

EKSPLORASI BAKTERI ENDOFIT DARI DAUN MANGROVE *Sonneratia alba* SEBAGAI AGEN BIOKONTROL DAN PEMACU PERTUMBUHAN TANAMAN

Roza Tasha Nabila, Eko Prasetya

Program Studi Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Negeri Medan
Jl. Willem Iskandar Psr. V Medan Estate, Medan, Indonesia, 20221
Email Korespondensi: rozatasha27@gmail.com

Abstract

Tanaman mangrove, khususnya *Sonneratia alba*, merupakan ekosistem unik yang menjadi sumber potensial mikroorganisme untuk pertanian berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi keanekaragaman komunitas bakteri endofit dari daun *S. alba* dan mengidentifikasi potensinya sebagai agen biokontrol serta *Plant Growth-Promoting Bacteria* (PGPB). Analisis metagenomik menggunakan *Oxford Nanopore Technologies* (ONT) 16S *Full Length Metagenomic Sequencing* berhasil mengidentifikasi komunitas bakteri yang sangat beragam. Hasil identifikasi menunjukkan keberadaan genus yang dikenal luas memiliki potensi agronomis, seperti *Bacillus*, *Pantoea*, *Pseudomonas*, dan *Stenotrophomonas*. Berdasarkan studi literatur, banyak anggota dari genus ini yang terbukti mampu melaksanakan fungsi PGPB melalui mekanisme seperti produksi fitohormon (auksin), pelarutan fosfat, dan penambatan nitrogen. Selain itu, potensi biokontrol juga sangat kuat, ditunjukkan dengan kemampuan genus *Pantoea* yang diketahui mampu menghasilkan senyawa antimikroba dan enzim litik untuk menekan patogen tanaman. Keanekaragaman fungsional yang terungkap dari profil metagenomik ini menegaskan bahwa komunitas bakteri endofit pada daun *Sonneratia alba* adalah sumber yang potensial untuk penemuan dan pengembangan biofertilizer serta biopestisida inovatif guna mendukung sistem pertanian yang ramah lingkungan dan produktif.

Keywords:

Bakteri endofit, Sonneratia alba, Biokontrol, Plant Growth-Promoting Bacteria, Metagenomik

Pendahuluan

Mangrove adalah ekosistem yang menempati *coastal area*, yaitu daerah yang ditandai oleh adanya interaksi intens antara lingkungan laut, perairan payau, sungai, dan daratan. Mangrove hidup di daerah tropik dan subtropik, terutama pada garis lintang 25° LU dan 25° LS (Martuti, 2015). Ekosistem hutan mangrove menjadi tempat hidup bagi berbagai jenis mikroorganisme yang mampu bertahan pada kondisi lingkungan ekstrem. Beragam biota menempati ekosistem ini, baik yang berasal dari perairan maupun dari daratan menuju laut. Hal tersebut terjadi karena ekosistem mangrove lebih dipengaruhi oleh faktor-faktor lingkungan daripada oleh kondisi iklim. Secara global, penyebaran mangrove dibatasi oleh suhu, namun pada skala regional dan lokal, variasi curah hujan, salinitas, pasang surut, gelombang, serta arus sungai berperan penting dalam menentukan luas sebaran dan biomassa mangrove (Matatula dkk, 2019).

Mangrove *Sonneratia alba* adalah jenis mangrove yang mampu tumbuh di berbagai substrat mulai dari lumpur, pasir, hingga batuan karang (Astiningseh dkk, 2022). Mangrove *Sonneratia alba* menunjukkan toleransi yang tinggi terhadap salinitas. Mangrove *Sonneratia alba* memiliki sistem perakaran yang khas yaitu pneumatofor (akar napas) berbentuk kerucut yang berfungsi sebagai sistem pertahanan dalam sedimen anaerobik. Di dalam sebagian besar jaringan tanaman terdapat mikroba-mikroba endofit baik bakteri maupun jamur yang hidup berkoloni. Bakteri endofit memiliki jalur masuk melalui stomata, lentisel, zona kemunculan akar lateral, atau dengan cara mengkolonisasi ruang

antarsel serta jaringan xylem dan floem. Simbiosis antara bakteri endofit dan tanaman bersifat menguntungkan dimana tanaman menyediakan lingkungan kaya nutrisi dan terisolasi dari lingkungan luar sedangkan bakteri endofit akan menghasilkan senyawa organik yang membantu pertumbuhan tanaman dan memproteksi dari pathogen (Maulidia dkk, 2023).

Upaya mengeksplorasi mikroorganisme baru dengan potensi agronomis yang tinggi telah membawa para peneliti menjelajahi lingkungan ekstrem, yang berperan sebagai laboratorium evolusi alami. Di antara berbagai ekosistem tersebut, hutan mangrove menonjol sebagai salah satu wilayah bioprospeksi yang paling potensial. Tekanan eksternal dari lingkungan yang kuat di ekosistem mangrove diduga menjadi pendorong evolusi mikroorganisme dengan kemampuan metabolisme (Pessoa *et al*, 2017).

Bakteri yang mampu beradaptasi dan bertahan dalam kondisi ekstrem tersebut umumnya mengembangkan jalur produksi enzim dan metabolit sekunder yang unggul, sehingga berpotensi besar dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi bioteknologi, termasuk di sektor pertanian. Diantara berbagai kelompok bakteri terdapat bakteri pemacu pertumbuhan tanaman atau *Plant Growth Promoting Bacteria* sebagai agen biokontrol yang memiliki kemampuan dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman dengan cara yang ramah lingkungan (Yanti dkk, 2017). Beragam mekanisme yang dimiliki oleh PGPB (*Plant Growth Promoting Bacteria*) tidak berfungsi secara terpisah, melainkan saling berinteraksi dalam jaringan sinergis yang memperkuat satu sama lain. Bakteri endofit juga menghasilkan beberapa enzim ekstraseluler, misalnya enzim kitinase, enzim protease, enzim selulase, dan beta-1,3- glukukanase (Kristianingrum dkk, 2024). Enzim ekstraseluler ini berfungsi sebagai proteksi pada tanaman karena kemampuan mendegradasi komponen struktural utama dinding sel jamur patogen.

Bakteri endofit seperti *Bacillus* sp memproduksi hormon pertumbuhan tanaman, terutama auksin seperti Asam Indol-3-Asetat (IAA). IAA memainkan peran penting dalam merangsang pemanjangan dan pertumbuhan sel, pembentukan akar lateral dan adventif serta perkembangan sistem perakaran secara keseluruhan. Produksi hormon IAA oleh bakteri endofit dapat merangsang pembentukan sistem perakaran yang lebih luas (Yuniawati dan Akhdiya, 2021). Akar yang lebih ekstensif ini kemudian menyediakan area penyerapan yang lebih besar, sehingga meningkatkan efisiensi penyerapan nitrogen dan fosfat yang dihasilkan atau dilarutkan oleh bakteri tersebut. Selain itu, bakteri endofit seperti *Pantoea* sp dikenal memiliki efek menguntungkan bagi tanaman dengan perannya dalam melindungi tanaman dari serangan penyakit. *Pantoea* sp. memproduksi senyawa metabolit khusus seperti senyawa organik volatil, antibiotik, dan biosurfaktan. Senyawa volatil yang dihasilkan oleh *Pantoea* sp diketahui efektif dalam melawan patogen tanaman (Duchateau *et al*, 2024).

Genus *Pseudomonas* memiliki potensi agronomis karena mampu melarutkan unsur fosfat dengan mensekresikan asam organik dan enzim fosfatase dengan mengubahnya menjadi ion fosfat terlarut sehingga dapat diserap oleh tanaman (Widowati dkk, 2024). Genus *Pseudomonas* juga menghasilkan antibiotik alami seperti piolosianin, fenazin, dan pirrolnitritin yang menghambat pertumbuhan jamur patogen seperti *Fusarium*, *Rhizoctonia*, dan *Pythium* (Mehmood *et al*, 2023). Tak hanya *Pseudomonas*, *Stenotrophomonas* juga dapat melarutkan fosfat anorganik, memiliki aktivitas enzim fosfatase, memproduksi hormon IAA, dan memiliki aktivitas antifungi. *S. maltophilia* dapat dijadikan biokontrol yang digunakan dalam pengembangan biopestisida.

Meskipun endofit memiliki potensi biologis yang sangat besar, tantangan utama terletak pada upaya untuk mengidentifikasi mereka secara tepat dan menyeluruh. Pendekatan konvensional berbasis kultur, yang bergantung pada penumbuhan mikroorganisme di media buatan laboratorium, memiliki keterbatasan mendasar (Kristianti & Amalia, 2023). Diketahui bahwa lebih dari 99% bakteri di lingkungan tidak dapat dikultur dengan metode standar. Fenomena ini, yang dikenal sebagai *great plate count anomaly* (anomali hitungan cawan besar), menunjukkan bahwa studi berbasis kultur hanya 1-5 % keanekaragaman bakteri yang mampu digambarkan dan sangat bias dari keragaman mikroba yang

sesungguhnya (Ekkers *et al*, 2015). Revolusi dalam mikrobiologi datang dengan munculnya metode molekuler, khususnya sekuensing gen 16S ribosom RNA (rRNA). Gen ini dianggap sebagai penanda filogenetik standar emas untuk bakteri karena memiliki daerah yang sangat lestari (konservasi) dengan panjang urutan gen 16S rRNA sekitar 1.500 bp (Noer, 2021).

Teknologi sekuensing generasi kedua (*Next-Generation Sequencing* - NGS), seperti platform *Oxford Nanopore Technology* (ONT), telah merevolusi ekologi mikroba dengan memungkinkan analisis komunitas secara keseluruhan. Penggunaan sekuensing 16S panjang penuh dengan ONT lebih dari sekadar memberikan nama yang lebih akurat pada bakteri. Hasilnya memungkinkan karakterisasi struktur komunitas yang lebih tepat, termasuk kelimpahan dan keseragaman spesies, terutama untuk taksa langka yang mungkin terlewatkan atau salah diidentifikasi oleh metode bacaan pendek. Primer PCR yang dirancang untuk daerah variabel pendek (misalnya, V4) dapat memiliki bias, gagal mengamplifikasi kelompok bakteri tertentu secara efisien, yang dapat menyebabkan perkiraan keanekaragaman yang lebih rendah dari kenyataannya (Heikema *et al*, 2020). Untuk mengatasi keterbatasan teknologi sekuensing bacaan pendek, teknologi generasi ketiga seperti *Oxford Nanopore Technologies* (ONT) menawarkan solusi yang transformatif. Keunggulan utama ONT terletak pada kemampuannya menghasilkan bacaan sekuens yang sangat panjang, yang dapat dengan mudah mencakup seluruh panjang gen 16S rRNA (~1.5 kb), dari daerah V1 hingga V9, dalam satu kali pembacaan.

Potensi besar yang ditawarkan ekosistem mangrove mendorong eksplorasi bakteri endofit yang hidup pada mangrove khususnya jenis *Sonneratia alba*. Teknologi NGS juga menjadi trend baru yang patut dilirik dalam mengeksplorasi konsorsium bakteri yang ada pada jaringan tanaman mangrove *Sonneratia alba*. Tujuan utama dari penelitian ini adalah penemuan spesies bakteri baru yang memiliki potensi sebagai biofertilizer dan biopeptisida untuk mendukung bidang pertanian yang berkelanjutan dan produktif.

Metode Penelitian

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah daun mangrove *Sonneratia alba*, ethanol 70%, Sodium Hipoklorit NaClO (12,5%), aquades steril, media NA, *Zymobionics DNA miniprep KIT*, *ZR BashingBead™ Lysis Tubes*, *DNA/RNA shield*, *ZymoBIOMICS™ DNA Binding Buffer*, *DNA Wash Buffer*, *ZymoBIOMICS™ HRC Prep Solution*, primer 16S (27F-1492R), *ice gel*.

Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah mikropipet 200µl, microtube, microtip, microsentrifuge 1.5 ml, timbangan analitik, Laminar Air Flow, autoklaf, gelas beaker, Oxford Nanopore Technologies (ONT), *coolbox*, sentrifuge, filter *Zymo-Spin™ III-F*, *collection tube*, *column tube*, spuit 1 ml, aluminium foil, plastik wrap, mortal dan alu, gunting, sarung tangan, masker, plastik ziplock, alat tulis, kertas label dan kamera.

Sampling dan Sterilisasi Permukaan Daun Mangrove *Sonneratia alba*

Sampel daun mangrove *Sonneratia alba* yang digunakan berjumlah sepuluh helai daun muda pada posisi ketiga hingga kelima dari pucuk. Daun disimpan dalam *coolbox* dan dibawa ke laboratorium untuk tahap isolasi DNA. Sebelum proses isolasi, daun dicuci dengan air mengalir, kemudian disterilisasi menggunakan etanol 70% selama dua menit dan larutan natrium hipoklorit selama satu menit, dilanjutkan pencucian lima kali dengan akuades steril. Sterilitas sampel diuji dengan

menginokulasikan akuades ke media NA; daun dinyatakan steril jika tidak ada pertumbuhan koloni. Setelah steril, daun dihaluskan dan ditimbang hingga mencapai berat 100 mg.

Isolasi dan Ekstraksi DNA Total

Proses isolasi dan ekstraksi DNA dilakukan menggunakan *ZR BashingBead™ Lysis Tubes* dan *ZymoBIOMICS™ DNA Miniprep Kit*. Sampel dicampur dengan larutan lisis, disentrifugasi beberapa kali untuk memisahkan supernatan, dan difiltrasi melalui berbagai kolom *Zymo-Spin™*. DNA kemudian dicuci bertahap menggunakan *DNA Wash Buffer* dan dielusi dengan air bebas DNase/RNase. Hasil elusi DNA dimurnikan kembali menggunakan *Zymo-Spin™ III-HRC Filter* untuk memperoleh DNA berkualitas tinggi yang siap digunakan pada tahap analisis berikutnya.

Analisis Bakteri Endofit Menggunakan NGS (Next Generation Sequencing)

Analisis metagenomik terhadap DNA bakteri endofit dilakukan oleh PT Genetika Science, Jakarta, menggunakan instrumen Oxford Nanopore Technology. Tahapan pengurutan menargetkan gen 16S rRNA, dengan primer spesifik 27F dan 1492R. Data hasil amplifikasi gen 16S rRNA region V1–V9 dianalisis menggunakan *Phusion Plus PCR Master Mix* dan *Oxford Nanopore Technologies 16S Full Length Metagenomic Sequencing Bioinformatics Analysis*. Selanjutnya, prediksi keberadaan bakteri gelatinolitik pada daun *Sonneratia alba* diperdalam melalui studi literatur.

Hasil dan Pembahasan

Hasil Ekstraksi dan Purifikasi DNA Bakteri Endofit Mangrove *Sonneratia alba*

Hasil ekstraksi DNA bakteri endofit daun mangrove diamplifikasi menggunakan metode PCR dengan pasangan primer universal yaitu 27F (5'-AGAGTTTGATCMTGGCTCAG-3') dan 1492R (5'-TACGGYTACCTTGTTACGACTT-3'). Reaksi PCR dilakukan menggunakan *Phusion Plus PCR Master Mix (Thermo Scientific™, F631S)*. Visualisasi panjang pita DNA berkisar pada 1.500 bp yang menunjukkan bahwa sampel DNA memenuhi kualifikasi dan dapat dilanjutkan ke tahap sekuensing. Tingkat kemurnian DNA bakteri endofit daun mangrove *Sonneratia alba* juga diuji menggunakan Nanodrop. Parameter kemurnian Nanodrop menggunakan rasio panjang gelombang 260/280 yang berfungsi sebagai parameter validasi sekunder yang digunakan untuk menilai kualitas DNA hasil isolasi (Sophian & Yustina, 2022). Prinsip kerja nanodrop spektrofotometri ialah kemampuan DNA dalam menyerap cahaya ultraviolet karena adanya basa purin dan pirimidin. DNA berkualitas baik berdasarkan uji nano drop memiliki kemurnian 1,8-2,0 (Mollah dkk, 2022). Hasil purifikasi Nanodrop menunjukkan konsentrasi DNA pada absorbansi A260/280 berada pada angka 1,72. Angka ini menunjukkan kemungkinan masih terdapatnya kontaminan berupa protein. DNA bakteri endofit selanjutnya disekuensing menggunakan *Oxford Nanopore Technologies (ONT)* untuk membaca serta mengurutkan keseluruhan DNA bakteri yang ada pada daun mangrove *Sonneratia alba*. DNA total bakteri yang telah diurutkan kemudian dianalisis secara bioinformatika untuk mendapatkan spesies-spesies bakteri endofit tersebut.

Bakteri Endofit Potensial Sebagai Biokontrol dan PGPB

Dari hasil analisis, didapatkan 4 genus yang memiliki potensi sebagai agen biokontrol dan PGPB, yaitu genus *Bacillus*, *Pantoea*, *Pseudomonas*, dan *Stenotrophomonas*. Keempat genus ini masing-masing memiliki persentase kelimpahan relatif pada daun mangrove *Sonneratia alba*, yaitu genus *Bacillus* (3,66%), *Pantoea* (11,26%), *Pseudomonas* (3,14%), dan *Stenotrophomonas* (0,26%).

Tabel 1. Genus Bakteri Endofit PGPB (*Plant Growth-Promoting Bacteria*)

| Nama Genus | Jumlah Bacaan | Kelimpahan Relatif (%) |
|-------------------------|---------------|------------------------|
| <i>Pantoea</i> | 43 | 11,26 |
| <i>Bacillus</i> | 14 | 3,66 |
| <i>Pseudomonas</i> | 12 | 3,14 |
| <i>Stenotrophomonas</i> | 1 | 0,26 |

Genus *Pantoea*, *Bacillus*, dan *Pseudomonas* menempati 10 genus bakteri endofit dengan jumlah kelimpahan relatif terbanyak pada daun mangrove *Sonneratia alba*. Genus *Pantoea* merupakan genus dengan persentase terbanyak, bakteri ini hidup di tumbuhan, tanah, dan air dan termasuk kelompok bakteri Enterobacteriaceae dengan gram-negatif yang dapat menjadi patogen pada manusia namun menjadi agen biokontrol yang efektif melawan penyakit busuk hitam pada ubi jalar (Jiang *et al*, 2019). Bakteri *Pantoea* memiliki kemampuan untuk menghambat pertumbuhan mikroorganisme lain, termasuk jamur. Sifat antibiosis yang dimilikinya memungkinkan *Pantoea* menghasilkan senyawa herbicidin yang berfungsi menekan infeksi patogen, serta memproduksi enzim kitinase yang berperan penting dalam proses mikoparasitisme terhadap jamur. Beberapa strain dari *Pantoea* dapat memproteksi tanaman anggur dari beberapa patogen, selain itu *Pantoea* juga dijadikan biopeptisida dengan mensekresi senyawa pantosin untuk melawan penyakit "Fire Blight" yang disebabkan oleh bakteri patogen *Erwinia amylovora* (Duchateau *et al*, 2024). Kemampuan *Pantoea* dalam melindungi tanaman didasarkan pada beberapa mekanisme potensial termasuk kompetisi, antagonisme langsung, dan stimulasi kekebalan tanaman yang dapat bekerja secara independent.

Genus *Bacillus* telah populer dalam bidang bioteknologi pertanian sebagai bakteri yang memiliki potensi sebagai PGPB. Salah satu kemampuannya adalah memfiksasi nitrogen, meskipun proses fiksasi nitrogen umumnya dikaitkan dengan bakteri simbiotik seperti Rhizobium, sejumlah spesies dari genus *Bacillus* juga diketahui mampu menambat nitrogen dari atmosfer. Proses ini dikatalisis oleh kompleks enzim nitrogenase yang mengubah gas nitrogen menjadi amonia, bentuk nitrogen yang dapat langsung digunakan tanaman dalam sintesis asam amino dan nukleotida. Kemampuan tersebut memiliki nilai penting karena dapat menekan ketergantungan terhadap pupuk nitrogen sintetis yang biayanya tinggi dan berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan (Beneduzi & Passaglia, 2015). Selain sebagai bakteri fiksasi nitrogen, Genus *Bacillus* juga merupakan salah satu jenis mikroorganisme yang mampu menyediakan unsur fosfor (P) melalui produksi asam organik, yang berperan dalam melepaskan ikatan ion-ion pengikat fosfat, sehingga fosfor dapat tersedia dalam bentuk bebas di tanah (Anggita dkk, 2024). Penelitian oleh Khotimah (2019) mendeskripsikan bahwa spesies *Bacillus* yaitu *B. cereus*, mampu melarutkan fosfat secara berurutan sebesar 115,4 mg/L-118 mg/L. Salah satu mekanisme PGPB yang paling signifikan dari genus *Bacillus* adalah kemampuan dalam mensintesis fitohormon, terutama auksin dalam bentuk asam indol-3-asetat (IAA). Hormon IAA ini akan meningkatkan penyerapan nutrisi dan perkembangan akar pada tanaman serta mengendalikan pertumbuhan tanaman. Asam amino triptofan adalah molekul utama untuk mensintesis IAA pada bakteri dan banyak ditemukan pada akar (Vishakha *et al*, 2023).

Genus *Pseudomonas* dikenal sebagai salah satu bakteri tanah yang paling efektif dalam berperan sebagai agen biokontrol sekaligus *Plant Growth-Promoting Bacteria* (PGPB). Bakteri ini mampu berkolonisasi secara agresif di daerah rizosfer dan memiliki kemampuan metabolik yang sangat beragam, sehingga dapat bertahan dan tumbuh pada berbagai kondisi lingkungan. Keberadaannya sebagai endofit pada daun *S. alba* mencerminkan kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem, yang sekaligus dapat memperkuat potensi sifat-sifat menguntungkan yang dimilikinya (Alattas *et al*, 2024). *Pseudomonas* berperan langsung sebagai biofertilizer, khususnya pada

tanah dengan pH netral hingga basa, di mana ketersediaan unsur besi sangat rendah, seperti kondisi yang sering dijumpai pada sedimen mangrove yang mengandung banyak karbonat (Almahasheer *et al*, 2016).

Genus *Stenotrophomonas* dimanfaatkan sebagai agen biokontrol potensial yang efektif melawan berbagai patogen tanaman penyebab hambatan pada pertumbuhan tanaman komersial. Kemampuan biokontrol *Stenotrophomonas* meliputi aktivitas kitinolitik dan proteolitik. Enzim kitinase yang dihasilkannya mampu menguraikan dinding sel jamur sehingga melindungi tanaman dari serangan fitopatogen, serta berpotensi mengaktifkan mekanisme pertahanan tanaman yang terinduksi. Tak hanya itu *Stenotrophomonas* juga mampu menghasilkan hormon IAA dan bertindak sebagai bakteri pelarut fosfat (Kumar *et al*, 2023).

Rangkuman dari genus-genus yang memiliki kemampuan sebagai PGPB (*Plant Growth-Promoting Bacteria*) pada tumbuhan mangrove *Sonneratia alba* disajikan pada tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2. Genus Bakteri Endofit PGPB (*Plant Growth-Promoting Bacteria*)

| Nama Genus | Mekanisme PGPB | Mekanisme Biokontrol |
|-------------------------|--|--|
| <i>Pantoea</i> | -Produksi hormon IAA | Mensekresi senyawa herbicolidin sebagai proteksi terhadap tanaman dari patogen |
| <i>Bacillus</i> | - Fiksasi Nitrogen - Pelarutan P - Produksi hormon IAA | Mensekresi enzim litik (kitinase dan protease) |
| <i>Pseudomonas</i> | -Biofertilizer | Mensekresi senyawa antibakteri dan antifungal |
| <i>Stenotrophomonas</i> | -Produksi hormon IAA | Mensekresi enzim kitinase |

Keunggulan utama bakteri endofit yang diperoleh dari daun mangrove *Sonneratia alba* terletak pada kemampuannya yang tinggi dalam menoleransi stres abiotik, khususnya terhadap kadar garam serta perubahan suhu dan kelembapan. Kemampuan ini terbentuk sebagai hasil dari tekanan seleksi di habitat alamnya, sehingga menjadikan bakteri endofit tersebut kandidat yang sangat potensial untuk diterapkan pada lahan pertanian berkelanjutan maupun dalam industri pertanian lainnya.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa daun mangrove *Sonneratia alba* mengandung komunitas bakteri endofit yang beragam dengan potensi tinggi sebagai agen biokontrol dan pemacu pertumbuhan tanaman (*Plant Growth-Promoting Bacteria*). Berdasarkan analisis metagenomik menggunakan teknologi Oxford Nanopore Technologies (ONT), ditemukan empat genus utama yang berpotensi agronomis, yaitu *Bacillus*, *Pantoea*, *Pseudomonas*, dan *Stenotrophomonas*. Keempat genus tersebut memiliki mekanisme berbeda dalam mendukung pertumbuhan tanaman, seperti fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, produksi hormon auksin (IAA), serta sekresi senyawa antimikroba dan enzim litik yang mampu menekan patogen tanaman.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Eko Prasetya, M.Sc sebagai dosen pembimbing atas dukungan dan motivasi yang telah diberikan dalam proses penulisan artikel jurnal ini sehingga artikel ini dapat terselesaikan dengan baik. Semoga karya ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

References

- Alattas, H., Glick, B.R., Murphy, D.V., & Scott, C. (2024). Harnessing *Pseudomonas* spp. for sustainable plant crop protection. *Front Microbiol*, 15. doi:10.3389/fmicb.2024.1485197
- Almahasheer, H., Duarte, C.M., & Irigoien, X. (2016). Nutrient Limitation in Central Red Sea Mangroves. *Front Mar Sci*, 3:271. doi: 10.3389/fmars.2016.00271
- Anggita, V., Khotimah, S., Rahmawati., Mukarlina. (2024). Potensi Bakteri Pelarut Fosfat dan Bakteri Penghasil IAA Asal Tanah Gambut terhadap Perkecambahan Tanaman Jagung (*Zea mays* L.). *Life Science*, 13 (2) : 109-118.
- Astiningseh, Y., Nurchayati, N., Kurnia, T., & Kartenogoro, A. (2022). Inventarisasi Dan Identifikasi Tanaman Mangrove di Kawasan Kawang, Muncar Kabupaten Banyuwangi. Prosiding Seminar Nasional MIPA UNIBA 2022. (216-224). Banyuwangi, Indonesia
- Beneduzi, A., & Passaglia, L. (2015). Genetic and Phenotypic Diversity of Plant Growth Promoting *Bacilli*. DOI 10.1007/978-3-642-20332-9_1
- Duchateau, S., Crouzet, J., Dorey, S., & Aziz, A. (2024). The plant-associated *Pantoea* spp. as biocontrol agents: Mechanisms and diversity of bacteria-produced metabolites as a prospective tool for plant protection. *Biological control*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105441>
- Ekkers, D., Cretoiu, M., Kielak, A., & Elsas, J. (2015). The great screen anomaly—a new frontier in product discovery through functional metagenomics. *Appl Microbiol Biotechnol*. 93:1005–1020. DOI 10.1007/s00253-011-3804-3
- Heikema, A., Kreft-Horst, D., Boers, S., Jansen, R., Hiltemann, S., Houten, C., Bont, L., & Hays, J. (2020). Comparison of Illumina versus Nanopore 16S rRNA Gene Sequencing of the Human Nasal Microbiota. *Genes*, 11, 1105. doi:10.3390/genes11091105
- Jiang, L., Jeong, J., Lee, J., Park, J., Yang, J., Lee, M., Choi, S., Kim, C., Kim, D., & Lee, J. (2019). Potential of *Pantoea dispersa* as an Effective Biocontrol Agent for Black Rot in Sweet Potato. *Nature*, 9 : 16345. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-52804-3>
- Khotimah, S. (2019) Potensi Jamur dan Bakteri Pendegradasi Selulosa Serta Bakteri Pelarut Fosfat, Penambat Nitrogen, Non Simbiosis, dan Penghasil IAA pada Berbagai Tingkat Kematangan Tanah Gambut Sebagai Kandidat Biofertilizer. Unpublished dissertation. [Universitas Brawijaya].
- Kristianingrum, S., Setiawan, A., & Jayanti, R. (2024). Potensi Bakteri Endofit Dari Tanaman Jahe Sebagai Agens Pengandali Hayati. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*, 12(2), 1749–1760. <https://doi.org/10.33394/bioscientist.v12i2.12263>
- Kristianti, T., & Amalia, L. (2023). Bacteria Analysis in the Ciwalen River Garut using Next Generation Sequencing of 16S Ribosomal RNA. *Berkala Ilmiah Biologi*, 14(3) : 10–16. <https://doi.org/10.22146/bib.v14i3.10471>
- Kumar, A., Rithesh, L., Kumar, V., Raghuvanshi, N., & Chaudhary, K. (2023) *Stenotrophomonas* in diversified cropping systems: friend or foe?. *Front Microbiol*, (14). doi: 10.3389/fmicb.2023.1214680
- Martuti. (2015). Keanekaragaman Mangrove di Wilayah Tapak, Tugurejo, Semarang. *Jurnal MIPA*, 36 (2) : 123-130.

- Matatula, J., Poedjirahajoe, E., Pudyatmoko, S., dan Sadono, R. (2019). Keragaman Kondisi Salinitas Pada Lingkungan Tempat Tumbuh Mangrove di Teluk Kupang, NTT. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(3) : 425-434. doi:10.14710/jil.17.3.425-434
- Maulidia, V. Muhammad, J. Dewi, J. Sumeinika, F.L. Chairuddin. & Agustinur. (2023). Pengaruh Beberapa Spesies Bakteri Endofit terhadap Viabilitas dan Vigor Benih Tomat (*Solanum lycopersicum* L.). *Agrotekma: Jurnal Agroteknologi dan Ilmu Pertanian*. 4 (1): 1-10
- Mehmood, N., Saeed, M., Zafarullah, S., Hyder, S., Rizvi, Z., Gondal, A., Jamil, N., Iqbal, R., Ali, B., Ercisli, S., & Kupe, M. (2023). Multifaceted Impacts of Plant-Beneficial *Pseudomonas* spp. in Managing Various Plant Diseases and Crop Yield Improvement. *Omega*, 8 : 22296-22315. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c00870>
- Mollah, A., Ashan, M., & Khatimah, A. (2022). Quality And Quantity Test Of Porang (*Amorphophallus muelleri* Blume) DNA In Some Area In South Sulawesi. *AgriTechno*, 15(1) : 1-7. <https://doi.org/10.20956/at.v15i1.688>
- Noer, S. (2021). Identifikasi Bakteri secara Molekuler Menggunakan 16S rRNA. *EduBiologia*, 1(1) : 1-6. doi:10.26539/edubiologia.v1i1.8596
- Pessoa, T. B. A., Rezende, R. P., Marques, E. de L. S., Pirovani, C. P., dos Santos, T. F., dos Santos Gonçalves, A. C., Romano, C. C., Dotivo, N. C., Freitas, A. C. O., Salay, L. C., & Dias, J. C. T. (2017). Metagenomic alkaline protease from mangrove sediment. *Journal of Basic Microbiology*, 57(11) : 962–973. DOI:10.1002/jobm.201700159
- Sophian, A., & Yustina. (2022). Analisis Nilai Kemurnian DNA Menggunakan Nano Fotometer pada Rasio 260/230 yang Diisolasi dari Produk Nugget. *Journal of Nutrition and Food Science*, 3 (2) : 82-86
- Vishakha, G., Shivaji, S., Bhagyashree, M., Komal, G., & Meghmala, W. (2023). In- vitro study of Plant Growth Promoting Traits (PGP) of *Cytobacillus firmus* strain VG5. *Bull. Env. Pharmacol. Life Sci*, [1]: 435-442
- Widowati, T., Simarmata, R., Nurjanah, L., dan Lekatompessy, S.J.R. (2024). Aktivitas Pemacu Pertumbuhan Tanaman dari Bakteri Endofit Bawang Merah (*Allium cepa* L.). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(4), 887-893, doi:10.14710/jil.22.4.887-893
- Yanti, Y., Warnita., Reflin., Noffianti, Z., & Nasution, C. (2017). Kajian Aplikasi Bakteri Endofit Indigenos dalam Meningkatkan Pertumbuhan dan Mengendalikan *Ralstonia solanacearum* Pada Kentang. *Prosiding Seminar Nasional BKS PTN Wilayah Barat Bidang Pertanian 2017*. (647-652). Semarang, Indonesia
- Yuniawati, R., & Akhdiya, A. (2021). Karakterisasi Isolat Bakteri Endofit Nilam (*Pogostemon cablin* B.) Sebagai Kandidat Biostimulan Pertumbuhan Tanaman. *Plasma Nutfah*, 27 (1) : 21-28