

Marine Journal

Desember 2016

PENGARUH PERUBAHAN IKLIM TERHADAP TERUMBU KARANG: ANTARA DAMPAK DAN PERANNYA DALAM SIKLUS KARBON

Al Azhar¹

¹ Lembaga Pengembangan dan Pemberdayaan Pendidik dan Tenaga Kependidikan, Kelautan, Perikanan, Teknologi Informasi dan Komunikasi (LP3TK-KPTK).

Abstrak

Perubahan iklim menyebabkan kerusakan terumbu karang, yang sering disebut peristiwa pemutihan karang (coral bleaching). Proses ini menyebabkan koloni karang menjadi putih, baik sebagian ataupun seluruh koloni. Hal ini mempengaruhi karang baik secara ekologi, biologi, maupun fisiologi. Kejadian pemutihan karang telah terjadi sejak tahun 1870, namun pemutihan karang massal secara global pada tahun 1998. Kemudian tahun 2002, tahun 2005, tahun 2007, dan tahun 2010. Peristiwa pemutihan karang tersebar di hampir seluruh belahan dunia, antara lain di Karibia, Jamaika, Brazil, Kolombia, Venezuela, Maladewa, Indonesia, India, Sri Lanka, Burma, Thailand, Singapura, Malaysia, dan di berbagai bagian Afrika Timur. Terumbu karang merupakan sebuah system yang berperan dalam siklus karbon global (perubahan iklim) dalam hal sink/source CO₂. Proses biogeokimia paling penting dalam sistem terumbu karang adalah fotosintesis dan kalsifikasi. Perilaku sink/source CO₂ juga dikendalikan oleh keseimbangan antara kedua proses. Fotosintesis menurunkan tekanan parsial CO₂ (pCO₂) sehingga terumbu karang berperan sebagai sink karbon. Sebaliknya, produksi kalsium karbonat (kalsifikasi) menaikkan tekanan parsial CO₂, sehingga terumbu karang berpotensi sebagai source karbon.

Kata Kunci : Terumbu Karang, Karbon, Perubahan Iklim.

Pendahuluan

Aktifitas manusia telah menyebabkan peningkatan gas rumah kaca (GRK) yang menimbulkan terjadinya perubahan iklim bumi (IPCC 2001). Perubahan iklim global terutama diakibatkan oleh pengaruh emisi gas-gas seperti CO₂, CH₄, N₂O, CF₄, C₂F₆. Dua dampak peristiwa tersebut yang sering dibicarakan, yaitu adanya peningkatan suhu udara atau permukaan bumi dan pencairan es di daerah kutub (Herterich 2001, Seiler dan Hahn 2001, Hupfer *et al.* 2001, Sterr 2001a,b). Kedua dampak yang ditimbulkan tersebut juga berpengaruh terhadap wilayah pesisir dan laut. Hal ini dikarenakan atmosfer dan wilayah pesisir adalah dua lingkungan yang saling berinteraksi dan mengontrol iklim di planet bumi. Hal ini dibenarkan IPCC (2007) yang menyatakan bahwa wilayah pesisir adalah wilayah yang paling rentan terkena dampak buruk perubahan iklim. Sistem pesisir (*coastal system*) memiliki sistem ekologi dan sistem sosial yang terkait sangat erat dan merupakan sebuah sistem terintegrasi. Keduanya memiliki kompleksitas dan terus berubah, sehingga pengelolaannya akan selalu dihadapkan pada

persoalan ketidakpastian dan perubahan mendadak (Folke *et al.* 2002).

Ekosistem pesisir yang rentan terhadap perubahan iklim yakni terumbu karang. Gangguan terhadap kondisi dan kerusakan terumbu karang yang sering dijumpai adalah peristiwa pemutihan karang (*coral bleaching*). Pemutihan merupakan akibat dari cekaman (*stress*) sewaktu terjadi perubahan besar pada organisasi jaringan dan sitokimia dalam polip karang (Hayes & Goreau 1992). Hasil akhir dari proses ini menyebabkan koloni karang menjadi putih, baik sebagian ataupun seluruh koloni.

Kejadian pemutihan karang telah tercatat sejak tahun 1870, seringkali terjadi pada beberapa koloni karang atau gugusan terumbu (Reid *et al.* 2011). Laporan pertama tentang pemutihan karang massal, yang terjadi pada seluruh terumbu karang di berbagai kawasan ialah pada tahun 1979. Selanjutnya frekuensi, skala dan intensitas kejadian pemutihan karang massal meningkat tajam selama beberapa tahun terakhir. Kejadian ini dipicu oleh peningkatan suhu global, dan menimbulkan kekhawatiran akan masa depan terumbu karang.

Efek perubahan iklim semakin terlihat ketika terjadi pemutihan karang massal secara global pada tahun 1998. Sebanyak 16% dari terumbu karang dunia telah hilang sebagai akibat dari hanya peristiwa tunggal tersebut. Sepuluh tahun kemudian, jumlah terumbu karang yang hilang meningkat menjadi 40%. Sebanyak 15% lainnya berada dalam kondisi kritis, sedangkan hampir semua karang di seluruh dunia sekarang dalam kondisi terancam. Pada tahun 2002, hampir 90% kawasan Great Barrier Reef (GBR) mengalami beberapa pemutihan. Tahun 2005, merupakan tahun terpanas yang pernah tercatat di belahan bumi utara. Peningkatan suhu laut di Karibia memicu kejadian pemutihan karang yang parah, di mana 95% dari seluruh terumbu karang di daerah ini mengalami pemutihan (Reid *et al.* 2011). Pada daerah-daerah seperti Jamaika, 34% dari seluruh karang memutih dan lebih dari separuhnya kemudian mati. Pada tahun yang sama, pemutihan massal jugaterjadi di daerah tropis Amerika bagian selatan, di antaranya terumbu karang di Brazil, Kolombia, dan Venezuela. Terumbu Karang di Teluk Aden mengalami pemutihan massal pada tahun 2007, setelah suhu laut mencapai 36,2°C, yang terjadi dalam jangka waktu sebulan. Seluruh terumbu karang di daerah ini memutih dengan tingkat kematian 30%.

Lebih lanjut Reid *et al.* (2011) menyatakan pemutihan karang massal terjadi di Karibia, Maladewa, India, Sri Lanka, Burma, Thailand, Singapura, Malaysia, dan di berbagai bagian Afrika Timur. Ini menunjukkan bahwa besaran dan skala terjadinya pemutihan karang tahun 2010/2011 merupakan yang paling parah sejak tahun 1997/1998, dimana 16% dari terumbu karang dunia mati.

Pemanasan global juga berdampak buruk terhadap terumbu karang di Indonesia. Tingginya suhu permukaan laut di Laut Andaman selama bulan Mei (2010) telah menyebabkan terjadinya pemutihan karang massal di seluruh wilayah tersebut. Menurut situs Coral Reef Watch NOAA, suhu permukaan laut mencapai puncaknya pada 27 Mei 2010, yaitu 34°C atau 4°C lebih tinggi dari rata-rata selama ini pada waktu yang sama. Pemutihan massal juga telah dilaporkan terjadi di beberapa

daerah di Indonesia seperti Padang, Sumatra, Taman Nasional Kepulauan Seribu, Banyuwangi di Bali, Kupang di Timur Barat, hingga di teluk Tomini di Sulawesi. Tingkat kerusakan bervariasi, dari yang parah (75%) di Sumatra dan Sulawesi, tingkat sedang hingga agak parah di berbagai lokasi di Jawa, Bali, Lombok dan Raja Ampat Papua Barat.

Jaringan Terumbu Karang Indonesia (INCRES/Indonesia Coral Reef Society) membenarkan adanya fenomena pemutihan karang pada tahun 2010, antara lain di Aceh, Makassar, Kepulauan Seribu, Bali, dan Lombok. Dilaporkan hampir sepertiga dari 200-an jenis karang di Kepulauan Spermonde, pada tahun 2010 mengalami pemutihan, seperti kelompok Acroporoid, Pocilloporoid, dan Poritid. Kelompok karang yang berpolip besar seperti Lobophyllia dan Euphyllia bersama dengan anemone baru nampak memutih setelah bulan kedua. Selain itu terdapat kawasan lain di Indonesia yang mengalami pemutihan karang dan peningkatan penyakit, namun tidak dilaporkan. Para ahli memprediksi bahwa pada tahun-tahun berikutnya, pemutihan karang akan semakin parah dan menjadi even tahunan jika tidak dilakukan pengelolaan terumbu karang yang efektif, utamanya pendekatan global terhadap emisi karbon (Reid *et al.* 2011).

Upaya pengelolaan terumbu karang yang efektif terhadap perubahan iklim global adalah model adaptasi atau resiliensi ekosistem (Bellwood *et al.* 2004; Hughes *et al.* 2007; Nystrom *et al.* 2008). Pemahaman tersebut menyadarkan pentingnya teknik menilai resiliensi ekosistem terumbu karang serta pengembangan pendekatan yang dibutuhkan untuk beradaptasi. Adaptasi merupakan kemampuan sistem ekologi dan sosial yang terkait sangat erat, untuk menghadapi situasi baru tanpa mengurangi kesempatan mendapatkan pilihan masa depan. Kunci untuk meningkatkan kapasitas adaptif ialah resiliensi yang merupakan strategi yang mulai dikembangkan (Folke *et al.* 2002). Pengembangan konsep ini sejalan dengan pendapat Berkes dan Seixas (2005) bahwa pengembangan sistem resiliensi ekologi-sosial merupakan kunci bagi pembangunan yang berkelanjutan khususnya bila dikaji dari

Marine Journal

Desember 2016

aspek perubahan mendadak seperti pemanasan global.

Holling (2001), Gunderson & Holling (2002), dan Adger *et al.* (2005) berpendapat bahwa resiliensi merupakan derajat kemampuan system kompleks yang adaptif untuk mengorganisaikan diri secara mandiri, serta membangun kapasitas belajar dan beradaptasi. Dengan demikian maka resiliensi ekologi-sosial merupakan kemampuan sistem kompleks yang adaptif untuk mengabsorpsi gangguan, mengorganisaikan diri secara mandiri serta membangun kapasitas adaptasi dari perubahan iklim, sehingga mampu mempertahankan struktur dan proses *esensial* serta menyediakan umpan balik.

Resiliensi merupakan pendekatan yang berbasis ekosistem. Pendekatan yang berbasis ekosistem dalam pengelolaan ekosistem kompleks perlu menyertakan masyarakat dalam konsep ekosistem (McLeod dan Leslie 2009 in Shackeroff J.M. *et al.* 2011). Oleh sebab itu, perlu dicari strategi pengelolaan ekosistem terumbu karang di wilayah pesisir dengan harapan masyarakat memperoleh manfaat dari strategi pengelolaan tersebut, dan rancangan untuk membangun model pengelolaan yang berbasis kepada resiliensi ekologi-sosial terumbu karang merupakan strategi yang relevan untuk menjawab permasalahan degradasi ekosistem terumbu karang yang setiap saat rentan terhadap perubahan iklim global. Berdasarkan alasan-alasan diatas maka kajian pengelolaan terumbu karang dengan pendekatan model adaptasi ekologi-sosial (resiliensi eko-sosio *system*) sebagai dasar pengelolaan ekosistem terumbu karang, perlu segera dilakukan.

1. Terumbu Karang

Terumbu karang adalah struktur di dasar laut berupa deposit kalsium karbonat di laut yang dihasilkan terutama oleh hewan karang. Karang adalah hewan tak bertulang belakang yang termasuk dalam Filum Coelenterata (hewan berrongga) atau Cnidaria (Timotius 2003). Terumbu karang

adalah ekosistem laut yang paling spektakuler dan beragam di planet bumi. Terumbu karang juga sangat kompleks dan produktif (Reaka-Kudla 1996).

1.1. Komponen yang Berperan Penting dalam Terumbu Karang

Terumbu karang hidup pada kondisi karakteristik lingkungan perairan tertentu, dalam pertumbuhannya terumbu karang dipengaruhi oleh beberapa factor lingkungan perairan yang berperan penting bagi pertumbuhan dan perkembangan terumbu karang. Terumbu karang pada umumnya terbatas pada suhu perairan antara 18-36°C, nilai optimal antara 26-28°C. Hal ini selanjutnya akan diekspresikan dalam pola distribusi dan keragaman terumbu karang secara latitudinal (Hubbard 1990). Sensivitas terumbu karang terhadap suhu dibuktikan dengan dampak yang ditimbulkan oleh perubahan suhu akibat pemanasan global yang melanda perairan Indonesia pada tahun 1998, yaitu terjadinya pemutihan karang yang diikuti dengan kematian massal mencapai 90-95%. Suharsono (1999) telah mencatat selama peristiwa pemutihan karang tersebut, suhu rata-rata permukaan air sekitar gugusan Pulau Pari Kepulauan Seribu berkisar 2-3°C diatas suhu normal. Menurut Neudecker (2001), perubahan suhu secara mendadak sekitar 4-6°C di bawah atau di atas ambient level dapat mengurangi pertumbuhan karang bahkan mematikannya.

Mengingat binatang karang (hermatypic atau *reef-building corals*) hidupnya bersimbiose dengan ganggang (*zooxanthellae*) yang melakukan proses fotosintesa, maka pengaruh cahaya (*illumination*) adalah penting sekali. Menurut Kanwisher dan Wainwright (1997) titik kompensasi binatang karang terhadap cahaya adalah pada intensitas cahaya antara 200-700 fluks (umumnya terletak antara 300-500 fluks). Intensitas cahaya secara umum di permukaan laut 2500-5000 fluks. Mengingat kebutuhan tersebut maka binatang karang (*coral*

reefs) umumnya tersebar di daerah tropis. Berkaitan dengan pengaruh cahaya tersebut terhadap pertumbuhan terumbu karang, maka faktor kedalaman juga membatasi kehidupan binatang karang. Pada perairan yang jernih memungkinkan penetrasi cahaya bisa sampai pada lapisan yang sangat dalam, sehingga binatang karang juga dapat hidup pada perairan yang cukup dalam.

1.2. Kerusakan Terumbu Karang

Fenomena alam yang berdampak besar terhadap kondisi dan kerusakan terumbu karang ialah peristiwa pemutihan karang (*coral bleaching*). Pemutihan merupakan akibat dari cekaman (*stress*) sewaktu terjadi perubahan besar pada organisasi jaringan dan sitokimia dalam polip karang (Hayes & Goreau 1992). Hasil akhir dari proses ini menyebabkan koloni karang menjadi putih, baik sebagian ataupun seluruh koloni. Beberapa contoh pemutihan terutama berhubungan dengan terdegradasinya pigmen-pigmen klorofil pada zooxantela yang disebabkan oleh pecahnya atau terjadinya fotooksidasi klorofil (Asada & Takahashi 1987, Brown 1997). Hasil pengamatan di Lautan Pasifik oleh Brown dan Ogden (1993) pada tahun 1982-1983 memperlihatkan adanya peningkatan suhu permukaan laut yang mengakibatkan keluarnya alga yang bersimbiosis dengan hewan terumbu. Hewan karang yang kehilangan simbiotiknya ini kemudian mati dan diperkirakan menurun dari 70% sampai 95%. Dengan demikian hewan ini masih menjadi faktor alam yang memberikan kontribusi utama terhadap penurunan kondisi terumbu karang (Glynn 1993, Hoegh-Guldberg *et al.* 1997). Empat episode utama dari peristiwa pemutihan karang terjadi sejak tahun 1979 dan menyebabkan kematian massal populasi karang. Setelah peristiwa itu hampir seluruh sistem yang ada di terumbu karang menghilang (Hoegh-Guldberg 1999).

Secara biologi, peristiwa pemutihan menyebabkan karang kehilangan 60-90% dari jumlah zooxantelanya. Zooxantela yang masih tersisa teridentifikasi kehilangan 50-80% pigmen fotosintesisnya (Glynn 1996). Gangguan

yang berkepanjangan dapat menyebabkan kematian, sebagian atau keseluruhan, tidak hanya pada individu koloni, tetapi juga terumbu karang secara luas. Beberapa spesies karang, pemutihan menyebabkan pertumbuhan jaringan dan pengendapan kapur terhenti, demikian pula proses reproduksi secara seksual terhambat. Karang dapat bertahan hidup jika tekanan hanya berlangsung dalam waktu yang singkat, tetapi akan mati jika dalam waktu yang lama (Pomeroy *et al.* 1999).

Pemutihan dapat pula terjadi pada organisme lain yang berasosiasi dengan terumbu karang seperti karang lunak, anemon, dan beberapa spesies kina raksasa tertentu (*Tridacna* spp.), yang juga memiliki alga simbiosis dalam jaringannya (Hoegh-Guldberg & Jones 1999). Sama seperti karang, organisme ini dapat juga mati apabila kondisi yang mengarah kepada pemutihan cukup parah.

Secara fisiologi, suhu perairan akan mempengaruhi laju metabolisme pada berbagai karang dan simbiotiknya. Pengaruh suhu terhadap produksi bergantung pada respons fotosintesis dan respirasi dari zooxantela dan hewan-hewan terhadap perubahan suhu yang terjadi. Kemampuan karang untuk mengadakan penyesuaian terhadap perubahan suhu dapat bervariasi menurut spesies dan tempat hidup karang. Sebagai contoh, karang laut dangkal dapat menyesuaikan diri pada suatu kisaran suhu yang luas jika dibandingkan dengan karang laut dalam (Muller-Parker & D'Elia 1995).

Kasus cekaman suhu, kenaikan suhu mengganggu kemampuan zooxantela untuk berfotosintesis dan dapat memicu produksi senyawa kimia berbahaya yang akhirnya merusak sel-sel mereka (Jones *et al.* 1998, Hoegh-Guldberg & Jones 1999). Akibat dari kehilangan zooxantela dan penurunan pigmen fotosintesis menyebabkan penurunan dan efisiensi fotosintesis pada zooxantela (Brown 1997). Warner *et al.* (1996) mempelajari zooxantela dari spesies yang hidup di belakang daerah terumbu, *Siderastrea radians* lebih tahan terhadap suhu dibandingkan karang *Montastrea annularis* dan *Agaricia lamarkii* yang hidup di bagian depan terumbu. Zooxantela pada *M. annularis* tampak lebih peka terhadap kerusakan

Marine Journal

Desember 2016

yang disebabkan oleh suhu pada atau dekat pusat reaksi fotosistem II, sedangkan zooxantela pada *S. radians* tetap mampu menghilangkan energi yang dibangkitkan melalui jalur nonfotokimia, dengan demikian akan melindungi fotosistem kerusakan selama terjadi peningkatan suhu.

Secara ekologi, karang-karang pembangun terumbu tidak semuanya sama dalam kepekaannya menerima pengaruh dari peningkatan suhu. Sebagai contoh, karang masif (*Porites* spp.) relatif tahan terhadap tekanan suhu, jika mengalami pemutihan maka cenderung pulih tanpa peningkatan kematian. Sedangkan *Acropora* (karang bercabang) terlihat lebih peka oleh peningkatan suhu perairan. Dalam kasus ini bisa mencapai 95% dari koloni yang mengalami pemutihan dan mati dalam 3-6 bulan berikutnya (Gleason & Wellington 1993). Perubahan struktur komunitas juga dilaporkan oleh Brown (1997) di Pulau Pari yang rata-rata terumbunya didominasi oleh komunitas *Acropora* bercabang sebelum peristiwa pemutihan pada tahun 1983, namun pada tahun 1994 tempat tersebut telah didominasi oleh *Porites* bercabang dan masif.

Dampak dari menurunnya pertumbuhan karang yang terkena pemutihan ialah mengurangi kemampuan karang untuk berkompetisi terhadap ruang dengan organisme bentik lainnya, seperti *turf algae*, alga koralin, makroalga, sepon, bryozoa, dan tunicata. Hasil pengamatan di Costa Rica, Panama, Kepulauan Galapagos, dan Indonesia menunjukkan bahwa alga bentik dengan cepat tumbuh menutupi karang yang hampir mati atau mati pada terumbu-terumbu yang rusak oleh peristiwa pemanasan El Niño (Glynn 1993). Selain itu Rani (2001) menyatakan pemutihan karang diduga mempengaruhi struktur komunitas ikan, namun karena populasi ikan-ikan terumbu memiliki karakter yang sangat kompleks maka berbagai faktor dapat mengontrol jumlah mereka dan pengaruhnya dapat bervariasi dari satu terumbu ke terumbu lainnya. Semuanya bergantung pada komposisi komunitas ikan, interaksi habitat sebelum dan sesudah dampak, dinamika

peremajaan, serta struktur habitat sebelum dan sesudah gangguan. Jika spesies-spesies karang yang dominan terpengaruh oleh dampak pemutihan dan terdapat keterkaitan erat antara karang-karang dan populasi ikan yang ada, maka perubahan dalam komunitas mungkin dapat terjadi. Jika karang-karang mati menjadi pecahan-pecahan karang (*rubble*), peluangnya ialah akan ada suatu penurunan besar terhadap kelirnpahan dan keberagaman ikan.

1.3. Konsep Adaptasi Terumbu Karang

Adaptasi merupakan kemampuan sistem sosial dan ekologi (*eco-socio*) yang terkait sangat erat untuk menghadapi situasi baru tanpa mengurangi kesempatan mendapatkan pilihan masa depan. Kunci untuk meningkatkan kapasitas adaptif ialah *resiliensi* yang merupakan strategi yang mulai dikembangkan (Folke *et al.* 2002). Holling dan Gunderson (2002) memberikan definisi resiliensi ekosistem sebagai besarnya gangguan yang dapat diterima sebelum sistem berubah strukturnya dengan berubahnya peubah dan proses yang mengendalikan perilakunya. Dengan mengadopsi definisi Holling, maka Folke *et al.* (2004) memberikan definisi umum resiliensi ekosistem sebagai ukuran besarnya gangguan yang dapat diterima oleh suatu sistem sebelum terjadi perubahan menjadi suatu kondisi (kestabilan) baru yang berbeda pengendalian struktur dan fungsinya. Holling juga membedakan antara resiliensi ekologis dengan resiliensi rekayasa (*engineering*), definisi yang pertama merupakan resiliensi ekologis. Resiliensi rekayasa (*engineering*) merupakan ukuran laju suatu sistem mencapai keseimbangan setelah gangguan berlalu. Resiliensi rekayasa ini dianggap tidak tepat digunakan untuk ekosistem yang memiliki kondisi keseimbangan yang banyak. Hughes *et al.* (2007) memberikan definisi yang khusus untuk resiliensi terumbu karang yaitu kemampuan terumbu karang untuk menghadapi gangguan dan membangun kembali sistem yang didominasi karang.

Faktor-faktor yang secara teoritis memegang peranan penting di dalam resiliensi terumbu karang meliputi keanekaragaman hayati, skala dan redundansi fungsi ekologis, memori ekologis, dan herbivori. Banyaknya faktor yang terlibat di dalam pengukuran resiliensi menjadikan pengukuran tersebut tidak mudah dilakukan hingga saat ini. Namun sebelum mengkaji keempat faktor resiliensi tersebut, pemahaman tentang perubahan komunitas dan gangguan pada terumbu karang juga sangat penting di dalam pengelolaan. Secara umum faktor-faktor yang berperan penting dalam resiliensi terumbu karang dijelaskan sebagai berikut:

- Keanekaragaman hayati memiliki peran yang sangat penting di dalam menjaga stabilitas ekosistem. Keanekaragaman hayati di tingkat spesies memberikan kekuatan kepada komunitas karang terhadap gangguan pemutih karang dan pemangsaan oleh *Acanthaster planci* dan *Drupella*. Kedua pemangsa karang tersebut memiliki preferensi terhadap karang jenis *Acroporidae* dan *Pocilloporidae* (Moran 1990, Cuming 1999), sehingga dalam intensitas gangguan yang sedang anggota komunitas karang lainnya tidak terganggu oleh pemangsa karang tersebut. Banyak penelitian mengungkapkan bahwa keanekaragaman yang tinggi diperlukan untuk berlangsungnya proses-proses ekologis, namun sebenarnya yang dibutuhkan bukanlah keanekaragaman spesies melainkan keanekaragaman fungsional (Peterson *et al.* 1998). Walaupun keanekaragaman fungsi ekologis lebih penting dalam resiliensi, keanekaragaman spesies juga dapat digunakan sebagai garansi atau petunjuk tingkat tentang resiliensi suatu ekosistem (Bengtsson 2002). Tingginya keanekaragaman spesies merupakan suatu jaminan bahwa fungsi-fungsi ekologis masih akan berjalan ketika gangguan yang mendadak terjadi di masa mendatang, yaitu gangguan yang skala dan intensitasnya belum pernah terjadi sepanjang sejarah ekosistem.

- Redundansi merupakan faktor penting dari resiliensi ekosistem. Redundansi dapat terjadi pada skala yang sama dan dapat pula terjadi antar skala. Redundansi di dalam skala yang sama terjadi ketika fungsi ekologis dijalankan oleh dua atau lebih spesies yang berbeda tetapi mempunyai skala ukuran hampir sama. Redundansi antar skala terjadi jika fungsi ekologis dari suatu spesies digantikan oleh spesies lain yang berbeda ukuran skalanya dari kelompok fungsional yang sama, misalnya antara penyu dan ikan herbivori dengan bulu babi *Diadema antillarum* (Jackson 1997).
- Memori ekologi merupakan komposisi dan distribusi organisme serta interaksinya dalam ruang dan waktu, termasuk pengalaman *life history* dengan fluktuasi lingkungan (Nystrom and Folke 2001). Memori ekologis tersebut terdiri atas tiga komponen, yaitu komponen biologis dan struktur yang selamat dari gangguan (*biological and structural legacy*), organisme penghubung bergerak (*mobile link*), dan daerah pendukung (*support area*).
- Herbivori merupakan suatu proses ekologis yang sangat penting pada resiliensi ekosistem terumbu karang. Herbivori merupakan satu-satunya mekanisme yang mengendalikan kelimpahan makroalgae. Jika pertumbuhan makroalgae tidak dikendalikan maka komunitas makroalgae akan segera mendominasi terumbu karang (Hughes *et al.* 2007). Dominasi makroalgae berdampak negatif pada komunitas karang batu.

2. Tinjauan Penelitian Terdahulu

Beberapa kajian terdahulu terkait yang berkaitan dengan pengelolaan terumbu karang dan perubahan iklim yang telah dilakukan di Indonesia maupun di mancanegara, antara lain:

2.1. Penelitian terkait pengelolaan terumbu karang

Walker *et al* (2002) telah mengkaji tentang manajemen resiliensi social ekologi sistem, sebuah hipotesis pendekatan partisipatif (*Participatory Approach*). Hasil kajian

Marine Journal

Desember 2016

menunjukkan bahwa terdapat empat tahap dalam melakukan analisis resiliensi sistem sosial-ekologi yang dapat digunakan sebagai pendekatan dalam memprediksi sistem resiliensi sosial-ekologi pada masa depan.

Perrings (1998) telah mengkaji dinamika resiliensi dalam sistem ekonomi lingkungan. Hasil kajian ini menunjukkan bahwa penggunaan kolaborasi antara konsep ekologi dan konsep ekonomi dalam penerapan konsep resiliensi dapat digunakan untuk mengukur tingkat resiliensi yang kaitannya dengan keadaan yang terjadi di alam. Kajian ini mengadopsi konsep dari Holling (1973) untuk mengukur resiliensi sosial-ekologi dari waktu yang digunakan dan faktor penyebabnya serta besarnya gangguan yang diserap sebuah sistem beserta penyebabnya.

Clanahan *et al.* (2002) telah mengkaji status ekologi dalam menilai resiliensi terumbu karang. Hasil kajian ini merekomendasikan beberapa variabel ekologi yang dapat digunakan sebagai indikator resiliensi ekosistem terumbu karang seperti keanekaragaman jenis, keystone species dan redundancy, predator, konektivitas, dan degradasi ekosistem.

Nystrom and Folke (2001), telah mengkaji tentang resiliensi spasial terumbu karang. Kajian terfokus pada interaksi antara resiliensi ekosistem terumbu karang dengan gangguan lingkungan yang diakibatkan oleh aktivitas manusia. Hasil kajian merekomendasikan faktor resiliensi spasial dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti memori ekologi (warisan biologis, *mobile link* spesies, dan dukungan daerah), fungsi keanekaragaman ekosistem terumbu karang sebagai *seascapes* (pemandangan laut) dan manajemen pengelolaan.

Hughes *et al.* (2007), telah mengkaji peranan ikan herbivor terhadap resiliensi terumbu karang. Kajian terfokus peran serta ikan-ikan herbivore, tahap pergeseran, dan daya resiliensi terumbu karang terhadap perubahan iklim. Sangaji M (2012), telah mengkaji rancang bangun model pengelolaan terumbu karang berbasis resiliensi eko-sosial system (kasus di Teluk Kotania Provinsi Maluku). Kajian terfokus

pada estimasi kondisi resiliensi dengan formulasi indeks resiliensi ekologi-sosial (ekosos) terumbu karang secara spasial-dinamis dengan penggunaan beberapa tools analisis dan aplikasi system dalam mewujudkan penilaian resiliensi terumbu karang secara cepat.

2.2. Penelitian terkait penyerapan dan pelepasan karbon

a) Studi Potensi Laut Indonesia sebagai Penyerap Karbon

Pusat Riset Wilayah Laut KKP bekerja sama dengan ITB melakukan riset tentang potensi laut Indonesia sebagai penyerap CO₂ pada tahun 2005/2006. Penelitian tersebut merupakan studi awal yang bertujuan untuk mengkaji secara kuantitatif aliran pertukaran CO₂ antara laut dan udara beserta pola sebarannya dalam skala ruang dan waktu di perairan Indonesia, melalui suatu pemodelan matematis pertukaran CO₂ laut-udara (*Sea-Air CO₂ flux exchange*) dengan menggunakan data citra satelit dan data klimatologi laut (Pranomo *et al.* 2010).

Studi awal menarik beberapa kesimpulan yakni: 1) meskipun dalam skala global perairan di wilayah tropis berpotensi sebagai sumber pelepas CO₂, dari hasil studi awal dapat ditunjukkan bahwa perairan Indonesia memiliki variabilitas baik sebagai pelepas, maupun sebagai penyerap CO₂. Terdapat dua kawasan yang memiliki potensi tinggi dalam penyerapan CO₂ yakni perairan Arafura dan perairan Selatan Jawa; 2) Tekanan parsial CO₂ laut memegang peranan vital dalam proses transfer atau aliran CO₂ dari atmosfer ke laut dan sebaliknya sehingga tingkat akurasi perhitungan tekanan parsial CO₂ laut sangat dibutuhkan.

b) Studi Karbon di Sungai Brantas – Jawa Timur

Studi karbon di Sungai Brantas dilakukan oleh tim peneliti dari Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT). Pengukuran konsentrasi dan fluks dari *dissolved* dan *particulate organic dan inorganic carbon* dilakukan secara bulanan dari bulan Juli 2005

hingga Juni 2006 di DAS Sungai Brantas, yang merupakan sungai *bertipe tropical mountainous* berukuran sedang dan kedua terpanjang di Pulau Jawa (Pranomo *et al.* 2010).

Konsentrasi DIC tinggi secara konsisten sepanjang tahun karena adanya *carbonate weathering* dalam DAS, kecuali bagian tengah dari DAS, dimana konsentrasi DOC sangat seasonal karena variasi dari aktifitas biologis. Konsentrasi *total inorganic carbon* secara substansial melampaui konsentrasi *total organic carbon*, tetapi perbedaannya menurun dari Januari hingga April dimana DOC meningkat tajam. *Carbon budget* mengindikasikan bahwa daerah hulu sungai merupakan *carbon source*, dan daerah tengah sungai *carbon sink*.

c) Studi Penyerapan Karbon oleh Berbagai Jenis Fitoplanton

Kajian penyerapan karbon oleh fitoplanton dilakukan sejak tahun 2007 oleh BPPT, untuk mengetahui tingkat serapan CO₂ oleh fitoplankton di lautan. Prospek fitoplankton di Indonesia (Pranomo *et al.* 2010), sebagai tumbuhan air yang menyerap karbon sangat besar. Wilayah laut Indonesia meliputi 70 persen dari total wilayahnya sehingga kandungan biomasnya jauh lebih banyak dibandingkan dengan tumbuhan di darat. Di lautan terdapat ratusan jenis fitoplankton. Dengan demikian potensi Indonesia mengisap CO₂ di laut sangat tinggi. Penelitian di University of New Zealand menunjukkan, satu miligram klorofil fitoplankton dapat menyerap 1,65 miligram CO₂. Ketika gas karbon mengendap ke permukaan air, maka akan berubah menjadi organik partikulat dan karbon organik terurai. Karbon partikulat akan tenggelam ke dasar laut. Sebagian lainnya akan dimakan biota laut.

d) Penyerapan Karbon oleh Laut Jawa

Tim penelitian IPB telah melakukan riset siklus karbon di Laut Jawa dengan mempertimbangkan sistem karbonat laut, arus laut, dan suplai dari daratan. Koropitan (2008) mengembangkan model matematika untuk mencoba meniru mekanisme di Laut Jawa. Penelitian ini menyimpulkan bahwa Laut Jawa berpotensi melepaskan karbon ke atmosfer

dalam kisaran 0,001 – 0,003 mol C/m²/tahun. Angka ini termasuk kecil (kurang dari 0,1%) dibanding dengan peluang pelepasan karbon pada lokasi upwelling ekuator di Lautan Pasifik, yang merupakan *carbon source* terbesar dari perairan global. Lokasi upwelling, yang memang memiliki temperatur permukaan laut yang rendah karena naiknya massa air dari lapisan bawah, tetapi hal ini akan diikuti pula oleh kandungan DIC yang tinggi. Beberapa publikasi di jurnal internasional menunjukkan bahwa daerah upwelling umumnya bersifat sebagai *carbon source*.

e) Kajian Karbon di Teluk Banten

Penelitian dan monitoring karbon laut di Teluk Banten telah dilakukan Badan Riset Kelautan dan Perikanan KKP sejak 2008. Kegiatan yang lebih komprehensif dilakukan tahun 2009 hingga 2010. Hasil pengukuran dan analisa deskriptif atas kondisi oseanografi, meteorology dan klimatologi perairan Teluk Banten dan Laut Jawa serta variabilitas fluks karbon di daerah-daerah tersebut menyimpulkan beberapa hal penting, antara lain: Teluk Banten seperti juga halnya Laut Jawa juga dipengaruhi oleh fenomena *El Nino Southern Oscillation* (ENSO). Total CO₂ di Laut Jawa relatif rendah dibandingkan dengan perairan lintang yang tinggi sampai ke Antartika pada bujur yang sama. Secara vertikal, terjadi variasi total CO₂ di laut Jawa namun kecenderungannya naik seiring dengan bertambahnya kedalaman. Pola variasi alkalinitas di laut Jawa, baik horizontal maupun vertikal menunjukkan pola yang sama dengan total CO₂.

f) Potensi Padang Lamun Sebagai Karbon Rosot dan Penyerap Karbon

Kiswara (2010) melakukan studi pendahuluan potensi padang lamun sebagai karbon rosot dan penyerap karbon di Pulau Pari Jakarta. Kajian ini dilatarbelakangi karena keberadaan ekosistem pesisir seperti alga makro, lamun, dan mangrove, selalu diabaikan ketika melakukan penghitungan siklus karbon di lautan. Penelitian tersebut bertujuan mengetahui peranan jenis-jenis lamun (*Enhalus acoroides*,

Marine Journal

Desember 2016

Cymodocea rotundata dan *Thalassia hemprichii*) sebagai karbon rosot (*carbon stock*) dan penyerapan karbon (*carbon sink*).

Analisis kandungan karbon dalam bagian tanaman lamun dilakukan dengan metode Walkley & Black. Persentase karbon pada bagian tanaman lamun tertinggi didapat pada rimpang yang berkisar antara 41,53 - 50,63 % dan terendah pada akar antara 26,79 - 37,77 %. Karbon rosot oleh lamun *Enhalus acoroides*, *Cymodocea rotundata* dan *Thalassia hemprichii* di padang lamun Pulau Pari berkisar antara 30,62 - 545,33 gr.C.m⁻² dan penyerapannya berkisar antara 0,20 - 1,83 gr.C.m⁻².h⁻¹.

g) Kajian Budget Karbon Sistem Terumbu Karang

Suzuki dan Kawahata (2003) melakukan kajian terhadap buget karbon system terumbu karang, dengan pengamatan berbagai variasi untuk jenis topografi dan pengaturan oseanografi (terumbu karang tepi, karang penghalang, dan atol) di Indo-Pasifik. Karang diselidiki yakni Shiraho Reef, terumbu karang tepi dari Kepulauan Ryukyu, karang penghalang dan Atol Majuro di Pasifik Ekuator Utara dan Atol Male Selatan di Maladewa di Samudera Hindia serta Great Barrier Reef. Pengamatan dilakukan dengan mendeteksi perbedaan laguna lepas pantai pada tekanan parsial CO₂ (pCO₂) dan pendekatan grafis didasarkan pada total alkalinitas. Hasil penelitian menunjukkan topografi terumbu, terutama waktu tinggal air laguna, memiliki efek sekunder pada besarnya perbedaan pCO₂ lepas pantai-laguna. Terrestrial memberikan pengaruh terhadap terumbu pesisir, termasuk laguna GBR dan terumbu karang di Kepulauan Ryukyu. Masukan karbon tinggi tampaknya meningkatkan aliran CO₂ ke atmosfer karena rasio C:Pterlarut yang tinggi. Terumbu karang, pada umumnya bertindak sebagai *sink* alkalinitas dan lokasi pelepasan CO₂ yang potensial akibat presipitasi karbonat dan tanah yang membawa karbon.

Beberapa penelitian lain yang terkait budget karbon terumbu karang menggunakan pemodelan sistem CO₂ dengan pendekatan rasio

produksi karbon organik-anorganik bersih (ROI), antara lain, Suzuki (1998), Suzuki *et al.* (2001), Kawahata *et al.* (2000b), dan Gattuso *et al.* (1996a), menyimpulkan bahwa terumbu karang (khususnya *fringing reef*) berpotensi sebagai source (pelepas) karbon. Sebaliknya, Kayanne *et al.* (1995), Chisholm dan Barnes (1998) menggunakan pendekatan metabolisme, menyatakan bahwa terumbu karang bertindak sebagai sink (penyerap) karbon.

3. Saran

Berdasarkan uraian di atas, jelas bahwa penelitian pengelolaan terumbu karang dengan pendekatan resiliensi baik secara parsial ekologi maupun gabungan ekologi dan sosial telah banyak dikembangkan. Begitu pula kajian terkait isu perubahan iklim, yang disertai dengan perhitungan penyerapan karbon (*carbon sink*) dan pelepasan karbon (*carbon source*) di wilayah pesisir dan laut telah banyak dihasilkan. Bukan hanya kajian terhadap karbon pada perairan (laut), tetapi juga ekosistem pesisir seperti lamun dan terumbu karang, cukup berkembang. Namun sejauh ini belum ada penelitian adaptasi terumbu karang terhadap perubahan iklim (berkaitan dengan siklus karbon) dengan memadukan system ekologi (model ekosistem) dan system dinamis sosial.

Model ekologi dilakukan untuk memodelkan siklus karbon ekosistem dan perairan terumbu karang dengan memasukkan setiap komponen yang memanfaatkan unsur karbon dalam ekosistem terumbu karang (baik sebagai produsen, konsumen, maupun proses dekomposisi). Pemodelan ekologi atau ekosistem seperti ini dilakukan untuk memperhitungkan secara detil komponen-komponen yang memanfaatkan karbon untuk mengetahui tingkat penyerapan dan pelepasan karbon di ekosistem terumbu karang. Model dinamis sosial dengan mengidentifikasi dan memodelkan komponen-komponen social masyarakat pesisir yang dapat mempengaruhi peningkatan emisi karbon yang berimbas pada suhu perairan sebagai faktor pembatas ekosistem terumbu karang.

Daftar Pustaka

- Adger WN, Terry P, Hughes, Carl Folke, Stephen R. Carpenter, Johan Rockström .2005. Social-Ecological Resilience to Coastal Disasters. *Science* Vol. 309 No. 5737 pp. 1036-1039.
- Adi NS, Rustam. 2010. Study awal pengukuran system CO₂ di Teluk Banten, Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan VI ISOI 2009.
- Asada K, Takahashi M. 1987. Production and scavenging of active oxygen in photosynthesis. Di dalam: Kyle OJ, Osmond CB, Arntzen CJ (cd). *Photoinhibition*. Amsterdam: Elsevier. hlm 228-287.
- Bellwood DR, Hughes TP, Folke C, Nystrom M. 2004. Confronting the Coral Reef Crisis. *Nature* 429, 827-833.
- Bengtsson J. 2002. Disturbance and resilience in soil animal communities. *Eur J Soil Biol* 38:119-125.
- Berkes F, and CS Seixas. 2005. Building resilience in lagoon socio-ecological systems: a local-level perspective. *Ecosystems* 8: 967-974.
- Brown BE, Ogden JC. 1993. Coral bleaching. *Sci Amer* 268:64-70.
- Brown BE. 1997. Coral bleaching: causes and consequences. *Coral Reefs* 16:S129-S138.
- Chisholm, J. R. M. and Barnes, D. J. 1998. Anomalies in coral reef community metabolism and their potential importance in the reef CO₂ source-sink debate. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 95, 6566-6569.
- Clanahan Mc T, Polunin N, Done Terry. 2002. Ecological States and the Resilience of Coral Reefs. *Conservation Ecology* 6(2):18. <http://www.consecol.org/vol6/iss2> (9 Juli 2009).
- Cuming RL. 1999. Predation on reef-building corals: multiscale variation in the density of three corallivorous gastropods, *Drupella* spp. *Coral Reefs* 18:147-157.
- Eriyatno. 2003. Ilmu Sistem Meningkatkan Mutu dan Efektivitas Manajemen. IPB Press. Bogor.
- Folke C, Steve Carpenter, Thomas Elmqvist, Lance Gunderson, CS Holling, Brian Walker, Jan Bengtsson, Fikret Berkes, Johan Colding, Kjell Danell, Malin Falkenmark, Line Gordon, Roger Kasperson, Nils Kautsky, Ann Kinzig, Simon Levin, Karl-Göran Mäler, Fredrik Moberg, Leif Ohlsson, Per Olsson, Elinor Ostrom, Walter Reid, Johan Rockström, Hubert Savenije and Uno Svedin. 2002. Resilience and Sustainable Development: Building Adaptive Capacity in a World of Transformations. *Ambio* 31: 37- 40.
- Gattuso, J.-P., Frankignoulle, M., Smith, S. V., Ware, J. R. and Wollast, R. 1996a. Coral reefs and carbon dioxide. *Science* 271, 1298.
- Gleason OF, Wellington GM. 1993. Ultraviolet radiation and coral bleaching. *Nature* 365:836-838.
- Glynn PW. 1993. Coral reef bleaching: ecological perspectives. *Coral Reefs* 12:1-17.
- Glynn PW. 1996. Coral bleaching: facts, hypotheses and implications. *Glob Change Bio* 2:495-509.
- Hayes, RI, and TJ Goreau. 1992. Histology of Caribbean and south Pacific bleached corals. *Proc. 7th Int. Coral Reef Symp*, 1: P71.
- Herterich, K. 2001. The Ice of the Earth. Pp.65-69 in *Climate of the 21st Century: Changes and Risk: Scientific Facts* (JL Lozán, H Graßl, and P Hupfer, eds.). *Wissenschaftliche Auswertungen*, Hamburg.
- Hoegh-Guldberg O, Berkelmans R, Oliver 1. 1997. Coral bleaching: implications for the Great Barrier Reef Marine Park. Di dalam: *Conference in Research and reef management proceedings*. Townsville, 24-26 Nov 1996. hlm 171-193.
- Hoegh-Guldberg O, Iones R. 1999. Photoinhibition and photoprotection in symbiotic dinoflagellates from reef-building corals. *Mar Ecol Progr Ser* 183:73-86.

Marine Journal

Desember 2016

Hoegh-Guldberg O. 1999. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Mar Freshwat Res* 50:839-866.

Holling CS and Gunderson LH. 2002. Resilience and adaptive cycles. In: Gunderson LH, Holling CS (eds.) *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Washington: Island Press. Pp 25-62.

Holling CS. 1973. Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4:1-23.

Holling CS. 2001. Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems. *Ecosystems* 4: 390-405.

Hubbard JAEB. 1990. Sediment Rejection by Recent Scleractinian Corals: A Key to Pleaeo-Environmental Reconstruccion. *Geol. Rundsch*, 61:598-629.

Hughes TP, Maria J Rodrigues, David R Bellwood, Daniela Ceccarelli, Ove Hoegh-Guldberg, Laurence McCook, Natalie Moltschaniwskyj, Morgan S. Pratchett, Robert S. Steneck, and Bette Willis. 2007. Phase Shifts, herbivory, and the resilience of coral reefs to climate change. *Current Biology* 17:360-365.

Hughes TP, Maria J Rodrigues, David R Bellwood, Daniela Ceccarelli, Ove Hoegh-Guldberg, Laurence McCook, Natalie Moltschaniwskyj, Morgan S. Pratchett, Robert S. Steneck, and Bette Willis. 2007. Phase Shifts, herbivory, and the resilience of coral reefs to climate change. *Current Biology* 17:360-365.

Hughes TP, Maria J Rodrigues, David R Bellwood, Daniela Ceccarelli, Ove Hoegh-Guldberg, Laurence McCook, Natalie Moltschaniwskyj, Morgan S. Pratchett, Robert S. Steneck, and Bette Willis. 2007. Phase Shifts, herbivory, and the resilience of coral reefs to climate change. *Current Biology* 17:360-365.

Hupfer, P, H Grassl, J. lozán. 2001. Summary: Warning Signal from Climate. Pp.400-408 in *Climate of the 21st Century: Changes and Risk: Scientific Facts* (JL Lozán, H Graßl, and P Hupfer, eds.). *Wissenschaftliche Auswertungen*, Hamburg.

IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edited by Houghton JT et al. Cambridge University Press. Cambridge. UK.

IPCC. 2007. *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edited by Alley, R. et al. IPCC Secretariat. Switzerland.

Jackson JBC. 1997. Reefs since Columbus. *Coral Reefs* 16, Suppl:S23-S32

Jones R, Hoegh-Guldberg O, Larkum AWL, Schreiber U. 1998. Temperature induced bleaching of corals begins with impairment of dark metabolism in zooxanthellae. *Plant Cell Environ* 21:1219-1230.

Kanwisher JW dan SA Wainwright. 1997. Oxygen Balance in Some Reef Corals. *Biology Bulletin Marine Biology Lab., Woods Hole*, 133:378-390.

Kawahata, H., Suzuki, A., Ayukai, T. and Goto, K. 2000b. Distribution of the fugacity of carbon dioxide in the surface seawater of the Great Barrier Reef. *Mar. Chem.* 72, 257-272.

Kayanne, H., Suzuki, A. and Saito, H. 1995. Diurnal changes in the partial pressure of carbon dioxide in coral reef water. *Science* 269, 214-216.

Kiswara W. 2010. Studi pendahuluan: potensi padang lamun sebagai karbon rosot dan penyerap karbon di Pulau Pari, Teluk Jakarta. *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia* 36(3): 361-376.

Koropitan AF. 2008. Are the Indonesian seas carbon sources or sink. Department of Marine Science and Technology. Faculty of Fisheries and Marine Science. Bogor Agricultural University.

Moran PJ. 1990. *Acanthaster plancii* (L.): biographical data. *Coral Reefs* 9:95-96

Muller-Parker G, O'Elia CF. 1995. Interaction between corals and their symbiotic algae. Di dalam: Birkeland C. *Life and Death of Coral Reefs*. New York: International Thomson. 96-113.

Neudecker S. 2001. Growth and survival of scleractinian coral exposed to thermal effluents at Guam. *Proceeding 4th international coral reef symposium*. Manila (1): 173-180.

Nystrom M, Folke C. 2001. Spatial resilience of coral reefs. *Ecosystems* 4: 406-417.

Nystrom M, Graham AJ, Lokrantz J, Norstrom AV. 2008. Capturing the cornerstone of coral reef resilience: linking theory to practice. *Coral Reefs* 27:795-809.

Perrings C, Levin SA, Barrett S, Aniyar S, Baumol W, Bliss C, Bolin B, Dasgupta P, Ehrlich P, Folke C, Gren IM, Holling CS, Jansson A, Mäler KG, Martin D, and Sheshinski E. 1998. Resilience in Natural and Socioeconomic Systems, Environment and Development Economics. Vol. 3, pp. 222-235.

Peterson GD, CR Allen, and CS Holling. 1998 et al. 1998. Ecological resilience, biodiversity, and scale. *Ecosystems* 1:6-18.

Pomeroy R, Reaser JK, Thomas PO. 1999. Coral bleaching, coral mortality, and global climate change. The U.S. coral reef taskforce. http://www.state.gov/www/global/globalIssues/coral_reefs/990305_coralreeC_rpthrul.

Pranomo WS, Novi SA, Agustin R, Terry LK, Berny AS, Tukul RA, Sugiarto W. 2010. Rencana strategi riset karbon laut di Indonesia Edisi II. Pusat penelitian dan pengembangan sumberdaya laut dan pesisir. Kementerian Kelautan dan Perikanan.

Rani C. 2001. Pemutihan karang: pengaruhnya terhadap komunitas terumbu karang. Universitas Hasanuddin. *Hayati* 8: 86-90.

Reaka-Kudla ML. 1996. The global biodiversity of coral reefs: a comparison with rainforest. Di dalam: Reaka-Kudla ML, Wilson DE, Wilson EO. (ed). *Biodiversity II: Understanding and protecting our*

natural resources. Washington DC: National Academy. 83-108.

Reid C, Justin M, Dave L, Diana K. 2011. Terumbu karang dan perubahan iklim. Diadaptasi badan penelitian dan pengembangan kelautan dan perikanan Kementerian Kelautan dan Perikanan RI: panduan pendidikan dan pembangunan kesadartahuan. CoralWatch, the university of Queensland.

Sangaji M. Rancang bangun model pengelolaan terumbu karang berbasis resiliensi eko-sosio system (kasus di Teluk Kotania Provinsi Maluku) [Disertasi]. Institut Pertanian Bogor. Bogor.

Seiler, W, and J Hahn. 2001. The Natural and Anthropogenic Greenhouse Effect Changing Chemical Composition of the Atmosphere due to Human Activities. Pp.116-122 in *Climate of the 21st Century: Changes and Risk: Scientific Facts* (JL Lozán, H Graßl, and P Hupfer, eds.). *Wissenschaftliche Auswertungen*, Hamburg.

Shackeroff JM, LM Campbell, and LB Crowder. 2011. Social-ecological guilds: putting people into marine historical ecology. *Ecology and Society* 16(1): 52. <http://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss1/art52/>

Sterr, H. 2001a. Implications of Climate Change on Sea Level. Pp.199-205 in *Climate of the 21st Century: Changes and Risk: Scientific Facts* (JL Lozán, H Graßl, and P Hupfer, eds.). *Wissenschaftliche Auswertungen*, Hamburg.

Sterr, H. 2001b. Coastal Zones at Risk. Pp. 245-250 in *Climate of the 21st Century: Changes and Risk: Scientific Facts* (JL Lozán, H Graßl, and P Hupfer, eds.). *Wissenschaftliche Auswertungen*, Hamburg.

Suzuki A, Kawahata H. 2003. Carbon budget of coral reef systems: an overview of observations in fringing reefs, barrier reefs and atolls in the Indo-Pacific regions. *Tellus*, 55B, 428-444.

Suzuki, A. 1998. Combined effects of photosynthesis and calcification on the partial pressure of carbon dioxide in seawater. *J. Oceanogr.* 54, 1-7.

Suzuki, A., Kawahata, H., Ayukai, T. and Goto, K. 2001. The oceanic CO₂ system and carbon budget in the

Marine Journal

Desember 2016

Great Barrier Reef, Australia. Geophys. Res. Lett. 28, 1243-1246.

Timotius S. 2003. Biologi Terumbu Karang. Makalah Trining Course: Karakteristik Biologi Karang. Yayasan Terumbu Karang Indonesia.

Walker B, S Carpenter, J Anderies, N Abel, GS Cumming, M Janssen, L Lebel, J Norberg, GD Peterson, and R Pritchard. 2002. Resillience Management in Social-ecological Systems: a Working Hypothesis for a Participatory Approach. Conservation Ecology 6(1):14. <http://www.consecol.org/vol6/iss/art14> (5 Maret 2009).

Warner ME, Fitt WK, Schmidt GW. 1996. The effects of elevated temperature on the photosynthetic efficiency of zooxanthellae in hospite from four different species of reef coral: a novel approach. Plant Cell Environ 19:291-299.

