

PENGARUH KONDISI pH TERHADAP RESPONS FISILOGIS DAUN LAMUN JENIS *Cymodocea rotundata*

*THE EFFECT OF pH CONDITIONS ON PHYSIOLOGICAL RESPONSE OF SEAGRASS LEAVES *Cymodocea rotundata**

Yudho Andika^{1*}, Mujizat Kawaroe², Hefni Effendi³, & Neviaty P. Zamani²

¹Program Studi Ilmu Kelautan, Sekolah Pascasarjana, IPB Univeristy, Bogor, 16680, Indonesia

²Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, FPIK, IPB University, Bogor, 16680, Indonesia

³Departemen Manajemen Sumberdaya Perairan, FPIK, IPB Univeristy, Bogor, 16680, Indonesia

*E-mail: andikayudho43@gmail.com

ABSTRACT

Increased carbon dioxide (CO_2) in the atmosphere causes ocean acidification. Acidification becomes a threat to seagrass. Nowadays, one of the challenges that must be faced is to predict the long-term impact of acidification on the physiology of seagrass. This research aims to analyze seagrass *Cymodocea rotundata* leave physiology responses to pH that consists of chlorophyll-a and b content, photosynthesis rate, and growth rate of seagrass leaf. This research was conducted on September–December 2017 in Marine Habitat Laboratory, Department of Marine Science and Technology, Bogor Agricultural University. The method used a completed randomized design with five repetitions. pH treatment used in this research is low pH (7.55), medium pH (7.78), and control (8.20). The setting of pH value was done by adding CO_3^{2-} . Chlorophyll-a and b contents, photosynthesis rate, and growth rate on *C. rotundata* leaf are higher on control pH treatment than medium pH (7.78) and low pH (7.55). ANOVA test shows that only chlorophyll-a is significantly different. The difference pH affects the chlorophyll content of a and b, photosynthesis rate, and leaf growth rate. The low pH of seawater has been shown to inhibit the physiological activity of *C. rotundata* leaves.

Keywords: chlorophyll, growth, photosynthesis, seagrass

ABSTRAK

Meningkatnya konsentrasi karbondioksida (CO_2) di atmosfer dapat menyebabkan asidifikasi laut. Asidifikasi menjadi ancaman bagi lamun. Salah satu tantangan yang harus dihadapi saat ini adalah memprediksi dampak jangka panjang dari asidifikasi laut terhadap fisiologi lamun. Tujuan penelitian ini untuk menganalisis respons fisiologis lamun *C. rotundata* yang meliputi kandungan klorofil a dan b, laju fotosintesis dan laju pertumbuhan daun lamun. Penelitian dilaksanakan pada bulan September–Desember 2017 di Laboratorium *Marine Habitat* Departemen Ilmu dan Teknologi Kelautan, Institut Pertanian Bogor. Metode yang digunakan adalah rancangan percobaan acak lengkap 5 pengulangan. Perlakuan pH yang digunakan yaitu pada nilai pH rendah (7,55), menengah (7,78) dan kontrol (8,20). Pengaturan nilai pH dengan cara menambahkan unsur CO_3^{2-} . Kandungan klorofil a dan b, Laju fotosintesis dan Laju pertumbuhan daun *C. rotundata* perlakuan pH 8,20 lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan pH 7,78 dan pH 7,55. Uji ANOVA menunjukkan hanya klorofil a yang berbeda signifikan. Perbedaan pH memengaruhi kandungan klorofil a dan b, laju fotosintesis dan laju pertumbuhan daun. Rendahnya pH air laut terbukti menghambat aktivitas fisiologis daun lamun *C. rotundata*.

Kata kunci: fotosintesis, klorofil, pertumbuhan, seagrass

I. PENDAHULUAN

Sumber utama karbondioksida (CO_2) di atmosfer berasal dari pembakaran bahan bakar fosil seperti minyak, batu bara, dan gas

alam (IPCC, 2014). Sejak abad ke-20, tingginya penggunaan bahan bakar fosil memengaruhi laju pertumbuhan karbon-dioksida (CO_2) beberapa kali lipat (Canadell *et al.*, 2007). IPCC (2013) menjelaskan peningka-

tan konsentrasi karbondioksida (CO_2) terlihat sangat signifikan, bahkan lebih cepat dari prediksi sebelumnya. Keadaan ini menyebabkan terjadinya asidifikasi laut (Fabry *et al.*, 2009). pH air laut diperkirakan akan turun 0,3 sampai 0,4 unit, sesuai dengan meningkatnya karbondioksida (CO_2) antara 300–400 % (Waldbusser *et al.*, 2011). Menurut IPCC (2014) pembakaran bahan bakar fosil terus berlanjut dalam 100 tahun kedepan, sehingga dapat menyebabkan penurunan pH permukaan laut hingga mencapai angka 7,5.

pH air laut berkaitan erat dengan karbon terlarut, semakin banyak karbondioksida (CO_2) dan asam karbonat (H_2CO_3), maka pH akan semakin rendah (Effendi, 2003). Zeebe & Wolf-Gladrow (2001) menyatakan karbondioksida (CO_2) berpartisipasi dalam reaksi kesetimbangan sebagai sistem penyangga. Sarmiento & Gruber (2006) menyatakan dalam proses asidifikasi, karbondioksida (CO_2) yang ada di atmosfer masuk ke dalam laut dan bereaksi dengan air laut (H_2O) kemudian membentuk asam karbonat (H_2CO_3). Asam karbonat (H_2CO_3) di perairan akan melepas ion H^+ dan membentuk bikarbonat (HCO_3^-). Ion bikarbonat (HCO_3^-) akan melepas ion H^+ dan membentuk karbonat (CO_3^{2-}). Ion H^+ yang dilepas menyebabkan pH perairan laut menurun (Mackereth *et al.*, 1989; Sarmiento & Gruber, 2006).

Tantangan yang harus dihadapi adalah mengurangi dampak dari asidifikasi laut dan bagaimana mempertahankan fungsi dari ekosistem laut (Widdicombe & Spicer, 2008). Knutzen (1981) menyatakan bahwa biota laut mampu mentolerir penurunan pH 0,5 sampai 1,0 unit, dalam kondisi pH yang lebih rendah akan mengganggu proses fotosintesis, mengurangi kalsifikasi karang, dan menghambat pertumbuhan organisme. Fabricius *et al.* (2011) mengungkapkan hal yang berbeda, asidifikasi berdampak pada meningkatnya aktivitas fotosintesis, produktivitas dan biomassa lamun. Ekosistem lamun memegang peranan penting untuk

aktivitas perikanan (Bastyan & Cambridge, 2008). Disamping itu, lamun juga berperan dalam siklus gas karbondioksida yang mampu menyerap gas karbondioksida di atmosfer (Gullstrom *et al.*, 2017). Lamun membutuhkan cukup banyak karbon anorganik untuk pertumbuhan dan kelangsungan hidupnya (Fourqurean *et al.*, 2012). *C. rotundata* merupakan salah satu spesies yang banyak ditemukan di kawasan Indo-Pasifik (Short *et al.*, 2007).

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa asidifikasi laut meningkatkan aktivitas fotosintesis pada spesies *C. serrulata*, *Halodule uninervis*, *Thalassia hemprichii* (Ow *et al.*, 2015) dan *Zoostera polichlamys* (Borum *et al.*, 2016). Asidifikasi laut menghambat aktivitas fotosintesis lamun *Zoostera marina* (Zimmerman *et al.*, 2017). Asidifikasi laut juga mengubah keseragaman komunitas lamun (Duarte *et al.*, 2013). pH sangat memengaruhi pertumbuhan dan produktivitas dari lamun *C. rotundata*. Belum adanya data mengenai pengaruh dari asidifikasi terhadap fisiologis lamun *C. rotundata* menjadi salah satu dasar untuk dilakukannya penelitian ini. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis respons fisiologis daun lamun *C. rotundata* yang meliputi kandungan klorofil, laju fotosintesis, pertumbuhan daun *C. rotundata* terhadap pemberian karbonat (CO_3^{2-}) pada kondisi pH yang berbeda.

II. METODE PENELITIAN

2.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian telah dilaksanakan pada bulan September–Desember 2017. Sampel lamun *C. rotundata* berasal dari Pulau Pari Kepulauan Seribu, Jakarta. Sampel lamun ditransplantasi kembali dalam toples di Laboratorium *Marine Habitat*, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, IPB University.

2.2. Alat dan Bahan

Penelitian menggunakan alat sebagai berikut: pH meter, termometer, lampu LED

(*Light Emitting Diode*), refraktometer, *portable photosynthesis system analysis*, gelas ukur, kantong sampel, timbangan, penggaris, botol sampel, pipet tetes, sekop, *coolbox*, kamera, dan alat tulis. Adapun bahan yang digunakan adalah lamun *C. rotundata*, pupuk cair, etanol, air laut, akuades dan CO_3^{2-} .

2.3. Prosedur Analisis Data

2.3.1. Pengambilan Sampel

Tunas lamun *C. rotundata* dan substrat diambil di Pulau Pari Kepulauan Seribu. *C. rotundata* diambil dengan menggalikan tunas utuh dengan rimpang terhubung pada sedimen sebelum dipindahkan ke toples. Sampel diambil kemudian dimasukkan ke dalam *coolbox* dan diaerasi, selanjutnya ditransplantasi ke toples (Riniatsih & Endrawati, 2013). Komposisi pupuk, karbonat dan lampu disesuaikan dengan hasil penelitian pendahuluan yang dilakukan selama 1 bulan di Laboratorium *Marine Habitat*, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor.

2.3.2. Rancangan Penelitian

Toples digunakan sebagai wadah untuk menumbuhkan lamun. Rancangan penelitian menggunakan rancangan acak lengkap dengan menggunakan tabel acak (*Figure 1*). Sebanyak lima belas toples digunakan untuk 3 perlakuan dengan 5 pengulangan. Perlakuan pH yang digunakan mengacu pada data IPCC (2014), untuk kontrol (8,20) merupakan kondisi pH laut saat ini, dalam perlakuan pH sedang (7,78) merupakan kondisi pH laut 50 tahun yang akan datang, sedangkan untuk pH rendah (7,55) merupakan kondisi pH laut 100 tahun yang akan datang. Setiap toples diisi air laut sebanyak 1,5 L dan satu tunas lamun *C. rotundata*. Pengaturan pH dilakukan dengan menambahkan karbonat (CO_3^{2-}). Pencahayaan menggunakan lampu LED 12 watt yang dipasang 30 cm di atas permukaan toples setiap 12 jam dalam satu hari. Pergantian air dilakukan setiap 2 minggu sekali, sedangkan

untuk pemberian pupuk dilakukan setiap 1 minggu sebanyak 1,5 mL.

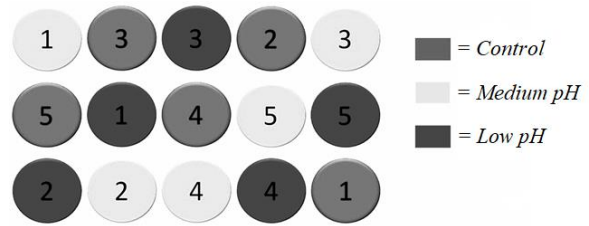


Figure 1. Research design.

2.3.3. Kandungan Klorofil

Berdasarkan Granger & Izumi (2002) penentuan konsentrasi klorofil diketahui dengan mengukur ekstrak daun lamun. Setiap sampel absorbansi menggunakan panjang gelombang 664 nm dan 647 nm. Kandungan klorofil lamun *C. rotundata* dihitung dengan rumus:

$$\text{Klorofil } a = \frac{11,93 E_{664} - 1,93 E_{647}}{20,36 E_{647} - 4,68 E_{647}} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{Klorofil } b = \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan: E_{664} adalah gelombang absorbansi, E_{647} adalah gelombang absorbansi.

2.3.4. Laju Fotosintesis

Laju fotosintesis diukur menggunakan *Portable photosynthesis system analysis* (LI-COR model LI-6400) dengan penyuntik CO_2 dan sumber cahaya LED. Data pengamatan dianalisis dengan pengaturan program berupa kurva respon intensitas cahaya (PAR = *Photosynthesis Active Radition*) dari 1–1200 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Soleh, 2017).

2.3.5. Laju Pertumbuhan

Pengukuran laju pertumbuhan daun lamun *C. rotundata* mengacu pada Short & Duarte (2001). Pertumbuhan daun lamun *C. rotundata* dihitung dengan rumus:

$$P = \frac{P_t - P_0}{\Delta t} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan: *P* adalah pertumbuhan daun lamun *C. rotundata* (mm/hari), *Pt* adalah panjang daun akhir (mm), *P0* adalah panjang daun awal (mm), Δt adalah lama waktu pengamatan (hari).

2.3.6. Kualitas Perairan

Parameter kualitas air yang diukur meliputi suhu menggunakan termometer dan salinitas dengan menggunakan refraktometer (APHA, 2012).

2.3.7. Analisis Statistik

Analisis data menggunakan ANOVA *one way* pada taraf nyata 5 % pada *Microsoft Excel* untuk menentukan perbedaan dari kandungan klorofil, laju fotosintesis, dan laju pertumbuhan daun lamun *C. rotundata* (Suliyanto, 2012).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil

3.1.1. Kualitas Perairan

Kualitas air yang diamati secara *in*

situ pada perlakuan pH rendah, sedang dan kontrol (*Table 1*). Nilai rata-rata suhu berkisar antara 26,58°C–26,61°C. Suhu tertinggi dijumpai pada perlakuan pH sedang, dan suhu terendah pada perlakuan pH kontrol. Nilai rata-rata salinitas pada penelitian ini berkisar antara 33,26 psu–33,33 psu.

3.1.2. Kandungan Klorofil *C. rotundata*

Hasil pengukuran kandungan klorofil a dan b *C. rotundata* (*Figure 2*) perlakuan pH kontrol (8,20) sebesar 1,77 mg/g dan 1,43 mg/g berada pada kisaran 1,62–1,97 mg/g (klorofil a) dan 1,21–1,94 mg/g (klorofil b). Kandungan klorofil a dan b *C. rotundata* perlakuan pH 7,78 sebesar 1,56 mg/g dan mg/g 1,24 berada pada kisaran 0–2,60 mg/g (klorofil a) dan 0–1,94 mg/g (klorofil b). Kandungan klorofil a dan b *C. rotundata* perlakuan pH 7,55 sebesar 0,58 mg/g dan 0,59 mg/g berada pada kisaran 0–1,83 mg/g (klorofil a) dan 0–1,44 mg/g (klorofil b). Hasil uji ANOVA menunjukkan rata-rata hasil kandungan klorofil a pada daun lamun berbeda signifikan ($P < 0,05$)

Table 1. The value range of physical and chemical parameters of water quality.

Water quality	pH treatments		
	L (7.55)	M (7.78)	C (8.20)
Temperature (°C)	26.60 ± 0.41	26.61 ± 0.42	26.58 ± 0.42
Salinity (psu)	33.27 ± 2.08	33.33 ± 2.12	33.26 ± 2.06

Information: The values are presented as mean ± standard deviation. L= low pH, M= medium pH, C= control.

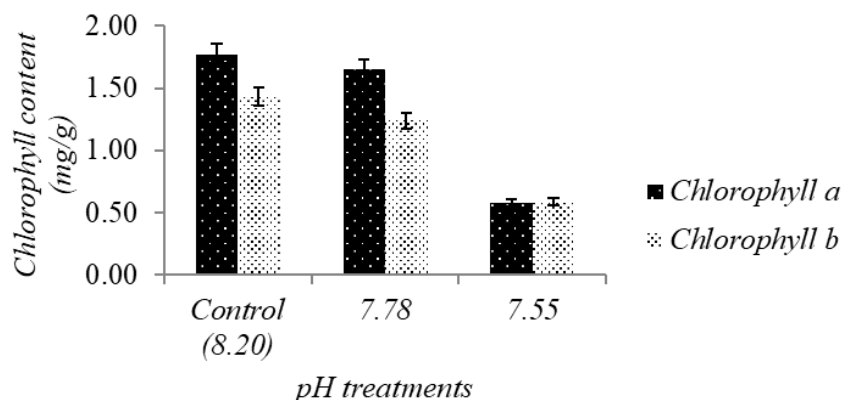


Figure 2. The average chlorophyll content of C. rotundata.

dan rata-rata hasil kandungan klorofil b pada daun lamun tidak berbeda signifikan ($P > 0,05$).

3.1.3. Laju Fotosintesis *C. rotundata*

Hasil pengukuran laju fotosintesis lamun *C. rotundata* (Figure 3) pada perlakuan pH kontrol (8,20) sebesar $8,89 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ berada pada kisaran $6,59$ – $11,45 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Laju fotosintesis *C. rotundata* pada perlakuan pH 7,78 sebesar $6,85 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ berada pada kisaran $5,51$ – $8,36 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Laju fotosintesis *C. rotundata* pada perlakuan pH 7,55 sebesar $6,87 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ berada pada kisaran 0 – $13,20 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Hasil uji ANOVA menunjukkan rata-rata hasil laju fotosintesis *C. rotundata* tidak signifikan ($P > 0,05$).

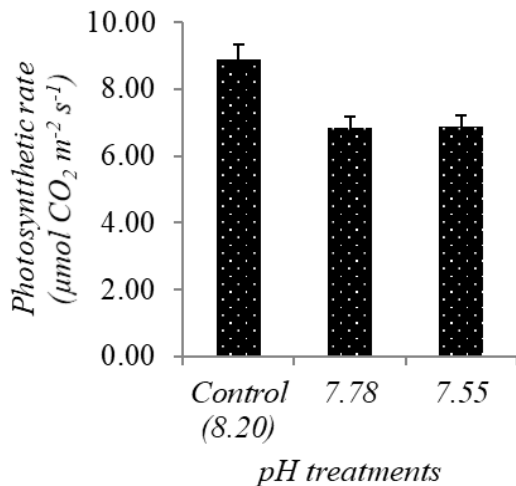


Figure 3. The average photosynthetic rate of *C. rotundata*.

3.1.4. Laju Pertumbuhan Daun *C. rotundata*

Berdasarkan data laju pertumbuhan daun *C. rotundata* (Figure 4) pada perlakuan pH kontrol (8,20) memiliki laju pertumbuhan daun *C. rotundata* sebesar $2,74 \text{ mm/hari}$ yang berada pada kisaran $1,00$ – $5,56 \text{ mm/hari}$. Laju pertumbuhan daun *C. rotundata* pada perlakuan pH 7,78 sebesar $2,51 \text{ mm/hari}$ yang berada pada kisaran $1,53$ – $3,56 \text{ mm/hari}$. Laju pertumbuhan pada

pH 7,75 sebesar $1,72 \text{ mm/hari}$ yang berada pada kisaran $0,70$ – $2,50 \text{ mm/hari}$. Hasil uji ANOVA pertumbuhan daun *C. rotundata* menunjukkan rata-rata hasil tidak signifikan ($P > 0,05$).

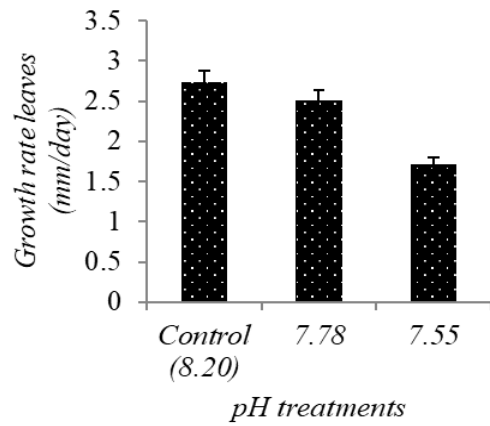


Figure 4. The average growth rate leaves of *C. rotundata*.

3.2. Pembahasan

Karbonat dimasukkan ke dalam perlakuan pH 7,55 dan pH 7,78 bereaksi dengan kalsium (Ca) menjadi kalsium karbonat (CaCO_3). Hal ini terlihat adanya butiran-butiran kapur pada kolom air. Nontji (1993) menyatakan bahwa pada dasarnya pH air laut akan kembali pada nilai semula karena adanya sistem karbondioksida yang berfungsi sebagai penyangga. Selama satu bulan pengamatan suhu tidak terjadi perubahan nilai yang signifikan. Nilai suhu yang didapatkan tergolong rendah dan masih dalam kisaran suhu optimal untuk pertumbuhan lamun, hal ini disebabkan pada bulan November–Desember termasuk ke dalam musim hujan. Menurut Effendi (2003) salah satu faktor yang memengaruhi suhu air laut adalah musim. Pengukuran salinitas selama satu bulan tidak terjadi peningkatan atau penurunan signifikan, hal ini disebabkan tidak adanya aktivitas pencampuran dengan air tawar. Kisaran nilai salinitas yang didapat masih dalam nilai optimum untuk kehidupan lamun. Salinitas optimal untuk pertumbuhan lamun berkisar antara 25 – 35 psu (Supriharyono, 2009).

Selama satu bulan pengamatan ditemukan pada perlakuan pH 7,55 ada sebanyak 4 daun yang gugur, pada perlakuan pH 7,78 ada sebanyak 5 daun dan pada perlakuan kontrol (8,20) hanya 2 daun yang gugur selama satu bulan. Lambers *et al.* (1998) menyebutkan bahwa lamun merespons perubahan lingkungan hingga pada kondisi stres. Kondisi stres terjadi pada hitungan hari hingga bulan. pH merupakan salah satu faktor yang menjadi penyebab hilangnya klorofil pada daun tumbuhan. Asidifikasi berdampak pada hilangnya unsur magnesium (Mg), sehingga akan terjadi perubahan warna pada daun. Pigmen klorofil yang berwarna hijau akan membentuk pigmen *pheophityn* yang berwarna coklat. Fennema (1996) menambahkan pada media asam (pH < 8) klorofil tidak stabil, penurunan pH pada air laut yang terjadi ketika pemanasan jaringan daun mengakibatkan hilangnya pigmen klorofil.

Aktivitas fotosintesis lamun *C. rotundata* dipengaruhi oleh klorofil sebagai penyerap cahaya. Daya serap sinar lampu yang rendah pada fotosintesis dipengaruhi oleh kandungan klorofil-a dan b pada perlakuan pH 7,55 klorofil-a dan b memiliki nilai yang rendah, sehingga berdampak pada laju fotosintesis yang rendah. Berbeda dengan pada perlakuan pH 7,78 yang memiliki nilai klorofil-a dan b cukup tinggi, namun laju fotosintesisnya rendah diduga daun muda yang baru tumbuh memiliki daya serap CO₂ yang kecil. Perlakuan pH kontrol (8,20) klorofil-a dan b memiliki nilai yang tinggi, sehingga berdampak pada laju fotosintesis yang tinggi. Ketersediaan karbon-dioksida (CO₂) dalam air laut memengaruhi aktivitas fotosintesis lamun *C. rotundata* (Lambers *et al.*, 1998). Laju fotosintesis lamun tergantung pada difusi karbon melalui kutikula pada permukaan daun (Kawaroe *et al.*, 2016). Lamun memperoleh karbon-dioksida (CO₂) dari air laut yang memiliki konsentrasi karbon anorganik tinggi (Hein & Sand-Jensen, 1997).

Secara tidak langsung perbedaan pH air laut memengaruhi pertumbuhan daun lamun *C. Rotundata*, tingginya nilai pertumbuhan daun lamun berbanding lurus dengan nilai kandungan klorofil dan nilai laju fotosintesis. Penelitian menunjukkan pada perlakuan pH 7,55 saat lamun sudah tumbuh pada ukuran ± 5 cm beberapa daun terlihat menguning. Hal ini mengindikasikan bahwa kandungan klorofil lamun sudah hilang, sehingga daun lamun tersebut tidak dapat tumbuh lagi. Banyak faktor dapat memengaruhi pertumbuhan lamun (Dunton, 1994). Pertumbuhan daun lamun dipengaruhi oleh faktor fisiologis, metabolisme, lingkungan (Azkab & Kiswara, 1994) dan nutrisi (Lee & Dunton, 2000). Vonk *et al.* (2015) menyatakan bahwa ukuran tubuh lamun juga memengaruhi pertumbuhan lamun. Lamun *C. rotunda* memiliki ukuran tubuh dan luas penampang daun yang kecil, sehingga memiliki daya serap yang kecil.

IV. KESIMPULAN

Perbedaan pH air laut memengaruhi kandungan klorofil-a dan b, laju fotosintesis dan laju pertumbuhan daun. Kandungan klorofil-a dan b, laju fotosintesis dan laju pertumbuhan daun lamun *C. rotundata* perlakuan pH kontrol lebih besar dibandingkan dengan perlakuan pH 7,78 dan pH 7,55. Uji ANOVA menunjukkan hanya klorofil-a yang berbeda signifikan. Rendahnya pH air laut terbukti menghambat aktivitas fisiologis daun lamun *C. rotundata*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ibu Dr. Mujizat Kawaroe dan Ibu Dr. Neviaty P. Zamani yang telah membantu mendanai dan memfasilitasi kegiatan riset serta semua pihak yang telah berkontribusi selama kegiatan berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- American Public Health Association (APHA). 2012. Standar method for the examination of water and waste wayer. 22 Edition. Environmental Protection Agency Press. Washington DC. 1360 p.
- Azkab, M.H. & W. Kiswara. 1994. Struktur komunitas biologi padang lamun di pantai selatan lombok dan kondisi lingkungannya. Pusat Penelitian dan Pengembangan Oseanologi LIPI. Jakarta. 124 p.
- Bastyan, G.R. & M.L. Cambridge. 2008. Transplantation as a method for restoring the seagrass *Posidonia australis*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 79: 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.04.012>
- Borum, J., O. Pederson, L. Kotulo, M.W. Fraser, J. Statton, T.D. Colmer, & G.A. Kendrick. 2016. Photosynthetic response to globally increasing CO₂ of co-occurring temperate seagrass species. *Plant, Cell and Environment*, 39: 1240-1250. <https://doi.org/10.1111/pce.12658>
- Canadell, J.P., C. Le Quere, M.R. Raupach, C.B. Field, E.T. Buitenhuis, P. Ciais, T.J. Conway, N.P. Gillett, R.A. Houghton, & G. Marland. 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proc Natl Acad Sci*, 104(47): 18866-18870. <https://doi.org/10.1073/pnas.0702737104>
- Duarte, C.M., I.E. Hendriks, T.S. Moore, Y.S. Olsen, A. Steckbauer, L. Ramajo, J. Carstensen, J.A. Trotter, & M. Mcculloch. 2013. Is ocean acidification an open-ocean syndrome? Understanding anthropogenic impacts on seawater pH. *Estuarine and Coastal*, 36: 221–236. <https://doi.org/10.1007/s12237-013-9594-3>
- Dunton, K.H. 1994. Seasonal growth and biomass of the subtropical seagrass *Halodule wrightii* in relation to continuous measurements of underwater irradiance. *Marine Biology*, 120: 479-489. <https://doi.org/10.1007/BF00680223>
- Effendi, H. 2003. Telaah Kualitas Air Bagi Pengelolaan Sumberdaya dan Lingkungan Perairan. Kanisius. Yogyakarta. 256 p.
- Fabricius, K.E., C. Langdon, S. Uthicke, C. Humphrey, S. Noonan, G. De'ath, R. Okazaki, N. Muehllehner, M.S. Glas, & J.M. Lough. 2011. Losers and winners in coral reefs acclimatized to elevated carbon dioxide concentrations. *Nature Climate Change*, 1: 165-169. <https://doi.org/10.1038/nclimate1122>
- Fabry, V.J., J.B. McClintock, J.T. Mathis, & J.M. Grebmeier. 2009. Ocean acidification at high latitudes: The Bellwether. *Oceanography*, 22(4): 160–171. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2009.105>
- Fennema. 1996. Food Chemitry 3 th edition. Marcel Dekker. Inc New York. 1067 p.
- Fourqurean, J.W., C.M. Duarte, H. Kennedy, & M. Marbà. 2012. Seagrass ecosystems as a globally significant carbon stock. *Nature Geoscience*, 1: 1-5. <https://doi.org/10.1038/ngeo1477>
- Granger, S. & H. Izumi. 2002. Water quality measurement methods for seagrass habitats. *Elsevier Science*, 20: 393-405. <https://doi.org/10.1016/B978-044450891-1/50021-9>
- Gullstrom M., L.D. Lyimo, M. Dahl, G.S. Samuelsson, M. Eggertsen, E. Enderberg, L.M. Rasmusson, H.W. Linderholm, A. Knudby, S. Bandeira,

- L.M Nordlund, & M. Bjork. 2017. Blue Carbon Storage in Tropical Seagrass Meadows Relates to Carbonate Stock Dynamics, Plant–Sediment Processes, and Landscape Context: Insights from the Western Indian Ocean. *Springer Nature*, 21: 551-566.
<https://doi.org/10.1007/s10021-017-0170-8>
- Hein, M. & K. Sand-Jansen. 1997. CO₂ Increases oceanic primary production. *Nature*, 388: 526-527.
<https://doi.org/10.1038/41457>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to The Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge. 1585 p.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge. 1434 p.
- Knutzen, J. 1981. Effects of decreased pH on marine organisms. *Marine Pollution Bulletin*, 12: 25–29.
[https://doi.org/10.1016/0025-326X\(81\)90136-3](https://doi.org/10.1016/0025-326X(81)90136-3)
- Lambers, H, F.S. Chapin, & T.L. Pons. 1998. Plant physiological ecology. Springer. New York. 605 p.
- Lee, K.S. & K.H. Dunton. 2000. Effects of nitrogen enrichment on biomass allocation, growth, and leaf morphology of the seagrass *Thalassia testudinum*. *Marine Ecology Progress*, 196: 39–48.
<https://doi.org/10.3354/meps196039>
- Mackereth, F.J.H., J. Heron, & J.F. Tailing. 1989. Water analysis. freshwater biological association. Liverpool University Press. Liverpool. 456-456 p.
- Nontji, A. 1993. Laut nusantara. Djambatan. Jakarta. 368 p.
- Ow, Y.X., C.J. Collier, & S. Uthicke. 2015. Response of three tropical seagrass species to CO₂ enrichment. *Marine Biology*, 162: 1005-1007.
<https://doi.org/10.1007/s00227-015-2644-6>
- Riniatsih I. & H. Endrawati. 2013. Pertumbuhan lamun hasil transplantasi jenis *Cymodocea rotundata* di padang lamun teluk awur jepara. *Buletin Oseanografi Marina*, 2: 34-40.
<https://doi.org/10.14710/buloma.v2i1.6924>
- Sarmiento, J.L. & N. Gruber. 2006. Ocean biogeochemical dynamics. Princeton University Press. New Jersey. 503 p.
- Short, F.T. & C.M. Duarte. 2001. Methods for the measurement of seagrass and growth production. di dalam: Short FT, Coles RG, editor. Global seagrass research methods. *Elsevier Science*, 8: 155-182.
<https://doi.org/10.1016/B978-044450891-1/50009-8>
- Short, F.T., T. Carrutgers, W. Dennison, & M. Waycott. 2007. Global seagrass distribution and diversity: a bioregion model. *J. of Experimental Marine Biology and Ecology*, 350: 3–20.
<https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.06.012>
- Soleh, M.A. 2017. Overestimation measurement of gas exchange by using Portable Photosynthesis Analyzer LI-6400. *J. Kultivasi*, 16(1): 255-259.
<https://doi.org/10.24198/kltv.v16i1.11546>
- Suliyanto. 2012. Analisis statistik pendekatan praktis dengan Microsoft excel. Andi offset. Yogyakarta. 232 p.

- Supriharyono. 2009. Konservasi ekosistem sumberdaya hayati. Pustaka Pelajar. Yogyakarta. 428 p.
- Vonk, J.A., M.J.A. Christianen, J. Stapel, & K.R. O'Brien. 2015. What lies beneath: why knowledge of belowground biomass dynamic is crucial to effective seagrass management. *Ecological Indicators*, 57: 259-267.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.008>
- Waldbusser, G.G., E.P. Voigt, H. Bergschneider, M.A. Green, & R.I. Newell. 2011. Biocalcification in the eastern oyster (*Crassostrea virginica*) in relation to long-term trends in Chesapeake Bay pH. *Estuaries and Coasts*, 34(2): 221–231.
<http://doi.org/10.1007/s12237-010-9307-0>
- Widdicombe, S. & J.I. Spicer. 2008. Predicting the impact of ocean acidification on benthic diversity. What can animal physiology tell us?, *J. Experimental Marine Biology Ecology*, 366: 187–197.
<https://doi.org/10.1016/j.jembe.2008.07.024>
- Zeebe, R.E. & D. Wolf-Gladrow. 2001. CO₂ in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes. Elsevier Science. Netherlands. 360 p.
- Zimmerman, R.C., V.J. Hill, M. Jinuntuya, B. Celebi, D. Ruble, M. Smith, T. Cedeno, & W.M. Swingle. 2017. Experimental impacts of climate warming and ocean carbonation on eelgrass *Zoostera marina*. *Marine Ecology Progress Series*, 566: 1-15.
<https://doi.org/10.3354/meps12051>

Received : 6 July 2018

Reviewed : 27 February 2019

Accepted : 18 August 2020

