

Peran Mikroorganisme Simbion dalam Meningkatkan Toleransi Terumbu Karang terhadap Kenaikan Suhu (Studi Literatur)

Janny Jovita Pakanan¹, Sri Misykat Azis^{2*}

¹ Program Studi Ilmu Lingkungan, Universitas Wira Bhakti dan janjovi88@wirabhaktimakassar.ac.id

^{2*} Program Studi Ilmu Lingkungan, Universitas Wira Bhakti dan misyaktazis29@wirabhaktimakassar.ac.id

ABSTRAK

Pemanasan laut akibat perubahan iklim telah menjadi ancaman serius bagi kelangsungan terumbu karang di seluruh dunia. Salah satu dampak utama dari pemanasan laut adalah pemutihan karang yang terjadi akibat gangguan dalam hubungan mutualisme antara karang dan *Symbiodinium*. Studi literatur menunjukkan bahwa peningkatan suhu laut tidak hanya menyebabkan pemutihan tetapi juga mempercepat pertumbuhan alga oportunistik serta meningkatkan risiko penyakit karang, yang pada akhirnya mempercepat degradasi ekosistem terumbu karang. Namun, penelitian terbaru mengungkapkan bahwa mikroorganisme simbion, termasuk *Symbiodinium*, bakteri, dan archaea, berperan penting dalam meningkatkan ketahanan karang terhadap stres termal. Beberapa strategi konservasi berbasis mikrobioma, seperti inokulasi mikroba tahan panas dan rekayasa komunitas mikrobioma, telah dikembangkan untuk meningkatkan ketahanan karang terhadap perubahan iklim. Selain itu, strategi mitigasi berbasis ekosistem dan pengurangan emisi gas rumah kaca juga menjadi langkah penting dalam menjaga kelestarian terumbu karang di masa depan.

Kata Kunci: Pemanasan Laut, Pemutihan Karang, Mikroorganisme Simbion, Konservasi Berbasis Mikrobioma, Perubahan Iklim

ABSTRACT

Ocean warming due to climate change has become a serious threat to the survival of coral reefs worldwide. One of the main impacts of ocean warming is coral bleaching, which occurs due to disruptions in the mutualistic relationship between corals and *Symbiodinium*. Literature studies indicate that rising sea temperatures not only cause bleaching but also accelerate the growth of opportunistic algae and increase the risk of coral diseases, ultimately hastening coral reef ecosystem degradation. However, recent studies have revealed that symbiotic microorganisms, including *Symbiodinium*, bacteria, and archaea, play a crucial role in enhancing coral resilience to thermal stress. Several microbiome-based conservation strategies, such as heat-tolerant microbial inoculation and microbiome community engineering, have been developed to improve coral resistance to climate change. Additionally, ecosystem-based mitigation strategies and greenhouse gas emission reductions are also essential steps in ensuring the future sustainability of coral reefs.

Keywords: Ocean Warming, Coral Bleaching, Symbiotic Microorganisms, Microbiome-Based Conservation, Climate Change

PENDAHULUAN

Pemanasan global telah menyebabkan peningkatan suhu air laut secara signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Laporan Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) tahun 2021 menyatakan bahwa suhu permukaan laut rata-rata global telah meningkat pada tingkat yang belum pernah terjadi sebelumnya dalam setidaknya 3.000 tahun terakhir akibat aktivitas manusia. Fenomena ini terutama disebabkan oleh peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer, yang menghambat pelepasan panas dari bumi dan menyebabkan akumulasi energi termal di lautan (Masson-Delmotte dkk., 2021).

Peningkatan suhu ini berdampak serius pada ekosistem laut, terutama terumbu karang yang sangat sensitif terhadap perubahan suhu. Salah satu dampak utama dari pemanasan laut

adalah pemutihan terumbu karang (coral bleaching), di mana karang kehilangan alga simbion fotosintetiknya, yaitu zooxanthellae. Zooxanthellae berperan penting dalam menyediakan hingga 90% energi yang dibutuhkan oleh karang melalui proses fotosintesis. Ketika suhu laut meningkat melebihi ambang batas toleransi karang, zooxanthellae mengalami stres dan dikeluarkan dari jaringan karang, menyebabkan warna karang memudar menjadi putih. Jika kondisi ini berlanjut, karang dapat mengalami kematian massal, mengancam keanekaragaman hayati laut dan fungsi ekosistem yang bergantung pada terumbu karang. Selain itu, degradasi terumbu karang dapat mengganggu ketahanan pesisir terhadap gelombang dan badai, yang pada akhirnya berdampak pada masyarakat pesisir yang bergantung pada sumber daya laut untuk mata pencaharian mereka (HS, 2024).

Namun, penelitian menunjukkan bahwa beberapa spesies terumbu karang mampu beradaptasi terhadap kenaikan suhu laut melalui berbagai mekanisme biologis dan ekologis. Salah satu mekanisme yang mendapat perhatian adalah peran mikroorganisme simbion, termasuk bakteri, archaea, dan fungi, yang dapat membantu karang meningkatkan toleransi terhadap stres termal. Mikroorganisme ini berkontribusi dalam berbagai aspek, seperti reduksi stres oksidatif, peningkatan ketahanan terhadap patogen, serta pengaturan metabolisme energi dan siklus nutrisi. Selain itu, ada indikasi bahwa beberapa spesies karang mampu mengalami perubahan ekspresi genetik dan komposisi komunitas mikrobiomnya untuk meningkatkan ketahanan terhadap kondisi lingkungan yang lebih hangat (Reef Resilience Network, 2025).

Pemahaman lebih lanjut mengenai hubungan antara terumbu karang dan mikroorganisme simbion dapat memberikan wawasan baru dalam strategi konservasi berbasis mikrobioma (*microbiome-based conservation*). Oleh karena itu, studi ini bertujuan untuk menganalisis peran mikroorganisme simbion dalam meningkatkan ketahanan terumbu karang terhadap kenaikan suhu laut melalui kajian literatur dari berbagai penelitian terbaru. Dengan pendekatan ini, diharapkan upaya konservasi dapat lebih efektif dalam melindungi ekosistem terumbu karang yang semakin terancam akibat perubahan iklim.

LANDASAN TEORI

Terumbu karang merupakan ekosistem laut yang sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan, terutama kenaikan suhu air laut akibat perubahan iklim. Pemanasan global yang dipicu oleh peningkatan emisi gas rumah kaca telah menyebabkan peningkatan suhu laut yang signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Kenaikan suhu ini menjadi salah satu faktor utama yang memicu pemutihan terumbu karang (*coral bleaching*), yaitu kondisi ketika karang mengalami stres termal dan melepaskan alga simbionnya, *zooxanthellae* (Hoegh-Guldberg dkk., 2017). *Zooxanthellae* berperan penting dalam proses fotosintesis yang menyediakan sebagian besar energi yang dibutuhkan oleh karang. Kehilangan *zooxanthellae* menyebabkan karang kehilangan sumber energi utamanya, melemah, dan menjadi lebih rentan terhadap penyakit serta kematian massal (Grottoli dkk., 2021).

Mekanisme adaptasi terumbu karang terhadap pemanasan laut melibatkan beberapa strategi biologis yang telah diidentifikasi dalam berbagai penelitian. Salah satu mekanisme yang terjadi adalah penggantian simbion *zooxanthellae* dengan spesies yang lebih

toleran terhadap suhu tinggi, seperti *Durusdinium*, yang lebih tahan terhadap suhu panas dibandingkan dengan simbion dari genus *Cladocopium* (Grottoli dkk., 2021). Pergantian simbion ini memungkinkan karang meningkatkan daya tahannya terhadap pemanasan laut melalui mekanisme yang dikenal sebagai *shuffling* atau *switching* komunitas simbion. Selain itu, regulasi genetik dan epigenetik juga berperan dalam meningkatkan ketahanan karang terhadap suhu tinggi. Karang dapat mengaktifkan gen yang berfungsi dalam perlindungan seluler, produksi protein kejutan panas (*heat shock proteins*), serta perbaikan DNA sebagai respons terhadap stres termal (van Oppen dkk., 2015).

Selain pergantian simbion dan regulasi genetik, mikroorganisme lain seperti bakteri, archaea, dan fungi juga memiliki kontribusi dalam meningkatkan ketahanan terumbu karang terhadap kenaikan suhu laut. Mikroorganisme ini dapat mengurangi stres oksidatif, meningkatkan sistem imun karang, serta membantu metabolisme energi dan detoksifikasi (Peixoto dkk., 2017). Beberapa bakteri simbion diketahui menghasilkan senyawa bioaktif yang melindungi karang dari infeksi patogen, terutama ketika suhu laut meningkat.

Selain mekanisme biologis, beberapa penelitian menunjukkan bahwa faktor lingkungan juga dapat memengaruhi ketahanan terumbu karang terhadap pemanasan laut. Variasi suhu alami yang terjadi di beberapa lokasi dapat membantu karang mengembangkan toleransi terhadap stres termal. Misalnya, karang yang hidup di lingkungan dengan fluktuasi suhu harian yang lebih tinggi cenderung lebih toleran terhadap pemanasan laut dibandingkan dengan karang yang hidup di perairan dengan suhu stabil (Palumbi dkk., 2014). Selain itu, keberadaan padang lamun dan hutan mangrove yang berdekatan dengan ekosistem terumbu karang dapat berperan sebagai zona perlindungan dengan menyediakan lingkungan yang lebih stabil dan mengurangi dampak stres termal pada karang (Anthony dkk., 2015).

Ketahanan terumbu karang terhadap pemanasan laut bergantung pada kombinasi adaptasi biologis, kondisi lingkungan, dan interaksi dengan mikroorganisme simbion. Studi lebih lanjut mengenai faktor-faktor ini menjadi penting dalam memahami sejauh mana karang dapat bertahan di tengah perubahan iklim serta dalam merancang strategi konservasi yang lebih efektif untuk melindungi ekosistem terumbu karang.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur dengan pendekatan *systematic review*. Pendekatan ini bertujuan untuk mengumpulkan, menilai, dan mensintesis temuan-temuan dari berbagai penelitian yang membahas adaptasi terumbu karang terhadap pemanasan laut. Dengan demikian, penelitian ini dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi ketahanan terumbu karang dalam menghadapi perubahan suhu laut.

Data yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari jurnal-jurnal ilmiah yang telah diterbitkan dalam kurun waktu sepuluh tahun terakhir. Sumber data utama mencakup database

akademik seperti Scopus, ScienceDirect, Springer, dan Google Scholar, yang menyediakan berbagai penelitian relevan dan telah melalui proses peer-review.

Dalam proses seleksi literatur, penelitian yang dimasukkan adalah studi yang secara spesifik membahas adaptasi terumbu karang terhadap pemanasan laut, termasuk interaksi antara terumbu karang dan mikroorganisme simbiotiknya. Sebaliknya, studi yang tidak berfokus pada pemanasan laut serta literatur non-ilmiah atau yang tidak melalui proses peer-review dikecualikan dari analisis.

Analisis data dilakukan dengan metode sintesis tematik. Hasil-hasil penelitian yang terkumpul dikelompokkan berdasarkan tema utama, seperti mekanisme adaptasi terumbu karang, peran mikrobioma dalam ketahanan terumbu, dan strategi konservasi berbasis mikrobioma. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi pola dan tren dalam penelitian yang telah dilakukan serta memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai ketahanan terumbu karang terhadap perubahan lingkungan.

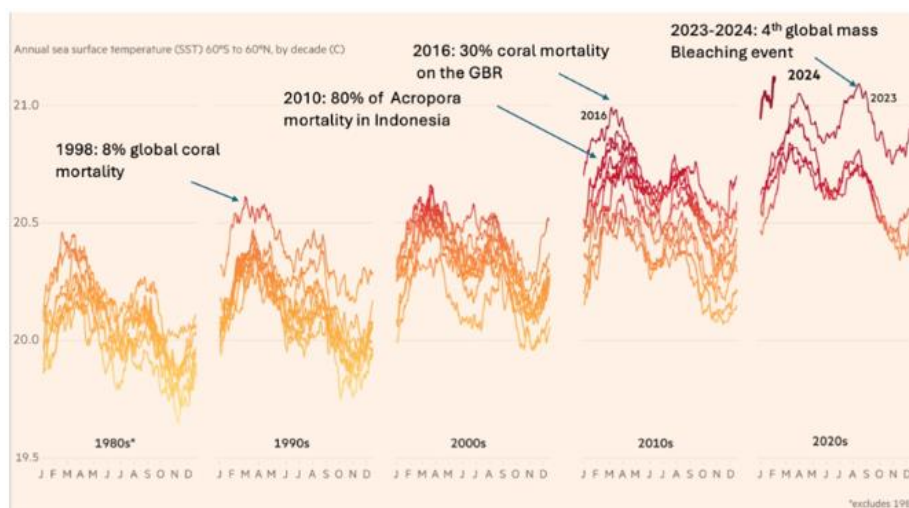
HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Dampak Pemanasan Laut terhadap Terumbu Karang

Analisis literatur menunjukkan bahwa pemutihan karang telah meningkat secara signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Sejak awal 2023, setidaknya 53 negara telah melaporkan peristiwa pemutihan terumbu karang massal akibat kenaikan suhu laut yang dipicu oleh perubahan iklim (Pristiandaru, 2024). Pemanasan laut menyebabkan stres termal yang mengganggu hubungan mutualisme antara karang dan dinoflagellata fotosintetik *Symbiodinium* (zooxanthellae), yang merupakan sumber utama energi bagi karang. Akibat stres ini, karang mengusir zooxanthellae, sehingga mengalami pemutihan dan berisiko mengalami kematian jika suhu laut tetap tinggi dalam jangka waktu yang lama (Hughes dkk., 2017).

Selain itu, peningkatan suhu laut juga dapat memicu laju pertumbuhan alga oportunistik yang bersaing dengan karang dalam memperoleh ruang dan sumber daya di ekosistem terumbu karang. Pertumbuhan alga berlebihan ini dapat menghambat pemulihan karang setelah mengalami pemutihan. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa perubahan suhu laut berkontribusi terhadap peningkatan kejadian penyakit karang, seperti *black band disease* dan *white syndrome*, yang mempercepat degradasi terumbu karang secara global (Muzahadah dkk., 2024).

Studi lebih lanjut mengindikasikan bahwa kemampuan terumbu karang untuk pulih setelah peristiwa pemutihan sangat bergantung pada frekuensi gangguan, kondisi lingkungan, dan ketersediaan larva karang yang dapat merekolonisasi area yang terdampak. Namun, pemanasan global yang terus meningkat membuat periode pemulihan semakin pendek, sehingga memperburuk dampak pemutihan yang terjadi secara berulang. Jika tren ini terus berlanjut, diperkirakan lebih dari 90% terumbu karang dunia dapat mengalami pemutihan tahunan pada akhir abad ke-21 (Reef Resilience Network, 2025).



Gambar 1. Tren kenaikan suhu laut global dan peristiwa pemutihan karang massal dari tahun 1980-an hingga 2024. Data menunjukkan bahwa pemanasan laut yang semakin intens telah meningkatkan kejadian pemutihan yang mengancam kelangsungan terumbu karang secara global.

B. Peran Mikroorganisme Symbion dalam Ketahanan Karang

Penelitian menunjukkan bahwa komunitas mikroba yang berasosiasi dengan karang memainkan peran penting dalam menjaga kesehatan dan ketahanan karang terhadap stres termal. Mikroorganisme simbiosis, termasuk *Symbiodinium*, bakteri, archaea, dan fungi, memiliki peran krusial dalam mempertahankan keseimbangan ekosistem mikro yang mendukung kelangsungan hidup karang (Bourne dkk., 2016).

Salah satu mekanisme utama mikroba simbiosis dalam membantu adaptasi karang terhadap pemanasan laut adalah kemampuannya dalam mengurangi stres oksidatif. Ketika karang mengalami peningkatan suhu, produksi spesies oksigen reaktif (*reactive oxygen species* atau ROS) meningkat, yang dapat menyebabkan kerusakan seluler dan mempercepat pemutihan. Beberapa bakteri simbiosis diketahui memiliki kemampuan untuk menurunkan ROS dan memberikan perlindungan tambahan terhadap stres termal (Ziegler dkk., 2019).

Selain itu, mikroba simbiosis juga terlibat dalam siklus nutrisi yang esensial bagi karang, seperti fiksasi nitrogen dan remineralisasi senyawa organik. Beberapa bakteri simbiosis dapat menghasilkan senyawa bioaktif yang memiliki sifat antibakteri dan antifungal, yang melindungi karang dari patogen dan penyakit yang dapat diperburuk oleh peningkatan suhu laut (Peixoto dkk., 2017). Salah satu contoh bakteri simbiosis dengan aktivitas antibakteri adalah *Virgibacillus marismortui*, yang ditemukan pada karang lunak *Sinularia sp.* di perairan Pulau Gili Labak, Madura. Penelitian menunjukkan bahwa bakteri ini mampu menghambat pertumbuhan *Escherichia coli* dengan zona hambat sebesar $2,207 \pm 0,401$ cm (Isolat L2.5). Temuan ini memberikan wawasan baru mengenai potensi mikroba simbiosis karang dalam mendukung ketahanan ekosistem karang serta pemanfaatannya dalam bioteknologi laut, khususnya dalam industri farmasi (Asih & Kartika, 2021).

Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa beberapa spesies *Symbiodinium* memiliki tingkat toleransi yang lebih tinggi terhadap suhu yang lebih hangat dibandingkan dengan spesies lainnya. Oleh karena itu, adanya fleksibilitas dalam komposisi komunitas *Symbiodinium* memungkinkan beberapa karang untuk beradaptasi dengan suhu yang lebih tinggi dengan cara beralih ke jenis *Symbiodinium* yang lebih tahan panas, meskipun adaptasi ini masih memiliki batasan

dan dapat mempengaruhi pertumbuhan serta reproduksi karang dalam jangka panjang (Grottoli dkk., 2021).

C. Strategi Konservasi Berbasis Mikrobioma

Pendekatan konservasi yang mempertimbangkan peran mikrobioma karang menjadi semakin penting dalam menghadapi tantangan pemanasan laut. Salah satu strategi yang diusulkan adalah **inokulasi mikroba tahan panas**, yaitu dengan mengintroduksi strain *Symbiodinium* yang lebih toleran terhadap suhu tinggi ke dalam populasi karang yang rentan. Teknik ini bertujuan untuk meningkatkan ketahanan karang terhadap pemanasan global dengan mengoptimalkan simbiosis antara karang dan mikroorganisme yang lebih adaptif (van Oppen dkk., 2015).

Selain itu, rekayasa komunitas mikrobioma karang juga menjadi salah satu pendekatan yang menjanjikan. Strategi ini mencakup manipulasi komposisi komunitas bakteri dan archaea yang berperan dalam meningkatkan ketahanan karang terhadap stres lingkungan. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa pemberian probiotik berbasis mikroba dapat mempercepat pemulihan karang setelah pemutihan dan mengurangi risiko infeksi penyakit (Rosado dkk., 2019).

Upaya rehabilitasi terumbu karang juga semakin berkembang melalui transplantasi fragmen karang dari populasi yang sehat ke area yang terdegradasi. Teknik ini melibatkan penanaman fragmen karang yang tahan terhadap suhu tinggi atau memiliki toleransi tinggi terhadap stres lingkungan. Beberapa proyek konservasi telah mengintegrasikan pendekatan ini dengan teknologi bioteknologi kelautan, seperti pemetaan genetik untuk mengidentifikasi spesies karang yang memiliki ketahanan lebih tinggi terhadap perubahan iklim (Baums dkk., 2019; Hs dkk., 2024).

Selain pendekatan berbasis biologi, strategi mitigasi berbasis ekosistem juga penting untuk mendukung kelangsungan hidup terumbu karang. Perlindungan habitat, pengelolaan sumber daya pesisir yang berkelanjutan, serta pengurangan emisi gas rumah kaca secara global merupakan langkah-langkah esensial untuk memperlambat laju pemanasan laut dan memastikan kelangsungan ekosistem terumbu karang dalam jangka panjang (Anthony dkk., 2015).

KESIMPULAN

Pemanasan laut akibat perubahan iklim telah menyebabkan peningkatan pemutihan terumbu karang secara global, yang berdampak pada ekosistem laut dan keanekaragaman hayati. Stres termal yang disebabkan oleh suhu laut yang tinggi mengganggu hubungan mutualisme antara karang dan *Symbiodinium*, serta meningkatkan risiko penyakit karang dan persaingan dengan alga oportunistik. Namun, mikroorganisme simbiosis berperan penting dalam membantu karang beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang ekstrem, terutama melalui pengurangan stres oksidatif, siklus nutrisi, dan perlindungan terhadap patogen. Oleh karena itu, strategi konservasi berbasis mikrobioma, seperti inokulasi mikroba tahan panas dan rekayasa komunitas mikroba, menjadi solusi potensial dalam meningkatkan ketahanan karang terhadap pemanasan laut. Selain itu, upaya rehabilitasi terumbu karang serta mitigasi berbasis ekosistem dan pengurangan emisi gas rumah kaca perlu terus dilakukan untuk memperlambat degradasi terumbu karang dan memastikan keberlanjutannya di masa depan.

REFERENSI

- Anthony, K. R. N., Marshall, P. A., Abdulla, A., Beeden, R., Bergh, C., Black, R., Eakin, C. M., Game, E. T., Gooch, M., Graham, N. A. J., Green, A., Heron, S. F., van Hooidonk, R., Knowland, C., Mangubhai, S., Marshall, N., Maynard, J. A., McGinnity, P., McLeod, E., ... Wear, S. (2015). Operationalizing resilience for adaptive coral reef management under global environmental change. *Global Change Biology*, 21(1), 48–61. <https://doi.org/10.1111/gcb.12700>
- Asih, E. N. N., & Kartika, A. G. D. (2021). Potensi dan Karakteristik Bakteri Symbion Karang Lunak *Sinularia* sp. Sebagai Anti Bakteri *Escherichia coli* dari Perairan Pulau Gili Labak Madura Indonesia. *Universitas Diponegoro*, 10(3), 355–362. <https://doi.org/10.14710/jmr.v10i3.30689>
- Baums, I. B., Baker, A. C., Davies, S. W., Grottoli, A. G., Kenkel, C. D., Kitchen, S. A., Kuffner, I. B., LaJeunesse, T. C., Matz, M. V., Miller, M. W., Parkinson, J. E., & Shantz, A. A. (2019). Considerations for maximizing the adaptive potential of restored coral populations in the western Atlantic. *Ecological Applications*, 29(8), e01978. <https://doi.org/10.1002/eap.1978>
- Bourne, D. G., Morrow, K. M., & Webster, N. S. (2016). Insights into the Coral Microbiome: Underpinning the Health and Resilience of Reef Ecosystems. *Annual Review of Microbiology*, 70, 317–340. <https://doi.org/10.1146/annurev-micro-102215-095440>
- Grottoli, A. G., Toonen, R. J., van Woesik, R., Vega Thurber, R., Warner, M. E., McLachlan, R. H., Price, J. T., Bahr, K. D., Baums, I. B., Castillo, K. D., Coffroth, M. A., Cuning, R., Dobson, K. L., Donahue, M. J., Hench, J. L., Iglesias-Prieto, R., Kemp, D. W., Kenkel, C. D., Kline, D. I., ... Wu, H. C. (2021). Increasing comparability among coral bleaching experiments. *Ecological Applications*, 31(4), e02262. <https://doi.org/10.1002/eap.2262>
- Hoegh-Guldberg, O., Poloczanska, E. S., Skirving, W., & Dove, S. (2017). Coral Reef Ecosystems under Climate Change and Ocean Acidification. *Frontiers in Marine Science*, 4. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00158>
- HS, S. M. (2024). Kenaikan Suhu Laut dan Kerusakan Karang: Analisis Dampak Jangka Panjang Terhadap Ekosistem Terumbu Karang. *West Science Press*, 3(8), 1195–1203. <https://doi.org/10.58812/jmws.v3i08.1569>
- Hs, S. M., Dharma, S., & Zainuddin, M. (2024). Utilizing Sediment Microbial Fuel Cells (SMFCs) for Bioremediation in Coral Transplantation at Samalona Island. *ARRUS Journal of Engineering and Technology*, 4(2), 165–175. <https://doi.org/10.35877/jetech3147>
- Hughes, T. P., Barnes, M. L., Bellwood, D. R., Cinner, J. E., Cumming, G. S., Jackson, J. B. C., Kleypas, J., van de Leemput, I. A., Lough, J. M., Morrison, T. H., Palumbi, S. R., van Nes, E. H., & Scheffer, M. (2017). Coral reefs in the Anthropocene. *Nature*, 546(1), 82–89. <https://doi.org/10.1038/nature22901>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, Ö., Yu, R., & Zhou, B. (Ed.). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Muzahadah, F., Shafira, F. E., & Faishal, M. (2024). RUSAKNYA EKOSISTEM TERUMBU KARANG AKIBAT PEMANASAN GLOBAL DALAM PERSPEKTIF HUKUM LAUT. *Universitas Balikpapan*, 6(I).
- Palumbi, S. R., Barshis, D. J., Traylor-Knowles, N., & Bay, R. A. (2014). Mechanisms of reef coral resistance to future climate change. *Science*, 344(6186), 895–898. <https://doi.org/10.1126/science.1251336>
- Peixoto, R. S., Rosado, P. M., Leite, D. C. de A., Rosado, A. S., & Bourne, D. G. (2017). Beneficial Microorganisms for Corals (BMC): Proposed Mechanisms for Coral Health and Resilience. *Frontiers in Microbiology*, 8, 341. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00341>
- Pristiandaru, D. L. (2024, April 16). *Krisis Iklim Makin Parah, 53 Negara Alami Pemutihan Terumbu Karang Massal Halaman all*. KOMPAS.com. <https://lestari.kompas.com/read/2024/04/16/120000186/krisis-iklim-makin-parah-53-negara-alami-pemutihan-terumbu-karang-massal>
- Reef Resilience Network. (2025). *Pemutihan Massal. Ancaman Iklim dan Manajemennya*. https://reefresilience.org/id/bleaching/mass-bleaching/?utm_source=chatgpt.com
- Rosado, P. M., Leite, D. C. A., Duarte, G. A. S., Chaloub, R. M., Jospin, G., Nunes da Rocha, U., P. Saraiva, J., Dini-Andreote, F., Eisen, J. A., Bourne, D. G., & Peixoto, R. S. (2019). Marine probiotics: Increasing coral resistance to bleaching through microbiome manipulation. *The ISME Journal*, 13(4), 921–936. <https://doi.org/10.1038/s41396-018-0323-6>

- van Oppen, M. J. H., Oliver, J. K., Putnam, H. M., & Gates, R. D. (2015). Building coral reef resilience through assisted evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(8), 2307–2313. <https://doi.org/10.1073/pnas.1422301112>
- Ziegler, M., Grupstra, C. G. B., Barreto, M. M., Eaton, M., BaOmar, J., Zubier, K., Al-Sofyani, A., Turki, A. J., Ormond, R., & Voolstra, C. R. (2019). Coral bacterial community structure responds to environmental change in a host-specific manner. *Nature Communications*, 10(1), 3092. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10969-5>