



Isolasi dan Karakterisasi Bakteri Selulolitik dari Hutan Mangrove Bengkalis, Riau: Potensi Sebagai Agen *Biofertilizer*

Isolation and Characterization of Cellulolytic Bacteria from the Bengkalis Mangrove Forest, Riau: Potential Biofertilizer Agents

Aisah¹, Delita Zul^{1*}

¹Program Studi Biologi, Jurusan Biologi

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau

Kampus Bina Widya Jl. HR Soebrantras Km. 12,5, Simpang Baru, Pekanbaru, Indonesia – 28293

Email: delita.zul@lecturer.unri.ac.id

*Penulis Korespondensi

Abstract

Mangrove forests are dynamic coastal ecosystems rich in organic matter and harbor diverse communities of enzyme-producing microorganisms. Among these, cellulolytic bacteria play a crucial role in the decomposition of plant biomass by degrading cellulose. This study aimed to isolate and characterize cellulolytic bacteria from the sediments and rhizospheres of natural mangrove plants in Kelapapati Village, Bengkalis District, Riau. Sediment and rhizosphere samples were cultured on Cellulose Congo Red Agar (CCRA) to isolate cellulolytic bacteria, indicated by clear halo zones around bacterial colonies. Isolates exhibiting cellulolytic activity were further characterized based on macroscopic and microscopic morphology. A total of 36 bacterial isolates were obtained, comprising 21 from the rhizosphere and 15 from the sediment samples. Among them, 20 isolates demonstrated cellulolytic activity, with 13 exhibiting high cellulolytic indices, four moderate activity, and three low activity. The highest cellulolytic index (10.8 ± 0.6) was observed in isolate MAT 1.1. Most isolates were Gram-negative and exhibited bacillus or streptobacillus morphologies. The physicochemical conditions of the mangrove habitat—pH 6.0, temperature $\sim 30^\circ\text{C}$, and salinity of 12.67 dS/m—were favorable for cellulolytic bacterial growth. These results underscore the potential of mangrove-derived cellulolytic bacteria as promising candidates for development into biofertilizer agents in saline and organic-rich soils.

Keywords: Biofertilizer, Cellulolytic bacteria, Mangrove, Rhizosphere, Sediment

Abstrak

Hutan mangrove merupakan ekosistem pesisir yang kaya akan bahan organik dan mendukung pertumbuhan mikroorganisme penghasil enzim selulase. Salah satu kelompok mikroorganisme penting di lingkungan ini adalah bakteri selulolitik yang mampu mendegradasi selulosa. Penelitian ini bertujuan untuk isolasi dan karakterisasi bakteri selulolitik dari sedimen dan rizosfer tanaman alami mangrove di Desa Kelapapati, Kabupaten Bengkalis, Riau. Penelitian dilakukan melalui pengambilan sampel sedimen dan rizosfer, isolasi bakteri menggunakan medium *Cellulose Congo Red Agar* (CCRA), uji aktivitas selulolitik berdasarkan zona bening yang terbentuk di sekeliling koloni, dan karakterisasi makroskopis dan mikroskopis terhadap isolat yang menunjukkan aktivitas selulolitik. Sebanyak 36 isolat berhasil diisolasi, terdiri atas 21 isolat asal rizosfer dan 15 isolat asal sedimen. Hasil uji menunjukkan bahwa sebanyak 20 isolat konfirmasi membentuk zona bening dengan indeks selulolitik pada kategori tinggi sebanyak 13 isolat, kategori sedang sebanyak empat isolat, dan kategori rendah sebanyak tiga isolat. Isolat MAT 1.1 menunjukkan indeks selulolitik tertinggi mencapai $10,8 \pm 0,6$ dan potensial sebagai agen *biofertilizer*. Sebagian besar isolat tergolong bakteri Gram negatif berbentuk *bacil* dan *streptobacil*. Lingkungan mangrove dengan pH 6, suhu rata-rata 30°C , dan salinitas 12,67 dS/m mendukung pertumbuhan bakteri selulolitik. Penelitian ini menunjukkan bahwa hutan mangrove Desa Kelapapati, Bengkalis, Riau merupakan sumber potensial bakteri selulolitik yang dapat dikembangkan sebagai agen *biofertilizer*.

Kata kunci: Biofertilizer, Bakteri selulolitik, Mangrove, Rizosfer, Sedimen

Disubmit: 11 Juni 2025; Direvisi: 22 Januari 2026; Diterima: 22 Januari 2026

Copyright© 2025. Aisah, Delita Zul



This work is licensed under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial 4.0 International License

How to Cite : Aisah, & Zul, D. (2026). Isolasi dan Karakterisasi Bakteri Selulolitik dari Hutan Mangrove Bengkalis, Riau: Potensi Sebagai Agen Biofertilizer. *Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, 11(1), 12-26.

Pendahuluan

Ekosistem mangrove merupakan salah satu ekosistem pesisir yang memiliki peran ekologis penting dalam menjaga stabilitas lingkungan pesisir tropis. Mangrove tidak hanya berfungsi sebagai pelindung alami dari abrasi, intrusi air laut, dan dampak bencana pesisir, namun juga sebagai penyimpan karbon biru, penyangga kualitas perairan, dan habitat bagi berbagai keanekaragaman hayati (Akram *et al.*, 2023). Produktivitas primer mangrove yang tinggi menghasilkan akumulasi biomassa tumbuhan dalam jumlah besar, terutama dalam bentuk serasah daun, ranting, dan akar, yang menjadi sumber utama bahan organik di tanah dan sedimen mangrove. Keberlanjutan fungsi ekologis ekosistem ini sangat ditentukan oleh efektivitas proses dekomposisi biomassa tumbuhan tersebut. Salah satu komponen utama biomassa tumbuhan mangrove dan penyusun sebagian besar dinding sel tanaman adalah selulosa. Selulosa adalah senyawa kompleks dan resisten terhadap degradasi alami oleh tumbuhan dan hewan, sehingga proses perombakannya sangat bergantung pada aktivitas mikroorganisme, khususnya bakteri selulolitik (Alamsjah *et al.*, 2024; Lee & Lee, 2024; Ananda *et al.*, 2023). Bakteri selulolitik diketahui mampu menghasilkan enzim selulase yang dapat menghidrolisis selulosa menjadi senyawa karbon sederhana (Ghose *et al.*, 2024; Naresh *et al.*, 2019). Keberadaan bakteri selulolitik sangat penting dalam mempercepat dekomposisi serasah mangrove, mengendalikan siklus karbon, serta meningkatkan ketersediaan nutrisi dalam tanah dan sedimen pesisir (Dewiyanti *et al.*, 2023). Oleh karena itu, bakteri selulolitik memegang peran kunci dalam menjaga keseimbangan fungsi ekosistem mangrove.

Selain perannya dalam siklus biogeokimia, bakteri selulolitik memiliki potensi besar sebagai agen *biofertilizer* yang ramah lingkungan. Kemampuan kelompok bakteri ini dalam mendegradasi bahan organik kompleks seperti selulosa memungkinkan percepatan mineralisasi unsur hara dan pelepasan nutrisi esensial yang dapat dimanfaatkan langsung oleh tanaman (Febriana & Susilastuti, 2024). Penggunaan *biofertilizer* berbasis bakteri selulolitik dinilai sebagai solusi berkelanjutan untuk mengurangi

ketergantungan pada pupuk kimia sintetis, menjaga kesehatan ekosistem tanah, serta mendukung pertanian yang lebih produktif dan ramah lingkungan (Zhao *et al.*, 2024). Penggunaan pupuk kimia secara berlebihan menyebabkan kadar bahan organik tanah menurun, struktur tanah rusak, dan pencemaran lingkungan (Manguntungi *et al.*, 2018). Oleh karena itu, eksplorasi bakteri selulolitik dari ekosistem alami seperti mangrove tidak hanya penting dari sudut pandang ekologi, tetapi juga memiliki nilai strategis dalam pengembangan teknologi pertanian ramah lingkungan.

Penelitian sebelumnya telah melaporkan keberadaan bakteri selulolitik dari berbagai ekosistem mangrove di Indonesia (Ananda *et al.*, 2023; Aswan *et al.*, 2024; Kurniawan *et al.*, 2018; Nursyirwani *et al.*, 2020) maupun di negara lain (Bamrunpanichtavorn *et al.*, 2023; Gatpatan *et al.*, 2024; Naresh *et al.*, 2019). Sebagian besar studi tersebut fokus pada kajian isolasi dan aktivitas selulolitik dan belum dikaitkan dengan potensi aplikasi berbasis sumber daya lokal. Selain itu, distribusi geografis penelitian bakteri selulolitik mangrove masih belum merata, banyak kawasan mangrove dengan karakteristik lingkungan unik yang belum dieksplorasi kajian mikrobiologi fungsionalnya. Hutan mangrove di Kabupaten Bengkalis, Provinsi Riau, merupakan salah satu kawasan pesisir yang memiliki kondisi ekologis khas, termasuk karakter sedimen, dinamika pasang surut, dan input bahan organik yang tinggi, namun relatif belum banyak dieksplorasi dari perspektif mikrobiologi tanah. Hingga saat ini, belum terdapat laporan ilmiah yang secara khusus mengkaji keberadaan dan karakteristik bakteri selulolitik dari sedimen dan rizosfer mangrove di wilayah ini. Kondisi tersebut menunjukkan adanya *research gap* yang jelas terkait pengetahuan keanekaragaman dan potensi mikroorganisme fungsional lokal, khususnya bakteri pendegradasi selulosa.

Bakteri selulolitik indigen memiliki adaptasi spesifik terhadap lingkungan asalnya, karena mikroba lokal cenderung lebih stabil dan efektif ketika diaplikasikan kembali ke lingkungan yang serupa. Namun, pendekatan ini belum banyak diterapkan pada ekosistem mangrove di wilayah Riau. Oleh karena itu, dilakukan penelitian ini yang bertujuan untuk: (i) isolasi bakteri selulolitik dari sedimen dan rizosfer mangrove di Kabupaten Bengkalis,

Riau; (ii) uji kemampuan degradasi selulosa secara kualitatif berdasarkan aktivitas enzimatis sebagai dasar penilaian potensinya sebagai agen *biofertilizer*; dan (iii) karakterisasi parsial bakteri selulolitik terseleksi. Novelty penelitian ini terletak pada eksplorasi bakteri selulolitik dari ekosistem mangrove Bengkalis yang belum pernah dilaporkan sebelumnya, sekaligus pada pendekatan yang mengaitkan peran ekologis mikroorganisme dengan potensi pemanfaatannya sebagai agen pupuk hayati berbasis sumber daya lokal. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam memperkaya data keanekaragaman mikroorganisme fungsional mangrove, memperkuat pemahaman tentang peran bakteri selulolitik dalam ekosistem pesisir, serta membuka peluang pengembangan biofertilizer yang mendukung pertanian berkelanjutan dan pengelolaan ekosistem mangrove secara berwawasan lingkungan.

Metode Penelitian

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan November 2024 s.d. Maret 2025 di Laboratorium Mikrobiologi Jurusan Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Riau. Sumber isolat bakteri selulolitik diambil dari kawasan mangrove yang berlokasi di Desa Kelapapati, Kecamatan Bengkalis, Kabupaten Bengkalis, Provinsi Riau.

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan yaitu medium *nutrient agar* (NA) (Himedia), *sigmacell cellulosa type 20 µm* (Sigma), *congo red* (Sigma), *bacteriological agar* (Himedia), dipotassium hydrogen orthophosphate (K_2HPO_4), magnesium sulfat ($MgSO_4$), natrium klorida (NaCl), natrium hidroksida (NaOH), hidrogen klorida (HCl), kristal violet, safranin, iodin, minyak imersi, aquades, alkohol 96%, alkohol 70%, spiritus, aluminium foil, sampel sedimen dan rizosfer mangrove sebagai sumber isolat.

Alat yang digunakan yaitu inkubator *shaker* inkubator (LabTech), autoklaf (GEA), oven, *microwave*, mikroskop binokuler, vortex (Wiggins), mikropipet, timbangan analitik, erlenmeyer, gelas beaker, gelas ukur, tabung

reaksi, cawan petri, dryglaski, termometer tanah (Allafrance), *soil tester* (Model DM-5), dan salinometer (EC-315).

Metode

Pengambilan Sampel Sebagai Sumber Isolat

Sumber isolat diambil dari kawasan hutan mangrove yang terletak di Desa Kelapapati, Kecamatan Bengkalis, Kabupaten Bengkalis, Provinsi Riau. Hutan mangrove relatif alami (Ariyanto & Pringgenies, 2024) dan secara geografis terletak pada koordinat 1°29'16.3" N dan 102°04'54.5" E di kawasan pesisir timur Pulau Sumatera. Sampel disampling dari tiga stasiun (Gambar 1) yang dinamakan stasiun I, II, dan III. Stasiun I memiliki kerapatan vegetasi mangrove rendah yang didominasi oleh *Xylocarpus granatum*, tidak terlalu banyak serasah, tetapi masih tertutupi oleh serasah, dan sedimen berwarna coklat kehitaman dan tanah gembur. Stasiun II memiliki kerapatan vegetasi sedang yang didominasi oleh *Rhizophora apiculata*, banyak serasah, serta sedimen coklat kehitaman dan gembur. Stasiun III memiliki kerapatan vegetasi sedang yang didominasi oleh *Excoecaria agallocha* dan *R. apiculata*. Warna sedimen dan rizosfer antar stasiun tidak berbeda mencolok karena kandungan bahan organik relatif merata.

Sampel sedimen dan rizosfer diambil dengan metode *purposive sampling* di tiga stasiun dengan jarak antar stasiun yaitu ± 100 m. Sampel sedimen diambil sebanyak 6 sampel dengan rincian sebagai berikut: tiga sampel diambil dari area terendam (selalu tergenang saat pasang surut) (MAT) dan tiga sampel lainnya diambil dari area yang tidak terendam (tidak tergenang saat pasang surut dan terendam saat pasang naik) (MATT) dari setiap stasiun. Sampel rizosfer diambil sebanyak 9 sampel dari tanaman *R. apiculata* (RRA), *E. agallocha* (REA), dan *X. granatum* (RXG), sehingga total seluruhnya diperoleh 15 sampel. Sampel sedimen diambil dari kedalaman 0-20 cm (*topsoil*) sebanyak ± 50 gr lalu dimasukkan ke dalam *ziplock*. Sampel rizosfer disampling dengan cara mencabut/memotong akar tanaman dan mengguncang hingga tidak ada lagi tanah (*bulk soil*) yang jatuh/terlepas. Tanah yang tetap melekat pada akar setelah proses tersebut merupakan sampel rizosfer. Sampel akar disimpan dalam kantong *ziplock*. Sampel

sedimen dan rizosfer yang diperoleh diletakkan di dalam *cool box* selama proses transportasi sampel ke laboratorium untuk diteliti lebih lanjut. Saat proses pengambilan sampel, juga dilakukan pengukuran suhu, pH, dan salinitas lokasi sampling.

Analisis Karakter Sifat Fisikokimia Area Sampling

Suhu tanah diukur menggunakan termometer tanah (Allafrance). Pengukuran dilakukan secara *in situ* pada setiap stasiun pengambilan sampel. Alat ditancapkan secara vertikal ke dalam tanah hingga ujung sensor bersentuhan langsung dengan lapisan tanah yang diukur. Setelah alat berada pada posisi yang tepat, pengukuran dibiarkan selama beberapa saat hingga nilai suhu yang ditampilkan pada layar stabil. Nilai suhu yang telah stabil kemudian dicatat sebagai hasil pengukuran. Pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap stasiun, dan nilai rata-rata digunakan sebagai data suhu tanah. pH tanah ditentukan menggunakan *soil tester* (Model DM-5). Alat ditancapkan secara vertikal ke dalam tanah pada setiap stasiun pengambilan sampel hingga sensor bersentuhan langsung dengan lapisan tanah yang diukur. Setelah alat berada pada posisi yang tepat, pengukuran dibiarkan selama beberapa saat hingga jarum penunjuk menunjukkan nilai pH yang stabil. Nilai pH yang telah stabil dicatat sebagai hasil pengukuran. Pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap stasiun, dan nilai rata-rata digunakan sebagai data pH tanah. Salinitas tanah diukur menggunakan salinometer (Model EC-315) berdasarkan prinsip pengukuran konduktivitas listrik tanah (*Electrical Conductivity*). Alat ditancapkan secara vertikal ke dalam tanah pada setiap stasiun pengambilan sampel hingga sensor bersentuhan langsung dengan tanah. Pengukuran dibiarkan selama beberapa saat hingga nilai yang ditampilkan pada layar stabil. Nilai salinitas tanah dicatat dalam satuan dS/m setelah mencapai kondisi konstan. Pengukuran dilakukan sebanyak tiga

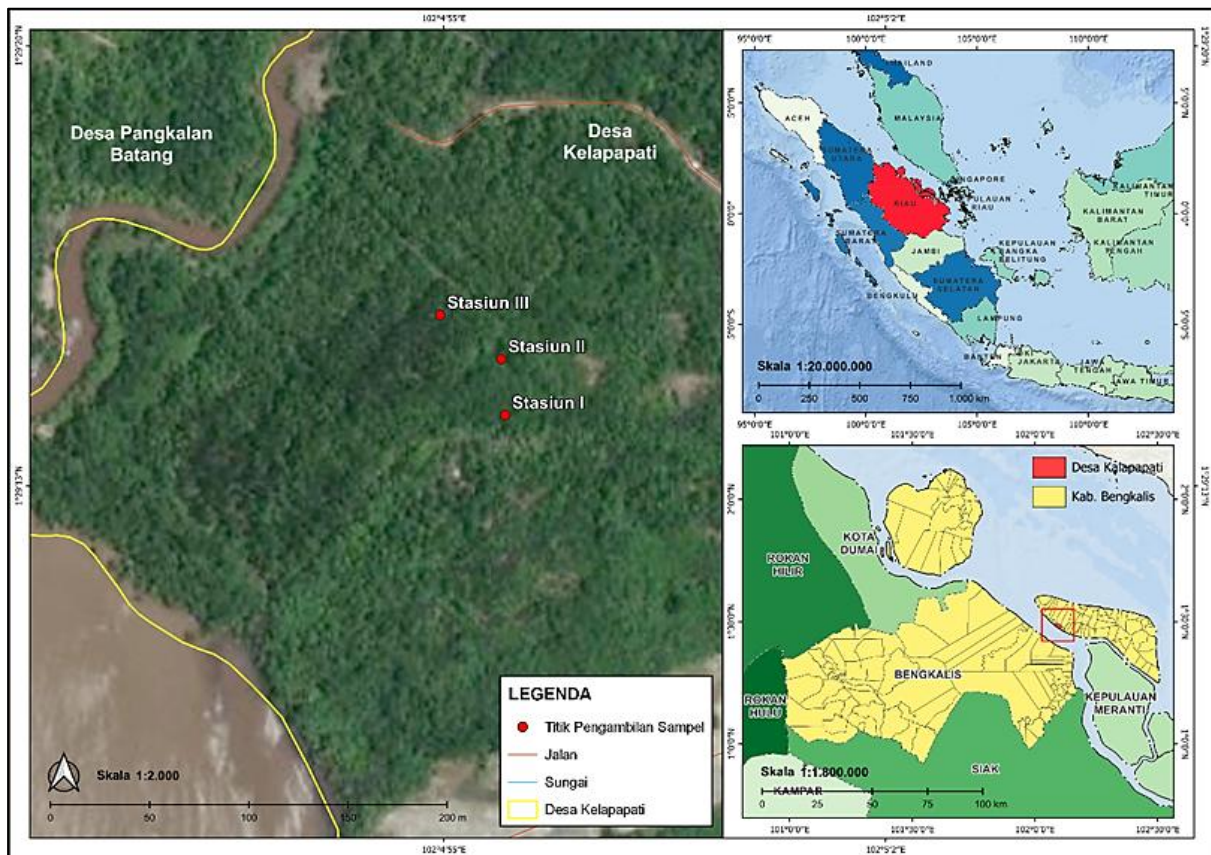
kali pada setiap stasiun, dan nilai rata-rata digunakan sebagai data salinitas tanah.

Isolasi Bakteri Selulolitik

Sebanyak 3 gr sampel tanah dimasukkan dalam 27 mL garam fisiologis 0,85% steril dan diagitasi menggunakan shaker inkubator dengan kecepatan 140 rpm dan suhu 28°C selama dua jam. Larutan tanah diencerkan secara berseri hingga dicapai pengenceran 10^{-4} . Sebanyak 100 μ L aliquot larutan tanah dari faktor pengenceran 10^{-2} , 10^{-3} dan 10^{-4} diinokulasikan secara *spread plate* ke medium *Cellulose Congo Red Agar* (CCRA) pada cawan petri dan diratakan dengan menggunakan dryglaski. Kultur diinkubasi selama lima hari pada suhu ruang. Komposisi medium CCRA terdiri dari (g/L) yaitu 0,5 g K_2HPO_4 ; 0,25 g $MgSO_4$; 0,2 g *congo red*; 1,88 g tepung *sigmacell cellulosa* tipe 20 μ m; 15 g *bacteriological agar*; satu L aquades (Hendricks *et al.*, 1995) yang dimodifikasi dengan penambahan 8 g NaCl agar medium setara dengan salinitas 12,67 dS/m.

Uji Konfirmasi dan Purifikasi Bakteri Selulolitik

Bakteri yang membentuk koloni tampak saat proses isolasi dan menunjukkan adanya zona bening yang terbentuk di sekeliling koloni menunjukkan bahwa isolat tersebut adalah bakteri selulolitik. Kemampuan degradasi selulosa oleh isolat yang tumbuh tersebut dikonfirmasi kembali. Uji dilakukan dengan cara menotolkan masing-masing isolat sebanyak satu loop ke cawan petri yang telah dituang medium CCRA steril. Kultur diinkubasi pada suhu ruang selama lima hari dan pengamatan dilakukan untuk melihat adanya pertumbuhan isolat dan ada tidaknya zona bening terbentuk di sekeliling koloni. Isolat yang positif membentuk zona bening di sekeliling koloni dipurifikasi pada medium NA dengan metode gores empat kuadran. Kultur kemudian diinkubasi selama 24 jam pada suhu ruang. Isolat murni ditandai dengan ciri koloni yang tumbuh sudah sama dan bentuk sel seragam yang dikonfirmasi melalui pewarnaan Gram. Apabila belum murni maka dilakukan streak kuadran kembali pada medium NA.



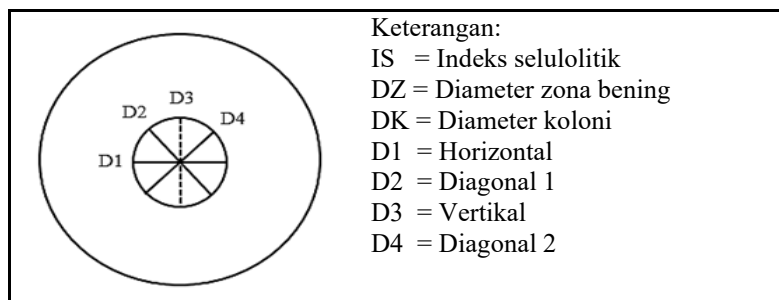
Gambar 1. Peta lokasi pengambilan sampel

Uji Aktivitas Selulolitik

Isolat bakteri yang sudah murni kemudian diuji kemampuan degradasi selulosa dengan cara ditotolkan pada medium CCRA. Kultur kemudian diinkubasi selama tujuh hari pada suhu ruang. Zona bening yang terbentuk di sekeliling koloni diukur menggunakan jangka sorong. Pengukuran diameter zona bening dan koloni dilakukan dari empat sisi berbeda untuk memastikan keakuratan dan konsistensi hasil.

Data diameter koloni dan zona bening dirata-ratakan dan digunakan untuk menghitung indeks selulolitik (IS) (Dewiyanti *et al.*, 2023). Rentang kategori nilai indeks selulolitik tergolong rendah jika ≤ 1 , sedang antara 1-2, dan tinggi jika ≥ 2 (Choi *et al.*, 2005). Indeks selulolitik dihitung menggunakan rumus, sebagai berikut:

$$IS = (\text{Rerata DZ} - \text{Rerata DK}) / \text{Rerata DK}$$



Karakterisasi Parsial Bakteri Selulolitik

Karakter Makroskopis

Karakteristik makroskopis koloni bakteri diamati pada medium NA. Ciri-ciri tersebut meliputi warna koloni, ukuran koloni, bentuk koloni seperti bulat, tidak beraturan, atau *filamentous*, serta tepi koloni yang dapat halus, bergelombang, atau bergerigi. Selain itu juga diamati elevasi koloni, yaitu tinggi koloni terhadap permukaan medium, misalnya datar, cembung, atau meninggi di tengah. Sifat optik koloni yang diamati apakah kusam, *transparent*, atau *translucent*.

Karakter Mikroskopis

Karakteristik mikroskopis dilakukan dengan uji pewarnaan Gram. Biakan bakteri diratakan pada *glass* objek steril, kemudian difiksasi di atas api bunsen hingga kering kemudian ditetaskan kristal violet dan biarkan selama satu menit. Setelah itu cuci dengan akuades, dilanjutkan dengan meneteskan iodine dan dibiarkan selama satu menit, lalu dicuci dengan akuades. Selanjutnya, dibilas menggunakan alkohol 96% hingga warna luntur. Lalu, ditambahkan safranin dan dibiarkan selama satu menit, kemudian cuci kembali dengan akuades. Preparat yang kering diamati di bawah mikroskop. Hasil pewarnaan akan diperoleh merah muda jika bakteri termasuk kelompok bakteri Gram negatif dan warna ungu jika bakteri tergolong Gram positif.

Analisis data

Analisis data dilakukan secara deskriptif kualitatif dan kuantitatif untuk menilai potensi isolat bakteri selulolitik sebagai kandidat agen *biofertilizer*. Analisis deskriptif kualitatif digunakan untuk mengkarakterisasi morfologi koloni dan morfologi sel bakteri selulolitik melalui pengamatan makroskopis dan mikroskopis. Analisis deskriptif kuantitatif digunakan pada pengukuran aktivitas selulolitik sebagai indikator fungsional potensi *biofertilizer*. Aktivitas selulolitik ditentukan berdasarkan nilai indeks selulolitik sebagai parameter kuantitatif untuk menilai potensi isolat sebagai agen *biofertilizer*. Nilai indeks selulolitik dari masing-masing isolat dianalisis meliputi nilai rata-rata dan standar deviasi untuk menggambarkan variasi tingkat aktivitas

selulolitik antar isolat. Isolat dengan nilai indeks selulolitik relatif tinggi diinterpretasikan sebagai kandidat unggul yang berpotensi dikembangkan lebih lanjut dalam aplikasi *biofertilizer*, karena menunjukkan efisiensi enzimatis yang lebih baik dalam mendegradasi selulosa.

Hasil dan Pembahasan

Karakter Fisikokimia Area Sampling

Tabel 1 menyajikan kondisi fisikokimia area sampling. Nilai pH di ketiga stasiun relatif seragam yaitu pH 6 yang mencerminkan kondisi pH yang sedikit masam. Suhu rata-rata 30°C dan salinitas bervariasi dari 8,38 hingga 15,91 dS/m yang menunjukkan karakteristik lingkungan estuarin. Kombinasi kondisi lingkungan tersebut berperan dalam menentukan komposisi dan fungsi komunitas mikroorganisme, khususnya bakteri selulolitik. Suhu rata-rata perairan dalam kisaran optimal mendukung pertumbuhan bakteri mesofilik yang mendominasi ekosistem pesisir tropis. Suhu yang relatif stabil di kawasan mangrove tropis memungkinkan bakteri mempertahankan aktivitas degradasi selulosa secara kontinu sepanjang waktu. Studi di kawasan mangrove Blanakan, Jawa Barat (Utami *et al.*, 2025) dan Mandeh, Sumatera Barat (Alamsjah *et al.*, 2024) mencatat bahwa pH rata-rata lingkungan adalah 6 dengan suhu berkisar antara 27 hingga 36°C. Sebanyak tiga dari enam bakteri yang diisolasi dari ekosistem mangrove Desa Kuala Simbur, Jambi memperlihatkan aktivitas selulolitik tertinggi pada kondisi pH medium 6,1-6,5, suhu 29-31°C dan salinitas 31,25 dS/m (Batubara *et al.*, 2022). Jika dibandingkan dengan lokasi mangrove lain (Ahmed *et al.*, 2022; Dittmann *et al.*, 2022), salinitas di Desa Kelapapati relatif lebih rendah, yang mengindikasikan dominasi pengaruh air tawar. Perbedaan ini menunjukkan bahwa komunitas bakteri selulolitik di Bengkalis kemungkinan lebih didominasi oleh bakteri estuarin-fakultatif yang memiliki kemampuan adaptasi terhadap fluktuasi salinitas. Secara keseluruhan, kondisi pH yang sedikit asam, suhu lingkungan yang relatif stabil, serta salinitas estuarin pada lokasi penelitian menciptakan *ecological niche* yang mendukung pertumbuhan dan aktivitas bakteri selulolitik (Balla *et al.*, 2022).

Tabel 1. Karakter fisika kimia area mangrove Desa Kelapapati Bengkalis

Parameter	Stasiun Pengambilan Sampel			Rata-rata
	I	II	III	
pH	6	6	6	6
Suhu (°C)	29	31	30	30
Salinitas (dS/m)	8,38	13,80	15,91	12,67

Isolat Bakteri Selulolitik yang Berhasil Diisolasi

Distribusi isolat bakteri selulolitik yang berhasil diisolasi dari lima sumber isolat (MAT, MATT, RRA, REA, RXG) pada tiga stasiun pengambilan sampel menunjukkan variasi jumlah isolat yang mencerminkan perbedaan kondisi mikroekologi dan variasi substrat organik di setiap lokasi (Tabel 2). Sebanyak 36 isolat berhasil diisolasi dengan kontribusi terbanyak berasal dari sumber isolat MAT dan REA, diikuti oleh MATT dan RXG, serta RRA. Pada Stasiun I, jumlah isolat terbanyak berasal dari sumber MAT (enam isolat), dengan total perolehan sebanyak 14 isolat. Hal ini menjadikan Stasiun I sebagai lokasi dengan perolehan isolat terbanyak di antara ketiga stasiun. Stasiun II menunjukkan distribusi yang relatif merata, dengan isolat terbanyak berasal dari RXG (empat isolat) dan MATT (empat isolat) dengan total isolat dari stasiun ini adalah 13 isolat. Di Stasiun III, isolat asal REA muncul dalam jumlah yang konsisten (tiga isolat), sementara MAT, RRA, dan RXG masing-masing menyumbang dua isolat. Total isolat dari stasiun III adalah sembilan isolat, yang merupakan jumlah terendah dibandingkan dua stasiun lainnya. Dari perolehan 36 total isolat, sebanyak 15 bakteri selulolitik asal sedimen dan sebanyak 21 isolat asal zona rizosfer tiga species mangrove. Data tersebut menunjukkan

perolehan isolat dari rizosfer lebih banyak dibanding jumlah isolat dari sedimen dengan rasio 1,4 : 1.

Perolehan isolat lebih banyak di zona rizosfer mencerminkan adanya efek rizosfer, yaitu fenomena ekologis di mana aktivitas akar tanaman meningkatkan ketersediaan substrat dan energi bagi mikroorganisme heterotrof. Rizosfer diketahui memproduksi eksudat akar seperti gula, asam amino, dan senyawa fenolik, yang berperan dalam merangsang aktivitas dan keragaman mikroorganisme tanah (Ma *et al.*, 2022). Keberadaan sistem akar yang kompleks dari spesies mangrove juga menciptakan lingkungan mikro dengan kelembapan, nutrisi, dan aerasi yang mendukung kolonisasi mikroba (Chrisnawati *et al.*, 2023). Hal ini menjelaskan mengapa isolat dari rizosfer cenderung lebih banyak dibandingkan isolat dari sedimen. Perbedaan kelimpahan bakteri selulolitik antara rizosfer dan sedimen menunjukkan bahwa zona perakaran mangrove merupakan mikrohabitat yang lebih kaya nutrisi dan lebih aktif secara biologis (Zhuang *et al.*, 2020). Sebaliknya, sedimen mangrove, meskipun kaya bahan organik, cenderung kondisi mikrohabitat lebih homogen dan rendah oksigen, sehingga mengganggu aktivitas mikroba tertentu. Oleh karena itu, kelimpahan bakteri selulolitik yang lebih rendah di sedimen menunjukkan bahwa proses dekomposisi selulosa di zona ini kemungkinan berlangsung lebih lambat.

Tabel 2. Daftar bakteri selulolitik yang berhasil diisolasi dari sampel sedimen dan rizosfer

Stasiun	Sumber Isolat*					Jumlah Isolat
	MAT	MATT	RRA	REA	RXG	
I	6	3	2	2	1	14
II	0	4	2	3	4	13
III	2	0	2	3	2	9
Total	8	7	6	8	7	36

Keterangan: * MAT (Mangrove alami tergenang), MATT (Mangrove alami tidak tergenang), RRA (Rizosfer *R. apiculata*), REA (Rizosfer *E. agallocha*), RXG (Rizosfer *X. granatum*)

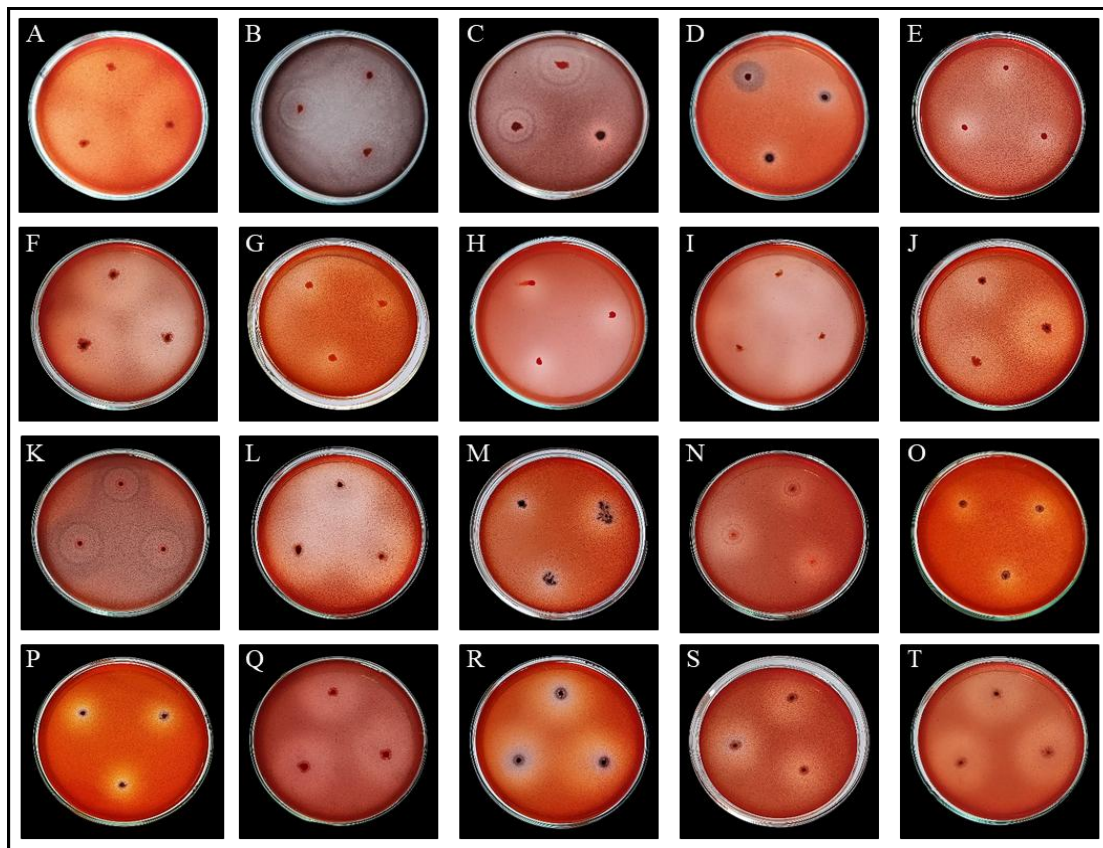
Perbedaan jenis mangrove juga berpengaruh terhadap jumlah isolat yang berhasil diisolasi (Zulkifli *et al.*, 2025). Spesies mangrove berkontribusi terhadap kehadiran bakteri selulolitik melalui perbedaan arsitektur akar dan kualitas-kuantitas kimia eksudat. Temuan ini menegaskan peran mangrove sebagai *ecosystem engineers* sebagai penyedia serasah, aktif membentuk lingkungan mikro dan seleksi mikroba. Perbedaan perolehan isolat dari rizosfer mengindikasikan adanya seleksi spesifik berbasis tanaman (*plant-driven selection*), yang masih jarang dibahas secara mendalam dalam studi bakteri selulolitik mangrove. Misalnya, *R. apiculata* memiliki akar tunjang yang kokoh dan banyak zona sekitar dengan kadar oksigen rendah, yang mendukung pertumbuhan bakteri aerob fakultatif. Sementara itu, *X. granatum* memiliki sistem akar lebih dalam dan bercabang halus, cenderung memengaruhi struktur tanah dan distribusi air secara berbeda. Di sisi lain, *E. agallocha* dikenal menghasilkan senyawa kimia seperti diterpenoid dan eksudat lateks yang bersifat toksik, yang dapat menghambat pertumbuhan mikroorganisme tertentu, tetapi mendukung pertumbuhan bakteri yang adaptif dengan senyawa tersebut. Studi oleh Sui *et al.*, (2023) menunjukkan bahwa lingkungan mikro di sekitar akar mangrove berperan dalam membentuk struktur komunitas mikroba.

Selain efek rizosfir, salinitas memainkan peran penting dalam mendukung kehadiran bakteri selulolitik (Balla *et al.*, 2022). Salinitas estuarin yang bervariasi antar stasiun berperan sebagai faktor seleksi utama yang menentukan keberadaan bakteri selulolitik yang toleran terhadap tekanan osmotik. Bakteri selulolitik di ekosistem mangrove umumnya menunjukkan adaptasi fisiologis berupa mekanisme osmoregulasi yang efisien, seperti akumulasi osmolit kompatibel dan modifikasi membran sel. Adaptasi ini memungkinkan bakteri mempertahankan aktivitas enzimatis meskipun terjadi fluktuasi salinitas akibat

pasang surut dan masukan air tawar. Secara keseluruhan, interaksi antara faktor fisikokimia dan adaptasi fisiologis bakteri selulolitik membentuk komunitas yang tidak hanya mampu bertahan, tetapi juga berfungsi secara optimal di lingkungan mangrove. Adaptasi ini menjadikan bakteri selulolitik sebagai komponen kunci dalam menjaga stabilitas siklus karbon dan keberlanjutan fungsi ekosistem mangrove. Kondisi ini mendukung proses dekomposisi aktif dan pertumbuhan bakteri heterotrof, termasuk bakteri selulolitik (Aswan *et al.*, 2024; Batubara *et al.*, 2022).

Indeks Selulolitik Bakteri

Sebanyak 36 isolat dikonfirmasi kemampuannya dalam mendegradasi selulosa dan 20 isolat konsisten membentuk zona bening di sekitar koloni. Pengukuran indeks selulolitik dilakukan untuk 20 isolat tersebut (Gambar 2). Nilai indeks selulolitik menunjukkan variasi aktivitas yang cukup lebar antar isolat, mencerminkan perbedaan kapasitas produksi dan efektivitas enzim selulase. Mayoritas isolat (13 isolat) tergolong memiliki aktivitas tinggi (Tabel 3). Empat isolat dengan nilai IS tertinggi adalah MAT 1.1, REA 2.1, RXG 2.1, dan MATT 2.1 menunjukkan potensi yang sangat baik sebagai penghasil selulase. Isolat yang juga memiliki nilai IS yang cukup tinggi, yaitu isolat REA 2.2, REA 1.1, dan REA 3.3. Sebanyak empat isolat dikategorikan sebagai aktivitas sedang, dengan nilai IS berkisar antara 1,0 hingga 2,0. Meskipun aktivitas selulolitiknya tidak setinggi isolat unggulan, kelompok ini tetap memiliki potensi yang dapat dioptimalkan lebih lanjut. Sebanyak tiga isolat termasuk kategori nilai IS rendah, seperti RXG 2.4 dan MAT 3.1. Nilai IS yang tinggi mencerminkan efisiensi degradasi selulosa yang tinggi, yang secara ekologis berimplikasi pada percepatan proses dekomposisi bahan organik berbasis lignoselulosa di ekosistem mangrove.



Gambar 2. Aktivitas selulolitik bakteri pendegradasi selulosa pada medium CCRA, A) MAT 1.1; B) REA 1.1; C) REA 1.2; D) RRA 1.1; E) RRA 1.2; F) MATT 2.1; G) MATT 2.2; H) RRA 2.1; I) REA 2.1; J) REA 2.2; K) REA 2.3; L) RXG 2.1; M) RXG 2.2; N) RXG 2.3; O) RXG 2.4; P) MAT 3.1; Q) RXG 3.1; R) REA 3.1; S) REA 3.2; T) REA 3.3.

Tabel 3. Indeks selulolitik bakteri selulolitik yang ditumbuhkan pada medium CCRA dengan pH 6 yang diinkubasi selama tujuh hari pada suhu ruang

Kode Isolat*	IS	Kategori IS
MAT 1.1	10,8±0,6	Tinggi
REA 1.1	6,6±0,5	Tinggi
REA 1.2	4,3±2,1	Tinggi
RRA 1.1	1,6±0,3	Tinggi
RRA 1.2	2,0±0,4	Sedang
MATT 2.1	9,2±0,3	Tinggi
MATT 2.2	1,4±0,0	Sedang
RRA 2.1	1,2±1,1	Sedang
REA 2.1	10,7±1,4	Tinggi
REA 2.2	7,0±1,8	Tinggi
REA 2.3	1,0±0,2	Sedang
RXG 2.1	9,6±2,2	Tinggi
RXG 2.2	1,6±0,1	Rendah
RXG 2.3	3,1±1,5	Tinggi
RXG 2.4	0,9±0,1	Rendah
MAT 3.1	0,9±0,1	Rendah
RXG 3.1	4,4±1,5	Tinggi
REA 3.1	4,6±1,7	Tinggi
REA 3.2	2,9±0,1	Tinggi
REA 3.3	4,9±0,7	Tinggi

Keterangan: * MAT (Mangrove alami tergenang), MATT (Mangrove alami tidak tergenang), RRA (Rizosfer *R. apiculata*), REA (Rizosfer *E. agallocha*), RXG (Rizosfer *X. granatum*)

Indeks selulolitik menunjukkan kemampuan isolat dalam mendegradasi selulosa dan menjadi indikator penting dalam seleksi bakteri selulolitik potensial. Isolat dengan IS rendah kemungkinan memiliki keterbatasan dalam hal produksi enzim, afinitas enzim terhadap substrat, atau mekanisme sekresi enzim ekstraseluler. Jika dibandingkan dengan bakteri selulolitik dari ekosistem lain, nilai IS isolat mangrove pada penelitian ini tergolong tinggi. Isolat selulolitik yang diisolasi dari rizosfer *X. granatum*, *R. apiculata*, dan *E. agallocha*, memiliki indeks selulolitik yang relatif tinggi (Tabel 3). Temuan ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang juga menyoroti potensi besar mikroorganisme dari ekosistem mangrove dalam menghasilkan enzim pendegradasi lignoselulosa (Aswan *et al.*, 2024; Gatpatan *et al.*, 2024; Ananda *et al.*, 2023). Hasil tersebut setara dengan beberapa isolat dalam penelitian ini, seperti MAT 1.1, MATT 2.1, dan REA 2.1 yang menunjukkan bahwa beberapa isolat lokal memiliki aktivitas lebih tinggi dan berpotensi untuk dikembangkan sebagai agen biofertilizer. Kushwaha *et al.* (2023) juga berhasil memperoleh isolat dari akar *Avicennia marina* yang memiliki indeks selulolitik sebesar 1,76-2,80. Nilai ini berada di bawah rata-rata sebagian besar isolat dalam penelitian ini. Data ini menunjukkan bahwa rizosfer *X. granatum* dan *R. apiculata* mungkin merupakan habitat mikroba selulolitik yang lebih aktif secara metabolik.

Penggunaan medium selektif CCRA yang mengandung selulosa kristalin (*sigmacell cellulosa* tipe 20 μ m) sebagai satu-satunya sumber karbon memberikan tekanan seleksi yang kuat dalam proses isolasi bakteri selulolitik. Selulosa kristalin lebih resisten terhadap hidrolisis dibandingkan selulosa amorf seperti CMC, sehingga hanya bakteri dengan sistem enzim selulase yang efektif yang mampu tumbuh dan membentuk zona bening. Penggunaan *congo red* juga memperjelas zona bening sebagai indikator aktivitas enzim selulase, sehingga mempermudah identifikasi awal terhadap potensi isolat dalam mendegradasi selulosa (Hendricks *et al.*, 1995). Isolat yang mampu mendegradasi selulosa kristalin avisel seperti yang terdapat pada CCRA, memiliki potensi enzimatik selulase yang lebih spesifik dan kuat dibanding isolat selulolitik yang diisolasi menggunakan medium

CMC yang mengandung kristal bersifat amorf. Selulosa amorf lebih mudah dihidrolisis dibandingkan selulosa kristal. Dilaporkan bahwa hidrolisis selulosa amorf mencapai 3 - 30 kali lebih efisien dibandingkan selulosa kristal (Kafle *et al.*, 2015).

Bakteri selulolitik asal ekosistem mangrove memiliki potensi sebagai kandidat agen biofertilizer (Zulkifli *et al.*, 2025), karena kemampuan adaptasinya terhadap kondisi salinitas tinggi, fluktuasi kadar air, dan ketersediaan oksigen yang terbatas. *Biofertilizer* yang diperkaya bakteri selulolitik mangrove dapat diaplikasikan pada tanah-tanah marginal, khususnya tanah salin dan tanah pesisir yang umumnya kaya bahan organik namun kesuburan rendah. Kemampuan bakteri selulolitik dalam mendegradasi bahan organik kompleks, terutama selulosa, berperan penting dalam meningkatkan ketersediaan karbon terlarut dan nutrisi bagi tanaman. Penggunaan bakteri selulolitik asal mangrove pada tanah asin dan kaya bahan organik memiliki keunggulan ekologis karena mikroorganisme tersebut telah terseleksi secara alami untuk bertahan dan berfungsi optimal di bawah tekanan osmotik. Dengan demikian, risiko kegagalan aplikasi akibat ketidakcocokan lingkungan dapat diminimalisasi. Isolat-isolat unggulan seperti MAT 1.1, MATT 2.1, dan REA 2.1, yang menunjukkan aktivitas selulolitik tinggi, memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai agen *biofertilizer*. Pemanfaatan bakteri selulolitik mangrove sebagai biofertilizer berkontribusi pada peningkatan produktivitas pertanian dan mendukung pengelolaan ekosistem yang berkelanjutan. Pendekatan ini membuka peluang integrasi antara konservasi ekosistem mangrove dan inovasi bioteknologi pertanian, di mana mikroorganisme indigen dimanfaatkan untuk memperbaiki kualitas tanah dan mendukung ketahanan pangan di wilayah pesisir.

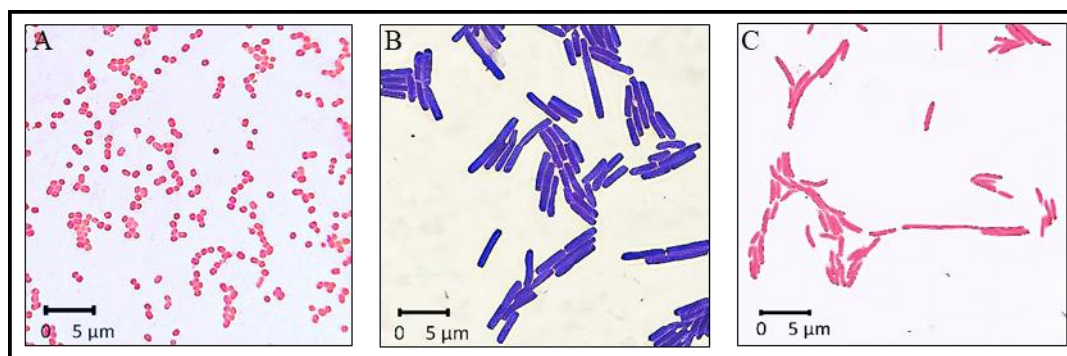
Karakter Makroskopis dan Mikroskopis Bakteri Selulolitik

Karakter 20 isolat yang diamati meliputi meliputi bentuk sel (Gambar 3), warna, bentuk, tepian, elevasi, dan sifat optik koloni (Gambar 4). Hasil pengamatan menunjukkan keragaman yang cukup tinggi berdasarkan morfologi koloni dan sel, yang mengindikasikan potensi keberagaman taksonomi dari isolat bakteri

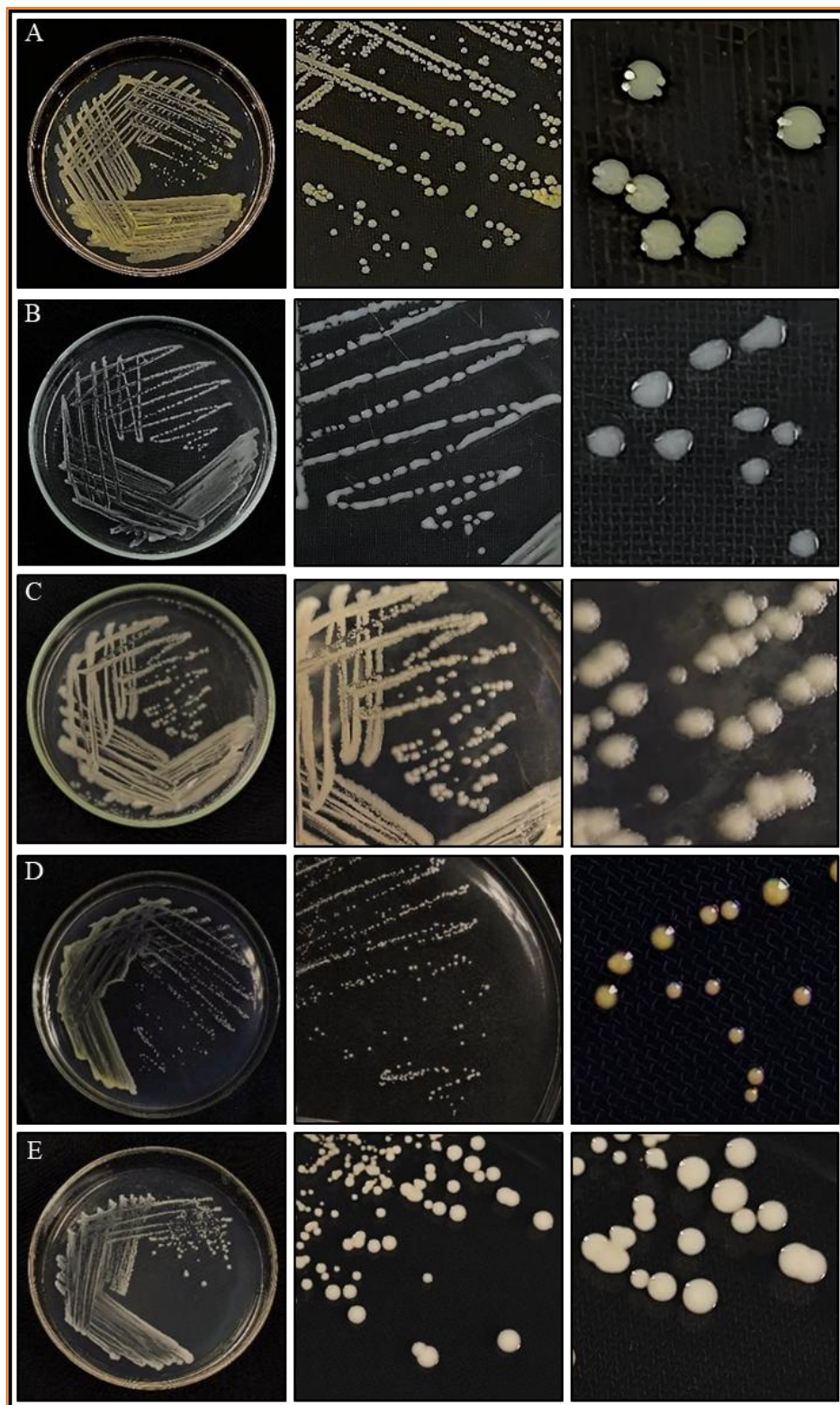
selulolitik yang diperoleh (Tabel 4). Sebagian besar isolat menunjukkan bentuk koloni yang *circular* dengan tepian *entire*, serta elevasi *convex* atau *flat*. Warna koloni didominasi oleh warna *white*, *yellow*, dan *cream*. Sebagian besar koloni bersifat *opaque*, meskipun beberapa isolat seperti RRA 2.1, REA 2.1, dan REA 2.3 menunjukkan karakteristik *transparent*. Ukuran koloni sebagian besar tergolong *small* hingga *moderate*, dengan beberapa koloni *punctiform*, seperti pada isolat REA 2.1, MATT 2.2, dan REA 3.1–3.3, yang mengindikasikan pertumbuhan lambat atau sifat koloni yang kompak. Dari 20 isolat, terdapat enam isolat Gram positif dan 14 isolat Gram negatif. Isolat Gram-positif ditemukan di berbagai sumber, seperti MAT, REA, dan RRA. Sebaliknya, isolat Gram negatif mendominasi hampir semua lokasi, terutama dari REA, RXG, dan MATT. Bentuk sel didominasi bentuk *bacil*, yang dimiliki oleh lebih dari separuh isolat. Beberapa isolat menunjukkan bentuk *coccus*, serta bentuk *streptobacil*.

Secara umum, isolat menunjukkan keragaman dalam morfologi koloni, sejalan dengan penelitian lainnya (Aswan *et al.*, 2024). Variasi ini mencerminkan perbedaan karakter fisiologis antar isolat dan berpotensi menunjukkan keanekaragaman spesies

mikroorganisme dari rizosfer mangrove, sebagaimana disampaikan oleh (Sui *et al.*, 2023), bahwa keanekaragaman mikroba pada lingkungan mangrove sangat dipengaruhi oleh kondisi substrat dan interaksi akar tanaman. Variasi morfologi ini mencerminkan keanekaragaman fenotipik dan berpotensi digunakan sebagai indikator awal dalam seleksi mikroorganisme potensial untuk aplikasi industri. Namun demikian, seperti yang disampaikan oleh (Chrisnawati *et al.*, 2023), karakteristik koloni dapat dipengaruhi oleh media pertumbuhan, waktu inkubasi, dan kondisi lingkungan lainnya, sehingga diperlukan analisis molekuler dan biokimia lanjutan untuk memastikan identitas dan potensi fungsional setiap isolat secara lebih akurat. Berdasarkan pengamatan mikroskopis, sebagian besar isolat tergolong Gram negatif dengan bentuk sel yang didominasi oleh *bacil* dan *streptobacil*. Sebaliknya, isolat Gram positif ditemukan dalam jumlah yang lebih sedikit dan umumnya berbentuk *coccus* atau *streptobacil*. Hasil ini sejalan dengan temuan Boro *et al.* (2024) yang menyatakan bahwa mayoritas bakteri selulolitik dari lingkungan mangrove Indonesia termasuk dalam filum Proteobacteria dan Bacteroidetes, yang cenderung bersifat Gram negatif.



Gambar 3. Pewarnaan Gram bakteri selulolitik dengan perbesaran 1000x, A) *Coccus*; B) *Bacil*; C) *Streptobacil*.



Gambar 4. Morfologi koloni bakteri selulolitik pada medium NA, A) MAT 1.1; B) REA 1.1; C) RRA 1.2; D) RXG 2.1; E) RXG 3.1.

Tabel 4. Karakter bakteri selulolitik asal rizosfer dan sedimen mangrove yang ditumbuhkan pada medium NA inkubasi 24 jam pada suhu ruang

Kode Isolat*	Morfologi Koloni						Gram	Bentuk Sel
	Warna	Bentuk	Tepian	Elevasi	Sifat Optik	Ukuran		
MAT 1.1	Yellow	Circular	Entire	Convex	Opaque	Small	Positive	Bacil
REA 1.1	White	Circular	Entire	Flat	Opaque	Small	Negative	Bacil
REA 1.2	Cream	Circular	Entire	Convex	Opaque	Moderate	Positive	Coccus
RRA 1.1	White	Circular	Entire	Convex	Opaque	Small	Negative	Coccus
RRA 1.2	White	Circular	Curled	Convex	Opaque	Small	Negative	Bacil
MATT 2.1	Yellow	Circular	Undulate	Flat	Opaque	Small	Negative	Streptobacil
MATT 2.2	White	Circular	Entire	Flat	Opaque	Punctiform	Negative	Bacil
RRA 2.1	White	Circular	Entire	Convex	Transparent	Small	Positive	Coccus
REA 2.1	Cream	Circular	Entire	Flat	Transparent	Punctiform	Negative	Bacil
REA 2.2	Yellow	Circular	Entire	Convex	Opaque	Small	Negative	Bacil
REA 2.3	White	Circular	Entire	Convex	Transparent	Small	Negative	Bacil
RXG 2.1	Yellow	Circular	Entire	Convex	Opaque	Small	Negative	Streptobacil
RXG 2.2	White	Circular	Entire	Convex	Transparent	Small	Negative	Bacil
RXG 2.3	Yellow	Circular	Entire	Convex	Opaque	Moderate	Negative	Bacil
RXG 2.4	Yellow	Circular	Entire	Convex	Opaque	Moderate	Negative	Bacil
MAT 3.1	White	Irregular	Curled	Flat	Opaque	Moderate	Positive	Bacil
RXG 3.1	White	Circular	Entire	Flat	Opaque	Moderate	Negative	Streptobacil
REA 3.1	Cream	Circular	Entire	Flat	Transparent	Punctiform	Negative	Streptobacil
REA 3.2	Yellow	Circular	Entire	Convex	Opaque	Punctiform	Positive	Streptobacil
REA 3.3	Yellow	Circular	Entire	Flat	Opaque	Punctiform	Positive	Streptobacil

Keterangan: *MAT (Mangrove alami tergenang), MATT (Mangrove alami tidak tergenang), RRA (Rizosfer *R. apiculata*), REA (Rizosfer *E. agallocha*), RXG (Rizosfer *X. granatum*)

Simpulan dan Saran

Sebanyak 36 isolat bakteri berhasil diisolasi dari sedimen dan rizosfer mangrove Desa Kelapapati, Bengkalis Riau dan 20 isolat diantaranya memiliki aktivitas selulolitik yang stabil berdasarkan pembentukan zona bening pada medium CCRA. Nilai IS menunjukkan sebagian besar isolat memiliki aktivitas selulase yang tinggi. Isolat unggulan dengan kode MAT 1.1, REA 2.1, dan MATT 2.1 memperlihatkan kemampuan degradasi selulosa yang tergolong tinggi, sehingga berpotensi untuk digunakan sebagai agen *biofertilizer*. Zona rizosfer terbukti menjadi sumber isolat yang lebih potensial dibandingkan sedimen, karena lebih banyak diperoleh bakteri selulolitik. Karakterisasi menunjukkan bahwa sebagian besar isolat merupakan bakteri Gram negatif dengan bentuk sel dominan *bacil* dan *streptobacil*. Temuan ini menunjukkan bahwa ekosistem mangrove alami berpotensi sebagai sumber bakteri selulolitik yang dapat digunakan sebagai agen *biofertilizer*.

Penelitian lanjutan perlu fokus pada karakterisasi isolat-isolat selulolitik unggulan meliputi analisis kinetika enzim, stabilitas aktivitas selulase pada berbagai kondisi pH dan

salinitas, identifikasi molekuler berbasis gen 16S rRNA dan pendekatan genomik untuk memahami potensi fungsionalnya secara komprehensif. Uji interaksi antar isolat dalam bentuk konsorsium mikroorganisme juga perlu dilakukan. Dari sisi aplikasi, isolat selulolitik potensial diuji secara *in situ* untuk mengetahui kemampuan dekomposisi dan pemulihan ekosistem mangrove dan secara *ex situ* sebagai komponen *biofertilizer* pada tanah salin dan lahan pesisir yang kaya bahan organik.

Daftar Pustaka

- Ahmed, S., Kumar, S., Friess, D. A., Jacobs, M., Islam, A., Alam, A., Jamil, M., Hossain, N., Dey, T., Sullibie, C., Naabeh, S., & Pretzsch, H. (2022). Salinity reduces site quality and mangrove forest functions. From monitoring to understanding. *Science of the Total Environment*, 853, 158662. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158662>
- Akram, H., Hussain, S., Mazumdar, P., Chua, K. O., Butt, T. E., & Harikrishna, J. A. (2023). Mangrove health: A review of functions, threats, and challenges associated with mangrove management practices. *Forests*, 14(9), 1698.

- <https://doi.org/10.3390/f14091698>
- Alamsjah, F., Aswan, D. R., & Agustien, A. (2024). pH and temperature optimization of several bacterial isolates from mangrove waters in the Mandeh area to produce cellulase enzyme. *Online Journal of Biological Sciences*, 24(3), 367–373. <https://doi.org/10.3844/ojbsci.2024.367.373>
- Ananda, D., Rasyidah, R., & Mayasari, U. (2023). Isolasi dan karakterisasi bakteri selulolitik dari lumpur mangrove Pantai Pandaratan Kecamatan Sarudik Kabupaten Tapanuli Tengah Provinsi Sumatera Utara. *Bioma : Berkala Ilmiah Biologi*, 25(1), 20–27. <https://doi.org/10.14710/bioma.25.1.20-27>
- Ariyanto, D., & Pringgenies, D. (2024). Natural mangrove associated gastropods at Bengkalis Island, Riau Province, Indonesia: Preliminary survey. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1356(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1356/1/012045>
- Aswan, D. R., Alamsjah, F., & Agustien, A. (2024). Isolation and screening of cellulolytic bacteria from mangrove waters in Mandeh, West Sumatera Province, Indonesia. *International Journal of Progressive Sciences and Technologies*, 45(2), 163–170. <http://dx.doi.org/10.52155/ijpsat.v45.2.6295>
- Balla, A., Silini, A., Cherif-silini, H., Bouket, A. C., Boudechicha, A., Luptakova, L., Alenezi, F. N., & Belbahri, L. (2022). Screening of cellulolytic bacteria from various ecosystems and their cellulases production under multi-stress conditions. *Catalysts*, 12(7), 769. <https://doi.org/10.3390/catal12070769>
- Bamrungpanichtavorn, T., Ungwiwatkul, S., & Boontanom, P. (2023). Diversity and cellulolytic activity of cellulase-producing bacteria isolated from the soils of two mangrove forests in Eastern Thailand. *Biodiversitas of Biological Diversity*, 24(7), 3891–3902. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d240728>
- Batubara, U. M., Suparjo, S., Maritsa, H. U., Pujianto, E., & Herlina, M. (2022). Screening and determination of potential cellulolytic bacteria from mangrove ecosystem. *Jurnal Perikanan dan Kelautan*, 27(2), 264–271. <https://doi.org/10.31258/journal.perikanan.kelautan.v27n2.264-271>
- Boro, T. L., Karyawati, A. T., Ruma, M. T. L., Mauboy, R. S., & Tari, T. A. (2024). Isolasi dan karakterisasi bakteri selulolitik tanah di ekosistem mangrove di Desa Noelbaki Kecamatan Kupang Kabupaten Kupang Tengah. *Jurnal Biotropikal Sains*, 21(2), 84–92. <https://doi.org/10.31258/journal.perikanan.kelautan.v27n2.264-271>
- Choi, Y. W., Hodgkiss, I. J., & Hyde, K. D. (2005). Enzyme production by endophytes of *Brucea javanica*. *Journal Agricultural Technology*, 1, 55–66.
- Chrisnawati, S. D., Sabdaningsih, A., Jati, O. E., & Ayuningrum, D. (2023). Isolasi dan identifikasi molekuler bakteri rhizosfer dari sedimen mangrove jenis *Rhizopora* sp. di ekosistem mangrove Tapak, Semarang. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 16(2), 117–124. <https://doi.org/10.21107/jk.v16i2.15952>
- Dewiyanti, I., Darmawi, D., Muchlisin, Z. A., Helmi, T. Z., & Arisa, I. I. (2023). The influence of cellulolytic bacteria on soil properties in mangrove ecosystems of Banda Aceh and Aceh Besar, Indonesia. *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, 18(3), 613–622. <https://doi.org/10.18280/ij dne.180313>
- Dittmann, S., Mosley, L., Stangoulis, J., & Nguyen, V. L. (2022). Effects of extreme salinity stress on a temperate mangrove ecosystem. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 1–18. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.859283>
- Febriana, D. dan D. S. (2024). Pengaruh keragaman jenis organisme terhadap kesuburan tanah. *Agrosience*, 14(1), 5–24. <https://doi.org/10.35194/agosci.v14i1.4055>
- 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>
- Ghose, M., Parab, A. S., Manohar, C. S., Mohanan, D., & Toraskar, A. (2024). Unraveling the role of bacterial communities in mangrove habitats under the urban influence, using a next-generation sequencing approach. *Journal of Sea Research*, 198, 102469. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2024.102469>

- 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>
- 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/10.24002/biota.v3i1.1892>
- Kurniawan, A., Febrianti, D., Sari, S. P., Prihanto, A. A., Asriani, E., Kurniawan, A., & Sambah, A. B. (2018). Isolasi dan identifikasi bakteri pendegradasi selulosa asal ekosistem mangrove Tukak Sadai, Bangka Selatan. *Jurnal Perikanan Pantura (JPP)*, 3(2), 9–16. <https://doi.org/10.30587/jpp.v1i2.461>
- Kushwaha VK, Sharma M, Kanade P, Rana T, & Yadav LS. (2023). Endophytic fungi from mangrove plant *Avicennia marina* and their enzyme cellulase activity. *The International Journal of Science, Mathematics and Technology Learning*, 30(2), 117–130. <https://doi.org/10.18848/2327-7971/CGP/v30i02>
- Lee, C. Y., & Lee, S. Y. (2024). Contribution of aerobic cellulolytic gut bacteria to cellulose digestion in fifteen coastal grapsoid crabs underpins potential for mineralization of mangrove production. *Current Microbiology*, 81(8), 1–11. https://doi.org/10.1007/s00284-024-03718-5?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate.net%26utm_medium%3Darticle
- Ma, W., Tang, S., Dengzeng, Z., Zhang, D., Zhang, T., & Ma, X. (2022). Root exudates contribute to belowground ecosystem hotspots: A review. *Frontiers in Microbiology*, 13, 937940. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.937940>
- Manguntungi, B., Asmawati, R. A. A. M. A. A., & Tegar Aprilian1, K. E. P. (2018). Endonesia (Endophyte for Indonesia): Biofertilizer berbasis mikroba endofit guna meningkatkan kualitas pembibitan budidaya kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) di Indonesia. *Biota : Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, 3(1), 44–52. <https://doi.org/10.21315/tlsr2019.30.1.8>
- Naresh, S., Kunasundari, B., Gunny, A. A. N., Teoh, Y. P., Shuit, S. H., Ng, Q. H., & Hoo, P. Y. (2019). Isolation and partial characterisation of thermophilic cellulolytic bacteria from North Malaysian tropical mangrove soil. *Tropical Life Sciences Research*, 30(1), 123–147. <https://doi.org/10.21315/tlsr2019.30.1.8>
- Nursyirwani, N., Feliatra, F., Tanjung, A., & Harjuni, F. (2020). Isolation of cellulolytic bacteria from mangrove sediment in Dumai Marine Station Riau and the antibacterial activity against pathogens. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 430(1), 012012. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/430/1/012012>
- Sui, J., He, X., Yi, G., Zhou, L., Liu, S., Chen, Q., Xiao, X., & Wu, J. (2023). Diversity and structure of the root-associated bacterial microbiomes of four mangrove tree species, revealed by high-throughput sequencing. *PeerJ*, 11, 1–25. [10.7717/peerj.16156](https://doi.org/10.7717/peerj.16156)
- Utami, S., Winarni, I., Kurniawati, H., Pratomo, H., & Indonesia, S. S. (2025). Diversity of cellulolytic bacteria from mangroves in Blanakan, West Java, Indonesia. *AACL Bioflux*, 18(1), 126–137. <https://doi.org/10.21315/tlsr2019.30.1.8>
- Zhao, G., Zhu, X., Zheng, G., Meng, G., Dong, Z., Baek, J. H., Jeon, C. O., Yao, Y., Xuan, Y. H., Zhang, J., & Jia, B. (2024). Development of biofertilizers for sustainable agriculture over four decades (1980–2022). *Geography and Sustainability*, 5(1), 19–28. [10.1016/j.geosus.2023.09.006](https://doi.org/10.1016/j.geosus.2023.09.006)
- Zhuang, W., Yu, X., Hu, R., Luo, Z., Liu, X., Zheng, X., Xiao, F., Peng, Y., & He, Q. (2020). Diversity, function and assembly of mangrove root-associated microbial communities at a continuous fine-scale. *npj Biofilms and Microbiomes*, 52, 1–10. [10.1038/s41522-020-00164-6](https://doi.org/10.1038/s41522-020-00164-6)
- Zulkifli, L., Sakaroni, R., Ayu, D., Rasmi, C., & Wirajagat, G. C. (2025). Endophytic bacteria of mangrove roots from the West Coast of Lombok Island with phosphate-solubilizing and IAA-producing abilities as biofertilizer candidates. *Jurnal Biologi Tropis*, 25(4b), 607618. <https://doi.org/10.29303/jbt.v25i4b.11175>