PERANAN EKOLOGI MAKROALGA BAGI EKOSISTEM LAUT

Oleh

Tri Handayani¹⁾

ABSTRACT

ECOLOGICAL ROLE OF MACROALGAE FOR MARINE ECOSYSTEM.

Macroalgae is an ecologically and economically important component in marine ecosystem. Ecologically, macroalgae has a role as a primary producer, food for other marine biota, provide shelter, nursery ground and carbon sink. Macroalgae contains photosynthetic pigments to be able to provide their own food and produce carbon dioxide for other marine biota (called primary productivity). Macroalgae is a food source, provide shelter and nursery ground for fish, gastropods (mollusks), crustaceans and sea urchins. Macroalgae also has the ability to to reduce the effects of global warming through carbon sink. Absorption of carbon emissions of anthropogenic activity by marine organisms are called as blue carbon. Therefore, macroalgae is ecologically important for the balancing of marine ecosystems sustainability.

PENDAHULUAN

Makroalga merupakan salah satu biota penyusun ekosistem laut yang memiliki manfaat, baik secara ekologis maupun secara ekonomis (Prathep *et al.*, 2011; Chaves *et al.*, 2013; Satheesh & Wesley, 2012). Pemanfaatan makroalga secara ekonomis sudah bukan menjadi rahasia lagi. Makroalga atau rumput laut (sebutan oleh kalangan pengusaha dan pembudidaya makroalga) merupakan komoditas unggulan di bidang perikanan. Makroalga merupakan sumber penghasil fikokoloid (agar-agar, karaginan dan alginat) yang banyak dimanfaatkan untuk berbagai industri seperti industri makanan, kosmetik, farmasi, fotografi dan industri lainnya (Holdt & Kraan, 2011). Makroalga juga merupakan sumber polisakarida bioaktif seperti ulvan, fukoidan, fukosantin, manitol,

laminaran, caulerpenin yang bermanfaat untuk bahan senyawa obat (Zhuang *et al.*, 1995; Murata & Nakazoe, 2001; Deville *et al.*, 2004; Holdt & Kraan, 2011).

Manfaat makroalga secara ekologis memberikan dampak terhadap keseimbangan ekosistem laut dan secara tidak langsung memberikan dampak terhadap manusia terutama dalam bidang perikanan. Keanekaragaman makroalga yang tinggi akan berpengaruh terhadap produktivitas biologi yang tinggi di ekosistem. Makroalga sangat penting dalam perekrutan dan perlindungan bagi ikan dan kekerangan. Hasil perikanan tersebut akan terus berkelanjutan apabila keseimbangan ekosistem laut dapat terjaga kelestariannya (Okuda, 2008). Peranan makroalga secara ekologis terhadap ekosistemnya tidak banyak mendapatkan perhatian, karena peranan

¹⁾ Pusat Penelitian Oseanografi - LIPI

tidak memberikan dampak secara langsung bagi kehidupan manusia, padahal peranan makroalga secara ekologis juga sangat penting terutama bagi keseimbangan ekosistem.

Tulisan ini membahas peranan makroalga secara ekologis bagi ekosistem laut, yang berisi hubungan timbal balik antara makroalga dengan lingkungan dan makroalga dengan biota laut lainnya. Dengan meningkatnya pemahaman tentang arti penting peranan makroalga bagi ekosistem laut, diharapkan dapat meningkatkan kesadaran masyarakat untuk selalu menjaga kelestarian ekosistem laut, sehingga daya dukung ekosistem laut terhadap hasil perikanan dapat terus berkelanjutan.

EKOSISTEM LAUT

Ekosistem didefinisikan sebagai gabungan dari organisme hidup dan lingkungan, yang terdapat interaksi antara organisme satu dengan organisme lainnya dan terhadap lingkungannya. Ekosistem laut adalah bagian dari sistem akuatik terbesar di planet ini, meliputi lebih dari 70 persen permukaan bumi. Habitatnya membentuk area sistem yang luas mulai dari daerah dekat pantai yang produktif hingga dasar laut. Contoh ekosistem berdasarkan komunitas adalah ekosistem mangrove, padang lamun dan terumbu karang. Masing-masing ekosistem tersebut memiliki karakteristik yang berbeda-beda (Baker *et al.*, 2009).

Terumbu karang adalah ekosistem perairan dangkal yang terdiri dari terumbu yang terbuat dari kalsium karbonat yang

sebagian besar disekresikan oleh karang pembentuk terumbu dan makroalga yang berkapur. Terumbu karang menempati kurang dari 0,1% dari dasar perairan laut/samudera namun memainkan berbagai peran penting di seluruh daerah tropis, menampung keanekaragaman hayati tingkat tinggi serta menyediakan organisme dan jasa ekosistem utama seperti habitat perikanan, perlindungan pantai, dan perairan yang menarik untuk pariwisata (Jaap, 2000; Wild *et al.*, 2011). Hutan mangrove merupakan suatu formasi hutan yang mampu tumbuh dan berkembang di daerah tropis dan subtropis pada lingkungan pesisir yang memiliki kondisi antara lain: berkadar garam sangat ekstrim, jenuh air, kondisi tanah yang tidak stabil dan anaerob yang selalu dipengaruhi oleh pasang surut (Pramudji, 2013). Padang lamun adalah suatu ekosistem yang terdiri dari asosiasi antara lamun (tumbuhan angiospermae/berbunga yang dapat tumbuh dan berkembang di perairan laut) dengan organisme laut lainnya dan habitatnya (Hemminga & Duarte, 2000; Duarte, 2000). Makroalga merupakan salah satu biota penyusun dari tiga ekosistem tersebut.

PERANAN MAKROALGA SECARA EKOLOGIS

Makroalga sebagai biota penyusun ekosistem laut tentunya memiliki peranan secara ekologis terhadap ekosistem tempat tumbuhnya. Peranan makroalga secara ekologis tersebut antara lain:

A. Sebagai Produsen Primer

Makroalga memiliki peranan secara ekologis bagi ekosistem laut sebagai produsen primer dalam rantai makanan (Prathep *et al.*, 2011). Makroalga mengandung pigmen fotosintetik sehingga dapat menyediakan makanan sendiri dengan bantuan sinar matahari dan nutrisi yang ada di air laut. Makroalga menempati zona intertidal di daerah pasang surut sampai kedalaman dimana 0,01% cahaya fotosintesis tersedia (Agarwal *et al.*, 2016). Sebagai produsen primer, makroalga melakukan proses fotosintesis dan peristiwa ini sering kita sebut sebagai produktivitas primer. Meskipun makroalga memiliki proporsi kecil dalam menyumbang produktivitas primer di laut, tetapi makroalga menyumbang biomassa dan proporsi besar dalam produktivitas primer di ekosistem laut. Estimasi potensi produktivitas primer makroalga sangat penting untuk memahami peranan makroalga dalam ekosistem laut dan transfer energi melalui rantai makanan (Tait & Sciel, 2010).

Produktivitas primer bervariasi berdasarkan kedalaman perairan. Kondisi tersebut disebabkan, karena perbedaan spesies atau perbedaan komposisi dan keragaman makroalga di perairan yang berbeda kedalamannya (Tait & Sciel, 2010). Perbedaan produktivitas primer juga dapat terjadi, karena perbedaan kapasitas fotosintesis. Kapasitas fotosintesis makroalga di

perairan pantai curam lebih rendah dibandingkan dengan di perairan pantai landai (Gomez *et al.*, 1997; Skene, 2004). Makroalga di pantai landai memiliki biomassa yang lebih besar dari pada di pantai curam (Tait & Schiel, 2010). Jumlah spesies makroalga di pantai landai lebih besar daripada di pantai curam. Hal ini menunjukkan potensi dari peran keanekaragaman hayati dalam meningkatkan produktivitas primer (Schiel, 2006). Makroalga tumbuh di zona mid-littoral pada pantai berbatu memiliki laju fotosintesis dan produktivitas primer lebih rendah daripada makroalga di zona infra-littoral (Gomez *et al.*, 2005). Biomassa dan keragaman spesies dapat meningkatkan produktivitas primer makroalga (Bruno *et al.*, 2005).

Aktivitas fotosintesis thallus makroalga dapat diukur dengan laju transpor elektron (*electron transport rate*/ETR) menggunakan fluoresensi amplitudo-pulsa termodulasi (*pulse-amplitude modulated*/PAM) (Enriquez & Borowitzka, 2010; Migne *et al.*, 2015). Produktivitas individu dan komunitas diukur dengan *carbon fluxes* dalam ruang tertutup. Terdapat perbedaan produktivitas primer di setiap lokasi dan musim, dimana produktivitas primer seluruh komunitas akan menurun jika dibandingkan dengan pengukuran produktivitas primer secara individual dari spesies dominan (Migne *et al.*, 2015).

Potensi produktivitas primer makroalga cukup tinggi. Produktivitas primer spesies makroalga akan berbeda pada populasi yang berbeda, contohnya adalah produktivitas primer *Dictyopteris delicatula*, kondisi ini diduga dipengaruhi oleh nutrisi perairan (Gaitan-Espitia, 2011). Di India, spesies makroalga yang paling produktif adalah *Ulva lactuca* dan *U. intestinalis*, selanjutnya adalah *Enteromorpha prolifera* dan *Rhizoclonium grande*. Hal ini terjadi karena *U. lactuca* dan *U. intestinalis* memiliki efisiensi maksimum dalam menyerap energi matahari (Chaudhuri & Choudhury, 1994).

B. Sebagai sumber makanan bagi biota lainnya

Sebagai produsen primer dalam rantai makanan, makroalga merupakan sumber pangan bagi biota laut lainnya (herbivora) (Prathep *et al.*, 2011). Pemangsaan makroalga oleh herbivora tidak selalu memberi pengaruh negatif bagi ekosistem, tetapi juga merupakan salah satu cara alami untuk menjaga keseimbangan ekosistem dengan cara mencegah terjadinya ledakan populasi makroalga di ekosistem (Filbee-

Dexter & Scheibling, 2014). Ikan, bulu babi dan gastropoda umumnya menjadi pemangsa bagi makroalga (Duffy & Hay, 1990).

Makroalga merupakan makanan utama bagi ikan laut herbivora. Sebanyak 5% ikan merupakan ikan herbivora, tetapi hanya 30% saja yang hidup di laut. Ikan laut herbivora tersebut umumnya hidup di terumbu karang (Talentino-Pablico *et al.*, 2007). Tempat hidup ikan herbivora di terumbu karang, menyebabkan interaksi tidak hanya antara makroalga dan ikan herbivora, tetapi juga terjadi interaksi segitiga antara makroalga, ikan herbivora dan karang (Hixon, 2015). Sebagian besar ikan laut herbivora merupakan anggota dari Famili Blennidae, Kyphosidae dan Siganidae. Sebagai contoh, makroalga hijau seperti *Enteromorpha* dan *Ulva* lebih disukai oleh *Scartichthys viridis* (Blennidae), *Girella* spp. (Kyphosidae), *Sarpa salpa* (Sparidae). Makroalga coklat seperti *Sargassum* dan *Dictyota* lebih disukai oleh *Kyphosus* spp. (Kyphosidae) dan *Siganus* spp. (Siganidae) (Talentino-Pablico *et al.*, 2007). Jenis-jenis ikan herbivora yang memangsa makroalga dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Makroalga yang umumnya dimakan oleh ikan (Talentino-Pablico *et al.*, 2007).

Makroalga		Spesies Ikan Herbivora
Rhodophyta		
Ceramiales	<i>Ceramium</i>	<i>Sarpa salpa</i>
Corallinales	<i>Corallina</i>	<i>Scartichthys</i> spp.
	<i>Jania</i>	<i>Hermosilla azurea</i>
Gelidiales	<i>Gelidium</i>	<i>Girella</i> spp.
Rhodomelales	<i>Laurencia</i>	<i>Siganus</i> spp
	<i>Polysiphonia</i>	
Ochrophyta		
Sargassales	<i>Sargassum</i>	<i>Acanthurus</i> spp.
		<i>Naso</i> spp.
		<i>Kyphosus</i> spp
Dictyotales	<i>Dictyota</i>	<i>Holacanthus passer</i>
		<i>Amphiprion</i> spp.
		<i>Sarpa salpa</i>
Chlorophyta		
Ulvales	<i>Ulva</i>	<i>Girella</i> spp.
	<i>Enteromorpha</i>	<i>Sarpa salpa</i>
Cladophorales	<i>Cladophora</i>	<i>Scartichthys viridis</i>
		<i>Liza vaigiensis</i>

Bulu babi merupakan biota bentik yang hidup di batuan, serta terumbu di zona subtidal dan merupakan salah satu herbivora pemangsa makroalga (Filbee-Dexter & Scheibling, 2014). Pemangsaan makroalga oleh bulu babi perlu mendapatkan perhatian, terutama yang memangsa makroalga/rumput

laut budidaya. Penelitian pemangsaan bulu babi terhadap makroalga telah banyak dilakukan dan umumnya merupakan makroalga pada daerah subtropis (Norderhaug & Christie, 2009; Filbee-Dexter & Scheibling, 2014). Spesies bulu babi pemangsa makroalga dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Makroalga sebagai sumber makanan bagi bulu babi.

No	Genus Makroalga	Spesies bulu babi	Sumber Pustaka
1	<i>Laminaria</i>	<i>Strongylocentrotus polyacanthus</i> <i>S. franciscanus</i> <i>S. droebachiensis</i> <i>S. purpuratus</i> <i>Evechinus chloroticus</i>	Watanabe & Harrold, 1991; Scheibling & Anthony, 2001; Lauzon-Guay & Scheibling, 2007; Norderhaug & Christie, 2009.
2	<i>Alaria</i>	<i>S. franciscanus</i> <i>S. droebachiensis</i>	Lauzon-Guay & Scheibling, 2007
3	<i>Nereocystis</i>	<i>S. franciscanus</i>	Watanabe & Harrold, 1991; Watson & Estes, 2011.
4	<i>Pterygophora</i>	<i>S. franciscanus</i>	Watson & Estes, 2011
5	<i>Macrocystis</i>	<i>S. franciscanus</i> <i>S. purpuratus</i> <i>Tetrapygyus niger</i> <i>Loxechinus albus</i> <i>E. chloroticus</i>	Watanabe & Harrold, 1991; Vega <i>et al.</i> , 2005; Vasquez <i>et al.</i> , 2006.
6	<i>Lessonia</i>	<i>L. albus</i> <i>L. niger</i>	Vega <i>et al.</i> , 2005; Vasquez <i>et al.</i> , 2006.
7	<i>Cystoceira</i>	<i>Paracentrotus lividus</i> <i>Arbicia lixula</i> <i>Diadema antillarum</i>	Thibaut <i>et al.</i> , 2005; Hernandez <i>et al.</i> , 2008; Giakoumi <i>et al.</i> , 2012.
8	<i>Sargassum</i>	<i>P. lividus</i> <i>Diadema antillarum</i> <i>Centrostephanus rodgersii</i>	Thibaut <i>et al.</i> , 2005; Hernandez <i>et al.</i> , 2008.
9	<i>Ecklonia</i>	<i>C. rodgersii</i> <i>E. chloroticus</i>	Johnson <i>et al.</i> , 2005.
10	<i>Undaria</i>	<i>Heliocidaris erythrogramma</i> <i>S. nudus</i>	Tamaki <i>et al.</i> , 2005; Valentine & Johnson, 2005; Watanuki <i>et al.</i> , 2010.
11	<i>Saccharina</i>	<i>S. nudus</i>	Watanuki <i>et al.</i> , 2010

Makroalga merupakan salah satu sumber makanan bagi gastropoda. Setiap spesies gastropoda memiliki kegemaran makan makroalga yang berbeda-beda. Gastropoda seperti *Elysa* sp. umumnya ditemukan dan memakan *Caulerpa racemosa* (Duffy & hay,

1990). Gastropoda *Euchelus asper* lebih suka memakan makroalga *Enteromorpha linza* dibandingkan dengan *Ulva lactuca* dan *Gelidium* spp. *Nerita oryzarum* lebih suka memakan makroalga *Ulva lactuca* dibandingkan dengan *Enteromorpha linza* (Das *et al.*, 2014).

C. Sebagai Tempat Perlindungan

Makroalga dapat menjadi tempat perlindungan/habitat bagi biota laut berukuran kecil, antara lain ekinodermata, moluska dan krustasea (Okuda, 2008; Prathep *et al.*, 2011). Sebagai contoh, makroalga *Halimeda opuntia* menjadi tempat perlindungan bagi bulu babi, krustasea, moluska dan polikaeta berukuran kecil. Hal ini terbukti dengan ditemukannya biota-biota laut tersebut di rumpun *H. opuntia* (pengamatan pribadi).

Makroalga yang tumbuh di antartika umumnya memiliki thallus berukuran besar dan menjadi tempat perlindungan bagi beberapa gastropoda, antara lain: *Desmarestia antarctica*, *Desmarestia anceps*, *Desmarestia menzeisii*, *Gigartina skottbergii*, *Myriograme mangini*, *Plocamium cartilagineum* dan *Palmaria decipiens*. Masing-masing makroalga tersebut menjadi tempat berlindung bagi gastropoda yang berbeda. *D. menzeisii* menjadi tempat berlindung bagi gastropoda *Skenella umbilicata* dengan kepadatan dapat mencapai 28 individu per 100 g makroalga basah. *Gigartina skottsbergii* menjadi tempat berlindung bagi gastropoda

S. umbilicata dengan kepadatan hingga mencapai 41 individu per 100 gram makroalga basah. Sedangkan *Plocamium cartilagineum* menjadi tempat berlindung bagi gastropoda *S. umbilicata*, *Eatoniella caliginosa* dan *Laevilacunaria antarctica* dengan kepadatan masing-masing 37, 39 dan 8 individu per 100 g makroalga basah (Amsler *et al.*, 2015).

D. Sebagai Habitat Pengasuhan

Makroalga merupakan koloni/rumpun yang dimanfaatkan oleh biota laut sebagai habitat pengasuhan (Okuda, 2008; Prathep *et al.*, 2011). Biota laut yang umum ditemukan berada di rumpun makroalga adalah ikan (Chaves *et al.*, 2013). Makroalga *Sargassum furcatum* di Perairan Pulau Cabo Frio, Brazil menjadi habitat pengasuhan bagi beberapa jenis ikan antara lain: *Diplodus argenteus*, *Haemulon aurolineatum* dan *Acanthurus bahianus* (Ornellas & Coutinho, 1998). Beberapa contoh spesies ikan yang dapat ditemukan di rumpun makroalga dan menjadikan makroalga sebagai habitat pengasuhan dapat dilihat pada Gambar 1.

Gambar 1. Beberapa contoh spesies ikan yang dapat ditemukan di rumpun makroalga di perairan Tamandare, Timur Laut Brazil: (a) *Pomacanthus paru*, (b) *Stegastes variabilis*, (c) *Dasyatis marianae* dan (d) *Acanthurus bahianus* (Chaves *et al.*, 2013).

Peranan makroalga sebagai habitat pengasuhan, secara umum berkaitan dengan sumber makanan. Biota laut yang tumbuh dan berada di sekitar rumpun makroalga umumnya merupakan biota yang memangsa makroalga dan menjadikan makroalga sebagai habitat pengasuhan juga. Bulu babi merupakan salah satu biota yang menjadikan makroalga sebagai sumber makanan sekaligus sebagai habitat pengasuhan (Giakuomi *et al.*,

2012; Filbee-Dexter & Scheibling, 2014).

E. Sebagai Penyerap Karbon

Saat ini, banyak penelitian yang tertarik untuk meneliti potensi tumbuhan laut sebagai penyerap emisi karbon dari aktivitas antropogenik, yang dikenal dengan istilah “karbon biru” (*blue carbon*) (Krause-Jensen *et al.*, 2018). Produsen primer di laut berkontribusi setidaknya 50 %

dari fiksasi karbon dunia dan dapat menyumbang sebanyak 71% dari seluruh karbon yang tersimpan di sedimen lautan. Alga dan tumbuhan tingkat tinggi, seperti mangrove dan lamun merupakan produsen primer lautan yang memiliki potensi dalam menyimpan karbon (Nellemann *et al.*, 2009). Makroalga diketahui memiliki kemampuan menyerap karbon, sehingga dapat mengurangi pengaruh pemanasan global (Phang *et al.*, 2008; Chung *et al.*, 2011).

Penyerapan karbon oleh makroalga tidak hanya terjadi pada makroalga yang tumbuh secara alami, tetapi juga makroalga yang dibudidayakan (Chung *et al.*, 2011). Makroalga seperti kelp (*Macrocystis* dan *Laminaria*) memiliki laju fotosintesis dan produktivitas yang tinggi yaitu ≥ 3.000 g C per m² per tahun (30×10^6 g per ha per tahun). Makroalga coklat (Ochrophyta) yang memiliki laju fotosintesis paling besar adalah *Sargassum*, *Ascophyllum* dan *Fucus*. Namun, makroalga merah (Rhodophyta) seperti *Porphyra* dan *Palmaria* memiliki laju fotosintesis yang lebih tinggi daripada makroalga coklat. Sedangkan makroalga hijau (Chlorophyta) yang berthalus sederhana seperti *Ulva* dan *Enteromorpha*, juga memiliki laju asimilasi CO₂ yang tinggi (Ritschard, 1992; Muraoka, 2004).

Program penyerapan CO₂ berbasis makroalga sangat penting untuk dimasukkan dalam memperhitungkan dampak potensial perubahan iklim terhadap pertumbuhan dan produksi makroalga yang digunakan. Harapannya, perubahan iklim akan memberikan dampak tidak hanya pada distribusi dan keanekaragaman makroalga, tetapi juga terhadap fisiologi makroalga (Chung *et al.*, 2011).

PENUTUP

Makroalga memiliki peranan secara ekologi bagi ekosistem laut yaitu sebagai produsen primer, tempat perlindungan, habitat pengasuhan, sumber makanan bagi biota laut lainnya, dan penyerap karbon sehingga dapat mengurangi dampak pemanasan global. Peranan makroalga ini memberikan dampak secara tidak langsung terhadap perikanan. Manfaat ekologi makroalga seringkali dipandang sebelah mata karena tidak memberikan dampak langsung terhadap kehidupan manusia. Pemahaman dan penyampaian informasi terkait pentingnya manfaat makroalga secara ekologi kepada masyarakat perlu mendapatkan dukungan dari pemerintah pusat dan daerah, dengan harapan kelestarian ekosistem laut dapat terjaga sehingga manfaatnya dapat terus berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal S., K. Banerjee, A. Saha, G. Amin and A. Mitra. 2016. Can seaweed be potential sink of carbon?. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 4 (8): 217-225.
- Amsler M. O., Y. M. Huang, W. Engl, J. B. McClontock and C. D. Amsler. 2015. Abundance and diversity of gastropods associated with dominant subtidal macroalgae from the Western Antarctic Peninsula. *Polar Biol.* DOI 10.1007/s00300-015-1681-4.
- Baker, D. J., T. Bowman, J. Byrne, M. Connor, J. Cortina, J. Cortina, R. Dalrymple, L. Dierking, W. Eichbaum, J. Falk, A. Friedman, M. Grabowski, M. Nichol, W. Patzert, S. Pomponi, W. Reeburgh, and J. Sharp. 2009. Marine ecosystems and fisheries: balancing ecosystem sustainability and the socio-economics of fisheries. Report of the ocean on the edge series produced by The Aquarium of The Pacific. 37 pp.
- Bruno J. F., K. E. Boyer, J. E. Duffy, S. C. Lee, and J. S. Kertesz. 2005. Effects of macroalgal species identity and diversity on primary productivity in benthic marine communities. *Ecol. Lett.* 8:1165–1174.
- Chaudhuri, A. B. and A. Choudhury. 1994. *Mangroves of the Sundarbans, India*. 1, Bangkok, Thailand: IUCN. 247 pp.
- Chaves, L. T. C., P. H. C. Pereira, and J. L. L. Feitosa. 2013. Coral reef fish association with macroalgal beds on a tropical reef system in North-eastern Brazil. *Marine and Freshwater Research*. <http://dx.doi.org/10.1071/MF13054>
- Chung I. K., J. Beardall, S. Mehta, D. Sahoo and S. Stojkovic. 2011. Using marine macroalgae for carbon sequestration: a critical appraisal. *J. Appl. Phycol*, 23: 877-886. DOI 10.1007/s10811-010-9604-9.
- Das S., G. Deshmukhe and A. Dwivedi. 2014. Grazing on selected genera of green, red and brown macroalgae. *Applied Ecology and Environmental Research*, 12 (3): 717-725.
- Déville C, J. Damas, P. Forget, G. Dandrifosse, and O. Peulen. 2004. Laminarin in the dietary fibre concept. *J. Sci. Food Agric.* 84:1030–1038.
- Duarte, C. M. 2000. Marine biodiversity and ecosystem services: an elusive ink. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 250: 117-131.
- Duffy J. E. and M. E. Hay. 1990. Seaweed adaptations to herbivory: chemical, structural, and morphological defenses

- are often adjusted to spatial or temporal patterns of attack. *BioScience*, 40 (5): 368-375.
- Enriquez, S., and M. A. Borowitzka. 2010. The use of the fluorescence signal in studies of seagrasses and macroalgae. In: Suggett, D. J., Prasil, O., Borowitzka, M. A. (Eds.), *Chlorophyll a Fluorescence in Aquatic Sciences: Methods and Applications*. Springer, pp. 187–208.
- Filbee-Dexter K. and R. E. Scheibling. 2014. Sea urchin barrens as alternative stable states of collapsed kelp ecosystems. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 495: 1-25.
- Gaitan-Espitia J. D. 2011. Metabolic rates and primary productivity of the marine macroalgae *Dictyopteris delicatula* in Taganga bay, Colombian Caribbean. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*. 46 (1): 73-77.
- Giakoumi S., E. Cebrian, G. D. Kokkaris, E. Ballesteros and E. Sala. 2012. Relationships between fish, sea urchins and macroalgae: the structure of shallow rocky sublittoral communities in the cyclades, Eastern Mediterranean. *Estuar. Coast Shelf Sci.* 109: 1-10.
- Gomez I., G. Weykam, H. Kloser, and C. Weincke. 1997. Photosynthetic light requirements, metabolic carbon balance and zonation of sublittoral macroalgae from King George Island (Antarctica). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 148:281–293.
- Gomez I., F. Figueroa, P. Huovinen, N. Ulloa and V. Morales. 2005. Photosynthesis of the red alga *Gracilaria chilensis* under natural solar radiation in an estuary in southern Chile. *Aquaculture* 244: 369-382.
- Hemminga, M. A. and C. M. Duarte. 2000. *Seagrass Ecology*. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 298 pp.
- Hernandez J. C., S. Clemente, C. Sangil and A. Brito. 2008. Actual status of the sea urchin *Diadema antillarum* populations and macroalgal cover in marine protected areas compared to a highly fished area (Canary Islands-eastern Atlantic Ocean). *Aquat. Conserv.* 18: 1091-1108.
- Hixon M. A. 2015. Reef fishes, seaweeds, and corals: a complex triangle. In: C. Birkeland (ed.), *Coral Reefs in the Anthropocene*, 195 – 215. DOI 10.1007/978-94-017-7249-5_10.
- Holdt S.L. and S. Kraan. 2011. Bioactive compounds in seaweed: functional food applications and legislation. *J. Appl. Phycol* 23: 543-597.

- Jaap W. C. 2000. Coral reef restoration. *Ecological Engineering* 15: 345-364.
- Johnson C. S. D. Ling, D. J. Rose, S. Shepherd and K. J. Miller. 2005. Establishment of the long-spined sea urchin (*Centrostephanus rodgersii*) in Tasmania: first assessment of potential threats to fisheries. Project Report. School of Zoology and Tamarian Aquaculture and Fisheries Institute, Hobart.
- Krause-Jensen D., P. Lavery, O. Serrano, N. Marba, P. Masque, and C. M. Duarte. 2018 Sequestration of macroalgal carbon: the elephant in the Blue Carbon room. *Biol. Lett.* 14: 20180236. <http://dx.doi.org/10.1098/rsbl.2018.0236>
- Lauzon-Guay J. and R. E. Scheibling. 2007. Behaviour of sea urchin *Strongylocentrotus droebachiensis* grazing fronts: food-mediated aggregation and density-dependent facilitation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 329: 191-204.
- Migne A., G. Delebecq, D. Davoult, N. Spilmont, D. Menu and F. Gevaert. 2015. Photosynthetic activity and productivity of intertidal macroalgae: in situ measurements , from thallus to community scale. *Aquatic Botany*, 123: 6-12.
- Muraoka D. 2004. Seaweed resources as a source of carbon fixation. *Bull. Fish Res. Agen Supplement* 1:59–63.
- Murata M, and J. Nakazoe. 2001. Production and use of marine algae in Japan. *Jpn. Agr. Res. Q.* 35:281–290.
- Nellemann C., E. Corcoran, C. M. Duarte, L. Valdes, C. De Young, L. Fonseca, and G. Grimsditch. 2009. Blue carbon. A rapid response assessment. United Nations Environment Programme, GRID Arendal. www.grida.no.
- Norderhaug K. M. and H. C. Christie. 2009. Sea urchin grazing and kelp re-vegetation in the NE Atlantic. *Marine Biology Research*, 5: 515-528.
- Okuda, K. 2008. Coastal environment and seaweed-bed ecology in Japan. *Kuroshio Science*. 2 (1): 15-20.
- Ornellas, A. B., and R. Coutinho. 1998. Spatial and temporal patterns of distribution and abundance of a tropical fish assemblage in a seasonal *Sargassum* bed, Cabo Frio Island, Brazil. *Journal of Fish Biology* 53: 198–208.
- Phang S. M. P. E. Lim J. L. S. Ooi H. Y. Yeong W. S. Ng and F. C. Küpper 2008. Marine algae of Perak Island, Jarak Island and the Sembilan Group of Islands in the Straits of Malacca.

- Malaysian Journal of Science*, 27 (3), 47-60.
- Pramudji. 2013. Pengertian mangrove dan pegangan koleksi spesimen. *Dalam: R. Pratiwi (Ed) Manajemen Koleksi Rujukan Biota Laut. Pusat Penelitian Oseanografi LIPI, Jakarta.* 197-228.
- Prathep A., S. Pongparadon A. Darakrai B. Wichachucherd and S. Sinutok. 2011. Diversity and distribution of seaweed at Khanom. Mu Ko Thale Tai National Park, Nakhon Si Thammarat Province, Thailand. *Songklanakarin J. Sci. Technol.* 33 (6): 633-640.
- Ritschard R. L. 1992. Marine algae as a CO₂ sink. *Water Air Soil Pollut.* 64 : 289–303.
- Satheesh, S., and S. G. Wesley. 2012. Diversity and distribution of seaweeds in the Kudankulam coastal waters. South-Eastern coast of India. *Biodiversity Journal* 3(1):79– 84.
- Scheibling R, E. and S. X. Anthony. 2001. Feeding, growth and reproduction of sea urchins (*Strongylocentrotus droebachiensis*) on single and mixed diets of kelp (*Laminaria* spp.) and the invasive alga *Codium fragile* ssp. *Tomentosoides*. *Marine Biology*, 139: 139-146.
- Schiel D. R. 2006. Rivets or bolts? When single species count in the function of temperate rocky reef communities. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 338:233–252.
- Skene K. R. 2004. Key differences in photosynthetic characteristics of nine species of intertidal macroalgae are related to their position on the shore. *Can. J. Bot.* 82:177–184.
- Tait L. W. and D. R. Schiel. 2010. Primary productivity of intertidal macroalgal assemblages: comparison of laboratory and in situ photorespirometry. *Marine Ecology progress Series*, 416: 115-125.
- Talentino-Pablico G., N. Bailly, R. Froese and C. Elloran. 2007. Seaweeds preferred by herbivorous fishes. *J. Appl. Phycol.* DOI 10.1007/s10811-007-9290-4.
- Tamaki H., H. Takahashi, A. Fukuya, M. Fukuda, S. Arai and S. Muraoka. 2005. The distributional patterns of *Undaria pinnatifida* (Harvey) Suringar and Seaurchins related to water velocity condition in Ogatsu bay, Miyagi Prefecture. *Japan J. Phycol.* 53: 131-135.
- Thibaut T., S. Pinedo, X. Torras and E. Ballesteros. 2005. Longterm decline of the populations of Fucales (*Cystoceira* spp. and *Sargassum* spp.) in the Alberes Coast (France, North-western

- Mediterranean). *Mar. Pollut. Bull.* 50: 1472-1489.
- Valentine J. P. and C. R. Johnson. 2005. Persistence of sea urchin (*Heliocidaris erythrogramma*) barrens on the east coast of Tasmania: inhibition of macroalgal recovery in the absence of high densities of sea urchins. *Bot. Mar.* 48: 106-115.
- Vásquez J. A., J. A. Vega, and A. H. Buschmann. 2006. Long term variability in the structure of kelp communities in northern Chile and the 1997–98 ENSO. *J. Appl. Phycol.* 18: 505–519
- Vega J. M. A., J. A. Vasquez and A. H. Buschmann. 2005. Population biology of the subtidal kelp *Macrocystis integrifolia* and *Lessonia trabeculata* (Laminariales: phaeophyta) in an upwelling ecosystem of northern Chile: interannual variability and El Nino 1997-98. *Rev. His. Nat.* 78: 33-50.
- Watanabe J. M. and C. Harrold. 1991. Destructive grazing by sea urchins *Strongylocentrotus* spp. in a Central California kelp forest: potential roles of recruitment, depth, and predation. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 71: 125-141.
- Watanuki A., T. Aota, E. Otsuka, T. Kawai, Y. Iwahashi, H. Huwahara and D. Fujita. 2010. Restoration of kelp beds on an urchin barrens: removal of sea urchins by citizen divers in southwestern Hokkaido. *Bull. Fish Res. Agency.* 32: 83-87.
- Watson J. and J. A. Estes. 2011. Stability, resilience, and phase shifts in rocky subtidal communities along the west coast of Vancouver Island, Canada. *Ecol. Monogr.* 81: 215-239.
- Wild C., O. Hoegh-Guldberg, M. Naumann, M. F. Colombo-Pallotta, M. Ateweberhan, W. K. Fitt, R. Iglesias-Prieto, C. Palmer, J. C. Bythell, J. C. Ortiz, Y. Loya, and R. van Woesik. 2011. Climate change impedes scleractinian corals as primary reef ecosystem engineers. *Mar. Freshw. Res.* 62:205–215
- Zhuang C, H. Itoh, T. Mizuno, and H. Ito. 1995. Antitumor active fucoidan from the brown seaweed, *Umitoranoo* (*Sargassum thunbergii*). *Biosci Biotechnol. Biochem.* 59:563–567.