

Original research

Pemanfaatan *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA) sebagai Substrat Alternatif dalam Transplantasi Karang *Acropora* di Pulau Pahawang

Evaluating Fly Ash and Bottom Ash (FABA) as Alternative Substrates for Coral Transplantation in Pahawang Island

Novriadi Novriadi^{1*}, Andy Darmawan¹, Simon Martinus¹, Muhammad Kevin Syawaldi²¹Program Studi Biologi, Fakultas Sains, Institut Teknologi Sumatera, Lampung²Program Studi Sains Lingkungan dan Kelautan, Institut Teknologi Sumatera, Lampung

Email: novriadi@bi.itera.ac.id

Abstrak

Degradasi terumbu karang akibat perubahan iklim dan aktivitas manusia memicu perlunya upaya rehabilitasi. Saat ini upaya rehabilitasi yang umum dilakukan adalah transplantasi karang dengan substrat buatan. Penelitian ini mengevaluasi efektivitas *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA) sebagai substrat alternatif dibandingkan beton konvensional dalam transplantasi karang *Acropora* di Pulau Pahawang. Substrat dibuat dengan rasio beton : FABA (80:20) dan diuji terhadap parameter pertumbuhan dan tingkat kelangsungan hidup fragmen karang selama enam bulan. Hasil menunjukkan bahwa substrat berbasis FABA mendukung pertumbuhan karang lebih baik dibandingkan substrat beton, dengan nilai *Geometry Mean Dimension* (GMD) yang lebih tinggi secara signifikan ($p < 0,0001$). Selain itu, tingkat kelangsungan hidup karang pada substrat FABA mencapai 100%, lebih tinggi dibandingkan beton (85%). Keunggulan substrat FABA diduga berasal dari kandungan kalsium dan silika yang mendukung pembentukan kerangka kapur karang, serta keberadaan biofilm yang berperan dalam stabilisasi ekosistem mikro. Temuan ini menunjukkan bahwa FABA dapat menjadi alternatif yang lebih efisien dan ekonomis untuk substrat transplantasi karang, sekaligus menawarkan solusi pemanfaatan limbah industri secara berkelanjutan. Namun, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengkaji dampak jangka panjang FABA terhadap ekosistem laut.

Kata kunci: : *Acropora*, beton, FABA, transplantasi karang.

Abstract:

Coral reef degradation due to climate change and human activities has necessitated rehabilitation efforts. Currently, coral transplantation using artificial substrates is a widely adopted method. This study evaluates the effectiveness of Fly Ash and Bottom Ash (FABA) as an alternative substrate compared to conventional concrete in the transplantation of *Acropora* corals in Pahawang Island. The substrates were prepared with a concrete-to-FABA ratio of 80:20 and tested for coral fragment growth and survival rate over six months. The results indicate that FABA-based substrates supported coral growth more effectively than concrete substrates, with a significantly higher *Geometry Mean Dimension* (GMD) ($p < 0.0001$). Additionally, the survival rate of corals on FABA substrates reached 100%, exceeding that of concrete (85%). The superior performance of FABA substrates is presumed to be attributed to their calcium and silica content, which facilitates coral skeletal formation, as well as the presence of biofilm that contributes to micro-ecosystem stabilization. These findings suggest that FABA can serve as a more efficient and cost-effective alternative for coral transplantation substrates while offering a sustainable solution for industrial waste utilization. However, further research is required to assess the long-term impacts of FABA on marine ecosystems.

Keywords : *Acropora*, concrete, FABA, coral transplantation.

Pendahuluan

Terumbu karang merupakan ekosistem laut yang memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem pesisir serta sebagai habitat bagi berbagai jenis biota laut (Okubo & Onuma, 2015). Namun, degradasi ekosistem terumbu karang akibat perubahan iklim, aktivitas manusia, dan sedimentasi menjadi permasalahan yang semakin meningkat (IPBES, 2019). Oleh karena itu, upaya restorasi terumbu karang menjadi sangat penting untuk menjaga kelestariannya. Salah satu metode yang umum digunakan dalam restorasi adalah transplantasi

karang dengan bantuan substrat buatan (Ammar, 2014; Omori, 2011).

Substrat buatan yang digunakan dalam transplantasi karang harus memiliki karakteristik yang mendukung pertumbuhan karang, termasuk tekstur permukaan, kandungan mineral, serta kestabilan dalam lingkungan laut (Matus et al., 2021; Ramírez-Portilla et al., 2022). Beton merupakan salah satu bahan yang umum digunakan sebagai substrat dalam transplantasi karang karena sifatnya yang kuat dan tahan lama. Namun, penggunaan beton dalam jumlah besar membutuhkan biaya produksi yang cukup

tinggi. Oleh karena itu, diperlukan alternatif material yang lebih efektif dan ekonomis.

Fly Ash dan *Bottom Ash* (FABA), yang merupakan limbah hasil pembakaran batu bara, memiliki potensi untuk digunakan sebagai bahan campuran dalam pembuatan substrat buatan. FABA mengandung senyawa seperti kalsium dan silika yang dapat berperan dalam pertumbuhan kerangka kapur karang (Khasanah et al., 2019). Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa material dengan kandungan mineral tertentu dapat meningkatkan daya rekat dan pertumbuhan karang pada substrat buatan (Levenstein et al., 2022; Quinlan et al., 2019; Sunagawa et al., 2007). Namun, kajian mengenai efektivitas substrat berbasis FABA dalam mendukung pertumbuhan karang masih terbatas.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pertumbuhan dan tingkat kelangsungan hidup fragmen karang *Acropora* pada substrat berbasis beton dan substrat yang telah dicampur dengan FABA. Penelitian dilakukan di Dusun Jelarangan dan Cukunyai, Desa Pulau Pahawang, dengan metode transplantasi karang menggunakan mode penempelan *horizontal contact*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai potensi pemanfaatan FABA sebagai bahan alternatif dalam restorasi terumbu karang serta memberikan solusi yang lebih efisien dan ramah lingkungan dalam konservasi ekosistem terumbu karang.

Bahan dan Metode

Waktu dan Lokasi

Penelitian ini dilakukan pada bulan September 2024 hingga Februari 2025 dan berlokasi di dusun Jelarangan dan Cukunyai Desa Pulau Pahawang. Bahan FABA diambil dari pembangkit listrik PT Bukit Asam Tbk. Unit Pelabuhan Tarahan, Lampung. Berdasarkan dokumen teknis internal dan referensi industri, FABA yang digunakan merupakan hasil pembakaran sempurna batubara dengan suhu di atas 1000°C, yang menghasilkan residu bertekstur halus dan memiliki kandungan utama berupa kalsium, silika, serta alumina. Saat ini, FABA dari sumber tersebut telah dikaji dan diuji oleh beberapa lembaga, dan menurut ketentuan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan jenis FABA tertentu tidak lagi dikategorikan sebagai limbah B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) sesuai PP Nomor 22 Tahun 2021. FABA yang digunakan dalam penelitian ini sedang dalam proses uji lanjutan untuk analisis logam berat terlarut dan potensi bioakumulasi terhadap biota laut.

Pengukuran Parameter Lingkungan

Parameter lingkungan yang diambil di lokasi penelitian adalah salinitas, suhu, pH dan kecerahan. Data lingkungan yang didapat dibandingkan dengan tabel standar baku mutu air laut untuk biota dalam

Keputusan Kementrian Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 (Tabel 1).

Tabel 1. Standar baku mutu air laut untuk biota dalam Keputusan Kementrian Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004

No	Parameter	Baku mutu
1	Salinitas	32-34 ⁰ / ₀₀
2	Suhu	28-30 ⁰ C
3	pH	7-8,5
4	Kecerahan	>5m

Pembuatan Substrat

Metode pengujian transplantasi menggunakan media substrat beton berdimensi 20 cm (panjang), 10 cm (lebar), dan 3 cm (tinggi). Penelitian ini menggunakan dua perlakuan yaitu substrat beton murni dengan rasio pasir : semen (2:1) dan substrat beton bercampur FABA dengan rasio beton : FABA (4:1) dengan komposisi FA : BA (1:1). Komposisi FABA dalam beton mengambil presentase dari kandungan pasir. Masing-masing perlakuan dilakukan ulangan sebanyak delapan substrat.

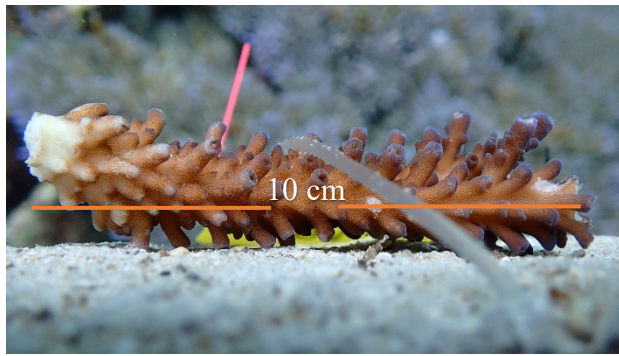
Persiapan Fragmen *Acropora* dan Mode Penempelan *Horizon Contact*

Fragmen *Acropora* diambil dari koloni disekitar lokasi. Fragmen dipotong sepanjang 10 cm lalu diletakkan secara horizontal pada substrat dengan tujuan untuk memperluas kontak jaringan halus maupun polip dari *Acropora* terhadap substrat. Hal ini diharapkan dapat mempercepat terbentuknya basal sekunder pada fragmen. Selain itu kami mencoba untuk menumbuhkan titik axial koralit baru dari radial koralit sehingga orientasi pertumbuhan dan percabangan bisa lebih luas dan rapat. Penempelan karang ke substrat menggunakan tali pancing untuk menghindari penggunaan semen (Gambar 1).

Sebanyak delapan substrat beton dan delapan substrat FABA diletakkan secara terpisah sejauh 500 meter. Proses perhitungan dilakukan secara manual dengan pencatatan panjang, lebar, dan tinggi selama enam bulan. Total volume pertumbuhan dihitung dengan *Geometry Mean Dimension* (GMD).

$$GMD = \sqrt[3]{p \times l \times t}$$

GMD = *Geometry Mean Dimension*
p = Panjang fragmen secara horisontal
l = Lebar karang
t = Tinggi karang



Gambar 1. Fragmen karang pada awal trasnplantasi

Nilai GMD pada substrat FABA dan beton selama 6 bulan diplotkan dalam diagram cartesius. Pola GMD substrat FABA dan beton dibandingkan dengan ANCOVA menggunakan package lsmeans (Russel. 2016) pada program R 4.2.2 (R Core Team. 2022).

Hasil dan Pembahasan

Data Parameter Lingkungan

Data parameter lingkungan dapat pada Tabel 2 menunjukkan data salinitas, suhu dan pH pada bulan pertama hingga bulan ke enam. Angka salinitas, suhu, dan pH dari area ini relatif stabil dan berada pada kondisi yang dikategorikan dalam kondisi yang mendukung kehidupan biota laut berdasarkan standar baku mutu dari Kementerian Lingkungan Hidup (Menteri Negara Lingkungan Hidup, 2004).

Tabel 2. Parameter lingkungan selama enam bulan di dusun Jelarangan Desa Pulau Pahawang

Bulan	Salinitas (ppt)	Suhu (°C)	pH	Kecerahan
1	32	27	7,9	8 m
2	32	28	7,7	7 m
3	32	27	7,8	7 m
4	31	27	7,9	6 m
5	32	28	7,8	8 m
6	32	28	7,9	7 m

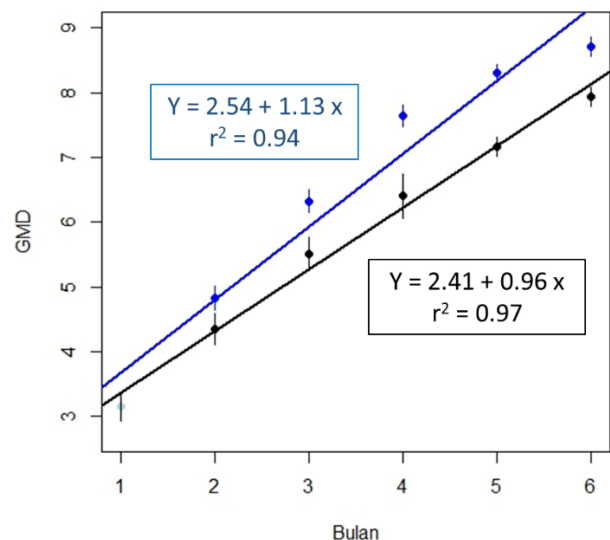
Data Pertumbuhan Karang

Hasil pengamatan pertumbuhan karang *Acropora* pada substrat beton dan FABA menunjukkan bahwa karang *Acropora* dapat tumbuh pada kedua jenis substrat tersebut. Hal ini berarti penggunaan semen dalam membuat substrat dapat dikurangi dan disubstitusi menggunakan FABA sehingga biaya pembuatan substrat dalam upaya transplantasi dapat ditekan.

Meskipun sama-sama menunjukkan pertumbuhan, namun pertumbuhan fragmen pada substrat FABA (garis biru) menunjukkan nilai pertumbuhan yang lebih besar dibanding pertumbuhan

fragmen karang pada sustrat beton (garis hitam) (p -value < 0.0001) (Gambar 2).

Perbedaan ini diduga karena kandungan kalsium dan silika yang terkandung dalam FABA cukup tinggi dan dibutuhkan bagi karang untuk membentuk kerangka kapurnya (Mass et al., 2017). Selain itu keberadaan biofilm yang menutupi substrat FABA (Gambar 3) memungkinkan kestabilan daur nutrisi pada ekosistem sekitar karang (Gómez-Lemos et al., 2018; Tebben et al., 2015).



Gambar 2. Grafik pertumbuhan fragmen karang *Acropora* pada substrat beton FABA (biru) dan beton murni (hitam) selama enam bulan pengamatan di desa Pulau Pahawang. Titik merupakan nilai rata-rata dan standar deviasinya.

Survival Rate

Angka laju bertahan hidup fragmen karang pada substrat beton selama enam bulan sebesar 85%. Karang yang mati mengalami kondisi pemutihan diduga akibat kegagalan menstabilkan fragmen dengan substrat. Penstabilan substrat pada awal transplantasi ditandai dengan keberhasilan karang membentuk basal sekunder. Pertumbuhan basal sekunder pada bulan pertama hingga bulan ketiga di sampel fragmen dapat dilihat pada Gambar 4-6. Beberapa karang pada substrat beton diduga mengalami kesulitan dalam membentuk basal sekunder akibat kondisi permukaan substrat beton yang terlalu halus. Karang membutuhkan permukaan yang kasar untuk memperbesar luas bidang penempelan jaringan atau planula karang (Gómez-Lemos et al., 2018; Lei et al., 2021). Sedangkan pada substrat FABA, presentase fragmen yang bertahan hingga bulan ke enam adalah 100%. Hal ini diduga karena permukaan substrat faba yang bertekstur sehingga memperbesar peluang penempelan jaringan karang dan mempermudah membentuk basal sekunder. Selain itu kandungan dalam FABA seperti *Crustose Coraline Algae (CCA)*, alga, dan bakteri

diduga dapat menjadi nutrisi bagi komponen biofilm (Lasut, 2002). Biofilm dapat membantu menstabilkan ekosistem mikro di sekitar fragmen karang (Petersen et al., 2021). Selain itu, biofilm memberikan semacam petunjuk (*chemical cue*) yang dapat ditangkap oleh organisme yang bersimbiosis dengan karang sehingga hal ini dapat membantu karang bertahan hidup (Sneed et al., 2014).



Gambar 3 Fragmen Karang dengan Biofilm



Gambar 4 Polip yang mulai membentuk basal sekunder pada bulan pertama



Gambar 5 Basal sekunder pada bulan kedua



Gambar 6 Basal sekunder pada bulan ketiga

Kesimpulan

Substrat FABa memiliki kemampuan dalam mendukung pertumbuhan karang dan memberi kesempatan bertahan hidup yang lebih baik dari substrat beton. Akan tetapi penelitian lebih lanjut tentang kandungan dari FABa secara presisi, bagaimana dampaknya bagi biota non karang, dan bagaimana mekanisme pelunturan bahan yang terkandung dalam FABa ke lingkungan perlu dilakukan.

Acknowledgement

Terimakasih kepada LPPM ITERA melalui Pusat Riset Hayati Berkelanjutan, PT. Bukit Asam Unit Peltar yang telah memberikan izin untuk mengambil sampel FABa. Ucapan terima kasih juga kepada Pemerintah Desa dan Kelompok Konservasi Desa Pulau Pahawang, Villa La Nadiya, Gaja Laut, Pusat Selam Lampung, dan Aragonite Research Club.

Conflict of Interest

Karya tulis ini tidak memiliki conflict of interest.

Referensi

- Ammar, M. S. A. (2014). Coral Reef Restoration and Artificial Reef Management, Future and Economic. *The Open Environmental Engineering Journal*, 2(1), 37–49. <https://doi.org/10.2174/1874829500902010037>
- Edwards, A. J., & Gomez, E. D. (2007). Reef restoration concepts and guidelines: Making sensible management choices in the face of uncertainty. In *Capacity Building for Management Programme/Coral Reef Targeted Research: St. Lucia*.
- Gómez-Lemos, L. A., Doropoulos, C., Bayraktarov, E., & Diaz-Pulido, G. (2018). Coralline algal metabolites induce settlement and mediate the inductive effect of epiphytic microbes on coral larvae. *Scientific Reports*, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-35206-9>
- IPBES. (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on*

- Biodiversity and Ecosystem Services*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6417333>
- Khasanah, R. I., Herawati, E. Y., Hariati, A. M., Mahmudi, M., Sartimbul, A., Wiadnya, D. G. R., Asrial, E., Yudatomo, & Nabil, E. (2019). Growth rate of acropora formosa coral fragments transplanted on different composition of faba kerbstone artificial reef. *Biodiversitas*, 20(12), 3593–3598. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d201218>
- Lasut, M. T. (2002). 'Metallothionein': Suatu Parameter Kunci Yang Penting Dalam Penetapan Baku Mutu Air Laut (Bmal) Indonesia. *Comparative and General Pharmacology*, 2(1), 61–68.
- Lei, X., Jiang, L., Zhang, Y., Sun, Y., Zhou, G., Lian, J., & Huang, H. (2021). Coral larval settlement and post-settlement survival facilitated by crustose coralline algae with or without living tissue. In *Marine Biology* (Vol. 168, Issue 8). <https://doi.org/10.1007/s00227-021-03943-7>
- Levenstein, M. A., Marhaver, K. L., Quinlan, Z. A., Tholen, H. M., Tichy, L., Yus, J., Lightcap, I., Wegley Kelly, L., Juarez, G., Vermeij, M. J. A., & Wagoner Johnson, A. J. (2022). Composite Substrates Reveal Inorganic Material Cues for Coral Larval Settlement. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(12), 3960–3971. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c08313>
- Mass, T., Giuffre, A. J., Sun, C.-Y., Stifler, C. A., Frazier, M. J., Neder, M., Tamura, N., Stan, C. V., Marcus, M. A., & Gilbert, P. U. P. A. (2017). Amorphous calcium carbonate particles form coral skeletons. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(37). <https://doi.org/10.1073/pnas.1707890114>
- Matus, I. V., Lino Alves, J., Góis, J., Barata da Rocha, A., Neto, R., & Da Silva Mota, C. (2021). Effect of 3D printer enabled surface morphology and composition on coral growth in artificial reefs. *Rapid Prototyping Journal*, 27(4), 692–706. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2020-0165>
- Menteri Negara Lingkungan Hidup. (2004). Keputusan Menteri Negara Nomor 51 Tahun 2004. *Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 51 Tahun 2004 Tentang Baku Mutu Air Laut*, 51, 1489–1498.
- Okubo, N., & Onuma, A. (2015). An economic and ecological consideration of commercial coral transplantation to restore the marine ecosystem in Okinawa, Japan. *Ecosystem Services*, 11, 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.07.009>
- Omori, M. (2011). *Degradation and restoration of coral reefs: Experience in Okinawa , Japan. 1000.* <https://doi.org/10.1080/17451001003642317>
- Petersen, L. E., Moeller, M., Versluis, D., Nietzer, S., Kellermann, M. Y., & Schupp, P. J. (2021). Mono- and multispecies biofilms from a crustose coralline alga induce settlement in the scleractinian coral *Leptastrea purpurea*. *Coral Reefs*, 40(2), 381–394. <https://doi.org/10.1007/s00338-021-02062-5>
- Quinlan, Z. A., Ritson-Williams, R., Carroll, B. J., Carlson, C. A., & Nelson, C. E. (2019). Species-Specific Differences in the Microbiomes and Organic Exudates of Crustose Coralline Algae Influence Bacterioplankton Communities. *Frontiers in Microbiology*, 10(November), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02397>
- Ramírez-Portilla, C., Bieger, I. M., Belleman, R. G., Wilke, T., Flot, J. F., Baird, A. H., Harii, S., Sinniger, F., & Kaandorp, J. A. (2022). Quantitative three-dimensional morphological analysis supports species discrimination in complex-shaped and taxonomically challenging corals. *Frontiers in Marine Science*, 9(September), 1–17. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.955582>
- Sneed, J. M., Sharp, K. H., Ritchie, K. B., & Paul, V. J. (2014). The chemical cue tetrabromopyrrole from a biofilm bacterium induces settlement of multiple Caribbean corals. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1786), 1–9. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.3086>
- Sunagawa, I., Takahashi, Y., & Imai, H. (2007). Strontium and aragonite-calcite precipitation. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 102(3), 174–181. <https://doi.org/10.2465/jmps.060327a>
- Tebben, J., Motti, C. A., Siboni, N., Tapiolas, D. M., Negri, A. P., Schupp, P. J., Kitamura, M., Hatta, M., Steinberg, P. D., & Harder, T. (2015). Chemical mediation of coral larval settlement by crustose coralline algae. *Scientific Reports*, 5, 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep10803>