



BAB 12

Restorasi Ekosistem Terumbu Karang Berbasis Inovasi Teknologi Pemanfaatan Limbah Batu Bara

Ruly Isfatul Khasanah, Endang Yuli Herawati, Yudatomo Tri Nugroho, Erry Nabil

A. Dari Limbah Abu Menjadi Terumbu Karang Baru

Terumbu karang merupakan salah satu ekosistem perairan tropik yang sangat produktif (Wilkinson, 2008). Komponen biota terpenting yang mendominasi pada ekosistem ini adalah hewan karang yang tergolong ke dalam ordo Scleractinia yang memiliki kerangka yang terbuat dari kapur (Nybakken, 1992). Peran ekologis yang dimainkan terumbu karang adalah sebagai daerah penyedia makanan, daerah asuhan, daerah pertumbuhan, dan daerah perlindungan bagi biota-biota yang berasosiasi dengan terumbu karang serta sebagai penyimpan karbon (Simarangkair et al., 2015). Terumbu karang memiliki

R.I. Khasanah*, E.Y. Herawati, Y.T. Nugroho, & E. Nabil.

*Universitas Islam Negeri Sunan Ampel Surabaya, *e-mail*: ulick.isfatul@gmail.com

© 2023 Editor & Penulis

Khasanah, R. I., Herawati, E. Y., Nugroho, Y. T., & Nabil, E. (2023). Restorasi ekosistem terumbu karang berbasis inovasi teknologi pemanfaatan limbah batu bara. Dalam K. Amri, H. Latuconsina, & R. Triyanti (Ed.), *Pengelolaan sumber daya perikanan laut berkelanjutan* (423–464). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.908.c763 E-ISBN: 978-623-8372-50-8

keunikan simbiosis, yaitu antara hewan karang dan *zooxanthella* yang mampu menyerap karbon untuk proses fotosintesis dan menghasilkan oksigen (Patty & Simon, 2015). Selain itu, terumbu karang juga sangat berpotensi menyimpan karbon di dalam kerangkanya (Muzaki, 2019).

McManus (2001) mengatakan bahwa laut menyerap sekitar sepertiga dari CO₂ antropogenik yang masuk ke atmosfer. CO₂ yang diserap oleh laut dimanfaatkan oleh organisme laut untuk fotosintesis dan pembentukan kerangka kapur. Salah satu yang memanfaatkan CO₂ adalah hewan karang (*Scleractinia*) yang bersimbiosis dengan *zooxanthellae*. Pada hewan karang terjadi proses fotosintesis dan respirasi. Oksigen yang dihasilkan dari proses fotosintesis dikonsumsi oleh hewan karang, sedangkan CO₂ yang dihasilkan dari respirasi hewan karang merupakan pasokan utama karbon. Pasokan karbon ini tidak hanya berasal dari respirasi hewan karang, tetapi juga berasal dari lingkungan luar yang dimanfaatkan hewan karang untuk proses fotosintesis dan kalsifikasi (Moulding, 2005). Kalsifikasi karang sangat bergantung pada cahaya, nutrisi, suhu, dan aroganit (mineral karbonat) (Kambey, 2013). Hutagalung dan Julianty (2013) menyatakan bahwa hewan karang dapat mendaur ulang karbon dioksida, peningkatan karbon dioksida di alam dapat meningkatkan pemanasan global. Proses kalsifikasi pada hewan karang dapat menyimpan karbon dalam kerangka karang sehingga dapat mengurangi karbon pada atmosfer yang merupakan penyebab pemanasan global (*global warming*) (Sunarto, 2006).

Ekosistem terumbu karang ini sangat rentan mengalami kerusakan. Ada dua penyebab kerusakan terumbu karang, yaitu pengaruh dari kegiatan manusia dan pengaruh dari alam. Kerusakan yang disebabkan oleh kegiatan manusia merupakan ancaman utama bagi keselamatan terumbu karang (Dahuri, 2003). Kerusakan terumbu karang makin meningkat setiap tahunnya akibat ketergantungan manusia terhadap sumber daya hayati dari ekosistem terumbu karang (Fachrurrozie et al., 2012).

Upaya restorasi terumbu karang, terutama memulihkan kembali fungsi dan peran terumbu karang, perlu dilakukan. Salah satu upaya untuk menanggulangi masalah kerusakan ekosistem terumbu karang serta mencari alternatif untuk mengurangi tekanan terhadap perusakan terumbu karang dapat dilakukan dengan cara transplantasi karang. Transplantasi karang merupakan upaya pencangkokan atau pemotongan karang hidup untuk ditanam di tempat yang telah ditentukan atau di tempat yang karangnya telah mengalami kerusakan. Transplantasi karang berperan dalam mempercepat regenerasi terumbu karang yang telah rusak dan menambah jumlah karang dewasa untuk meningkatkan produksi planula (Fachrurrozie et al., 2012) serta untuk mempercepat *recovery* dan penutupan karang hidup (Edward, 1999).

Substrat alami (terumbu) karang mengandung unsur silikat, magnesium, aluminium, ferum, dan kalsium (Guntur et al., 2018). Unsur-unsur tersebut juga ditemukan dalam bahan limbah batu bara PLTU, yaitu *fly ash* dan *bottom ash*, keduanya mengandung silikat, kalsium, aluminium, besi, dan magnesium relatif tinggi yang berbeda. Hal ini yang mendasari ide media tumbuh transplantasi. Unsur-unsur tersebut sangat dibutuhkan untuk mendukung pertumbuhan karang pada media buatan, terutama dalam proses kalsifikasi karang yang sangat bergantung pada kondisi perairan, tetapi substrat memberikan pengaruh yang sangat nyata pada pertumbuhan karang (Scoffin et al., 1980).

Limbah dominan yang dimanfaatkan dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berupa limbah abu (*fly ash* dan *bottom ash*, atau biasa disingkat FABA). Selama ini, limbah abu tersebut telah dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan *paving block* atau batako dan campuran industri semen. Untuk memastikan bahwa produk *paving* dari limbah abu ini tidak berpotensi mencemari lingkungan, dilakukan uji *Toxicity characteristic leachate procedure* (TCLP) terhadap produk paving di Laboratorium ALS Indonesia, dan hasil

pengujian tersebut menunjukkan bahwa bahan tersebut aman dan bebas dari bahan beracun berbahaya, dinyatakan tidak mengandung racun dan tidak berbahaya (non-B3) dalam SK.183/MenLHK/Setjend/PSLB.3/3/2016.

Hingga kini belum ada media/terumbu tumbuh buatan yang berasal dari limbah abu PLTU untuk transplantasi karang. Uji coba dan riset transplantasi menggunakan media berbahan FABA telah dilakukan sejak tahun 2018 dan masih berlangsung hingga saat ini (2023) di perairan Paiton, Kabupaten Probolinggo; perairan Taman Nasional Baluran, Jawa Timur; perairan Pasir Putih, Situbondo; dan perairan Grand Watu Dodol (GWD), Banyuwangi. Sebagai upaya pengayaan pemanfaatan limbah abu tersebut, dalam bab ini dibahas mengenai inovasi tersebut yang menyumbangkan nilai penting bagi ekosistem perairan pesisir dan sebagai langkah dalam memberikan kontribusi nyata dalam mendukung program pemulihan ekosistem terumbu karang dunia.

B. Transplantasi Terumbu Karang dengan Media FABA: Studi Kasus Restorasi di Perairan PLTU Paiton, Probolinggo, Jawa Timur

Restorasi terumbu karang berbasis riset ini dilakukan sejak tahun 2017 dan berkelanjutan hingga saat ini (2023). Awalnya sebagai uji coba transplantasi terumbu karang bermedia FABA (*fly ash* dan *bottom ash*) di perairan pesisir sekitar PLTU Paiton, Probolinggo, Jawa Timur. Di lokasi tersebut digunakan kanstin FABA sebagai media tumbuh transplantasi karang. Kanstin FABA adalah inovasi produk mirip *paving block*/batako yang terbuat dari *fly ash* dan *bottom ash* yang merupakan limbah dominan yang dimanfaatkan sebagai bahan bakunya.

Hasil uji *toxicity characyeristic leachate procedure* (TCLP) menunjukkan bahwa *fly ash* dan *bottom ash* mengandung unsur-unsur,

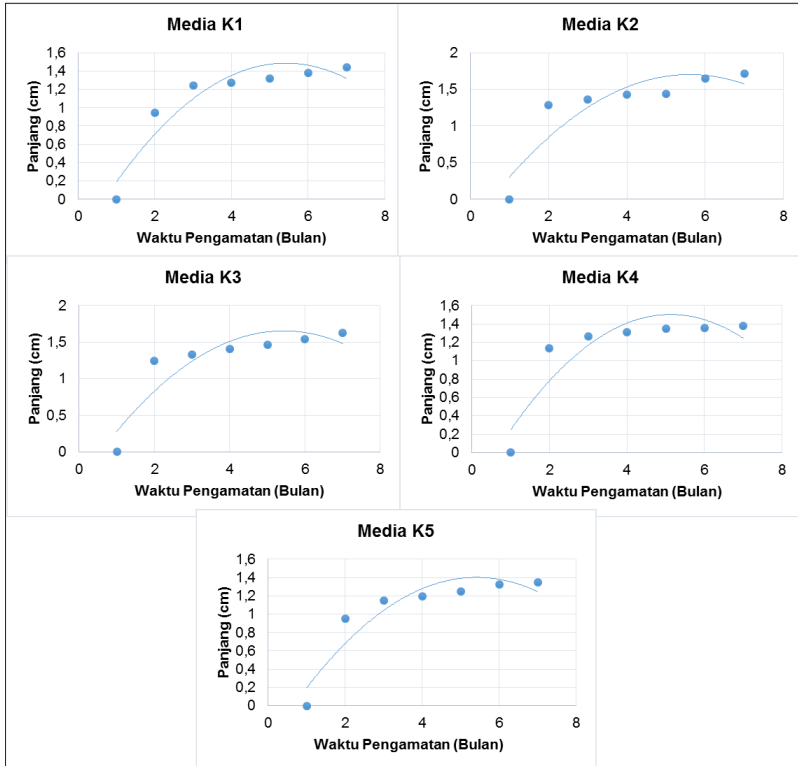
antara lain magnesium (MgO), kalsium (CaO), aluminium (Al₂O₃), dan zat besi (Fe₂O₃) serta silikat (SiO₂) yang sangat dibutuhkan untuk pertumbuhan karang sehingga akan memberi pengaruh dan menyumbang kebutuhan hidup jenis karang *Acropora* spp. dan mendukung kecepatan pertumbuhan karang *Acropora* sp. tersebut serta akhirnya memberi nilai lebih baik, bagi pemanfaatan limbah maupun upaya rehabilitasi terhadap lingkungan perairan pesisir PLTU utamanya.

Acropora branching merupakan bentuk yang berasal dari karang *Acropora* yang mempunyai koloni bercabang. Karang *Acropora* memiliki tingkat pertumbuhan dan sekaligus pemulihan yang cepat apabila dibandingkan dengan bentuk karang lainnya (Suharsono, 1984). Karakter ini yang menjadi dasar pemilihan karang jenis *Acropora* sp. (Wilkinson, 2008) dijadikan sebagai transplan pada media buatan (kanstin FABA) yang telah dilakukan uji coba dalam studi ini.

Hasil penelusuran literatur menunjukkan bahwa belum ada referensi penelitian terdahulu tentang seberapa banyak kandungan unsur magnesium (MgO), kalsium (CaO), aluminium (Al₂O₃), dan zat besi (Fe₂O₃) serta silikat (SiO₂) dari substrat alami yang dibutuhkan jenis karang *Acropora* untuk tumbuh optimum.

Hasil riset Khasanah et al. (2019) menyebutkan bahwa laju pertumbuhan dan kelulushidupan (*survival rate*) jenis *Acropora* sp. relatif baik. Yang memiliki laju pertumbuhan tertinggi adalah *Acropora formosa* dan *Acropora pulchra* dengan tingkat kelangsungan hidup 82,61% dan 80,95%; serta laju pertumbuhan masing-masing 1,958 dan 1,730 cm/bulan. Hal ini menunjukkan bahwa FABA sangat *eligible* (memenuhi syarat) dan *feasible* (layak) digunakan untuk kegiatan rehabilitasi terumbu karang.

Pertambahan tinggi, diameter dan cabang fragmen *Acropora formosa* dan *A pulchra* disajikan dalam bentuk kurva pertumbuhan pada Gambar 12.1.



Keterangan: K1: 100% *bottom ash*
 K2: 75 % *fly ash* dan 25 % *bottom ash*
 K3: 50 % *fly ash* dan 50 % *bottom ash*
 K4: 25 % *fly ash* dan 75 % *bottom ash*
 K5: 100 % *fly ash*

Sumber: Khasanah et al. (2019)

Gambar 12.1 Pertambahan Panjang *Acropora formosa* di Variasi Media



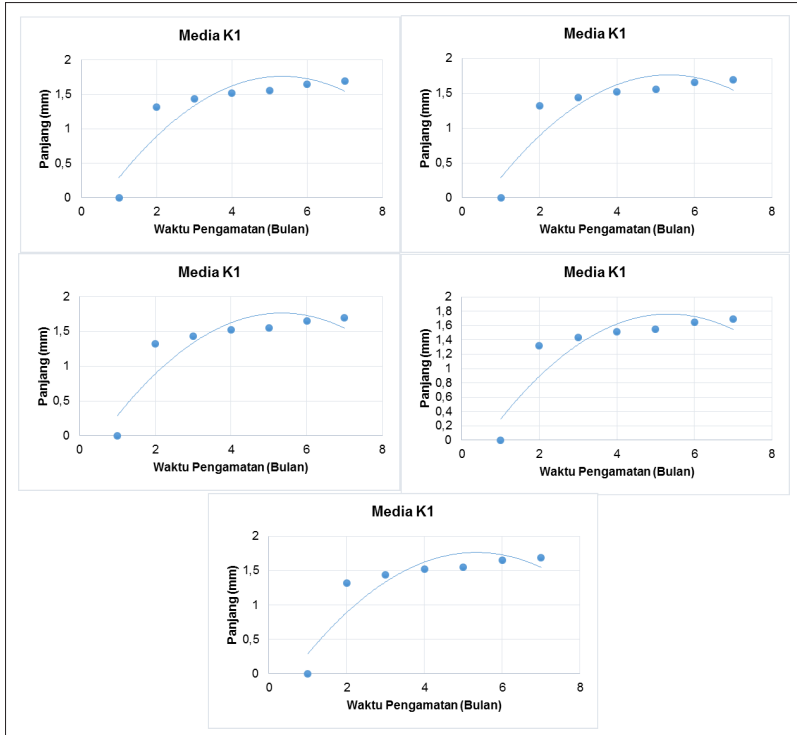
Sumber: Khasanah et al. (2019)

Gambar 12.2 Fragmen *Acropora formosa* Usia Satu Bulan Setelah Ditransplantasi



Sumber: Khasanah et al. (2019)

Gambar 12.3 Fragmen *Acropora formosa* Usia Satu Tahun yang Ditransplantasi pada Media FABA



Keterangan: K1: 100% *bottom ash*
 K2: 75 % *fly ash* dan 25 % *bottom ash*
 K3: 50 % *fly ash* dan 50 % *bottom ash*
 K4: 25 % *fly ash* dan 75 % *bottom ash*
 K5: 100 % *fly ash*

Sumber: Khasanah et al. (2019)

Gambar 12.4 Pertambahan Panjang *Acropora pulchra* di Variasi Media

Gambar 12.1 dan 12.4 menunjukkan bahwa pertumbuhan panjang cabang, baik pada *Acropora formosa* maupun *Acropora pulchra*, memiliki pertumbuhan optimum pada bulan pertama dan mencapai puncaknya pada bulan kelima di semua variasi media. Pada bulan keenam pasca-transplantasi, pertumbuhan karang mulai mengalami perlambatan yang dibuktikan dengan terjadinya kurva penurunan

pada masa tersebut. Hal ini disebabkan adanya proses retardasi, yaitu terjadinya perlambatan pertumbuhan karang akibat adanya kompetisi dengan alga terkait kebutuhan nutrisi yang dibuktikan dengan makin meningkatnya unsur nitrat dan fosfat.

Menurut Pastorok dan Bilyard (1985), terjadinya peningkatan unsur hara nitrogen dan fosfor akan mempercepat laju pertumbuhan fitoplankton. Tingginya laju pertumbuhan fitoplankton akan menekan laju pertumbuhan karang melalui dua cara, yaitu pertama, mengurangi penetrasi cahaya yang akan mengganggu aktivitas *zooxanthellae* dan kedua, meningkatkan laju pertumbuhan alga jenis lain yang memiliki sifat *filter feeder* dan akan menyebabkan terjadinya kompetisi makan dengan hewan karang (Haris, 2000). Terjadinya perlambatan pertumbuhan ini disebabkan adanya proses retardasi. Terjadinya pertumbuhan alga yang signifikan dapat menyebabkan kematian pada karang karena daya adaptasi dan daya saing karang lebih rendah jika dibandingkan alga dalam perebutan unsur hara perairan (Hakanson & Bryhn, 2008).

Selain itu, terjadinya perlambatan laju pertumbuhan karang pada bulan keenam juga disebabkan oleh penurunan tingkat kecerahan perairan. Hal ini menyebabkan makin kecilnya intensitas cahaya yang masuk ke kolom perairan sampai ke karang sehingga mengakibatkan makin rendahnya laju fotosintesis yang dilakukan oleh *zooxanthellae* (Haris, 2000). Rendahnya laju fotosintesis akan menyebabkan tidak terpenuhinya energi untuk laju pertumbuhan karang yang berasal dari translokasi produk fotosintesa dari *zooxanthellae* dan menyumbang sebagian besar energi untuk proses metabolisme karang (Haris, 2000). Rendahnya energi yang digunakan untuk proses fotosintesis akan menyebabkan terjadinya penurunan proses kalsifikasi pada karang. Hal ini menyebabkan laju pembentukan terumbu mengalami penurunan sehingga laju pertumbuhan pada karang mengalami perlambatan (Supriyadi, 2019).

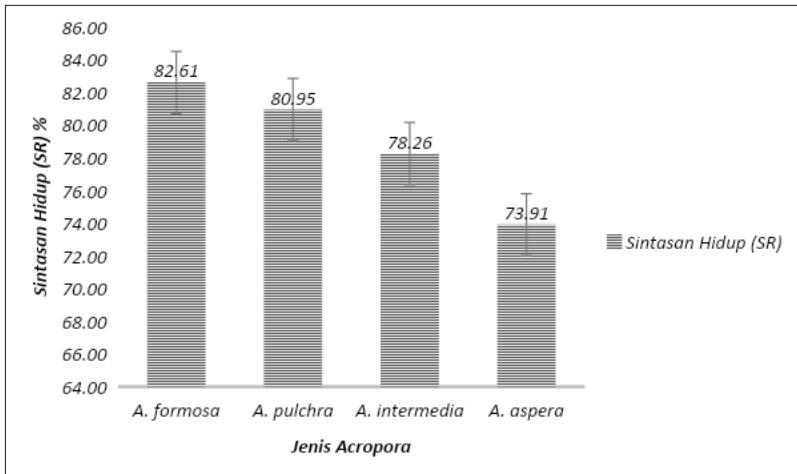
Selain itu, yang menjadi penyebab kekeruhan di lokasi transplantasi adalah sedimentasi. Sedimentasi pada ekosistem

terumbu karang memberikan dampak negatif terhadap kehidupan dan pertumbuhan karang melalui proses *shading* dan *covering* (Partini, 2009). Berdasarkan penelitian Khasanah (2020), laju sedimentasi terukur di lokasi penelitian sebesar 25,57 mg/cm²/hari. Salah satu faktor lain yang memengaruhi laju sedimentasi ini adalah arus sebagai media transpor sedimen. Kondisi arus yang rendah akan menyebabkan sedimen lebih mudah mengendap di fragmen karang transplantasi.

Riset sebelumnya telah dipublikasi dalam jurnal ilmiah bereputasi, Khasanah (2020) menyebutkan bahwa pelaksanaan transplantasi menggunakan karang jenis *Acropora formosa*, *A. pulchra*, *A. Intermedia*, dan *A. aspera*. Karang jenis ini digunakan sebagai fragmen transplantasi karena memiliki daya tahan hidup yang tinggi dengan laju pertumbuhan yang relatif cepat (Harriot & Fisk, 1998). Salah satu instrumen yang dapat digunakan untuk mengukur kesuksesan suatu transplantasi karang adalah ketahanan hidup fragmen (*survival rate*) (Partini, 2009). Perbedaan ketahanan hidup (*survival rate*) masing-masing spesies fragmen karang transplantasi dapat dilihat pada Gambar 12.5.

Gambar 12.5 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan tingkat kelangsungan hidup (*survival rate*) pada setiap jenis. Karang jenis *Acropora formosa* memiliki tingkat kelangsungan hidup (*survival rate*) tertinggi dengan nilai sebesar 82,61% dan karang jenis *Acropora aspera* memiliki kelangsungan hidup (*survival rate*) terendah yaitu sebesar 73,91%.

Tingkat kelangsungan hidup karang adalah hal yang penting, yaitu makin tinggi ketahanan hidup karang maka makin tinggi pula persentase tutupan karang dan dapat meningkatkan jumlah ikan (Fadli, 2008). Ketahanan hidup dari suatu karang dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah satunya tingkat stres dari fragmen karang. Tingkat stres karang dipengaruhi oleh berbagai faktor, di antaranya ukuran fragmen dan kondisi lingkungan. Ukuran fragmen yang kecil menyebabkan jumlah *zooxhantelae* yang berasosiasi menjadi lebih sedikit dan menjadikan fragmen lebih rentan terhadap



Sumber: Khasanah et al. (2019)

Gambar 12.5 *Survival Rate Acropora* sp. yang Ditransplantasi pada Media Kanstin FABA

kematian (Nurman et al., 2017). Salah satu kondisi lingkungan yang memengaruhi ketahanan hidup (*survival rate*) dari fragmen karang adalah kecerahan, yaitu makin tinggi nilai kecerahan perairan maka cahaya yang sampai ke fragmen makin besar. Cahaya merupakan faktor pembatas kehidupan terumbu karang, terutama untuk karang bercabang yang membutuhkan cahaya lebih banyak karena memiliki polip dengan ukuran kecil (Fadli, 2008).

C. Transplantasi Terumbu Karang dengan Media FABA: Studi Kasus Rehabilitasi di Perairan Taman Nasional Baluran, Jawa Timur

Ada dua jenis terumbu karang yang ditransplantasi ke media FABA di Perairan Taman Nasional Baluran, yakni jenis *Acropora* spp. dan *Montifora* spp.

1. Transplantasi Jenis Karang *Acropora* spp.

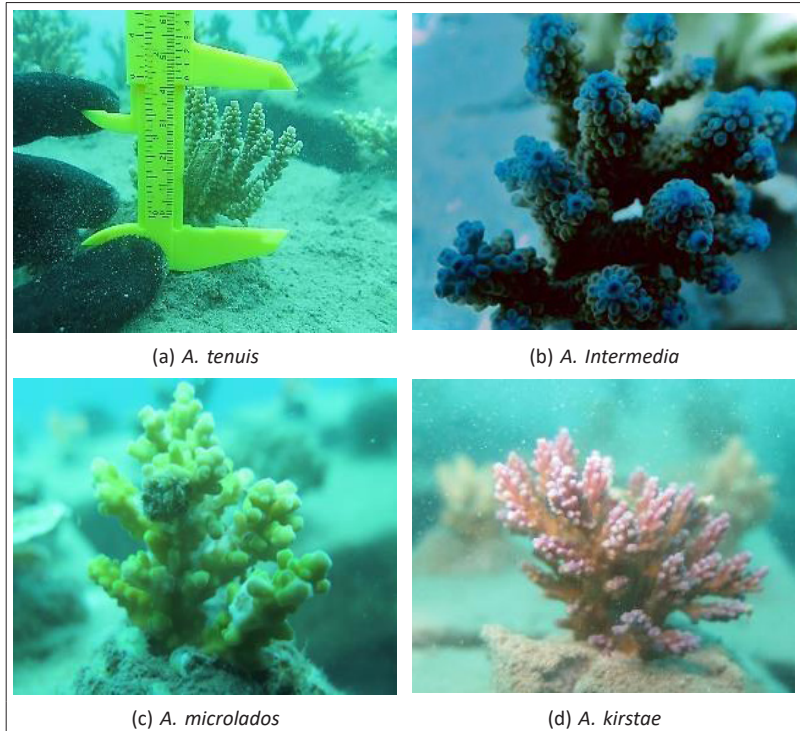
Metode yang digunakan dalam restorasi terumbu karang ini adalah metode *basic escape* dengan substrat kanstin berbentuk H dengan masing-masing unit (modul) terdiri dari tujuh blok kanstin FABA. Satu unit kanstin FABA berukuran $40 \times 5 \times 15$ cm dengan kedalaman perairan 7–8 cm.



Sumber: Khasanah (2020)

Gambar 12.6 Susunan Media FABA di Dasar Perairan

Setiap unit dibuat enam lubang sebagai tempat menjulurkan pecahan karang yang akan ditransplantasikan. Ukuran fragmen karang *Acropora* yang digunakan adalah 8 cm. Jenis yang ditransplantasikan adalah *Acropora intermedia*, *Acropora tenuis*, *Acropora microlados* dan *Acropora kirskyae*. Setiap jenis ditransplantasikan pada lima unit kanstin.

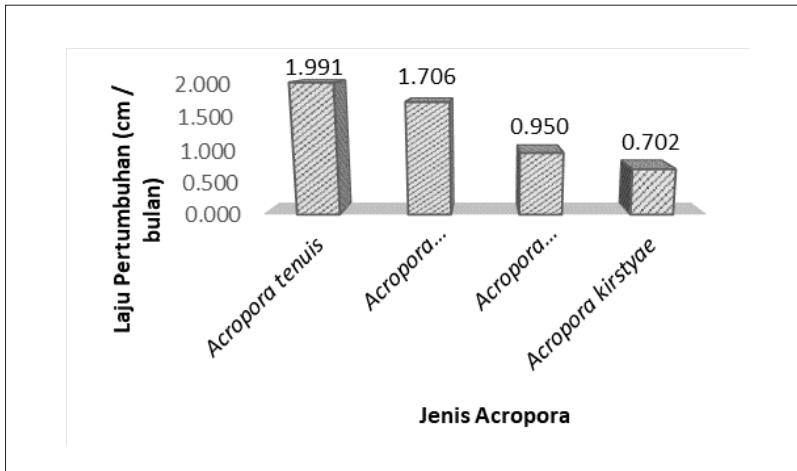


Keterangan: (a) *A. tenuis*, (b) *A. Intermedia*, (c) *A. microlados*, dan (d) *A. kirstae*
 Sumber: Khasanah (2020)

Gambar 12.7 Jenis *Acropora* yang Ditransplantasi pada Media FABA

a. Laju Pertumbuhan Transplantasi Jenis Karang *Acropora* spp.

Hasil laju pertumbuhan fragmen karang *Acropora tenuis*, *A. Intermedia*, *A. microlados*, dan *A. kirstyae* di perairan Pantai Bama, Taman Nasional Baluran, sebagaimana yang disajikan pada Gambar 12.8.



Gambar 12.8 Rerata Laju Pertumbuhan Jenis Karang *Acropora* spp. yang Ditransplantasikan pada Batu-batu Kanstin FABa Selama Lima Bulan

Selama lima bulan sejak karang *Acropora* ditransplantasikan, diperoleh rata-rata laju pertumbuhan yang berbeda. *Acropora tenuis* memiliki laju tertinggi 1,991 cm/bulan, *Acropora mikrolados* 0,950 cm/bulan, *Acopora intermedia* 1,706 cm/bulan; dan *Acropora kirskyae* 0,702 cm/bulan (Gambar 12.8). Laju pertumbuhan keempat jenis *Acropora* tersebut tidak dapat dibandingkan karena masing-masing memiliki karakter morfologi yang berbeda. Pemanfaatan fragmen karang bercabang *Acropora* didasarkan pada kemampuan bertahan hidup yang tinggi dan laju pertumbuhan yang relatif cepat dibandingkan jenis lainnya (Nurman et al., 2017). Perbedaan morfologi antarjenis fragmen yang ditanam pada penelitian ini akan memberikan pengaruh yang beragam, seperti jumlah cabang yang dihasilkan dan besar-kecilnya cabang fragmen. Hal ini akan memengaruhi jumlah *zooxhantellae* yang berasosiasi dengan karang dan memengaruhi laju fotosintesis yang dihasilkan. Selain dipengaruhi oleh faktor internal seperti bentuk morfologi, laju pertumbuhan karang yang ditransplantasikan juga dipengaruhi oleh berbagai

faktor eksternal, termasuk media yang digunakan. Begitu juga dengan faktor lingkungan di perairan Baluran mendukung kehidupan biota laut, memenuhi standar baku mutu berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. 51 Tahun 2004.

Jenis media dan metode transplantasi yang digunakan akan memengaruhi keberhasilan kegiatan transplantasi karang. Hal ini terkait dengan tingkat adaptasi dan stres fragmen yang ditransplantasikan yang sangat memengaruhi kehidupan dan pertumbuhan fragmen tersebut. Penelitian ini dimaksudkan untuk memperjelas apakah batu kerb adalah media yang cocok untuk semua jenis *Acropora*.

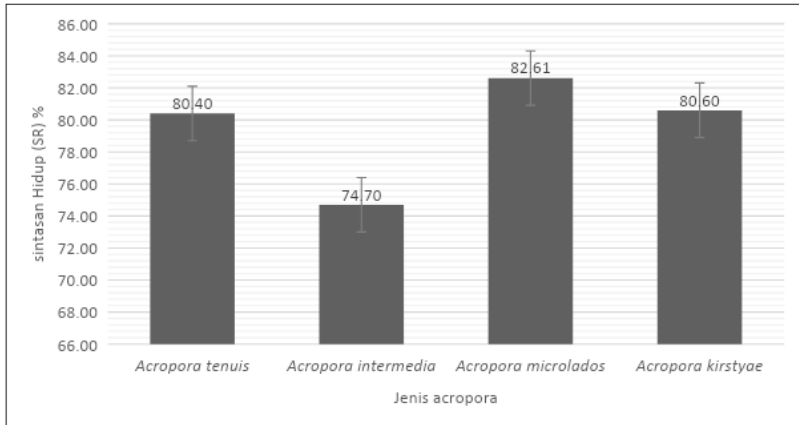
Perbedaan laju pertumbuhan fragmen karang pada transplantasi ini salah satunya dipengaruhi oleh faktor internal, seperti bentuk percabangan. Menurut Effendi dan Ainurrahim (2012), jenis karang yang memiliki bentuk percabangan lebih banyak akan memiliki jumlah *zooxhantellae* yang lebih banyak. Jumlah *zooxhantellae* yang lebih banyak akan mempercepat proses fotosintesis yang dilakukan oleh karang sehingga menghasilkan kalsium karbonat yang banyak untuk mendukung laju pertumbuhan karang yang ditransplantasikan. Perbedaan ini juga dipengaruhi oleh tingkat adaptasi dari setiap fragmen yang ditransplantasikan. Fragmen karang yang ditransplantasikan akan siap tumbuh baik secara vertikal maupun horizontal setelah proses penyembuhan luka patah tulang berhenti. Fragmen karang akan melakukan proses pemulihan dari bekas potong sesaat setelah ditransplantasikan dengan penggunaan energi yang relatif besar sehingga proses pertumbuhan masih terganggu (Febry et al., 2017). Karang yang baru ditransplantasikan juga akan mengeluarkan lendir sebagai tanda karang mengalami stress. Sekresi lendir ini juga berfungsi sebagai perlindungan diri terhadap kondisi yang tidak stabil dan akan kembali normal setelah karang mampu beradaptasi dengan kondisi baru tersebut. Lamanya proses ini dipengaruhi oleh kesesuaian kondisi air dan media yang digunakan (Nurman et al., 2017).

Selain faktor internal, media transplantasi sebagai faktor eksternal juga memengaruhi laju pertumbuhan fragmen karang yang ditransplantasikan. Hasil pengujian kandungan FABA yang merupakan bahan utama pembuatan batu kerb oleh Sucofindo Cabang Surabaya tahun 2016 menunjukkan bahwa media ini mengandung beberapa komposisi kimia yang dibutuhkan untuk mendukung pertumbuhan karang, seperti SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , dan TiO_2 . Hasil tersebut sesuai dengan yang disampaikan oleh Guntur (2018) bahwa media transplantasi yang mengandung unsur tersebut akan mendukung pertumbuhan fragmen karang yang ditransplantasikan.

b. Kelangsungan Hidup Transplantasi

Setelah lima bulan *Acropora* ditransplantasikan pada substrat FABA kerbstone, mereka memiliki tingkat kelangsungan hidup yang berbeda (Gambar 12.9). *Acropora tenuis* memiliki tingkat kelangsungan hidup 80,40%; *A. intermedia* memiliki tingkat kelangsungan hidup yang lebih rendah, yaitu 70,70%; *A. microlados* 82,61%; dan *A. kirskyae* 80,60%. Diindikasikan bahwa keempat jenis *Acropora* tersebut telah beradaptasi pada habitat alami di lingkungan perairan Pantai Bama.

Kanstin FABA yang terkena air laut akan mengalami pelindian akibat proses kimia dan fisika (Suprenant, 1991). Pencucian seperti ini memungkinkan kalsium, magnesium, aluminium, dan silikat (serta senyawa lain di batu tepian) diencerkan dalam air laut, menyediakan mineral yang dibutuhkan oleh karang untuk biomineralisasi. Berkaitan dengan hal tersebut, fragmen karang pada *kerbstone* diharapkan memiliki laju pertumbuhan yang lebih tinggi dibandingkan jenis media transplantasi lainnya. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa laju pertumbuhan fragmen karang dari keempat jenis *Acropora* tersebut tidak berbeda nyata. Hasil ini diduga karena kebutuhan relatif *Acropora* terhadap senyawa tersebut. Perbedaan ukuran partikel *fly ash* dan *bottom ash* menyebabkan proses pencucian tidak terjadi dalam waktu singkat (Muzaki, 2019).



Gambar 12.9 Rerata Tingkat Kelangsungan Hidup Karang Jenis *Acropora* spp.

Tingkat kelangsungan hidup fragmen karang yang ditransplantasikan dipengaruhi oleh berbagai faktor penentu, seperti cahaya, sedimentasi, suhu, salinitas, pH, dan kedalaman. Terjadinya kematian fragmen karang yang ditransplantasikan biasanya terjadi karena kondisi air yang tidak sesuai atau lamanya fase stres setelah tanam. Hal ini dapat ditandai dengan pemutihan keseluruhan fragmen karang. Karang yang memutih menandakan alga simbion *zooxanthellae* di dalam jaringan karang telah keluar atau mati. Fase ini menyebabkan berkurangnya suplai makanan yang dihasilkan *zooxanthellae* melalui proses fotosintesis sehingga menyebabkan kematian karang (Nurman et al., 2017).

Selain itu, gelombang dan arus juga berpengaruh penting terhadap kelangsungan hidup karang yang ditransplantasikan, yaitu sebagai penolak sedimen. Adanya arus akan membantu karang mempercepat proses penolakan sedimen terhadap sedimentasi yang mengendap di permukaan tubuh karang sehingga meminimalkan risiko stres dan kematian (Jipriandi et al., 2017). Karang yang hidup di arus juga memiliki tingkat kelangsungan hidup dan pertumbuhan yang lebih baik. Hal ini berkaitan dengan kemampuan arus untuk membawa suplai oksigen dan sumber makanan seperti plankton bagi koloni

karang seiring dengan sirkulasi yang terjadi. Namun, gelombang dan arus yang terlalu tinggi juga dapat menyebabkan karang yang ditransplantasikan lepas dari media sehingga menyebabkan kegagalan transplantasi karang.

Laju sedimentasi juga menjadi faktor penentu keberhasilan kegiatan transplantasi. Laju sedimentasi di lokasi penelitian menunjukkan nilai 13,4 mg/cm²/hari yang termasuk dalam kategori bahaya sedang (Pastorok & Biyard, 1985). Kategori ini dapat menyebabkan penurunan jumlah spesies (kematian) pada tanaman transplantasi pecahan karang. Hasil ini diduga menjadi penyebab matinya fragmen karang akibat cekaman sedimentasi melalui proses *shading* dan *covering*. Laju sedimentasi yang tinggi pada ekosistem terumbu karang akan menurunkan laju pertumbuhan dan meningkatkan laju kematian ekosistem terumbu karang (Supriyadi, 2019).

Tingkat kelangsungan hidup karang juga dipengaruhi oleh asal benih yang digunakan, yaitu jika benih fragmen yang ditransplantasikan berasal dari lokasi yang jauh dari lokasi penanaman, akan berdampak buruk akibat perubahan lingkungan, baik dari segi kedalaman maupun parameter kualitas air lainnya (Nurman et al., 2017).

Berdasarkan hal tersebut, angka kematian yang mencapai 17,31%–26,09% diduga karena faktor benih. Pecahan benih yang diambil dari pantai Grand Watu Dodol (GWD), Kabupaten Banyuwangi, harus diangkut dengan jarak yang relatif jauh menuju lokasi penanaman, pantai Bama, Taman Nasional Baluran, Kab. Situbondo. Hal ini diduga menjadi salah satu faktor pemicu stres pada fragmen karang sehingga tidak dapat bertahan hidup di lokasi barunya. Selain itu, pergerakan ini juga memungkinkan terjadinya perubahan kualitas air yang memicu peningkatan stres karang yang menyebabkan kematian.

Tingkat kelangsungan hidup fragmen karang juga dipengaruhi oleh media dan teknik transplantasi yang digunakan. Penggunaan media buatan sebagai tempat transplantasi dibuat sestabil mungkin, tidak mudah tergeser oleh arus/gelombang, memiliki struktur tiga dimensi dengan permukaan miring yang disukai larva karang untuk

menempel. Selain itu, sedapat mungkin media buatan harus dapat mencegah abrasi dan guling serta berada pada posisi yang lebih tinggi dari substrat dasar sehingga dapat meminimalisasi penumpukan sedimen (Fadli, 2008). Berdasarkan hal tersebut, penggunaan media *kerbstone* FABA dianggap memenuhi kriteria media buatan sebagai tempat transplantasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kelangsungan hidup keempat jenis karang tersebut berkisar antara 73,91–82,61% dan termasuk dalam kategori berhasil dari segi biologi. Hasil ini sesuai dengan Iswara dan Sundono (2010), yaitu bahwa kegiatan transplantasi karang akan dinyatakan berhasil dari segi biologi jika tingkat kelangsungan hidupnya antara 50–100%.

2. Transplantasi Jenis Karang *Montipora foliosa*

Genus *Montipora* mempunyai koloni berbentuk lembaran, merayap, bercabang dan *submassive*. Memiliki koralit kecil yang semuanya tenggelam dan tidak mempunyai septa. Retikulum berbentuk bukit-bukit kecil, alur atau tonjolan-tonjolan sehingga permukaan koloni selalu terlihat kasar dan porus. Genus *Montipora* telah diidentifikasi sebanyak sekitar 135 jenis *Montipora*, tetapi saat ini yang dikenal hanya ada sekitar 45 jenis. Sebaran jenis karang ini dapat ditemukan di seluruh perairan Indonesia (Suharsono, 2017).

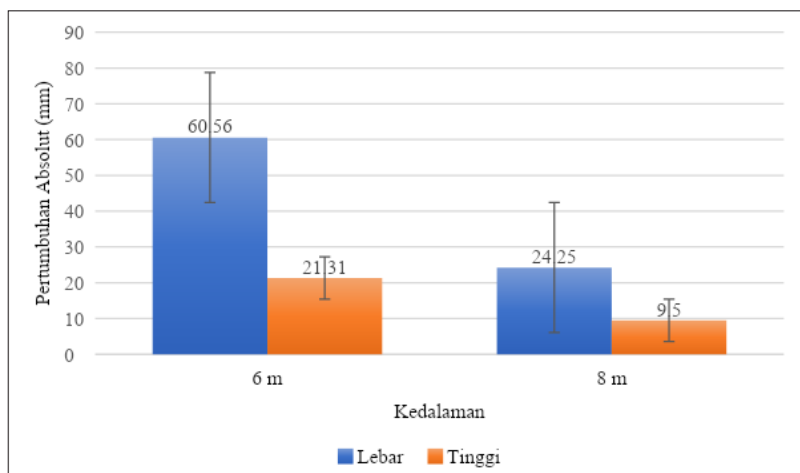
Montipora foliosa memiliki bentuk pertumbuhan *submassive*. Karang *massive* mempunyai laju pertumbuhan yang lambat dibandingkan dengan karang kelompok *Acropora* dan membutuhkan lebih banyak cahaya matahari untuk proses fotosintesis karena intensitas cahaya yang didapat oleh terumbu karang akan makin berkurang dengan makin bertambahnya kedalaman perairan. (Mukholladun et al., 2016).

a. Pertumbuhan Mutlak

Pertumbuhan absolut *Montipora foliosa*. selama kurang lebih enam bulan pengamatan menunjukkan bahwa pertumbuhan lebar karang

Montipora jauh lebih tinggi dari nilai pertumbuhan absolut tinggi. Gambaran tersebut sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Pratiwi et al. (2019) yang menunjukkan bahwa genus *Montipora* cenderung tumbuh dengan pola yang sama, yaitu pertumbuhan panjang (lebar) lebih besar dari tinggi pertumbuhan meskipun pencangkakan dilakukan pada lokasi dan kedalaman yang berbeda.

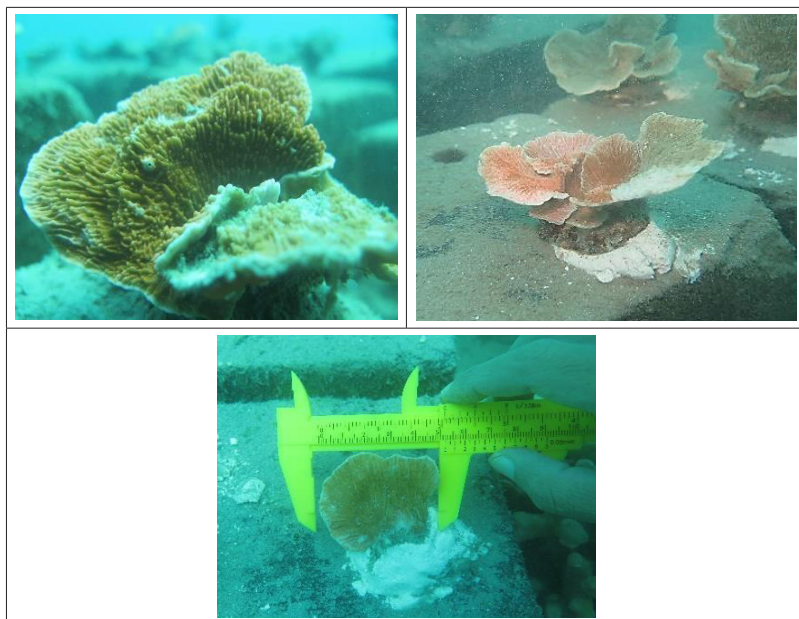
Jenis karang dengan bentuk pertumbuhan koloni lembaran seperti *Montipora* akan bertahan lama dan pertumbuhannya lebih intensif dibandingkan diikuti dengan pertumbuhan yang tinggi. *Montipora* dengan morfologi berupa lembaran memiliki bentuk pertumbuhan yang cenderung memanjang. Dengan bentuk kehidupan ini, *Montipora* akan menutupi kerangka yang cenderung ke samping daripada ke atas, mengikuti bentuk morfologisnya. Pola pertumbuhan dan morfologi *Montipora foliosa* yang cenderung melebar juga dapat disebabkan oleh pengaruh sifat fisik dan karakteristik perairan tempat karang tersebut hidup. Karakteristik fisik lokasi transplantasi karang di pantai Bama memiliki kedalaman yang rendah dan gelombang yang



Gambar 12.10 Grafik Perbandingan Pertumbuhan Absolut Karang *Montipora foliosa* yang Ditransplantasikan pada Kedalaman Perairan yang Berbeda

kuat. Daerah yang dangkal, memiliki suplai cahaya yang cukup, dan terkena gelombang besar akan menyebabkan pertumbuhan karang menjadi lebih pendek dan bercabang tumpul.

Grafik tersebut juga menunjukkan bahwa pertumbuhan absolut terbaik *Montipora* sp. adalah pada kedalaman 6 meter dengan rata-rata pertumbuhan absolut tinggi dan lebar fragmen pada kedalaman 21,31 mm dan 60,56 mm, sedangkan pertumbuhan absolut dengan nilai terkecil berada pada kedalaman 8 meter dengan tinggi maksimum 9,5 meter dan lebar 24,25 meter. Rata-rata pertumbuhan absolut tinggi dan lebar fragmen pada kedalaman ini masing-masing adalah 5,33 mm dan 15,14 mm. Perbedaan nilai pertumbuhan absolut yang drastis pada kedua kedalaman tersebut dapat disebabkan oleh beberapa faktor, di antaranya pada kedalaman 6 meter untuk mendapatkan cahaya dan sirkulasi air yang optimal.



Sumber: Herawati et al. (2022)

Gambar 12.11 Macam-Macam *Montipora* sp. yang Ditransplantasi di Media FABA

b. Tingkat Kelangsungan Hidup (*Survival Rate*)

Survival rate (SR) bergantung pada keakuratan metode, terutama dalam perawatan fragmen dan faktor biologis, seperti jenis karang keras yang ditransplantasikan dan respons terhadap kondisi lingkungan (Clark & Edwards, 1995). Data kelangsungan hidup fragmen karang selama periode pengamatan disajikan pada Tabel 12.1.

Tabel 12.1 SR Karang *Montipora foliosa* pada Media Transplantasi

Observation Month	June	July	August	September
Number of Fragments	92	83	74	73
SR (%)	80,5			

Berdasarkan data tersebut, SR karang *Montipora foliosa* yang ditransplantasikan, baik pada kedalaman 6 maupun 8 meter, hingga akhir penelitian adalah 80,5%. Nilai SR ini menunjukkan bahwa kelangsungan hidup fragmen *Montipora* sp di Bama cukup baik. Menurut Harriott dan Fisk (1988), keberhasilan transplantasi karang dapat dinilai dari tingkat kelangsungan hidup 50% atau lebih. Hal ini juga didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Suhendar et al. (2020) yang menyatakan bahwa kelangsungan hidup karang dari marga *Montipora* cukup tinggi.

Secara keseluruhan, persentase SR memiliki kecenderungan menurun dan diperkirakan akan terus menurun setelah September 2022. Faktor utama penyebab penurunan persentase SR diperkirakan akibat lepasnya fragmen karang dari meja transplantasi. Terlihat hanya beberapa fragmen karang yang ditemukan mati karena ganggang. Menurut Clark dan Edwards (1995), salah satu faktor yang memengaruhi tingkat kematian karang pada transplantasi adalah teknik penempelan fragmen. Lebih lanjut, Jaap (1999) juga menyatakan pentingnya pengikatan fragmen karang dengan kuat dan kokoh untuk mencegah fragmen karang terlepas dari modul (Rizal et al., 2020, 2022).

D. Komposisi Bahan Kanstin FABA Media Transplantasi

Dalam studi kasus yang telah dipaparkan, media transplantasi yang digunakan berbahan baku *fly ash* dan *bottom ash* yang merupakan limbah yang berasal dari proses produksi (pembakaran batu bara) dan dari luar proses produksi (proses perbaikan peralatan pembangkit) pembangkitan listrik, PT Jawa Power.

Dalam proses pembakaran batu bara di *boiler*, sebagian besar material anorganik, seperti silikon dioksida (SiO_2), aluminium oksida (Al_2O_3), dan besi oksida (Fe_2O_3), dan sisa beberapa persentase karbon yang tidak terbakar akan jatuh ke *submercible scraper chain conveyor* (SSCC) yang letaknya ada di bagian bawah *boiler* dan dikumpulkan. Material inilah yang kemudian dikenal sebagai limbah abu bawah (*furnace bottom ash* /FABA). Dari total kandungan abu (*ash*) dalam batu bara yang dibakar dalam boiler, 80% menjadi abu terbang (*fly ash*) dan 20% menjadi abu bawah (*bottom ash*). Selain itu, sebagian material anorganik yang tidak terbakar dan berukuran kecil (200 mesh) akan mengalir bersama gas buang pembakaran (*flue gas*) keluar dari *boiler*. Material inilah yang disebut sebagai limbah abu terbang (*pulverized fuel ash-fly ash*). Limbah abu terbang (*fly ash*) ini dikumpulkan dengan cara melewati gas buang pembakaran melalui alat penangkap debu, yaitu *electrostatic precipitator* (ESP), yang mempunyai efisiensi penangkapan lebih dari 99%. Dari tangki penampung di ESP (*ESP hopper*), kemudian limbah abu terbang (*fly ash*), dengan menggunakan sistem *pneumatic* (udara bertekanan), dialirkan ke tempat penampung abu terbang (*fly ash silo*) yang berada di lokasi penimbunan abu (*ash disposal area*). Sementara itu, setelah melewati ESP, gas hasil pembakaran (*flue gas*) dilewatkan ke unit penangkap sulfur (*flue gas gesulphurization plant*/FGD) untuk mengurangi kandungan gas SO_x , dengan efisiensi penangkapan gas SO_2 96%. Dari FGD, gas buang tersebut dialirkan ke cerobong (*stack*) dengan ketinggian 220 meter untuk kemudian didispersikan ke lingkungan (Suprianto, 2016).

Kerangka karang Scleractinian terbuat dari kalsium karbonat (CaCO_3) yang dikristalisasi dalam aragonit (sistem ortorombik) (Allemand et al., 2004; Tambutté et al., 2011). Untuk membangun kerangka tersebut, karang harus memasok kalsium dan karbon anorganik dari air laut sekitar (Gattuso et al., 1999; Allemand et al., 2004). Dalam penelitian ini, digunakan bahan limbah abu batu bara yang disebut *fly ash* dan *bottom ash* yang mengandung unsur kalsium, aluminium, magnesium, dan silikat relatif tinggi. Unsur-unsur ini ditemukan pada terumbu karang alami yang dibutuhkan karang untuk hidup (Hutagalung & Julianty, 2013).

Tabel 12.2 Hasil Pengukuran Komposisi Unsur dalam Kanstin yang Bersumber dari *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (dalam % bahan)

No	Parameter	Unit	FA 0% (K1)	FA 25% (K2)	FA 50% (K3)	FA 75% (K4)	FA 100% (K5)
1.	Silikat (SiO_2)	% wt	40.33	38.81	38.48	36.47	26.65
2.	Aluminium (Al_2O_3)	% wt	9.22	8.94	9.36	9.52	9.80
3.	Besi (Fe_2O_3)	% wt	16.55	17.37	17.59	17.97	19.25
4.	Kalsium (CaO)	% wt	22.85	24.95	24.12	25.04	29.32
5.	Magnesium (MgO)	% wt	6.37	5.21	5.70	5.92	7.25

Keterangan: FA : *fly ash*

Sumber: Khasanah et al. (2019)

Kanstin yang terkena air laut akan mengalami pencucian sebagai akibat dari proses kimia dan fisik (Suprenant, 1991). Pencucian seperti itu memungkinkan kalsium, magnesium, zat besi, aluminium, dan silikat (dan senyawa lain dalam kanstin) terdiluasi dalam air laut, menyediakan mineral yang dibutuhkan oleh karang untuk biomineralisasi. Mengenai hal ini, fragmen karang dalam kanstin tertentu harus memiliki tingkat pertumbuhan yang lebih tinggi dibandingkan kanstin lainnya. Namun, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tingkat pertumbuhan fragmen karang di kelima jenis kanstin tidak berbeda secara signifikan. Hasil ini diduga karena kebutuhan terhadap senyawa-senyawa tersebut bersifat relatif.

Perbedaan ukuran partikel *fly ash* dan *bottom ash* menyebabkan proses pencucian tidak terjadi dalam waktu singkat (Khasanah et al., 2019).

Tingkat pertumbuhan fragmen karang dalam kanstin berbeda-beda meskipun berbahan baku sama, tetapi kombinasi campuran *fly ash* dan *bottom ash* dibuat berbeda. Hal ini disebabkan oleh kandungan senyawa silikat, aluminium, zat besi, magnesium, dan kalsium dalam jumlah yang bervariasi oleh perbedaan rasio kedua bahan tersebut (Tabel 12.2). Pemanjangan fragmen, diameter koloni, dan jumlah cabang tertinggi adalah model kanstin (K2) yang mengandung unsur-unsur silika 37,43%, kalsium 20,62 %, aluminium 10,99%, zat besi 17,37%, dan magnesium 6,74%. Konsorsium inilah yang menjadi nilai optimum dalam pertumbuhan *A. formosa*.

Silika adalah amorf (jenis padatan yang atom atau partikelnya tersusun secara acak dan tidak teratur, contohnya kaca, karet, dan plastik) serta akan mudah mengeras ketika dicampur dengan semen, membentuk senyawa kalsium silikat yang sulit larut dalam air (Wikana & Wantutrianus, 2014). Pengerasan oleh kalsium silikat ini mampu menghambat proses pencucian agar terjadi terus-menerus.

E. Pengaruh Komposisi Bahan Kanstin FABA Media Transplantasi terhadap Laju Pertumbuhan Karang

Penelitian ini menggunakan beberapa jenis media yang memiliki komposisi bahan berbeda antara satu dan lainnya. Hal ini bertujuan untuk mengetahui komposisi bahan yang paling sesuai di antara kelima jenis media yang digunakan yang ditunjukkan dengan laju pertumbuhan tertinggi dari fragmen karang yang ditransplantasikan. Untuk mengetahui pengaruh komposisi bahan penyusun media terhadap laju pertumbuhan karang salah satunya dapat dilakukan dengan melakukan uji korelasi dengan metode *principal component analysis* (PCA). Hasil pengolahan data dengan metode korelasi ini ditunjukkan pada Tabel 12.3 dan Gambar 12.12.

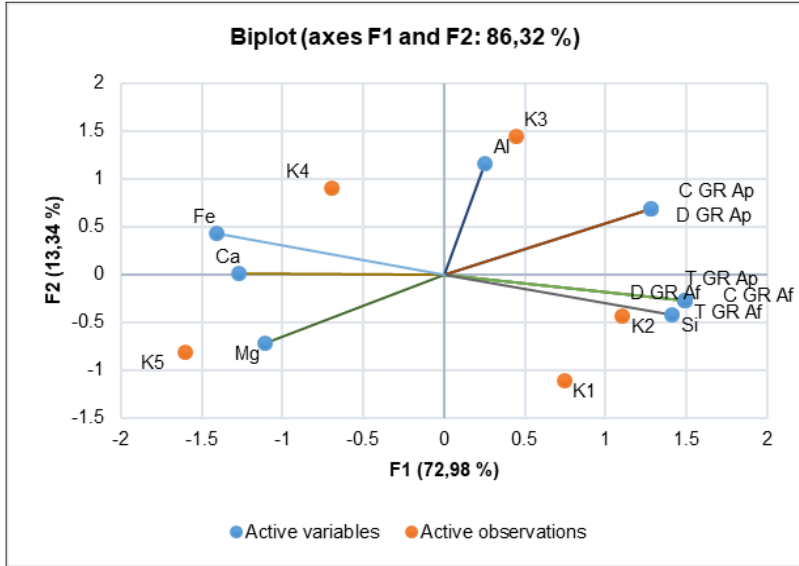
Tabel 12.3 Nilai Korelasi Kandungan Media terhadap Pertumbuhan

Variables	Si	Ca	Al	Mg	Fe
T GR Af	0.900	-0.700	0.000	-0.700	-0.900
D GR Af	0.900	-0.700	0.000	-0.700	-0.900
C GR Af	0.900	-0.700	0.000	-0.700	-0.900
T GR Ap	0.900	-0.700	0.000	-0.700	-0.900
D GR Ap	0.600	-0.700	0.300	-0.800	-0.600
C GR Ap	0.600	-0.700	0.300	-0.800	-0.600

Keterangan:

- T : Tinggi
- D : Diameter
- C : Cabang
- GR: Growth Rate
- Af : *Acropora formosa*
- Ap : *Acropora pulchra*

Gambar 12.12 dan Tabel 12.3 menunjukkan hubungan korelasi komposisi media terhadap laju pertumbuhan karang transplantasi, baik pertumbuhan panjang, diameter, maupun cabang. Tabel 12.3 menunjukkan bahwa terdapat korelasi positif dan juga negatif antara komposisi media meliputi Si, Ca, Al, Mg dan laju pertumbuhan. Korelasi positif ditunjukkan oleh unsur Si terhadap laju semua faktor pertumbuhan di kedua jenis karang. Korelasi sangat kuat ditunjukkan terhadap pertumbuhan karang *Acropora formosa*, baik panjang, diameter, maupun cabang, dengan nilai korelasi sebesar 0,9. Pengaruh unsur Si terhadap *Acropora pulchra* menunjukkan korelasi sangat kuat dengan nilai sebesar 0,9 terhadap pertumbuhan panjang, sedangkan korelasi kuat ditunjukkan terhadap pertumbuhan diameter dan cabang dengan nilai sebesar 0,6 (Khasanah et al., 2019). Selain itu, korelasi positif juga ditunjukkan oleh unsur Al terhadap pertumbuhan diameter dan cabang *Acropora pulchra* dengan nilai sebesar 0,3 dengan tingkat hubungan rendah. Hal ini berarti bahwa Al tidak memberikan pengaruh besar terhadap pertumbuhan diameter dan cabang fragmen karang transplantasi *Acropora pulchra*.



Sumber: Khasanah et al. (2019)

Gambar 12.12 Biplot Korelasi Kandungan Media terhadap Pertumbuhan

Tabel 12.3 juga menunjukkan korelasi negatif yang ditunjukkan oleh unsur Ca, Mg, dan Fe. Unsur Ca menunjukkan hubungan korelasi kuat berbanding terbalik terhadap pertumbuhan panjang, diameter, dan cabang di kedua jenis karang *Acropora formosa* dan *Acropora pulchra* dengan nilai korelasi sebesar 0,7. Unsur lain yang juga memiliki korelasi negatif adalah Mg dengan hubungan korelasi kuat terhadap pertumbuhan panjang, diameter, dan cabang *Acropora formosa* serta pertumbuhan panjang *Acropora pulchra* dengan nilai korelasi 0,7. Unsur Mg juga memiliki hubungan korelasi sangat kuat terhadap pertumbuhan diameter dan cabang *Acropora pulchra* dengan nilai korelasi sebesar 0,8. Hal ini menunjukkan bahwa Mg memiliki pengaruh besar terhadap pertumbuhan karang transplantasi. Selain itu korelasi sangat kuat ditunjukkan Fe terhadap pertumbuhan karang

Acropora formosa, baik panjang, diameter, maupun cabang, dengan nilai korelasi sebesar 0,9 dengan hubungan berbanding terbalik. Fe juga memiliki pengaruh negatif terhadap *Acropora pulchra* dengan korelasi sangat kuat, yaitu sebesar 0,9, terhadap pertumbuhan panjang, sedangkan korelasi kuat ditunjukkan Fe terhadap pertumbuhan diameter dan cabang dengan nilai sebesar 0,6 (Khasanah et al., 2019). Hubungan yang ditunjukkan oleh Ca, Mg, dan Fe menunjukkan jika makin tinggi unsur tersebut dalam suatu media transplantasi akan menyebabkan penurunan laju pertumbuhan fragmen karang, baik pertumbuhan panjang, diameter, maupun cabang.

Selain pengolahan menggunakan PCA (Tabel 12.3), juga dihasilkan biplot yang menunjukkan kedekatan antarvariabel, yaitu makin besar pengaruh suatu unsur terhadap laju pertumbuhan maka akan memiliki garis yang makin berdekatan. Kuadran 1 memiliki nilai spesifik terhadap variabel pertumbuhan diameter dan cabang *Acropora pulchra* serta unsur Al. Pada kuadran 1 terdapat variabel media K3 yang menunjukkan bahwa media tersebut memiliki nilai dominan terhadap unsur Al yang memengaruhi pertumbuhan diameter dan cabang *Acropora pulchra*. Kuadran 2 menunjukkan bahwa media K1 dan K2 memiliki karakteristik spesifik terhadap variabel Si yang memberikan pengaruh terhadap pertumbuhan panjang, diameter, dan cabang *Acropora formosa* serta pertumbuhan panjang *Acropora pulchra*. Hal ini menunjukkan bahwa media ini memiliki laju pertumbuhan yang lebih tinggi daripada jenis media yang lain. Hal ini sesuai dengan data penelitian, yaitu bahwa media K1 dan K2 memiliki laju pertumbuhan tertinggi dibandingkan media lainnya. Kuadran 3 menunjukkan bahwa media K5 memiliki karakteristik spesifik terhadap unsur Mg dan Ca. Hal ini sesuai dengan data penelitian, yaitu bahwa media K5 memiliki kandungan unsur Mg dan Ca tertinggi dibandingkan dengan jenis media lain. Pada kuadran 4 terdapat media K4 yang memiliki karakteristik spesifik terhadap unsur Fe dan Ca. Hal ini menunjukkan bahwa pada media K4 memiliki nilai dominan terhadap unsur Fe dan Ca dibandingkan media jenis lain.

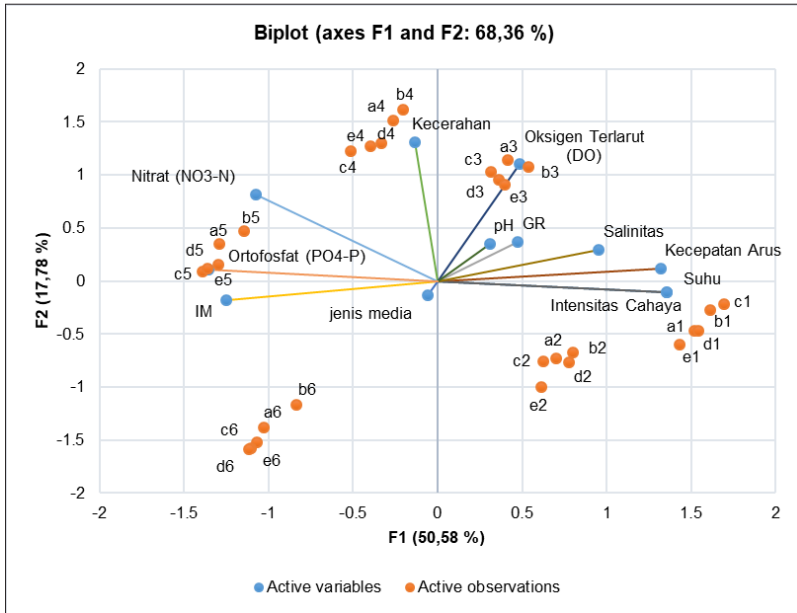
F. Hubungan Parameter Hidro-oseanografi, Indeks Mortalitas, Laju Sedimentasi, dan Pertumbuhan Karang

Analisis komponen utama atau *principal component analysis* (PCA) merupakan metode analisis statistik yang dapat digunakan terhadap segala bentuk data penelitian dan dapat mengatasi masalah pelanggaran asumsi klasik dengan menghasilkan variabel bebas baru. Komponen yang digunakan dalam analisis PCA pada penelitian ini mencakup faktor oseanografi yang meliputi suhu, kecerahan, arus, intensitas cahaya, kedalaman, salinitas, pH, DO, serta kandungan nitrat dan fosfat. Komponen lain yang digunakan adalah laju pertumbuhan dan indeks mortalitas dari ekosistem karang. Hasil pengolahan data menggunakan PCA berupa matriks tabel dan grafik korelasi yang menunjukkan hubungan antarvariabel, baik berupa korelasi positif maupun korelasi negatif. Hasil pengolahan data dapat dilihat pada Tabel 12.4 dan Gambar 12.13.

Tabel 12.4 Nilai Korelasi Parameter terhadap Pertumbuhan dan Mortalitas

Variabel	Laju Pertumbuhan (GR)	Indeks Mortalitas (IM)
GR (<i>Growth Rate</i>)	1	-0,487
IM (Indeks Mortalitas)	-0,487	1
Jenis Media	-0,360	0,091
Kecerahan	0,279	-0,057
Suhu	0,301	-0,863
Kecepatan Arus	0,381	-0,912
Intensitas Cahaya	0,301	-0,863
Salinitas	0,016	-0,561
Oksigen Terlarut (DO)	0,071	-0,304
pH	0,164	-0,249
Nitrat (NO ₃ -N)	-0,070	0,589
Ortofosfat (PO ₄ -P)	-0,301	0,863

Sumber: Khasanah et al. (2019)



Gambar 12.13 Biplot Korelasi Parameter terhadap Karang

Berdasarkan Tabel 12.4 dapat dilihat bahwa terdapat dua jenis korelasi, yaitu positif dan negatif, antara berbagai parameter laju pertumbuhan karang transplantasi. Korelasi negatif ditunjukkan oleh beberapa faktor, yaitu mortalitas, jenis media, nitrat, dan fosfat, dengan nilai koefisien korelasi kurang dari 0,5. Hal ini berarti bahwa keeratan hubungan yang terjadi berada pada kategori sangat rendah sampai sedang antara variabel tersebut terhadap laju pertumbuhan karang transplantasi. Korelasi yang terjadi berupa hubungan negatif, yaitu jika nilai dari variabel tersebut mengalami peningkatan maka akan menyebabkan penurunan laju pertumbuhan. Salah satu faktor yang memiliki nilai korelasi negatif adalah kandungan unsur hara (nitrat dan fosfat). Makin tinggi kadar N dan P suatu perairan maka dapat menyebabkan terjadinya pertumbuhan alga yang akan menjadi

kompetitor bagi terumbu karang sehingga laju pertumbuhan menjadi terhambat (Khasanah et al., 2019).

Korelasi positif terhadap laju pertumbuhan juga ditunjukkan oleh beberapa parameter, yaitu kecerahan, suhu, arus, intensitas cahaya, salinitas, DO, dan pH. Hal ini menunjukkan bahwa makin tinggi nilai dari parameter tersebut sampai batas tertentu akan menyebabkan terjadinya peningkatan laju pertumbuhan karang transplantasi. Kecepatan arus memiliki nilai korelasi positif terhadap pertumbuhan, yaitu 0,381 yang termasuk dalam kategori rendah. Hal ini menunjukkan bahwa makin cepat arus perairan maka dapat menyebabkan peningkatan laju pertumbuhan karang transplantasi. Hal ini berkaitan dengan peran arus sebagai sirkulasi perairan yang membawa oksigen dan unsur hara yang dibutuhkan oleh karang untuk proses metabolisme. Selain itu, arus juga berfungsi sebagai *sediment rejector*, yaitu makin tinggi kecepatan arus suatu perairan maka akan membantu karang untuk memindahkan sedimen yang menutupi permukaan tubuhnya. Menurunnya cekaman yang disebabkan penutupan sedimen di permukaan tubuh karang menjadikan laju pertumbuhan karang menjadi lebih cepat (Joni et al., 2015).

Selain terhadap laju pertumbuhan, pengaruh yang sama juga ditunjukkan oleh parameter terhadap indeks mortalitas dengan hubungan positif dan negatif. Korelasi negatif ditunjukkan oleh berbagai faktor, yaitu kecerahan, suhu, arus, intensitas cahaya, salinitas, DO dan pH terhadap indeks mortalitas. Salah satu parameter yang berkorelasi sangat kuat ditunjukkan oleh intensitas cahaya dengan nilai korelasi sebesar -0,863. Hal ini menunjukkan bahwa makin tinggi intensitas cahaya yang mencapai terumbu karang akan menurunkan indeks mortalitas karang transplantasi. Intensitas cahaya memiliki fungsi sebagai unsur utama dalam proses terjadinya fotosintesis yang dilakukan oleh alga simbiosis *zooxanthellae* (Partini, 2009). Menurut Joni et al., (2015) bahwa sebesar 90% kebutuhan makanan terumbu karang untuk pertumbuhan dihasikan melalui proses fotosintesis sehingga makin tinggi intensitas cahaya akan menaikkan tingkat

kelangsungan hidup karang. Korelasi positif ditunjukkan oleh beberapa parameter terhadap indeks mortalitas, yaitu jenis media, nitrat, dan fosfat.

Gambar 12.13 merupakan plot gabungan antara *score plot* dan *loading plot* yang menunjukkan keterkaitan antara stasiun dan variabel dengan nilai eigen sebesar 68,36%. Nilai ini sudah memenuhi syarat minimum untuk menentukan banyaknya komponen yang diambil, yaitu 60% (Supranto, 2004). Menurut Maqbool et al., (2016) bahwa Faktor 1 dan Faktor 2 merupakan faktor yang dapat menggambarkan variabilitas tertinggi. Penelitian ini melakukan pengamatan pada lima jenis media, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 12.13 dengan simbol a, b, c, d, dan e dengan enam waktu pengamatan dengan simbol 1, 2, 3, 4, 5, dan 6.

Kuadran 1 menunjukkan terdapat a3, b3, c3, d3, dan e3 yang memiliki karakteristik spesifik terhadap arus, salinitas, laju pertumbuhan, pH, dan oksigen terlarut. Hasil ini sesuai dengan data penelitian yang sudah dilakukan di lapangan bahwa kadar oksigen terlarut berada pada kondisi tertinggi. Kuadran 2 menunjukkan a1, b1, c1, d1, e1, a2, b2, c2, d2, dan e2 memiliki karakteristik spesifik terhadap variabel intensitas cahaya dan suhu. Hal ini berarti bahwa pada a1, b1, c1, d1, e1, a2, b2, c2, d2, dan e2 variabel intensitas cahaya dan suhu lebih mendominasi dibandingkan dengan variabel lain. Hal ini juga dibuktikan dengan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa intensitas cahaya dan suhu memiliki nilai tertinggi pada waktu pengamatan pertama dan kedua dibandingkan dengan waktu pengamatan lainnya. Kedua variabel ini menunjukkan korelasi positif terhadap pertumbuhan karang, yaitu jika variabel ini meningkat, laju pertumbuhan pun akan mengalami peningkatan.

Kuadran 3 menunjukkan a6, b6, c6, d6, dan e6 memiliki karakteristik spesifik terhadap variabel media dan indeks mortalitas. Hal ini menunjukkan bahwa pada pengamatan terjadi kematian yang tinggi. Hal ini dibuktikan dengan makin tingginya tingkat kematian karang pada pengamatan ini di kelima jenis media. Selanjutnya pada kuadran 4 menunjukkan a5, b5, c5, d5, dan e5 memiliki

karakteristik spesifik terhadap nitrat, ortofosfat, dan kecerahan. Hal ini dibuktikan berdasarkan hasil penelitian yang ini memiliki nilai tertinggi pada variabel nitrat dan ortofosfat. Keseluruhan hasil analisis PCA ini menunjukkan bahwa parameter fisika dan kimia perairan memengaruhi tingkat pertumbuhan dan indeks mortalitas dari fragmen karang yang ditransplantasikan.

G. Penutup

Limbah abu batu bara *fly ash* dan *bottom ash* (FABA) dapat digunakan sebagai media transplantasi karang buatan untuk karang. Media transplantasi berbahan *fly ash* dan *bottom ash* terbukti layak dan cocok untuk pertumbuhan terumbu karang. Pemanfaatan limbah abu batu bara dari PLTU tersebut merupakan upaya memberikan kontribusi nyata untuk mendukung restorasi/pemulihan ekosistem terumbu karang dunia.

Rekomendasi dari tulisan ini adalah aplikasi transplantasi terumbu karang bermedia FABA diperbanyak sehingga tujuan rehabilitasi dan restorasi karang di perairan yang mengalami degradasi dapat tercapai. Tentunya hal ini disertai pengkajian lebih dalam sehingga membuka peluang penelitian, misalnya menggunakan jenis bibit karang yang berbeda dari jenis yang telah dicoba dalam penelitian terdahulu.

Referensi

- Clark, S., & Edwards, A. J. (1995). Coral transplantation as an aid to reef rehabilitation: Evaluation of a case study in the Maldivian Islands. *Coral Reefs*, 14(4), 201–213. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00334342>
- Dahuri, R. (2003). *Keanekaragaman hayati laut: Aset pembangunan berkelanjutan Indonesia*. PT Gramedia Pustaka Utama.
- Edwards A. J., & Clark, S. (1999). Coral transplantation: A useful management tool or misguided meddling? *Marine Pollution*

- Bulletin*, 37(8–12), 474–487. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X99001459>
- Effendi, F. W., & Aunurohim. (2012). Densitas zooxanthellae dan pertumbuhan karang *Acropora formosa* dan *Acropora nobilis* di perairan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) Paiton, Probolinggo, Jawa Timur. ANZDOC. <https://adoc.pub/kata-kunci-acropora-formosa-acropora-nobilis-densitas-zooxan.html>
- Fachrurrozie, A., Nufti, P. P., & Riani, W. (2012). Pengaruh perbedaan intensitas cahaya terhadap kelimpahan zooxanthellae pada karang bercabang marga: *Acropora* di perairan Pulau Pari, Kepulauan Seribu. *Jurnal Akuatika*, 3(2), 115–124. <http://111.223.252.120/index.php/akuatika/article/view/1607>
- Fadli, N. (2008). Tingkat kelangsungan hidup fragmen karang *Acropora formosa* yang ditransplantasikan pada media buatan yang terbuat dari pecahan karang (rubble). *Berita Biologi*, 9(3), 265–273. https://e-journal.biologi.lipi.go.id/index.php/berita_biologi/article/view/782
- Febry, H. N., Batu, S., & Ratna, D. P. (2017). Tingkat kelangsungan hidup karang *Acropora formosa* hasil transplantasi di perairan Sawapudo Kecamatan Soropia. *Sapa Laut*, 2(4), 119–125. <https://text-id.123dok.com/document/zkx1r51y-tingkat-kelangsungan-hidup-karang-acropora-formosa-hasil-transplantasi-di-perairan-sawapudo-kecamatan-soropia-survival-rate-of-coral-acropora-formosa-as-transplantation-results-in-sawapudo-waters-soropia-district.html>
- Guntur, Abu Bakar S., & Jaziri A. A. (2018). *Rehabilitasi terumbu karang*. UB Press. https://books.google.co.id/books/about/Rehabilitasi_Terumbu_Karang.html?id=8vdqDwAAQBAJ&redir_esc=y
- Hakanson, L., & Bryhn, A. C. (2008). *Eutrophication in the Baltic Sea present situation, nutrient transport processes, remedial strategies*. SpringerVerlag Berlin Heidelberg. <https://books.google.com/books?hl=id&lr=&id=mMpYxUpzY0YC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Eutrophication+in+the+Baltic+Sea+Present+Situation,+Nutrient+>

- Transport+Processes,+Remedial+Strategies&ots=wzwRvcvITv&sig=JhkqEPkgBOZnd7ZPBudS8rJdEso
- Haris, A. (2000). *Laju pertumbuhan dan tingkat kelangsungan hidup fragmentasi buatan karang lunak (Octocorallia: Alcyonacea) Sarcophyton tracheliorporum van Marenzeller dan Lobophytum strictum Tixier-Durivault di perairan Pulau Pari, Kepulauan Seribu*. Program Pascasarjana IPB.
- Harriott, V. J., & Fisk, D. A. (1988). Coral transplantation as a reef management option. Dalam *Proceedings of the Sixth International Coral Reef Symposium, Townsville*, (Vol. 2, 375–379). https://www.researchgate.net/publication/267385903_Coral_transplantation_as_a_reef_management_option
- Herawati, E. Y., Arsad, S., & Khasanah, R. I. (2022). Growth rate and survival rate of montipora coral transplant on FABA material in Baluran National Park. Dalam *Prosiding 5th International Conference on Fisheries and Marine*.
- Hutagalung, J. (2013). *Analisis kandungan unsur pada terumbu karang (coral reef) di daerah pesisir pantai Sibolga* [Tesis tidak diterbitkan]. Universitas Negeri Medan. <http://digilib.unimed.ac.id/10350/>
- Iswara, S. (2010). *Analisis laju pertumbuhan dan kelangsungan hidup karang Acropora spp., Hydno-pora rigida, dan Pocillopora verrucosa yang ditransplantasikan di Pulau Kelapa, Kepulauan Seribu* [Skripsi]. Institut Pertanian Bogor. <http://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/62861>
- Jaap, W. C. (1999). Coral reef restoration. *Ecol Eng*, 15(2), 345–364. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925857400000859>
- Jipriandi, Pratomo, A., & Irawan, H. (2017). Pertumbuhan karang *Acropora formosa* dengan teknik transplantasi pada ukuran fragmen yang berbeda. https://www.researchgate.net/publication/322055700_PERTUMBUHAN_KARANG_Acropora_formosa_DENGAN_TEKNIK_TRANSPLANTASI_PADA_UKURAN_FRAGMEN_YANG_BERBEDA

- Joni, Irawan, H., & Pratomo, A. (2015). *Laju pertumbuhan dan tingkat kelangsungan hidup karang Acropora formosa hasil transplantasi pada kedalaman berbeda*. https://www.researchgate.net/publication/313396342_LAJU_PERTUMBUHAN_DAN_TINGKAT_KELANGSUNGAN_HIDUP_KARANG_Acropora_formosa_HASIL_TRANSPLANSTASI_PADA_KEDALAMAN_BERBEDA
- Kambey, A. D. (2013). The growth of hard coral (*Acropora* sp.) transplants in coral reef of Malalayang Waters, North Sulawesi, Indonesia. *Jurnal Ilmiah Platax*, 1(4), 196–203. <https://doi.org/10.35800/jip.1.4.2013.3703>
- Kepmen LH No. 51 Tahun 2004. (2019, 18 April). *Baku mutu air laut untuk air laut*. Jakarta.
- Khasanah, R. I., Herawati, E. Y., Hariati, A., & Mahmudi, M. (2019). Growth rate of *Acropora formosa* coral fragments transplanted on different composition of FABA kerbstone artificial reef. *BIODIVERSITAS*, 20(12), 3593–3598. <https://mail.smujo.id/biodiv/article/view/4603>
- Khasanah, R. I. (2020). Kecepatan tumbuh dua spesies sclerectinian (*Acropora* sp. : Acroporidae) pada media kanstin FABA (FA:BA) [Disertasi]. Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Brawijaya.
- Maqbool, M. A., Aslam, M., & Ali, H. (2016). Evaluation of advance chickpea (*Cicer arietinum* L.) accessions based on drought tolerance indices and SSR markers againts different water treatment. *Pak Journal Bot*, 48(4), 1421–1429. https://www.researchgate.net/publication/306358363_Evaluation_of_advanced_chickpea_Cicer_Arietinum_L_accessions_based_on_drought_tolerance_indices_and_SSR_markers_against_different_water_treatments
- McManus, J. W. (2001). Coral reefs. *Encyclopedia of Ocean Sciences* (Second Edition). Academic Press, 524–534. <https://doi.org/10.1016/B978-012374473-9.00090-4>.
- Moulding, A. L. (2005). Coral recruitment patterns in the Florida keys. *Revista de Biología Tropical*, 53(1), 75–82.

- Mukholladun, W., Insafitri, & Effendy, M. (2016). Laju pertumbuhan karang *Goniastrea sp.* pada kedalaman berbeda di Pulau Mandangin Kabupaten Sampang. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Ilmu Kelautan 27 juli 2016*. Universitas Trunojoyo Madura.
- Muzaki, F. K. (2019). Growth rate of *Acropora muricata* coral fragments transplanted on dome-shaped concrete artificial reef with different composition. *BIODIVERSITAS*, 20(6), 1555–1559. https://www.researchgate.net/publication/333754352_Short_Communication_Growth_rate_of_Acropora_muricata_coral_fragments_transplanted_on_dome-shaped_concrete_artificial_reef_with_different_composition
- Nurman, F. H., Sadarun, B., & Palupi, R. D. (2017). Tingkat kelangsungan hidup karang *Acropora formosa* hasil transplantasi di perairan Sawapudo Kecamatan Soropia. *Sapa Laut*, 2(4), 119–125. <https://text-id.123dok.com/document/zkx1r51y-tingkat-kelangsungan-hidup-karang-acropora-formosa-hasil-transplantasi-di-perairan-sawapudo-kecamatan-soropia-survival-rate-of-coral-acropora-formosa-as-transplantation-results-in-sawapudo-waters-soropia-district.html>
- Nybakken, J. P. (1992). *Biologi laut: Suatu pendekatan ekologis*. PT Gramedia Pustaka Utama.
- Partini. (2009). *Efek sedimentasi terhadap terumbu karang di Pantai Timur Kabupaten Bintan* [Skripsi tidak diterbitkan]. Program Studi Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Pesisir dan Lautan. Sekolah Pascasarjana IPB.
- Pastorok, R. A., & Bilyard, G. R. (1985). Effect of sewage pollution on coral reef communities. *Marine Ecology Progress Series*, 21, 175–189. <https://www.int-res.com/articles/meps/21/m021p175.pdf>
- Patty, & Simon, I. (2015). Karakteristik fosfat, nitrat, dan oksigen terlarut di perairan Selat Lembeh, Sulawesi Utara. *Jurnal Pesisir dan Laut Tropis*, 2(1), 18–23. <https://www.researchgate.net/>

- publication/334487442_Karakteristik_Fosfat_Nitrat_dan_Oksigen_Terlarut_di_Perairan_Selat_Lembah_Sulawesi_Utara
- Pratiwi, D. B., Ramses, R., & Efendi, Y. (2019). The differences pace of growth and survival rates of *Montipora tuberculosa* coral species which comes from parent transplants and parent nature. *Simbiosis*, 8(1), 10–19. <https://www.researchgate.net/publication/334725256>
- Rizal, A., Akbarsyah, N., Putra, P. K. D. N. Y., Permana, R., & Andhikawati, A. (2020). Molecular diversity of the bacterial community associated with *Acropora digitifera* (Dana, 1846) corals on Rancabuaya coastline, Garut District, Indonesia. *World Scientific News*, 144, 384–396. <https://www.researchgate.net/publication/341774597>
- Rizal, A., Wirawan, C. A., Pratiwy, F. M., & Pratiwi, D. Y. (2022). *Integrated development of marine and fisheries of Sangihe Islands district, North Sulawesi, Indonesia*. The Institute of Biopaleogeography named under Charles R. Darwin 12. <https://www.institutebiopaleogeography-darwin.com/wp-content/uploads/2012/11/IBPG-12-2022-1-63.pdf>
- Scoffin, T. P., Stearn, C., Boucher, D., Frydl, P., Hawkins, C. M., Hunter, I. G., & MacGeachy, J. K. (1980). Calcium carbonate budget of a fringing reef on the west coast of Barbados. I. Erosion, sediments and internal structure. *Bulletin of Marine Science*, 30(2), 475–508.
- Simarangkair, O. R., Yulianda, F., & Boer, M. (2015). Pemulihan komunitas karang keras pasca pemutihan karang di Amed Bali. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 20(2), 158–63. <https://journal.ipb.ac.id/index.php/JIPI/article/view/9963>
- Suhendar, D. B., Johan, O., Idris, S., Yusri, & Maduppa, H. H. (2020). Growth rate and survival of transplanted corals of the genera porites and *Montipora* in Pulau Tunda, Banten. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Kelautan dan Perikanan Ke-VII* (1–11). Fakultas Kelautan dan Perikanan, Universitas Nusa Cendana. https://www.researchgate.net/publication/347436131_
- Suharsono. (2017). *Jenis-jenis Karang di indonesia* (Ed. 3). Puslit Oseanografi-LIPI. Jakarta.

- Suharsono. (1984). *Pertumbuhan karang*. Puslitbang Oseanologi-LIPI.
- Sunarto. (2006). *Keanekaragaman hayati dan degradasi ekosistem terumbu karang* [Karya ilmiah]. Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Padjadjaran.
- Supranto, J. (2004). *Analisis multivariat: Arti dan interpretasi*. Rineka Cipta.
- Suprenant, B. (1991). *Designing concrete for exposure to seawater*. Magazine Engineering University of Colorado USA.
- Supriyadi. (2019). *Pengaruh faktor oseanografi dan suspensi sedimen terhadap pertumbuhan dan mortalitas karang transplantasi (Acropora spp.) di Paiton Probolinggo* [Skripsi]. Program Studi Ilmu Kelautan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Ampel.
- Wikana, I., & Wantutrianus. (2014). Pengaruh pemakaian fly ash abu batu sebagai pengganti sebagian semen pada kuat tekan beton mutu tinggi. *Majalah Ilmiah UKRIM*, 1(XIX), 41–52. <https://e-jurnal.ukrimuniversity.ac.id/file/IWAN%20-%20WANTUTRIANUS.%20Ed%201-2014.pdf>
- Wilkinson, C. (2008). *Status of coral reefs of the world: 2008*. Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rain Forest Research Centre.

