

**PENINGKATAN KONSENTRASI KARBONDIOKSIDA DAN SUHU TERHADAP
PERTUMBUHAN DAN HISTOPATOLOGI MAKROALGA
TROPIK *Halimeda* sp**

**INCREASING CARBON DIOXIDE CONCENTRATION AND TEMPERATURE ON
GROWTH AND HISTOPATHOLOGY OF TROPIC MACROALGAE *Halimeda* sp**

Sahabuddin^{1*}, Jamaluddin Jompa², dan Nita Rukminasari²

¹Balai Penelitian dan Pengembangan Budidaya Air Payau, Maros

²Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan Universitas Hasanuddin, Makassar

*E-mail: s.abud_din@yahoo.co.id

ABSTRACT

The increasing CO₂ concentration and temperature affected growth, chlorophyll content, calcium content, and histological tissue of tropical macroalgae Halimeda sp. The study was conducted to examine the interaction effect of the increased CO₂ concentration and temperature on growth, chlorophyll-a content, calcium content, and histological tissue of tropical macroalgae Halimeda sp in a laboratory. Research was set with a completely randomized factorial design at 3 levels of factors (A) the CO₂ concentration: 385 ppm (ambient), 750 ppm (medium), 1000 ppm (high), and 3 levels of factor (B) the temperature: 30°C, 32°C, 34°C. Microcolony of macroalgae Halimeda sp were selected and obtained from the Lae-lae island then growing in the aquarium 30 x 30 x 45 cm³. Biological parameters observed were growth rate (total, specific and relative), chlorophyll-a content, calcium content, and histopathology tissue. The results showed that the increased of CO₂ concentration and temperature negatively affected on the growth of Halimeda sp, reduced of the growth rate, the chlorophyll-a content, calcium content and damaged to histopatology tissue of the Halimeda sp at tropical macroalgae.

Keywords: CO₂ concentration, temperature, growth response, histopathology, *Halimeda* sp

ABSTRAK

Peningkatan konsentrasi karbondioksida dan suhu mempengaruhi pertumbuhan, kandungan klorofil, kandungan kalsium dan jaringan histopatologi makroalga *Halimeda* sp. Penelitian dilakukan untuk menguji efek interaksi peningkatan konsentrasi CO₂ dan suhu terhadap pertumbuhan, kandungan klorofil-a, kandungan kalsium serta jaringan histopatologi *Halimeda* sp pada uji laboratorium. Penelitian menggunakan rancangan acak lengkap pola faktorial, terdapat 3 taraf perlakuan dari faktor (A) konsentrasi CO₂ yakni : 385 ppm (ambien), 750 ppm (sedang), 1000 ppm (tinggi), dan 3 taraf perlakuan dari faktor (B) suhu yakni : 30°C, 32°C, 34°C. Makroalga *Halimeda* sp diperoleh dari pulau Lae-lae kemudian diuji dalam akuarium 30 x 30 x 45 cm³. Parameter biologi yang diamati yakni : laju pertumbuhan (total, spesifik dan relatif), kandungan klorofil-a, kandungan kalsium, serta jaringan histopatologi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi CO₂ dan suhu berpengaruh negatif terhadap pertumbuhan *Halimeda* sp, menurunkan kandungan klorofil-a dan kandungan kalsium, serta merusak jaringan histopatologi makroalga tersebut.

Kata kunci: konsentrasi CO₂, suhu, respon pertumbuhan, histopatologi, *Halimeda* sp

I. PENDAHULUAN

Peningkatan aktivitas antropogenik berupa penggunaan bahan bakar fosil (BBF), produksi semen, serta pembakaran biomas dan alih fungsi lahan yang semakin intensif

setelah memasuki era industrialisasi, sehingga menyebabkan tingginya konsentrasi karbondioksida di atmosfer (IPPC, 2007). Karbon di atmosfer diperkirakan sekitar $4,1 \pm 0,1 \times 10^{15}$ gC/tahun (Gattuso *et al.*, 1998; Houghton *et al.*, 2001).

Peningkatan laju tekanan parsial karbondioksida 0,4% per tahun, menyebabkan karbondioksida di atmosfer meningkat dari 280 ppm (pra-industri) menjadi 385 ppm pada kondisi ambien (Pajusalu *et al.*, 2013). Pada akhir abad ke-21 diperkirakan mencapai nilai 900 ppm (Houghton *et al.*, 2001; Royal Society, 2005). Konsentrasi karbondioksida tinggi di atmosfer diprediksi menurunkan pH laut sekitar 0,4 unit hingga tahun 2100 (Orret *et al.*, 2005) sehingga menyebabkan terjadinya pengasaman laut *ocean acidification* (Koch *et al.*, 2013; Pajusalu *et al.*, 2013). Hal ini memiliki konsekuensi negatif terhadap ekosistem dan menyebabkan gangguan jaringan pada makroalga dan kerangka kapur pada organisme *calcifying* (Gattuso *et al.*, 1998; Pajusalu *et al.*, 2013).

Pengasaman laut umumnya menurunkan tingkat kalsifikasi pada *coccolithophor* (Riebesell *et al.*, 2000; Zondervan *et al.*, 2002; Delille *et al.*, 2005; Beaufort *et al.*, 2011) dan makroalga berkapur lainnya (Gao dan Zheng, 2010; Sinutok *et al.*, 2011) dengan respon yang berbeda-beda pada setiap spesies pada kondisi lingkungan yang berbeda pula (Langer *et al.*, 2006, 2009; Iglesias-Rodriguez *et al.*, 2008; Doney *et al.*, 2009; Shi *et al.*, 2009). Efek dari tingginya CO₂ dan suhu pada fotosintesis dan kalsifikasi dari jenis makroalga pembentuk kapur karang (*H. macroloba* dan *H. cylindracea*) telah diselidiki dengan mikrosensor O₂ dan klorofil fluorometri melalui kombinasi CO₂ (400 dan 1.200 ppm) pada perlakuan suhu ambien dan prediksi suhu pada tahun 2100 (28°C dan 32°C). Pengapuran pada spesies ini erat kaitannya dengan fotosintesis, sehingga penurunan efisiensi fotosintesis menyebabkan penurunan kalsifikasi, pH tampaknya menjadi faktor utama yang mempengaruhi spesies *Halimeda* sp, stres panas juga memiliki dampak pada efisiensi pada fotosistem dan fotokimia (Sinutok *et al.*, 2011). Kalsifikasi alga pada gilirannya dipengaruhi oleh dampak radiasi ultraviolet matahari (280-400 nm) pada fotofisiologi makroalga (Gao *et al.*, 2009; Gao dan Zheng, 2010; Guan dan Gao, 2010).

Peningkatan konsentrasi CO₂ dan suhu sebagai unsur utama perubahan iklim sangat berpengaruh terhadap pertumbuhan dan produktifitas makroalga *Halimeda* sp. Kondisi ini menggambarkan makroalga tropik *Halimeda* sp mengalami ancaman produktifitas dengan semakin intensifnya kegiatan industrialisasi, sekaligus menjadi ancaman bagi lingkungan ekosistem di perairan tropik, sedangkan *Halimeda* sp termasuk kelompok alga berkapur yang memanfaatkan kalsium karbonat (CaCO₃) untuk membentuk kerangka tubuhnya, serta dapat menghasilkan kristal kalsit untuk pembentukan kerangka kapur, produksi sedimen bagi komunitas lainnya seperti pembentukan kerangka kapur pada koloni karang (Adey, 1998; Nelson, 2009). Hal ini ditegaskan Doney *et al.* (2012) bahwa organisme laut dihadapkan dengan stres gabungan antara meningkatnya suhu laut dan pengasaman laut. Olehnya itu pengujian terhadap makroalga jenis *Halimeda* sp terhadap efek peningkatan konsentrasi CO₂ dan suhu seyogyanya sangat berguna bagi pengembangan pengelolaan komunitas ekosistem bagi keberlanjutan sumberdaya laut.

Peningkatan konsentrasi karbondioksida dan suhu mempengaruhi pertumbuhan, kandungan klorofil-a dan kandungan kalsium serta jaringan histopatologi makroalga tropik *Halimeda* sp. Hasil penelitian tentang efek peningkatan konsentrasi CO₂ dan suhu pada makroalga tropik belum banyak didokumentasikan, baik penelitian laboratorium maupun penelitian skala lapangan, maka dilakukan penelitian tentang efek peningkatan konsentrasi CO₂ dan suhu terhadap pertumbuhan, kandungan klorofil-a dan kandungan kalsium serta jaringan histopatologi makroalga *Halimeda* sp pada kondisi daerah tropik.

II. METODE PENELITIAN

2.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan selama 6 minggu di laboratorium Biologi dan Plankton Balai Penelitian dan Pengembangan Budidaya Air

Payau, Maros. Mikrokoloni *Halimeda* sp diseleksi dan dikoleksi di sekitar perairan pulau Lae-Lae Kota Makassar pada salinitas 29 ppt dan suhu 30°C, sehingga diperoleh mikrokoloni dengan performansi yang baik dari warna dan morfologinya, selanjutnya disterilkan kemudian diaklimatisasi selama 24 jam pada akuarium yang telah disiapkan di laboratorium pada suhu ruangan.

2.2. Bahan dan Data

Mikrokoloni makroalga *Halimeda* sp hasil seleksi dari alam ditimbang dan diukur berat dan panjang awalnya, kemudian dimasukkan ke dalam wadah penelitian yang telah dipersiapkan terlebih dahulu berupa akuarium berukuran 30 cm x 30 cm x 45 cm, didesain dengan rancangan acak lengkap pola faktorial. Terdapat 2 faktor perlakuan masing-masing 3 level yakni: konsentrasi CO₂ (385 ppm; 750 ppm; 1000 ppm ekuivalen dengan pH 8,12; 7,99; dan 7,72-7,78). Konsentrasi 385 ppm CO₂ adalah konsentrasi CO₂ sekarang (Pajusalu *et al.*, 2013) ekuivalen dengan pH alami yakni pH 8,12 (ambien), kemudian konsentrasi 750 ppm CO₂ adalah konsentrasi prediksi tahun 2050 (ekuivalen dengan pH 7,99) dan konsentrasi 1.000 ppm CO₂ adalah konsentrasi CO₂ prediksi tahun 2100 (akhir abad 21) diprediksi pH laut sekitar 7,72-7,87 karena konsentrasi CO₂ tinggi di atmosfer akan menurunkan pH laut sekitar 0,4 unit hingga tahun 2100 (IPPC, 2007; Orr *et al.*, 2005; Meehl *et al.*, 2007; Fernandes *et al.*, 2015). Faktor suhu juga mengikuti tren peningkatan konsentrasi CO₂ yakni; 30°C suhu permukaan laut kondisi sekarang; yang kemudian dinaikkan menjadi 32°C dan 34°C (+2 dan +4) masing-masing 3 ulangan, sehingga terdapat 27 unit percobaan.

Mikrokoloni makroalga ditumbuhkan dalam media kultur setelah media tersebut diinjeksi CO₂ mix 0.075% balance N₂ mix yang ekuivalen dengan 750 ppmv CO₂ skenario tahun 2050 dan 0.1% CO₂, balance N₂ mix yang ekuivalen dengan 1000 ppmv CO₂, skenario tahun 2100 (Caldeira & Wickett

2005; Feely *et al.*, 2010). Gas CO₂ mix tersebut dialirkan dari tabung melalui pengaturan regulator merk Harris sesuai konsentrasi uji yang telah ditentukan.

Untuk mempertahankan kondisi CO₂, maka di ekuivalenkan menggunakan larutan asam basa: HCl dan NaOH (Riebesel *et al.*, 2010). Untuk mempertahankan suhu media, maka aquarium dihubungkan dengan pemanas air "heater" yang telah diatur sesuai kondisi suhu uji; 30°C, 32 °C, dan 34°C. Kondisi pH dan suhu selalu dikontrol setiap hari menggunakan pH meter dan termometer. Pengukuran pertambahan panjang dan berat makroalga di ukur setiap pekan selama 6 minggu penelitian di laboratorium.

2.3. Analisis Data

Peubah biologi yang diamati yakni : pertumbuhan (total, harian dan relatif), kandungan klorofil-a, kandungan kalsium (Ca), dan jaringan histopatologi. Pertumbuhan dihitung dari pertambahan panjang dan berat biomassa makroalga dari hasil sampling setiap pekan. Kandungan klorofil-a dianalisis melalui ekstraksi 1 gram sampel dalam 80% pelarut aseton. Ekstrak yang dihasilkan diukur menggunakan spektrofotometer sinar tampak, pada panjang gelombang 663 nm, dengan ketebalan tabung sel 1 cm (APHA, 2005). Kandungan kalsium (Ca) diukur dengan metode titrasi (Sudarmaji, 2010). Analisis histopatologi menggunakan mikroskop Olympus bX 51 dan kamera dp 21 dengan skala 100 mikron (1 mikron=pembesaran 200 kali mikroskop). Parameter kualitas air diamati setiap melakukan sampling pertumbuhan makroalga, yakni: salinitas, suhu, pH, alkalinitas (APHA, 2005). Data diolah dengan software SPSS 20, untuk mengetahui ragam tiap perlakuan maka dilakukan analisa varian (anova), kalau terjadi signifikansi antar perlakuan dilakukan uji lanjut post-hoc (Steel and Torrie, 1991), hasilnya ditampilkan dalam bentuk grafik dan histogram.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil

3.1.1. Performa *Halimeda* sp

Performa makroalga *Halimeda* sp yang dikoleksi dari alam dan performa makroalga setelah diinjeksi dengan konsentrasi 385 ppm, 750 ppm dan 1.000 ppm CO₂ tertera pada Gambar 1. Secara anatomi tidak terjadi perbedaan warna dan bentuk yang sangat mencolok antara makroalga yang tumbuh pada media injeksi CO₂ dan non injeksi CO₂. Makroalga hijau berkapur memiliki proses pengapuran yang unik. Genus *Halimeda* tempat terlarutnya kristal pada permukaan inter selular ruang antara struktur khusus yang disebut utricles. Ruang utricles dipisahkan dari air laut eksternal, karena itu makroalga ini memiliki pengendalian hayati lingkungan internal melalui proses fotosintesis dan pernapasan (Borowitzka and Larkum 1977, Lee and Carpenter 2001). Makroalga *Halimeda* spp. juga menunjukkan berbagai macam morfologi, lebar dan jumlah lapisan utricles dalam thallus yang mempengaruhi pengapuran, dan karena itu spesies seperti *H. macroloba* dan *H. incrassata*, dengan 2 sampai 4 lapisan utricles yang relatif tebal mungkin kurang sensitif terhadap pCO₂ daripada *H. minima*, yang memiliki 1 atau 2 lapisan tipis utricles (Verbruggen *et al.*, 2004; Dijoux *et al.*, 2012).

3.1.2. Pertumbuhan Total, Harian, dan Relatif

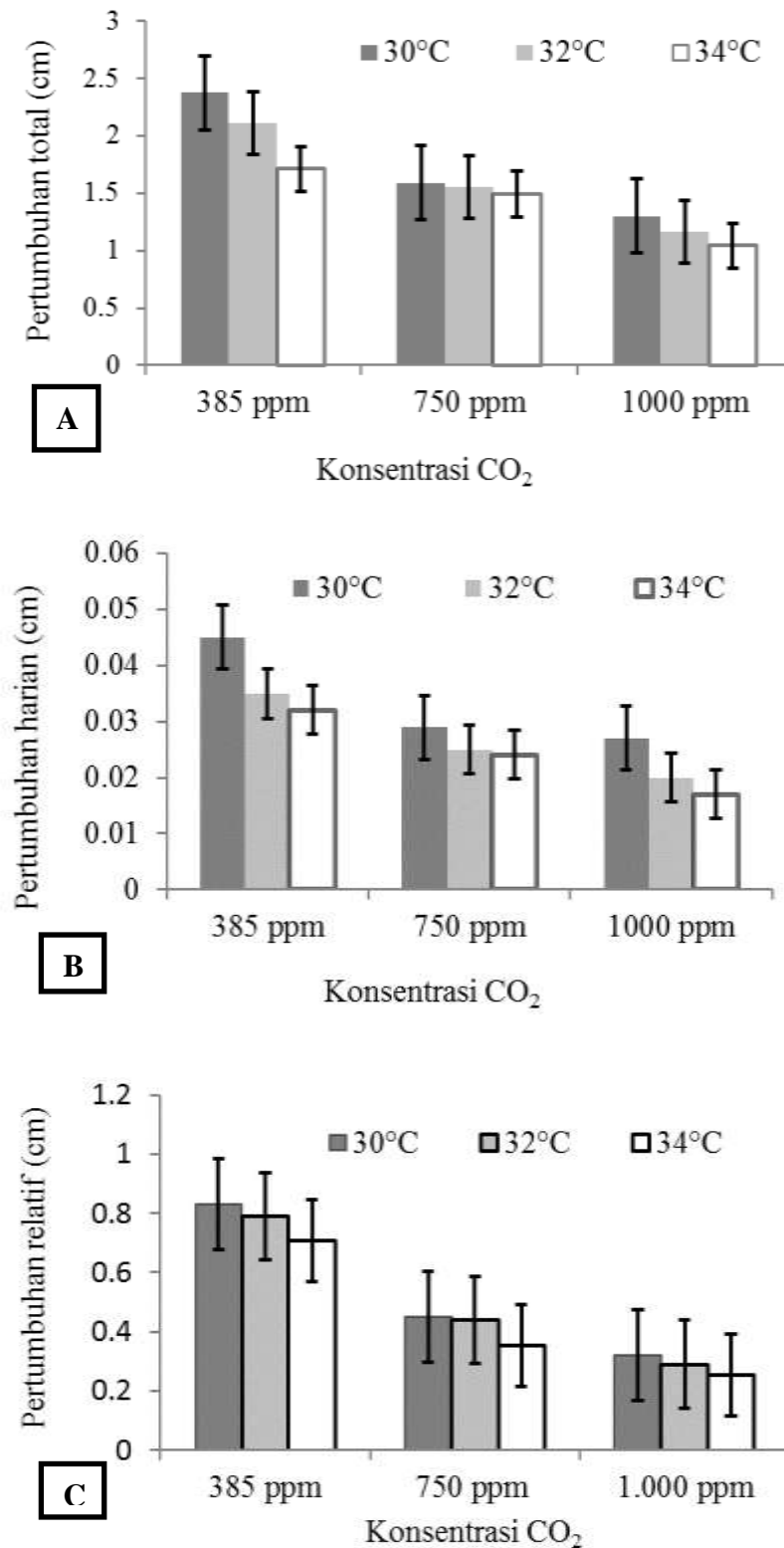
Pertumbuhan total, harian, dan relatif *Halimeda* sp pada peningkatan konsentrasi

CO₂ (385, 750, 1.000 ppm) dan suhu (30, 32, dan 34°C) terlihat pada Gambar 2. Hasil pengujian pada injeksi konsentrasi CO₂ terhadap pertumbuhan total makroalga *Halimeda* sp didapatkan tertinggi pada konsentrasi 385 ppm CO₂; yakni 3,75±0,25 gr pada suhu 30°C, selanjutnya pertumbuhan totalnya menurun pada injeksi 750 ppm CO₂; yakni 2,75±0,24 gr pada suhu 34°C dan terendah pada konsentrasi 1000 ppm CO₂ pada suhu 34°C; yakni 1,45±0,15 gr. Hasil analisis keragaman (anova) didapatkan bahwa CO₂ dan suhu serta efek interaksinya berpengaruh nyata (P<0,05) terhadap pertumbuhan total *Halimeda* sp. Terjadi tren penurunan pertumbuhan total seiring peningkatan konsentrasi CO₂ dan suhu, hal ini menunjukkan bahwa makroalga *Halimeda* sp masih memungkinkan melakukan aklimasi pada kondisi konsentrasi CO₂ dan kondisi suhu sekarang karena masih mampu melakukan proses metabolisme secara normal, sedangkan pada kondisi konsentrasi CO₂ dan suhu ke depan sudah sulit melakukan adaptasi, kondisi tersebut sesuai dengan hasil kajian Vogel *et al* (2015) bahwa *Halimeda* spp masih dapat melakukan aklimasi dan kalsifikasi pada kondisi konsentrasi CO₂ sekarang, namun sangat pesimis pada konsentrasi CO₂ proyeksi ke depan.

Laju pertumbuhan harian *Halimeda* sp tertinggi pada konsentrasi 385 ppm CO₂ yakni 0,045 cm pada suhu 30°C, kemudian turun pada suhu 32°C dan 34°C yakni 0,029 cm dan 0,027 cm. Pada peningkatan CO₂ ke level 750 ppm pertumbuhan hariannya yakni 0,035 cm pada suhu 30°C dan turun menjadi



Gambar 1. Performa *Halimeda* sp : A) Alami ; B) injeksi CO₂ 385 ppm; C) injeksi CO₂ 750 ppm, dan D) injeksi CO₂ 1000 ppm.



Gambar 2. Rataan±SE (A) pertumbuhan total, (B) pertumbuhan harian, dan (C) pertumbuhan relatif makroalga *Halimeda* sp pada peningkatan konsentrasi CO₂ dan suhu selama penelitian. Standar error dihitung dari ulangan sampel.

0,025 cm dan 0,2 cm pada suhu 32°C dan 34°C. Pertumbuhan relatif tertinggi pada konsentrasi 385 ppm CO₂ yakni; 0,83 cm pada suhu 30°C, turun menjadi 0,79 cm dan 0,70 cm pada suhu 32°C dan 34°C. Pada konsentrasi 750 ppm CO₂ pertumbuhan relatifnya semakin turun yakni 0,45 cm, 0,44 cm, dan 0,354 cm masing-masing pada suhu 30°C, 32°C, 34°C, begitu pula pada konsentrasi 1.000 ppm CO₂ pertumbuhan relatifnya menjadi 0,32 cm, 0,29 cm dan 0,254 cm masing-masing pada suhu 30°C, 32°C dan 34°C. Pertumbuhan relatif semakin menurun seiring dengan peningkatan konsentrasi CO₂ dan suhu. Hasil analisis keragaman (anova) didapatkan bahwa efek interaksi CO₂ dan suhu berpengaruh nyata (P<0,05) terhadap pertumbuhan total, pertumbuhan harian, dan pertumbuhan relatif makroalga *Halimeda* sp. Laju pertumbuhan total, harian, dan relatif menurun dengan semakin meningkatnya konsentrasi CO₂ dan suhu. Peningkatan konsentrasi CO₂ yang menurunkan pH permukaan air laut menyebabkan terjadinya perubahan kimia karbonat air laut, maka akan dapat berpengaruh terhadap proses biologi dan fisika dari organisme laut yang berkapur maupun tidak berkapur (Fernandez *et al.*, 2015) yang pada akhirnya mempengaruhi proses metabolisme pada organisme laut termasuk makroalga tersebut sehingga proses pertumbuhannya melambat.

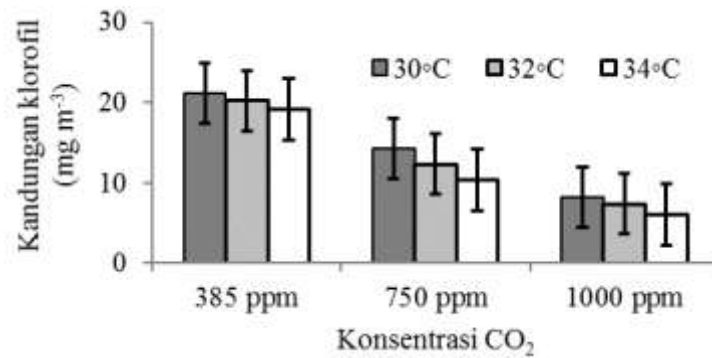
3.1.3. Kandungan Klorofil-a

Kandungan klorofil-a tertinggi pada konsentrasi 385 ppm CO₂, yakni 21,18 mg.m⁻³ pada suhu 30°C, kandungan klorofilnya turun pada suhu 32°C dan 34°C menjadi 20,26 mg.m⁻³ dan 19,11 mg.m⁻³. Pada konsentrasi 750 ppm CO₂ kandungan klorofilnya makin turun, yakni: 14,28 mg.m⁻³ pada suhu 30°C bahkan menjadi 12,31 mg.m⁻³ dan 10,42 mg.m⁻³ pada suhu 32 dan 34°C. Kandungan klorofil-anya semakin rendah pada konsentrasi 1.000 ppm CO₂ yakni: 8,21 mg.m⁻³ pada suhu 30°C dan terendah pada suhu 34°C yakni: 6,09 mg.m⁻³ (Gambar 3). Hasil analisis keragaman (anova) didapatkan

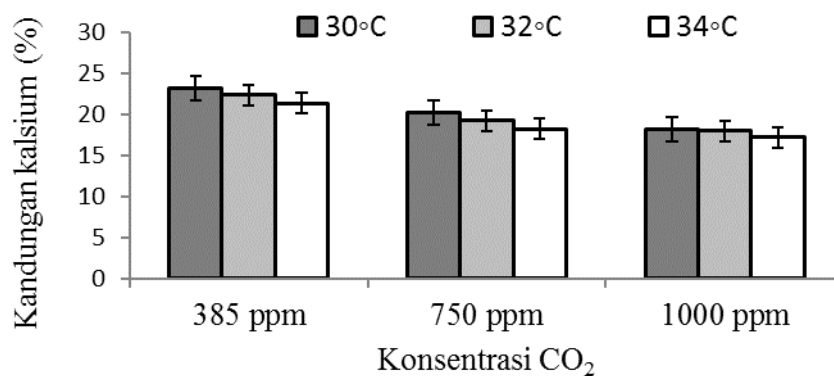
bahwa efek interaksi CO₂ dan suhu berpengaruh nyata (P<0,05) terhadap menu-runnya kandungan klorofil-a *Halimeda* sp. Hal tersebut terjadi karena pada konsentrasi 385 ppm CO₂ makroalga masih dapat melakukan proses fisiologi dengan baik karena kebutuhan akan kalsium karbonat masih normal, ketika terjadi kenaikan konsentrasi CO₂ maka terjadi disolusi karbonat yang berpengaruh terhadap lapisan utricule dalam thallus sehingga mengganggu proses fotosintesa dan respirasi apalagi dengan terjadinya peningkatan suhu maka kebutuhan komponen dan proses metabolik semakin bertambah sehingga kemampuan kloroplas dalam dinding sel semakin menurun pula (Dijoux *et al.*, 2012). Hasil penelitian Khairy *et al.* (2014) juga terjadi pada fitoplankton *Chaetoceros gracilis* mengalami kerusakan kloroplas, disintegrasi membran tilakoid, dan terjadinya sel lyses ketika terjadi peningkatan konsentrasi CO₂ 550-1.050 ppm.

3.1.4. Kandungan Kalsium (Ca)

Kandungan kalsium tertinggi pada konsentrasi 385 ppm CO₂, yakni 23,26% pada suhu 30°C, kemudian kandungannya menurun dengan meningkatnya CO₂ yakni 20,24% pada konsentrasi 750 ppm CO₂ dan paling rendah pada konsentrasi 1.000 ppm CO₂ yakni 17,19% pada suhu 34°C (Gambar 4). Hasil analisis keragaman (anova) didapatkan bahwa efek interaksi peningkatan konsentrasi CO₂ dan suhu berpengaruh nyata (P<0,05) terhadap kandungan kalsium makroalga *Halimeda* sp. Terjadi penurunan kandungan kalsium seiring dengan meningkatnya konsentrasi CO₂ dan suhu. Hasil kajian berupa ekspose konsentrasi CO₂ tinggi terhadap beberapa jenis makroalga yakni: *H. tuna*, *H. macroloba*, *H. opuntia*, dan *H. minima* ditemukan kerangka mineralnya berupa kristal aragonit semakin menurun (Robbin *et al.*, 2009; Ries *et al.*, 2009; Sinutok *et al.*, 2011; Comeau *et al.*, 2013).



Gambar 3. Rataan±SE kandungan klorofil (mg.m^{-3}) *Halimeda* sp pada peningkatan konsentrasi CO₂ dan suhu. Standar error dihitung dari ulangan sampel.



Gambar 4. Rataan±SE kandungan klorofil (mg.m^{-3}) *Halimeda* sp pada peningkatan konsentrasi CO₂ dan suhu. Standar error dihitung dari ulangan sampel.

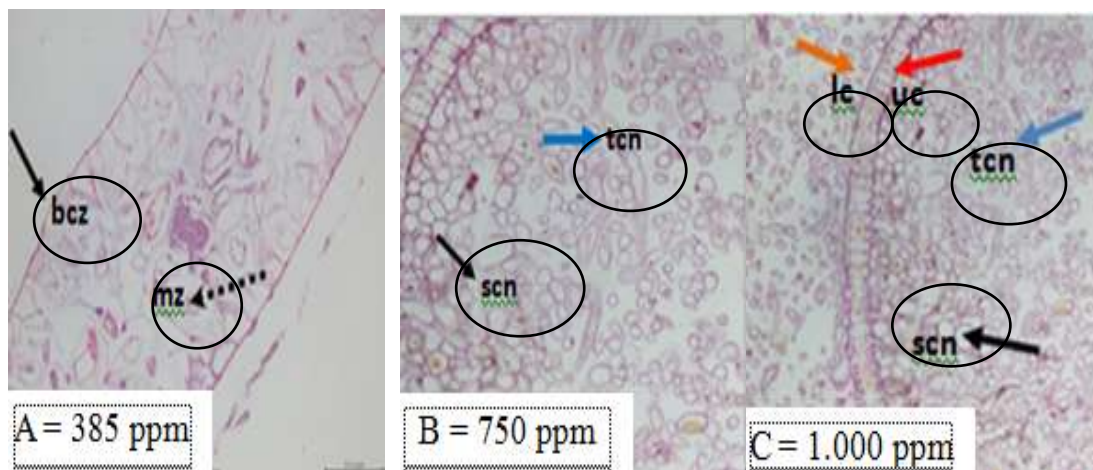
3.1.5. Jaringan Histopatologi

Pada konsentrasi 385 ppm CO₂ tidak terjadi perubahan pada bag cortex zone begitu pula pada bagian medulla zone, kondisi makroalga tersebut masih normal. Pada konsentrasi 750 ppm CO₂ terdapat sedikit sporangial cell nekrotik, thallus cell necrotic pada bag makroalga dari up cell dan lower cell yang mengindikasikan mulai mengalami kerusakan. Pada konsentrasi 1.000 ppm CO₂, ditemukan banyak sporangial cell necrotic (scn), begitu juga thallus cell necrotic (tcn) pada bag makroalga dari up cell (uc) dan lower cell (lc) yang menunjukkan terjadinya kerusakan (Gambar 5). Terjadinya kerusakan kerangka sel karena meningkatnya konsentrasi CO₂ yang mengakibatkan disolusi CaCO₃. Hal yang sama ditemukan pada jenis yang lain yakni: *Lithophyllum incrustan*, *Lithotamnium corallioides*, dan *Lithothamnion glassiale* ketika diekspose pada konsen-

trasi CO₂ melebihi 600 ppm, maka ditemukan terjadi pemutihan, dinding selnya menipis, pertumbuhannya menurun, dan kerangka mineralnya berupa kalsit menurun bahkan mengalami kerusakan (Noisette *et al.*, 2013 dan Ragazzola *et al.*, 2012).

3.2. Pembahasan

Pada penelitian ini pertumbuhan total, pertumbuhan harian, dan pertumbuhan relatif *Halimeda* sp tertinggi pada perlakuan konsentrasi 385 ppm CO₂ pada suhu 30°C (lihat Gambar 2), selanjutnya menurun dengan meningkatnya konsentrasi CO₂ dan suhu, hal ini terjadi karena proses peningkatan konsentrasi CO₂ yang mengakibatkan penurunan pH mengganggu proses metabolisme pada makroalga tersebut karena terjadinya ketidakseimbangan asam basa dalam struktur sel. Beberapa penelitian sebelumnya yang memperlihatkan efek nega-



Gambar 5. Histopatologi *Halimeda* sp: A) Normal, tidak ada perubahan bag cortex zone (bcz) dan bagian medulla zone (mz) normal; B) Ada sporangia cell necrotik (scn) juga thallus cell necrotik (tcn) mulai rusak; C) Banyak sporangia cell necrotik (scn) begitu juga thallus cell necrotik (tcn) pada bagian alga dari up cell (uc) dan lower cell (lc) kerusakan sedang.

tif dari *acidification* seperti pada species makroalga (Israel *et al.*, 1999; Israel and Hophy, 2002; Connel and Russell, 2010; Porzio *et al.*, 2010). Pertumbuhan makroalga menurun oleh peningkatan level CO₂ (Palacios and Zimmerman, 2007; Hall-Spencer *et al.*, 2008; Eklof *et al.*, 2012). Hasil analisis statistik menunjukkan adanya pengaruh perlakuan dan interaksinya terhadap pertumbuhan makroalga *Halimeda* sp (P<0,05). Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan konsentrasi CO₂ dan suhu menyebabkan menurunnya pertumbuhan, kandungan klorofil-a, kandungan kalsium dan menyebabkan malformasi pada jaringan histopatologi makroalga tersebut.

Pada beberapa penelitian sebelumnya tentang kajian efek peningkatan CO₂ terhadap makroalga genus *Halimeda* ditemukan tanggapan yang beragam (Hofmann and Bischof, 2014; Edmunds *et al.*, 2013). Namun, secara umum ukuran kristal aragonit dalam kerangka menurun, sedangkan kepadatan kristal meningkat pada pH lebih rendah dari 7,7 (Robbins *et al.* 2009, Sinutok *et al.*, 2011). Terdapat hasil kajian pada *H. opuntia* memperlihatkan bahwa menurunnya transport elektron dan disolusi pada 946 ppm

CO₂, tapi Hofmann *et al.* (2014) menemukan tidak ada efek dari peningkatan CO₂ pada transport elektron atau laju kalsifikasi pada *H. opuntia* yang diekspos sampai 1700 ppm CO₂.

Kandungan klorofil-a makroalga *Halimeda* sp menurun dengan meningkatnya konsentrasi karbondioksida dan suhu (lihat Gambar 3), hal ini menunjukkan bahwa kemampuan makroalga tersebut melakukan fotosintesa dan metabolisme terpengaruh dengan terjadinya pengasaman laut. Sejalan dengan hasil penelitian Porzio *et al.* (2013) bahwa tidak hanya makroalga berkapur yang terganggu dengan terjadinya pengasaman laut namun sekumpulan komunitas akan berubah dengan terjadinya pengasaman laut, hal ini mungkin karena kapasitas reproduksi alga (Porzio *et al.*, 2011) atau kemampuan fotosintesisnya (Porzio *et al.*, 2010) terganggu dengan menurunnya derajat keasaman laut. Selanjutnya penjelasan Barry (2011) bahwa konsekuensi dari tingginya konsentrasi CO₂ adalah menurunnya aktifitas enzim, terjadi inefisiensi fungsi seluler (seperti sintesa protein), terjadi depresi metabolik, bahkan pada organisme fitoplankton berpengaruh terhadap produksi pigmen sel

dan produktifitasnya. Selanjutnya hasil penelitian Khairy *et al.* (2014) bahwa kandungan total protein, karbohidrat dan lipid pada fitoplankton *Chaetoceros gracilis* menurun pada konsentrasi 550-1.050 ppm CO₂. Sejalan dengan penemuan Porzio *et al.* (2013) bahwa ganggang laut menunjukkan respon yang berbeda terhadap pengasaman laut, yang mana pada penurunan pH tidak selalu mendukung organisme fotosintetik laut.

Kandungan kalsium berhubungan erat dengan proses kalsifikasi yang membentuk kerangka kapur dari makroalga, pada penelitian ini terjadi penurunan kandungan kalsium (Ca) dengan meningkatnya konsentrasi CO₂ dan suhu. Pada beberapa penelitian sebelumnya terjadi penurunan kandungan kristal aragonit pada *Padina sp* di perairan Papua Nugini ketika terkspose konsentrasi CO₂ tinggi (1.000 ppm) dengan pH 7,78 (Johnsen *et al.*, 2012), begitu pula pada jenis makroalga *Porolithon onkodes* ketika terekspos konsentrasi CO₂ tinggi (600 ppm; pH 7,86) maka kristal aragonitnya turun 35% (Johnsen *et al.*, 2014). Hal ini berhubungan dengan peningkatan konsentrasi CO₂ yang menyebabkan terjadinya peleburan kalsium karbonat (CaCO₃) yang merupakan bahan utama pembentukan kerangka mineral tersebut. Sebuah hasil metaanalisis dimana tersedia seluruh data eksperimen, menunjukkan bahwa kalsifikasi adalah proses yang paling sering diobservasi dengan konsentrasi CO₂ dengan prediksi masa depan (Kroeker *et al.*, 2010). Pengapuran sangat rentan dengan terjadinya pengasaman laut (Royal Society, 2005; Kleypas *et al.*, 2006). Perubahan kalsifikasi berpengaruh bukan hanya pada individu organisme seperti kerang dan tiram (Gazeau *et al.*, 2007; Miller *et al.*, 2009), makroalga berkapur (Martin dan Gattuso, 2009), bahkan ekosistem juga bergantung pada kalsifikasi seperti terumbu karang tropis (Kleypas *et al.*, 2006; Silverman *et al.*, 2007), dan karang air dingin (Guinotte *et al.*, 2006; Turley *et al.*, 2007; Maier *et al.*, 2009) serta berpengaruh pada plankton mikroskopis

berkapur *e.g.* coccolithophor (Riebesell *et al.*, 2000), foraminifera (Bijma *et al.*, 2002; de Moel *et al.*, 2009), dan pteropods (Comeau *et al.*, 2010).

Hasil analisis histopatologi menunjukkan terjadinya kerusakan pada struktur sel makroalga ketika diinjeksi 750 ppm dan 1.000 ppm CO₂ terutama pada suhu 32°C dan 34°C (Gambar 4), hal ini terjadi karena berhubungan dengan konsentrasi ion karbonat yang semakin menurun seiring dengan meningkatnya konsentrasi CO₂, sesuai hasil penelitian Kuffner *et al.* (2007), bahwa tingkat kalsifikasi dan tingkat rekrutmen menurun pada keadaan saturasi rendah karbonat (CO₃²⁻) saat terjadi peningkatan CO₂. Bahkan terjadi kerusakan kerangka sel makroalga *Halimeda sp* dengan meningkatnya konsentrasi CO₂ dan suhu, hal ini terjadi karena peningkatan konsentrasi CO₂ dan suhu menyebabkan perubahan kesetimbangan asam basa yang berpengaruh terhadap kejenuhan CaCO₃. Barry *et al.* (2002) menjelaskan bahwa peningkatan konsentrasi CO₂ dapat meningkatkan peleburan kalsium karbonat (CaCO₃). Kondisi tersebut berpengaruh negatif serta mengakibatkan terjadinya kerusakan jaringan sel *Halimeda sp*, sebagaimana Seibel *et al.* (2001) menjelaskan bahwa asam-basa yang tidak seimbang dapat memicu rusaknya komponen eksoskeleton (seperti cangkang *calcareas*), penimbunan hasil metabolisme, aktivitas menurun, lemah akibat gangguan proses transport oksigen, dan jika berlangsung terus menerus akan menyebabkan kematian.

Hasil kajian Sinutok *et al.* (2012) yang menggabungkan peningkatan paparan suhu dan CO₂ terhadap spesies *Halimeda sp*. Terjadi penurunan kalsifikasi, fotosintesis dan perubahan dalam lingkungan mikro di sekitar segmen alga dan terjadi penurunan kinerja fisiologis, terjadi penurunan 50-70% dalam efisiensi fotokimia, penurunan 70-80% dalam produksi O₂ dan pengurangan tiga kali lipat dalam tingkat kalsifikasi pada peningkatan CO₂ dan perlakuan suhu yang tinggi. Terdapat pula efek tidak langsung dari

kenaikan suhu atau CO₂ pada herbivora laut yang mungkin timbul jika stres ini mengubah komposisi alga atau jaringan rumput laut sebagai makanan sehingga merubah kualitas komposisi makanannya. Suhu merupakan faktor penentu penting serapan hara pada produsen utama di laut (Raven dan Geider, 1988) dan dapat mengubah kandungan nitrogen pada jaringan alga.

Faktor abiotik sangat berpengaruh terhadap jenis makroalga berkapur dan asosiasi komunitasnya terhadap lingkungan masa depannya, menjadi perhatian besar dalam dekade terakhir (Sinutok *et al.*, 2011; Martin *et al.*, 2013; Olabarria *et al.*, 2013; Reyes-Nivia *et al.*, 2014). Sinutok *et al.* (2011) menemukan bahwa peningkatan suhu berimplikasi negatif terhadap *Halimeda* spp. Olabarria *et al.* (2013) melaporkan bahwa kombinasi peningkatan CO₂ dan suhu secara drastis menurunkan produktivitas makroalga berkapur dan tidak berkapur yang tumbuh di daerah batu karang. Martin *et al.* (2013) menemukan bahwa kalsifikasi pada *Lithophyllum cabiochae* terstimulasi dengan meningkatnya suhu pada kondisi CO₂ sekarang, tapi kombinasi suhu dan CO₂ berdampak negatif terhadap laju kalsifikasi.

IV. KESIMPULAN

Peningkatan konsentrasi karbondioksida dan suhu berpengaruh negatif terhadap pertumbuhan total, harian, dan relatif, makroalga berkapur *Halimeda* sp. Laju pertumbuhan tertinggi terstimulasi pada konsentrasi CO₂ dan suhu kondisi ambien, namun efek kombinasi meningkatnya konsentrasi CO₂ dan suhu pada kondisi ke depan menghambat produktivitas makroalga tersebut. Jaringan histopatologi makroalga tropik *Halimeda* sp mengalami malformasi, kandungan klorofil dan kalsium menurun pada kombinasi peningkatan konsentrasi CO₂ dan suhu pada kondisi ke depan, sehingga produktivitas makroalga tersebut tidak maksimal pada kondisi tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada teknisi laboratorium Biologi Plankton dan Kualitas Air pada Balai Penelitian dan Pengembangan Budidaya Air Payau Maros, yang telah membantu menganalisa sampel, drh. Yuni yang telah membantu menganalisa jaringan histopatologi, teknisi pada Jurusan Produksi Ternak Fakultas Peternakan Universitas Hasanuddin yang telah membantu menganalisa kadar kalsiumnya. Penelitian berlangsung atas dukungan dana penelitian kolaborasi antara Essex University United Kingdom dengan Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan Universitas Hasanuddin, Makassar.

DAFTAR PUSTAKA

- Adey, W.H. 1998. Coral reefs: algal structured and mediated ecosystems in shallow, turbulent, alkaline waters. *J. Phycol.*, 34:393-406.
- American Public Health Association (APHA). 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. APHA AWWA (American Water Work Organization) and WPCF (Water Pollution Control Federation). 21th edition, Washington D.C.1368p.
- Barry, J., B.A. Seibel, J. Drazen, M. Tamburri, C. Lovera, and P. Brewer. 2002. Field experiments on direct ocean CO₂ sequestration: the response of deep-sea faunal assemblages to CO₂ injection at 3200 m off Central California. *Eos Trans. AGU* 83, OS51F-02.
- Barry, J.P., S. Widdicombe, and J.M. Hall-Spencer. 2011. Effects of ocean acidification on marine biodiversity and ecosystem function. *In: Gattuso J.P. and L. Hansson (eds.)*. Ocean acidification. Oxford University Press. Oxford. 192-209pp.
- Beaufort, L., I. Probert, T. de Garidel-Thoron, E.M. Bendif, D. Ruiz-Pino,

- N. Metzl, C. Goyet, N. Buchet, P. Coupel, and M. Grelaud. 2011. Sensitivity of coccolithophores to carbonate chemistry and ocean acidification. *Nature*, 476:80-83.
- Bijma, J., B. Honisch, and R.E. Zeebe. 2002. The impact of the ocean carbonate chemistry on living foraminiferal shell weight: comment on "carbonate ion concentration in glacial-age deep waters of the caribbean sea" by W. S. Broecker and E. Clark. *Geochemical, Geophysic, Geosystem*, 3:1064-1264.
- Borowitzka, M.A. and A.W.D. Larkum. 1977. Calcification in the green alga *Hali-meda*. I. An ultrastructure study of thallus development. *J Phycol.*, 13:6-16
- Caldeira, K. and W.E. Wickett. 2005. Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean. *J. Geophys. Res. Oceans*, 110:C09S4
- Comeau, S., R. Jeffree, J. Teyssie, and J. Gattuso. 2010. Responses of the arctic pteropod *Limacina helicina* to projected future environmental conditions. *PLoS One*, 5 (6):11362.
- Connell, S.D. and B.D. Russell. 2010. The direct effects of increasing CO₂ and temperature on non-calcifying organisms: increasing the potential for phase shifts in kelp forests. *Proc. R. Soc. B.*, 277(1686):1409–1415.
- Delille, B., J. Harlay, I. Zondervan, S. Jacquet, L. Chou, R. Wollast, G.J. Richard, R.G.J. Bellerby, M. Frankignoulle, and A.V. Borges. 2005. Response of primary production and calcification to changes of pCO₂ during experimental blooms of the coccolithophorid *Emiliana huxleyi*. *Global Biogeochemical Cycles*, 19: GB2023.
- de Moel, H., G. M. Ganssen, F.J.C. Peeters, S.J.A. Jung, D. Kroon, G.J.A. Brummer, and R.E. Zeebe. 2009. Planktic foraminiferal shell thinning in the Arabian sea due to anthropogenic ocean acidification. *Biogeo-sciences*, 6(9):1917-1925.
- Dijoux, L., H. Verbruggen, L. Mattio, N. Duong, and C. Payri. 2012. Diversity of *Halimeda* (Bryopsidales, Chlorophyta) in New Caledonia: a combined morphological and molecular study. *J Phycol.*, 48:1465-1481.
- Doney, S.C., V.J. Fabry, R.A. Feely, and J.A. Kleypas. 2009. Ocean acidification: the other CO₂ problem. *Annual Rev. Marine Science*, 1:169-192.
- Doney, S.C., M. Ruckelshaus, J.E. Duffy, J.P. Barry, F. Chan, C.A. English, H.M. Galindo, J.M. Grebmeier, A.B. Hollowed, N. Knowlton, J. Polovina., N.N. Rabalais, W.J. Sydeman, and L.D. Talley. 2012. Climate change impacts on marine ecosystems. *Annual Report Marine Science*, 4:11-37.
- Eklöf, J., Alsterberg, J. Havenhand, K. Sundbäck, H. Wood, and L. Gamfeldt. 2012. Experimental climate change weakens the insurance effect of biodiversity. *Ecology Letter*, 15: 864-872.
- Feely, R.A., S.R. Alin, J. Newton, C.L. Sabine, M. Warner, A. Devol, C. Krembs, and C. Maloy. 2010. The combined effects of ocean acidification, mixing, and respiration on pH and carbonate saturation in an urbanized estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 88(4):442-449.
- Fernández, P.A., M.Y. Roleda, and C.L. Hurd. 2015. Effects of ocean acidification on the photosynthetic performance, carbonic anhydrase activity and growth of the giant kelp *Macrocystis pyrifera*. *Photosynthesis Research*, 124:293-304.
- Gao K., Z. Ruan, V. E. Villafañe, J. P. Gattuso, and E. W. Helbling. 2009. Ocean acidification exacerbates the effect of uv radiation on the calcifying phytoplankter *E. huxleyi*. *Limnology Oceanography*, 54:1855-1862

- Gao, K. and Y. Zheng. 2010. Combined effects of ocean acidification and solar uv radiation on photosynthesis, growth, pigmentation and calcification of the coralline alga *Corallina sessilis* (Rhodophyta). *Global Change Biology*, 16:2388-2398.
- Gattuso, J.P., M. Frankignoulle, I. Bourge, S. Romaine, and R.W. Buddemeier. 1998. Effect of calcium carbonate saturation of seawater on coral calcification. *Global Planet Change*, 18, 37-46.
- Guan, W. and K. Gao. 2010. Enhanced calcification ameliorates the negative effects of uv radiation on photosynthesis in the calcifying phytoplankton *E. huxleyi*. *China Science Bulletin*, 55:588-593
- Guinotte, J. M., J. Orr, S. Cairns, A. Freiwald, L. Morgan, and R. George. 2006. Will human-induced changes in seawater chemistry alter the distribution of deep-sea scleractinian corals. *Ecology Environmental*, 4(3):141-146.
- Hall-Spencer, J., R. Rodolfo-Metalpa, S. Martin, E. Ransome, M. Fine, and S. M. Turner. 2008. Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature*, 454 (7200): 96-99.
- Hofmann, L.C. and K. Bischof. 2014. Ocean acidification effects on calcifying macroalgae. *Aquat Biol*, 22:261-279.
- Houghton, J.T. 2001. *Climate change 2001: the Scientific Basis*. Cambridge University Press. Cambridge. 881p.
- Iglesias-Rodriguez, M.D., P.R. Halloran, R.-E.M. Rickaby, I.R. Hall, E. Colmenero-Hidalgo, J.R. Gittins, D. R.H. Green, T. Tyrrell, S. J. Gibbs, and P. von Dassow. 2008. Phytoplankton calcification in a high-CO₂ World. *Science*, 320:336-340.
- (IPCC) Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. *Climate change 2007: the fourth assessment report of the Cambridge University Press*. Cambridge. 344p.
- Israel, A., S. Z. Katz, J. E. Dubinsky, Merrill, and M. Friedlander. 1999. Photosynthetic inorganic carbon utilization and growth of *Porphyra linearis* (Rhodophyta). *J. Appl. Phycology*, 11:447-453.
- Israel, A. and M. Hophy. 2002. Growth, photosynthetic properties and rubisco activities and amounts of marine macroalgae grown under current and elevated seawater CO₂ concentrations. *Global Change Biology*, 8:831-840.
- Khairy, H.M., N.A. Shaltout., M.F. El-Naggar, N.A. El-Naggar. 2014. Impact of elevated CO₂ concentrations on the growth and ultrastructure of non-calcifying marine diatom (*Chaetoceros gracilis* F.Schu'tt). *Egyptian J.of Aquatic Research*. [http:// dx. doi. org/ 10 1016/j.ejar.2014.08.002](http://dx.doi.org/10.1016/j.ejar.2014.08.002)
- Kleypas, J.A., R.A. Feely, V.J. Fabry, C. Langdon, C.L. Sabine, L.L. Robbins. 2006. Impacts of ocean acidification on coral reefs and other marine calcifiers: a guide for future research, report of a workshop held 18–20 April 2005. St Petersburg, FL, sponsored by NSF, NOAA and the U.S., *Geological Survey*, 88p.
- Koch, M., G. Bowes, C. Ross, and X. Zhang. 2013. Climate change and ocean acidification effects on seagrasses and marine macroalgae. *Global Change Biology*, 19:103–132, doi: 10.1111/j.1365-2486.2012.02791.x
- Kroeker, K.J., R.L. Kordas, R.N. Crim, and G.G. Singh. 2010. Meta-analysis reveals negative yet variable effects of ocean acidification on marine organisms. *Ecology Letter.*, 13(11):1419-1434.
- Kuffner, I.B., Andersson, A.J, Jokiel, P.L., Rodgers, K.S., Mackenzie, F.T. 2007. Decreased abundance of crustose coralline algae due to ocean acidification.

- fication. *Nature Geoscience*, 1:114-117.
- Lee, D. and S.J. Carpenter. 2001. Isotopic disequilibrium in marine calcareous algae. *Chemical Geology*, 172:307-332
- Langer, G., M. Geisen, K.H. Baumann, J. Klas, U. Riebesell, S. Thoms, and J.R. Young. 2006. Species-specific responses of calcifying algae to changing seawater carbonate chemistry. *Geochemic, Geophysic, Geosystem*, 7:223-312.
- Langer, G., G. Nehrke, I. L. Z. Probert, and P. Ziveri. 2009. Strain-specific responses of *e.huxleyi* to changing seawater carbonate chemistry. *Biogeosciences*, 6:2637–2646
- Maier, C., J. Hegeman, M. G. Weinbauer, and J. P. Gattuso. 2009. Calcification of the cold-water coral *lophelia pertusa* under ambient and reduced pH. *Biogeosciences*, 6:1671-1680.
- Martin, S., S. Cohu, C. Vignot, G. Zimmerman, and J.P. Gattuso. 2013. One-year experiment on the physiological response of the Mediterranean crustose coralline alga, *Lithophyllum cabiochae*, to elevated pCO₂ and temperature. *Ecol Evol*, 3:676-693
- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver, and Z.C. Zhao. 2007. Global climate projections. Climate Change: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC. Cambridge University. Cambridge. 881p.
- Nelson, W.A. 2009. Calcified macroalgae critical to coastal ecosystems and vulnerable to change: a review. *Mar Freshw Res*, 60:787-801
- Noisette, F., H. Egilsdottir, D. Davoult, and S. Martin. 2013. Physiological responses of three temperate coralline algae from contrasting habitats to near-future ocean acidification. *J. Exp Mar Biol Ecol*, 448:179–187
- Olabarria, C., F. Arenas, R.M. Viejo, I. Gestoso. 2013. Response of macroalgal assemblages from rockpools to climate change: effects of persistent increase in temperature and CO₂. *Oikos* 122:1065-1079
- Orr, J. C. 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437:681-686.
- Pajusalu, L. 2013. Results of laboratory and field experiments of the direct effect of increasing CO₂ on net primary production of macroalgal species in brackish- ecosystems. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 62(2):148-154 doi: 10.3176.
- Pajusalu, L., G. Martin, A. Pollumae, K. Torn, and T. Paalme. 2015. Direct effects of increased CO₂ concentrations in seawater on the net primary production of charophytes in a shallow, coastal, brackish-water ecosystem. *Boreal Environment Research*, 20:413-422.
- Palacios, S.L. and R.C. Zimmerman. 2007. Response of eelgrass *Zostera marina* to CO₂ enrichment: possible impacts of climate change and potential for remediation of coastal habitats. *Marine Ecology Progress Series*, 344:1-13.
- Porzio, L., M. Lorenti, C. Arena, M.C. Buia. 2010. Risposta fotosintetica di alcune specie acroalgali in ambiente acidificato. In: Bottarin R, Schirpke U, Tappeiner U (eds.) L'uomo nell'ecosistema: una relazione bilanciata? *Eurac Book*, 56:181–187.
- Porzio, L., M.C. Buia, and J.M. Hall-Spencer. 2011. Effects of ocean acidification on macroalgal communities. *J. Experimental Marine Biology Ecology*, 400:278-287.

- Porzio, L., S.L. Garrard, and M.C. Buia. 2013. The effect of ocean acidification on early algal colonization stages at natural CO₂ vents. *Marine Biology*, doi 10.1007/s27-013-2251-3.
- Raven, J.A., and R.J. Geider. 1988. Temperature and algal growth. *New Phytology*, 110:441-461.
- Reyes-Nivia C, Diaz-Pulido G, Dove S (2014) Relative roles of endolithic algae and carbonate chemistry variability in the skeletal dissolution of crustose coralline algae. *Biogeosci Discuss.*,11:2993-3021
- Riebesell, U., I. Zondervan, B. Rost, P.D. Tortell, R.E. Zeebe and F.M.M. Morel. 2000. Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO₂. *Nature*, 407:364-367.
- Royal Society. 2005. Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. London: The Royal Society. 223 pp.
- Sabine, C.L., R.A. Feely, N Gruber, R.M. Key, K. Lee, J.L. Bullister, R. Wanninkhof, C.S. Wong, D.W. Wallace, and B. Tilbrook. 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, 305:367-371.
- Seibel, B. A. and P.J. Walsh. 2001. Potential impacts of CO₂ injection on deep-sea biota. *Science*, 294:319-320.
- Shi, D., Y. Xu, and F. M. M. Morel. 2009. Effects of the pH/pCO₂ control method on medium chemistry and phytoplankton growth. *Biogeosciences*, 6: 1199-1207.
- Silverman, J., B. Lazar, and J. Erez. 2007. Effect of aragonite saturation, temperature, and nutrients on the community calcification rate of coral reef. *J. Geo. Research*, 112:1-14.
- Sinutok, S., R. Hill., M. A. Doblin, R. Wuhler, and P. J. Ralph. 2011. Warmer more acidic conditions cause decreased productivity and calcification in subtropical coral reef sediment dwelling calcifiers. *Limnology Oceanography*, 56:1200-1212.
- Steel, R.G.D. and Torrie. 1991. Principles and procedures of statistics. Mc Graw-Hill Book Company. London. 487p.
- Sudarmadji, S., B. Haryono, dan Suhardi. 2010. Prosedur analisa untuk bahan makanan dan pertanian. Liberty. Yogyakarta. 324hlm.
- Turley, C.M., J. M. Roberts, and J. M. Guinotte. 2007. Corals in deepwater: will the unseen hand of ocean acidification destroy coldwater ecosystems. *Coral Reefs*, 26:445-448.
- Verbruggen, H., W.H.C.F. Kooistra. 2004. Morphological characterization of line-ages within the calcified tropical seaweed genus *Halimeda* (Bryopsidales, Chlorophyta). *J. Eur. Phycol*, 39:213-228
- Vogel, N., K.E. Fabricius, J. Strahl, S.H.C. Noonan, C. Wild, and S. Uthicke. 2015. Calcareous green alga *Halimeda* tolerates ocean acidification conditions at tropical carbon seeps. *Limnology and Oceanography*, 60:263-275.
- Zondervan, I., B. Rost, U. Riebesell. 2002. Effect of CO₂ concentration on the PIC/POC ratio in the coccolithophore *E. huxleyi* grown under light-limiting conditions and different daylengths. *J. Experiment Marine Biology Ecology*, 272:55-70.
- Diterima* : 26 Oktober 2015
Direview : 6 Desember 2015
Disetujui : 28 Desember 2015