

Isolation and Antibacterial Activity Test of Mangrove Rhizosphere Bacteria Against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*

Okto Asriatno^{1*}, Dewinta Nur Alvionita¹, Muhammad Syarieff¹, Dwirariska Aprilianasari Syamsuardi¹

¹Program Studi Kedokteran, Fakultas Kedokteran, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia;

Article History

Received : November 27th, 2025

Revised : December 01th, 2025

Accepted : December 16th, 2025

*Corresponding Author: **Okto Asriatno**, Program Studi Kedokteran, Fakultas Kedokteran, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia;
Email: okto.asriatno@uho.ac.id

Abstract: The global rise in multidrug-resistant pathogens necessitates the exploration of unique ecological niches, such as the mangrove rhizosphere, as promising reservoirs for novel antibacterial agents. In this study, we aimed to isolate and characterize bacteria from the rhizosphere of *Rhizophora* sp. in the mangrove forest of Bypass Kendari, Southeast Sulawesi, and to evaluate their antibacterial activity against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. Isolation was performed using the spread plate method on three different media: Nutrient Agar (NA), Zobell Marine Agar (ZMA), and International Streptomyces Project 2 (ISP2). A total of seven bacterial isolates were obtained (NA.1, ZMA.1, ZMA.2, ZMA.x, ISP2.1, ISP2.2, and ISP2.x), exhibiting diverse morphological characteristics ranging from mucoid to smooth colonies. Antibacterial screening using a modified Kirby-Bauer disc diffusion method revealed that only one isolate, ZMA.1, possessed broad-spectrum antagonistic activity, effectively inhibiting both the *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. Further microscopic identification via Gram staining characterized isolate ZMA.1 as a Gram-negative and rod-shaped bacteria, appearing in monobacillus and diplobacillus arrangements. These findings underscore the potential of Gram-negative bacteria from the mangrove rhizosphere as a promising source of new antibacterial candidates to combat multidrug-resistant pathogens.

Keywords: Antibacterial activity, *Escherichia coli*, isolation, mangrove Rhizosphere, *Staphylococcus aureus*.

Pendahuluan

Senyawa antibakteri memegang peran krusial dalam pengobatan modern sebagai pertahanan utama melawan penyakit infeksi. Senyawa ini bekerja melalui dua mekanisme utama, yaitu menekan pertumbuhan bakteri (*bacteriostatic*) atau mematikan bakteri sepenuhnya (*bactericidal*) dengan menargetkan struktur vital seperti dinding sel, membran sel, atau sintesis protein bakteri (Kapoor, Saigal, & Elongavan, 2017). Sejak era emas penemuan antibiotik di pertengahan abad ke-20, penggunaan agen ini telah menurunkan angka kematian akibat infeksi secara drastis (Hutchings et al., 2019). Namun, ketergantungan dan penggunaan antibiotik

yang masif dalam jangka panjang tanpa pengawasan ketat telah memicu respons adaptif alami dari mikroorganisme target.

Peningkatan kasus resistensi antimikroba (*Antimicrobial Resistance/AMR*) telah berkembang menjadi salah satu tantangan bagi kesehatan masyarakat global di abad ke-21. Resistensi antimikroba merujuk kepada bakteri atau mikroorganisme lain yang kebal terhadap antibiotik yang sebelumnya dapat membunuh mereka (Uddin et al., 2021). AMR adalah proses alamiah yang dapat terjadi melalui mutasi dan transfer gen horizontal (Munita & Arias, 2016), meskipun perilaku manusia seperti kelebihan dan kesalahan dalam penggunaan antibiotik serta buruknya pencegahan dan penanganan infeksi turut

berkontribusi terhadap meningkatnya kasus AMR (Alsamannoudi et al., 2021). Penurunan efikasi antibiotik konvensional terhadap patogen yang terus berevolusi meningkatkan risiko mortalitas akibat infeksi yang sebelumnya dapat ditangani secara medis. Sebuah studi komprehensif mengestimasi bahwa pada tahun 2019, bakteri AMR berkontribusi secara langsung terhadap 1,27 juta kematian di seluruh dunia (Murray et al., 2022). Situasi ini diperburuk dengan munculnya fenomena bakteri dengan resistensi multi-antibiotik seperti *Staphylococcus aureus* dan *Escherichia coli* menunjukkan kekebalan terhadap lebih dari satu golongan antibiotik (Sharma et al., 2011).

Pencarian senyawa bioaktif baru untuk menanggulangi masalah AMR telah dilakukan di berbagai kondisi lingkungan, salah satunya adalah pada ekosistem mangrove. Mangrove merupakan area yang dipengaruhi oleh pasang surut air laut dengan karakteristik unsur fisika, biologi, dan kimia yang khas antara darat dan laut (Ambeng et al., 2019). Kondisi lingkungan yang ekstrem dan dinamis ini memicu komunitas mikroba di dalamnya, khususnya di area rizosfer—wilayah tanah yang dipengaruhi langsung oleh sekresi akar—untuk mengembangkan jalur metabolisme yang kompleks (Palit et al., 2022). Rizosfer mangrove memiliki kepadatan dan keragaman bakteri yang jauh lebih tinggi dibandingkan tanah biasa karena keberadaan eksudat akar yang kaya nutrisi. Untuk bertahan hidup dalam kompetisi ruang dan nutrisi, bakteri rizosfer seperti genus *Bacillus*, *Pseudomonas*, dan *Streptomyces* beradaptasi dengan melepaskan metabolit sekunder berupa zat antibiotik yang kuat untuk menghambat organisme kompetitornya (Khairillah et al., 2024; Zhang et al., 2022).

Meskipun potensi mengenai kemampuan mikroba rizosfer mangrove dalam menghasilkan metabolit sekunder telah diketahui, namun eksplorasi agen bioaktif baru dari ekosistem ini masih belum optimal. Studi sebelumnya berfokus pada struktur komunitas mikroba mangrove (Zongsheng et al., 2023; Muwawa et al., 2024), isolasi bakteri dari sedimen umum ekosistem mangrove (Gopalakrishnan et al., 2016), atau lebih terfokus pada bakteri endofit tumbuhan

mangrove (Pramono et al., 2019; Fatimah et al., 2024; Azzahra et al., 2025). Kesenjangan pengetahuan ini menyebabkan potensi besar bakteri rizosfer mangrove sebagai sumber antibiotik alami belum dimanfaatkan sepenuhnya untuk mengatasi patogen klinis yang spesifik.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan dengan pendekatan yang memfokuskan isolasi bakteri spesifik dari rizosfer mangrove yang memiliki mekanisme antagonis terhadap bakteri Gram-positif dan Gram-negatif sekaligus. Penelitian ini bertujuan untuk mengisolasi bakteri dari rizosfer mangrove dan mengevaluasi aktivitas antagonisnya terhadap *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*, serta menyediakan data dasar bagi pengembangan kandidat antibakteri baru yang berasal dari sumber daya pesisir.

Bahan dan Metode

Lokasi dan Pengambilan Sampel

Sampel tanah rizosfer diambil dari dua titik pada kawasan Hutan Mangrove di sepanjang Jalan Bypass, Kota Kendari, Sulawesi Tenggara (3°59'03"S 122°31'58"E dan 3°58'49"S 122°31'54"E). Sampel yang diambil berupa tanah yang menempel erat pada akar tanaman. Pengambilan sampel dilakukan pada zona perakaran (10–20 cm dari permukaan tanah) tanaman bakau jenis *Rhizophora* sp. yang dominan pada area tersebut. Sebanyak kurang lebih 10 gram tanah dimasukkan ke dalam tabung Falcon, diberi label, dan disimpan di dalam cool box bersuhu 4°C untuk dibawa ke laboratorium guna proses isolasi lebih lanjut.

Isolasi Bakteri Rizosfer

Tahap isolasi bakteri dilakukan menggunakan metode cawan sebar (*spread plate method*) (Khairillah et al. 2024). Satu gram sampel tanah dimasukkan ke dalam 9 mL larutan NaCl 0,85% steril dan dihomogenkan menggunakan *vortex*. Selanjutnya, dilakukan dilusi bertingkat hingga seri 10^{-9} . Sebanyak 0,5 mL suspensi dari tiga seri pengenceran terakhir (10^{-7} – 10^{-9}) diinokulasikan secara aseptis ke permukaan tiga jenis media agar yang berbeda, yaitu: *Nutrient Agar* (NA) untuk bakteri umum, *Zobell Marine Agar* (ZMA) untuk bakteri laut,

dan *International Streptomyces Project 2* (ISP2) untuk kelompok Actinomycetes. Kultur diinkubasi di dalam inkubator selama 24 jam untuk media NA dan ZMA, serta hingga tujuh hari untuk media ISP2. Koloni yang tumbuh terpisah dan memiliki karakteristik morfologi berbeda dimurnikan kembali dengan metode gores (*streak plate*) hingga diperoleh isolat murni.

Karakterisasi Isolat Bakteri

Isolat murni yang berhasil didapatkan kemudian dikarakterisasi berdasarkan morfologi koloninya secara makroskopis. Parameter pengamatan meliputi bentuk koloni, warna, bentuk tepian (margin), dan elevasi. Isolat potensial dengan aktivitas antibakteri terbaik akan dilakukan pewarnaan Gram dan diamati menggunakan mikroskop.

Uji Aktivitas Antibakteri

Pengujian aktivitas antibakteri isolat murni menggunakan metode difusi cakram (*disc diffusion*) Kirby-Bauer yang telah dimodifikasi. *Escherichia coli* (representasi Gram-negatif) dan *Staphylococcus aureus* (representasi Gram-positif) digunakan sebagai bakteri uji. Bakteri uji diremajakan dan kekeruhannya disetarakan dengan standar McFarland 0.5, kemudian diinokulasikan secara merata (*swabbing*) menggunakan *cotton bud* steril ke seluruh permukaan media Mueller Hinton Agar (MHA). Isolat bakteri rizosfer ditumbuhkan dalam media cair (*Nutrient Broth*) dan diinkubasi di dalam inkubator dengan suhu 37°C selama 24 jam sebelum pengujian. Kertas cakram kosong (*blank disc*) berdiameter 5 mm diletakkan di dalam cawan petri steril dan ditetesi secara hati-hati 10-20 µL kultur cair isolat bakteri rizosfer (umur 24 jam) hingga meresap. Kertas cakram kemudian diambil menggunakan forsep dan diletakkan di atas permukaan media MHA yang telah diinokulasi bakteri uji. Sebagai kontrol positif digunakan kertas cakram yang telah diberi larutan Ciprofloxacin 1000 ppm. Sebagai kontrol negatif berupa kertas cakram yang diberi media NB. Cawan petri diinkubasi pada suhu 37°C selama 24 jam. Aktivitas antibakteri ditandai dengan terbentuknya zona bening (zona hambat) di sekitar kertas cakram. Diameter zona bening diukur menggunakan jangka sorong dalam satuan milimeter (mm). Penentuan kategori aktivitas

antibakteri berdasarkan diameter zona hambat dihitung menggunakan rumus:

$$\frac{(D_v - D_c) + (D_h - D_c)}{2}$$

dimana;

D_v (diameter vertikal), D_h (diameter horizontal), dan D_c (diameter cakram) dalam satuan milimeter. Diameter zona hambat kurang dari 5 mm termasuk kategori lemah, 5 – 10 mm termasuk kategori sedang, 10 – 20 mm kategori kuat, dan > 20 mm kategori sangat kuat (Tumundo et al., 2024).

Hasil dan Pembahasan

Isolat Bakteri Rizosfer

Isolasi bakteri dari sampel tanah rizosfer mangrove *Rhizophora* sp. yang diambil di kawasan Bypass Kendari berhasil memurnikan sebanyak 7 (tujuh) isolat bakteri yang berbeda secara morfologi. Ketujuh isolat tersebut diperoleh dari tiga jenis media isolasi yang berbeda, yaitu Nutrient Agar (NA), Zobell Marine Agar (ZMA), dan ISP2. Kode isolat diberikan berdasarkan media tempat tumbuhnya, yakni: NA.1, ZMA.1, ZMA.2, ZMA.x, ISP2.1, ISP2.2, dan ISP2.x. Penampakan ketujuh isolat tersebut di atas media agar padat dapat dilihat pada Gambar 1.

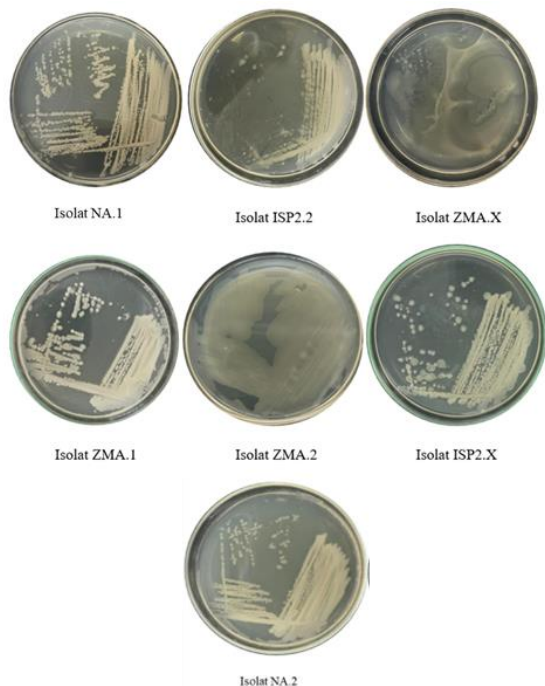
Karakter Morfologi Bakteri Rizosfer

Karakteristik morfologi koloni yang diamati secara makroskopis meliputi bentuk, warna pigmen, tepian (margin), dan elevasi. Hasil pengamatan menunjukkan variasi morfologi di antara isolat, di mana isolat yang tumbuh pada media ISP2 cenderung memiliki karakteristik kering dan bertepung (khas kelompok Actinomycetes), sedangkan isolat pada media ZMA dan NA cenderung basah atau *mucoïd*. Rincian karakteristik morfologi ketujuh isolat disajikan pada Tabel 1.

Aktivitas Antibakteri Isolat Rizosfer

Hasil uji aktivitas antibakteri menggunakan metode difusi cakram menunjukkan potensi antagonis yang bervariasi dari ketujuh isolat terhadap bakteri uji *Escherichia coli* dan *Staphylococcus aureus*. Berdasarkan pengamatan setelah inkubasi 24

jam, ditemukan bahwa mayoritas isolat (NA.1, ZMA.2, ZMA.x, ISP2.1, ISP2.2, dan ISP2.x) tidak menunjukkan aktivitas penghambatan yang signifikan (tidak terbentuk zona bening di sekitar kertas cakram).



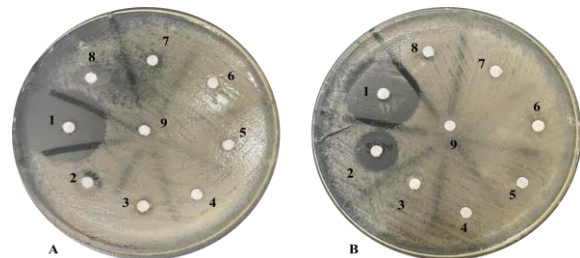
Gambar 1. Isolat Bakteri Rizosfer

Tabel 1. Morfologi Koloni Isolat Bakteri Rizosfer

No	Kode	Bentuk Koloni	Warna	Tepian	Elevasi
1.	NA.1	Circular	Putih pucat	Entire	Convex
2.	ZMA.1	Circular	Putih	Undulate	Raised
3.	ZMA.2	Mucoid	Putih keruh	Undulate	Raised
4.	ZMA.x	Mucoid	Putih keruh	Undulate	Raised
5.	NA.2	Circular	Putih	Entire	Convex
6.	ISP2.2	Filamentous	Putih krem	Filamentous	Raised
7.	ISP2.x	Circular	Putih krem	Rhizoid	Raised

Hanya satu isolat, yaitu ZMA.1, yang menunjukkan aktivitas antibakteri spektrum luas. Isolat ZMA.1 mampu membentuk zona bening yang jelas baik pada cawan yang diinokulasi *Escherichia coli* maupun *Staphylococcus aureus*

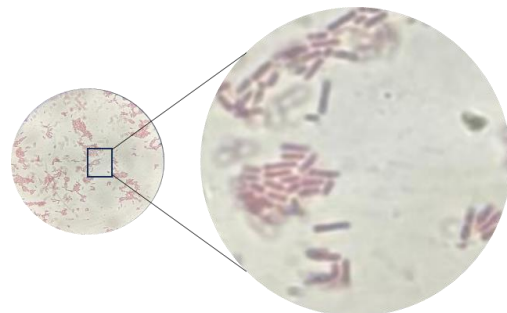
(Gambar 2). Zona hambat yang dihasilkan pada bakteri uji *Escherichia coli* yaitu 9,5 mm (kategori sedang), sedangkan zona hambat pada bakteri uji *Staphylococcus aureus* sebesar 19,5 mm (kategori kuat).



Gambar 2. Hasil Uji Aktivitas Antibiotik Isolat ZMA.1 terhadap *E.coli* (A) dan *Staphylococcus aureus* (B). Ket: 1 (Kontrol positif); 2 (ZMA.1); 3 (ZMA.2); 4 (NA.1); 5 (ISP2.2); 6 (ZMA.x); 7 (NA.2); 8 (ISP2.x); 9 (Kontrol negatif).

Identifikasi Mikroskopis Isolat Potensial

Isolat ZMA.1 dikarakterisasi lebih lanjut secara mikroskopis melalui pewarnaan Gram untuk mengetahui bentuk sel dan sifat dinding selnya. Hasil pengamatan di bawah mikroskop dengan perbesaran 1000x menunjukkan bahwa isolat ZMA.1 menyerap zat warna tandingan (safranin) sehingga tampak berwarna merah muda (Gambar 3). Berdasarkan bentuk selnya, isolat ini teridentifikasi memiliki bentuk batang (bacillus) dengan susunan sel yang bervariasi antara tunggal (monobasil) dan berpasangan (diplobasil). Dengan demikian, isolat ZMA.1 dikategorikan sebagai bakteri Gram-negatif berbentuk basil.



Gambar 3. Hasil pewarnaan Gram isolat ZMA.1 (perbesaran: 1000x)

Pembahasan

Eksplorasi mikroorganisme dari lingkungan ekstrem seperti rizosfer mangrove merupakan

strategi krusial dalam penemuan senyawa antimikroba baru. Dalam penelitian ini, berhasil diisolasi tujuh isolat bakteri (NA.1, ZMA.1, ZMA.2, ZMA.x, ISP2.1, ISP2.2, dan ISP2.x) dari rizosfer *Rhizophora* sp. di kawasan Bypass Kendari. Penggunaan media ZMA yang berbasis air laut memfasilitasi pertumbuhan bakteri halofilik/halotoleran yang dominan di lingkungan pesisir, sementara media ISP2 secara spesifik menyeleksi kelompok Actinobacteria. Khairillah *et al.* (2024) juga berhasil mengisolasi enam isolat dari rizosfer mangrove. Zhang *et al.* (2022) menyatakan bahwa rizosfer mangrove menyediakan *micro-niche* yang kaya nutrisi akibat adanya eksudat akar, sehingga mendukung koeksistensi berbagai filum bakteri dengan kepadatan populasi yang jauh lebih tinggi dibandingkan tanah non-rizosfer.

Karakterisasi morfologi menunjukkan variasi antara isolat yang diperoleh. Sebanyak lima isolat bertekstur *smooth* sedangkan dua isolat (ZMA.2 dan ZMA.x) bertekstur *mucoïd*. Hal ini mengindikasikan adanya eksopolisakarida yang dihasilkan oleh kedua isolat tersebut. Variasi morfologi ini merefleksikan adaptasi strategi bertahan hidup, dimana pembentukan lendir atau eksopolisakarida pada bakteri ZMA sering kali berfungsi sebagai proteksi terhadap fluktuasi salinitas, dehidrasi, antibiotik maupun stres akibat kandungan logam berat di lingkungan (Gupta & Diwan, 2017).

Tujuh isolat yang diuji, hanya isolat ZMA.1 yang menunjukkan aktivitas antibakteri. Hal ini terlihat dengan adanya zona bening atau zona hambat yang terbentuk di sekitar kertas cakram yang sebelumnya telah diberi kultur isolat. Pembentukan zona bening tersebut dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik dari segi kepadatan media, konsentrasi dan kecepatan difusi antibiotik, konsentrasi dan sensitivitas mikroba uji terhadap antibiotik, maupun interaksi antibiotik dengan media (Sari *et al.* 2022).

Isolat ZMA.1 mampu menghambat pertumbuhan *Escherichia coli* (Gram-negatif) dan *Staphylococcus aureus* (Gram-positif). Senyawa antibakteri isolat ZMA.1 dapat dikategorikan sebagai antibiotik spektrum luas, karena efektif menghambat pertumbuhan bakteri dari dua kelompok yang berbeda. Aktivitas antibakteri tersebut dapat berasal dari satu senyawa dengan spektrum yang luas ataupun

gabungan dari beberapa senyawa yang memiliki sifat antibakteri (Chau *et al.*, 2020). Senyawa antibakteri dengan spektrum yang luas sangat dibutuhkan dalam menanggulangi masalah akibat munculnya bakteri patogen yang resisten terhadap banyak antibiotik (He *et al.*, 2025). Beberapa penelitian sebelumnya juga menemukan bakteri penghasil senyawa antibakteri dengan spektrum yang luas. Penelitian Shanthakumar *et al.* (2015) menemukan bakteri *Exiguobacterium mexicanum* MSSRFS9 menghasilkan senyawa antibiotik yang mampu menghambat pertumbuhan *E. coli*, *Shigella flexneri*, *Klebsiella pneumoniae*, dan *Salmonella enterica*.

Aktivitas antibakteri isolat ZMA.1 lebih kuat terhadap bakteri Gram-positif dibandingkan dengan aktivitas antibakteri terhadap bakteri Gram-negatif. Hal ini diduga karena bakteri Gram-positif seperti *Staphylococcus aureus* tidak memiliki lapisan lipopolisakarida seperti pada bakteri Gram-negatif, yang menyebabkan bakteri tersebut lebih lemah terhadap senyawa antibiotik (Breijyeh *et al.*, 2020). Keberadaan membran luar (*outer membrane*/OM) pada bakteri Gram-negatif merupakan ciri pembeda utama dengan bakteri Gram-positif yang memiliki fungsi utama sebagai penghalang (*barier*) untuk mencegah masuknya senyawa-senyawa berbahaya (Gauba & Rahman, 2023).

Terlepas dari hal tersebut, kemampuan isolat ZMA.1 untuk menghambat pertumbuhan bakteri Gram-negatif cukup potensial. Hal ini menandakan bahwa senyawa yang dihasilkan oleh isolat ZMA.1 mampu menembus mekanisme pertahanan bakteri Gram-negatif. Senyawa antibakteri dapat menghambat pertumbuhan bakteri Gram-negatif melalui beberapa mekanisme, seperti inhibisi pembentukan dinding sel, inhibisi sintesis protein, inhibisi replikasi DNA, dan kerusakan membran sel (Kapoor, Saigal, & Elongavan, 2017).

Hasil pewarnaan Gram mengidentifikasi isolat ZMA.1 sebagai bakteri Gram-negatif berbentuk basil. Temuan ini menarik karena meskipun antibiotik sering diasosiasikan dengan Actinomycetes (Gram-positif), bakteri Gram-negatif dari lingkungan laut juga memiliki potensi besar. Darabpour *et al.*, (2011) berhasil mengisolasi *Pseudoalteromonas piscicida* PG-02, bakteri Gram-negatif berbentuk batang

penghasil antibakteri spektrum luas yang mampu menghambat pertumbuhan bakteri MRSA, *E. coli*, dan *Pseudomonas aeruginosa*. Selain itu, jenis bakteri dari kelompok Myxobacteria adalah contoh bakteri Gram-negatif berbentuk batang yang biasa ditemukan di lingkungan darat maupun perairan dan memiliki aktivitas antibakteri (Birkelbach *et al.*, 2024).

Kesimpulan

Isolat ZMA.1 yang diperoleh dari rizosfer mangrove *Rhizopora* sp. memiliki potensi sebagai penghasil senyawa antibakteri spektrum luas, ditandai dengan kemampuannya menghambat pertumbuhan bakteri Gram-positif (*Staphylococcus aureus*) maupun Gram-negatif (*Escherichia coli*). Kemampuan penghambatan terbaiknya pada *Staphylococcus aureus* dengan kategori kuat (zona hambat 19,5 mm). Diperlukan penelitian lebih lanjut terkait isolat ZMA.1, meliputi identifikasi molekuler berbasis 16S RNA, ekstraksi, dan karakterisasi senyawa antibakteri yang dihasilkannya.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Universitas Halu Oleo melalui program Penelitian Dosen Pemula Internal yang telah membiayai penelitian ini (DIPA Nomor: SP DIPA-139.03.2.693377/2025).

Referensi

- Alsamannoudi, H., Alamri, A., Almotiri, T., Alharbi, S., Alshammari, D., Alnasser, B., & Alswayeh, H. (2021). Antimicrobial resistance: A growing global threat. *International Journal of Health Sciences*, 3(S1): 145–151. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v3nS1.15079>
- Ambeng, Zubair, H., Oka, N. P., & Tonggiroh, A. (2019). Potential of soil bacteria isolated from mangrove rhizosphere in Sinjai Regency to suppress the growth of *Vibrio harveyi*. *Journal of Physics: Conference Series*, 1341(2), Article 022016. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1341/2/022016>
- Azzahra, F., Prasetyawati, E. T., & Lestari, S. R.

- (2025). Isolation and characterization of endophytic bacteria from the roots of *Avicennia* sp. in the mangrove area of Gunung Anyar, Surabaya. *Jurnal Pembelajaran dan Biologi Nukleus*, 11(1), 219–232. <https://doi.org/10.36987/jpbn.v11i1.6596>
- Birkelbach, J., Seyfert, C. E., Walesch, S., & Muller, R. (2024). Harnessing Gram-negative bacteria for novel anti-Gram-negative antibiotics. *Microbial Biotechnology*, 17(1), 1–10. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.70032>
- Breijyeh, Z., Jubeh, B., & Karaman, R. (2020). Resistance of Gram-negative bacteria to current antibacterial agents and approaches to resolve it. *Molecules*, 25(6), Article 1340. <https://doi.org/10.3390/molecules25061340>
- Chau, K. M., Quyen, D. V., Fraser, J. M., Smith, A. T., Van, T. T. H., & Moore, R. J. (2020). Broad spectrum antimicrobial activities from spore-forming bacteria isolated from the Vietnam Sea. *PeerJ*, 8, Article e10117. <https://doi.org/10.7717/peerj.10117>
- Darabpour, E., Ardakani, M. R., Motamedi, H., & Ronagh, M. T. (2011). Isolation of a broad spectrum antibiotic producer bacterium, *Pseudoalteromonas piscicida* PG-02, from the Persian Gulf. *Bangladesh Journal of Pharmacology*, 6(2), 74–83. <https://doi.org/10.3329/bjpp.v6i2.8592>
- Fatimah, Rahayuningtyas, N. D., Nastiti, A., Alawiyah, D. D., Ramadhan, R., Gerald, A., & Junairiah. (2024). Antibacterial and biosurfactant activity of endophytic bacteria isolated from mangrove plant in Lamongan, Indonesia. *Biodiversitas*, 25(7), 3035–3042. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d250725>
- Gopalakrishnan, S., Sunder, J., Sasidharan, V., & Subramanian, S. E. (2016). Antibacterial activity of actinobacteria isolated from mangroves of Andaman and Nicobar Islands, India. *Advances in Animal and Veterinary Sciences*, 4(5), 230–236. <https://doi.org/10.14737/journal.aavs/2016/4.5.230.236>
- Gupta, P., & Diwan, B. (2017). Bacterial

- exopolysaccharide mediated heavy metal removal: A review on biosynthesis, mechanism, and remediation strategies. *Biotechnology Reports*, 13, 58–71. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.12.006>
- He, W., Huan, X., Li, Y., Deng, Q., Chen, T., Xiao, W., Chen, Y., Ma, L., Liu, N., Shang, Z., & Wang, Z. (2025). A broad-spectrum antibiotic targets multiple-drug-resistant bacteria with dual binding targets and no detectable resistance. *Nature Communications*, 16, Article 7048. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-62407-4>
- Hutchings, M. I., Truman, A. W., & Wilkinson, B. (2019). Antibiotics: Past, present and future. *Current Opinion in Microbiology*, 51, 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.mib.2019.10.008>
- Kapoor, G., Saigal, S., & Elongavan, A. (2017). Action and resistance mechanisms of antibiotics: A guide for clinicians. *Journal of Anaesthesiology Clinical Pharmacology*, 33(3), 300–305. https://doi.org/10.4103/joacp.JOACP_349_15
- Khairillah, Y. N., Alang, H., Haryanto, A., Syamsia, & Rismawati. (2024). Isolation and identification of bacteria producing antibiotic compounds from the rhizosphere of *Avicennia marina* against pathogenic bacteria in the mangrove ecosystem area of West Kalimantan. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*, 12(2), 1679–1691. <https://doi.org/10.33394/bioscientist.v12i2.12527>
- Munita, J. M., & Arias, C. A. (2016). Mechanisms of antibiotic resistance. *Microbiology Spectrum*, 4(2). <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.VMBF-0016-2015>
- Murray, C. J. L., Ikuta, K. S., Sharara, F., et al. (2022). Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: A systematic analysis. *The Lancet*, 399(10325), 629–655. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(21\)02724-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)02724-0)
- Muwawa, E. M., Makonde, H. M., Obieze, C. C., de Oliveira, I. G., Jefwa, J. M., Kahindi, J. H. P., & Khasa, D. P. (2024). Diversity and assembly patterns of mangrove rhizosphere mycobiome along the coast of Gazi Bay and Mida Creek in Kenya. *PLoS ONE*, 19(4), Article e0298237. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0298237>
- Palit, K., Rath, S., Chatterjee, S., & Das, S. (2022). Microbial diversity and ecological interactions of microorganisms in the mangrove ecosystem: Threats, vulnerability, and adaptations. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 32467–32512. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19048-7>
- Pramono, H., Irawan, N. T., Firdaus, M. R. A., Sudarno, Sulmartiwi, L., & Mubarak, A. S. (2019). Bacterial endophytes from mangrove leaves with antibacterial and enzymatic activities. *Malaysian Journal of Microbiology*, 15(7), 543–553. <https://doi.org/10.21161/mjm.190352>
- Sari, R., Apridamayanti, P., & Pratiwi, L. (2022). Efektivitas SNEDDS kombinasi fraksi etil asetat daun cengkodok (*Melastoma malabathricum*) - antibiotik terhadap bakteri hasil isolat dari pasien ulkus diabetik. *Pharmaceutical Journal of Indonesia*, 7(2), 105–114. <https://doi.org/10.21776/ub.pji.2022.007.02.5>
- Shanthakumar, S. P., Duraisamy, P., Vishwanath, G., Selvanesan, B. C., Ramaraj, V., & David, B. V. (2015). Broad spectrum antimicrobial compounds from the bacterium *Exiguobacterium mexicanum* MSSRFS9. *Microbiological Research*, 178, 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2015.06.007>
- Sharma, D., Kaur, T., Chadha, B. S., & Manhas, R. K. (2011). Antimicrobial activity of actinomycetes against multidrug resistant *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* and various other pathogens. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 10(6), 801–808. <https://doi.org/10.4314/tjpr.v10i6.14>
- Tumundo, C., Wewengkang, D. S., & Jumriadi. (2024). Uji potensi antibakteri ekstrak spons *Stylissa carteri* dari perairan Poopoh Minahasa terhadap bakteri *Staphylococcus*

-
- aureus* dan *Pseudomonas aeruginosa*. *PHARMACON*, 13(1), 529–539. <https://doi.org/10.35799/pha.13.2024.49697>
- Uddin, T. M., Chakraborty, A. J., Khusro, A., Zidan, B. M. R. M., Mitra, S., Emran, T., Dhama, K., Ripon, M. K. H., Gajdacs, M., Sahibzada, M. U. K., Hossain, M. J., & Koirala, N. (2021). Antibiotic resistance in microbes: History, mechanisms, therapeutic strategies and future prospects. *Journal of Infection and Public Health*, 14(12), 1750–1766. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2021.10.020>
- Zhang, Y., Gui, H., Zhang, S., & Li, C. (2022). Diversity and potential function of prokaryotic and eukaryotic communities from different mangrove sediments. *Sustainability*, 14(6), Article 3333. <https://doi.org/10.3390/su14063333>
- Zhongsheng, Y., Zhihao, Z., & Fang, L. (2023). Community structures of mangrove endophytic and rhizosphere bacteria in Zhangjiangkou National Mangrove Nature Reserve. *Scientific Reports*, 13, Article 17127. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44447-2>