

# Kajian Hubungan Allometrik dan Biomassa Lamun *Thalassia hemprichii* sebagai Bioindikator Lingkungan

## (Assessment of Allometric and Biomass Relationship in *Thalassia hemprichii* Seagrass as an Environmental Bioindicator)

Andi Zulfikar<sup>1\*</sup>, Mennofatria Boer<sup>2</sup>, Luky Adrianto<sup>2</sup>, Reny Puspasari<sup>3</sup>

(Diterima Januari 2020/Disetujui Mei 2020)

### ABSTRAK

Lamun merupakan tumbuhan laut yang sensitif terhadap perubahan lingkungan, terutama akibat aktivitas manusia (antropogenik) dan telah sering digunakan sebagai bioindikator untuk kondisi lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui struktur interaksi antarmetrik (allometrik dan biomassa) pada wilayah dengan tekanan antropogenik yang tinggi (pemukiman) dan wilayah dengan tekanan antropogenik yang rendah (nonpemukiman) menggunakan lamun *T. hemprichii*. Penelitian yang dilakukan adalah penelitian konfirmatif melalui pembentukan model konseptual berdasarkan hasil-hasil penelitian terdahulu, kemudian model konseptual tersebut diuji melalui analisis multivariat menggunakan data observasi lapang. Hasil penelitian menunjukkan dominasi *Thalassia hemprichii* pada wilayah pemukiman yang merefleksikan adanya *input* nutrisi yang tinggi dengan kecenderungan nilai metrik yang lebih besar pada bagian atas (daun), sedangkan pada wilayah nonpemukiman menunjukkan nilai metrik yang lebih tinggi pada bagian bawah. Bagian atas *Thalassia hemprichii* yang memberikan dampak langsung pada biomassa atas dan bawahnya adalah lebar daun, sedangkan panjang daun mempunyai dampak tidak langsung. Struktur hubungan allometrik lamun jenis *T. hemprichii* menunjukkan beberapa kovariansi metrik berbeda secara signifikan antar- dan dalam kedua wilayah pemukiman dan nonpemukiman, yang terutama dipengaruhi oleh tingkat kepadatan *T. hemprichii* yang berbeda. Panjang daun, lebar daun, kelimpahan, dan tutupan *T. hemprichii* berpotensi untuk dapat digunakan sebagai komponen indeks dan bioindikator kualitas lingkungan.

Kata kunci: analisis lajur, model persamaan struktural, tekanan antropogenik, *Thalassia hemprichii*

### ABSTRACT

Seagrass has long been known to be very sensitive to environmental changes, especially caused by human activities (anthropogenic disturbance) and has been used as a bioindicator for environmental condition. This research aimed to study interaction of *Thalassia hemprichii* measured and derived variables (metrics), at two locations i.e., inhabited island (high anthropogenic location) and uninhabited island (low anthropogenic location). Confirmative approach was conducted using a developed conceptual model based on preliminary studies, the conceptual model was analyzed in multivariate context using data from field observation. The result showed that *Thalassia hemprichii* dominated and have higher above ground biomass value in inhabited area which indicated high nutrient input, meanwhile uninhabited area showed a higher below ground biomass value. Above ground of *Thalassia hemprichii* that have direct effect on its biomass and below ground metrics was leaf width, meanwhile leaf length of *Thalassia hemprichii* have indirect effect on its biomass and below ground metrics. The result also indicated some different metric covariations which were influenced by the degree of *Thalassia hemprichii* density. Leaf length, leaf width, density, and percent cover of *Thalassia hemprichii* potentially could be used as components in multimetric index and bioindicator for environmental quality.

Keywords: anthropogenic disturbance, path analysis, structural equation modeling, *Thalassia hemprichii*

### PENDAHULUAN

Padang lamun (*seagrass meadow*) merupakan salah satu komunitas pantai yang membentuk hu-

<sup>1</sup> Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan, Universitas Maritim Raja Ali Haji Tanjungpinang, Jl. Politeknik Senggarang, Tanjungpinang 29100

<sup>2</sup> Departemen Manajemen dan Sumberdaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

<sup>3</sup> Pusat Penelitian Pengelolaan Perikanan dan Konservasi Sumberdaya Ikan Jln. Pasir Putih I, Ancol Timur, Jakarta 14430

\* Penulis Korespondensi: Email: andizulfikar099@gmail.com

ngungan integratif dengan vegetasi daratan (mangrove) dan terumbu karang (Hogarth 2015). Lamun adalah tumbuhan berbunga (Angiospermae) yang hidup terendam dalam kolom air dan berkembang dengan baik di perairan laut dangkal dan estuari. Tumbuhan lamun terdiri atas daun dan seludang, batang menjalar yang biasanya disebut akar rimpang (rizom), dan akar yang tumbuh pada bagian rizom. Hingga saat ini diketahui terdapat 13 jenis lamun yang tersebar di hampir seluruh perairan dangkal Hindia Bagian Barat, termasuk perairan Indonesia (El Shaffai 2016).

Lamun cukup responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan sekitarnya (Marba *et al.* 2013), terutama

perubahan lingkungan akibat tekanan atau gangguan oleh aktivitas manusia (antropogenik). Lamun banyak digunakan sebagai bioindikator status kondisi lingkungan, khususnya yang terkait dengan gangguan antropogenik, melalui pengembangan indeks multi-metrik kualitas lingkungan (Roca *et al.* 2016).

*Thalassia hemprichii* merupakan jenis lamun tropis yang paling sensitif terhadap tekanan lingkungan dan merupakan produser primer utama di pantai tropis (Van Tussenbroek 2006). *Thalassia hemprichii* juga merupakan jenis yang paling banyak dan sering ditemukan di wilayah Taman Nasional Laut, Kepulauan Seribu (Setyawan *et al.* 2011; Feryatun *et al.* 2012; Wahab *et al.* 2017) tempat penelitian ini dilakukan. Jenis ini mempunyai potensi dan sangat sesuai untuk digunakan sebagai kandidat bioindikator kualitas lingkungan di perairan Indonesia.

Beberapa peneliti menyimpulkan bahwa beberapa metrik lamun menunjukkan keterkaitan satu-sama lain. Congdon *et al.* (2017) memberikan kesimpulan bahwa terdapat hubungan garis lurus (linear) antara tutupan lamun dan biomasa atas dan bawah lamun (*Thalassia testudinum*, *Halodule wrightii* dan *Syringodium filiforme*). Lyons *et al.* (2015) membuat kuantifikasi biomasa atas lamun dengan menggunakan persen tutupan daun sebagai prediktor pada padang lamun dengan jenis campuran. Tekanan antropogenik (terutama melalui buangan nutrisi berlebih ke perairan) memengaruhi hubungan antar-metrik lamun (Roca *et al.* 2016; Armitage & Fourqurean 2016; Fraser & Kendrick 2017; Angelina *et al.* 2019).

Gangguan dan ancaman, baik secara alami maupun akibat tekanan antropogenik pada ekosistem padang lamun, merupakan suatu keniscayaan. Pemahaman mengenai interaksi antar-metrik lamun terkait dengan kondisi lingkungannya penting untuk diketahui, terutama dalam tahap pemilihan indikator-indikator (metrik) yang akan digunakan sebagai komponen penilaian dalam indeks multimetrik. Wilayah dengan tekanan antropogenik yang berbeda diduga memberikan struktur interaksi yang juga berbeda. Interaksi multimetrik tersebut dapat dianalisis secara simultan dengan menggunakan pendekatan multivariat, seperti model persamaan struktural (*structural equation modeling* atau SEM).

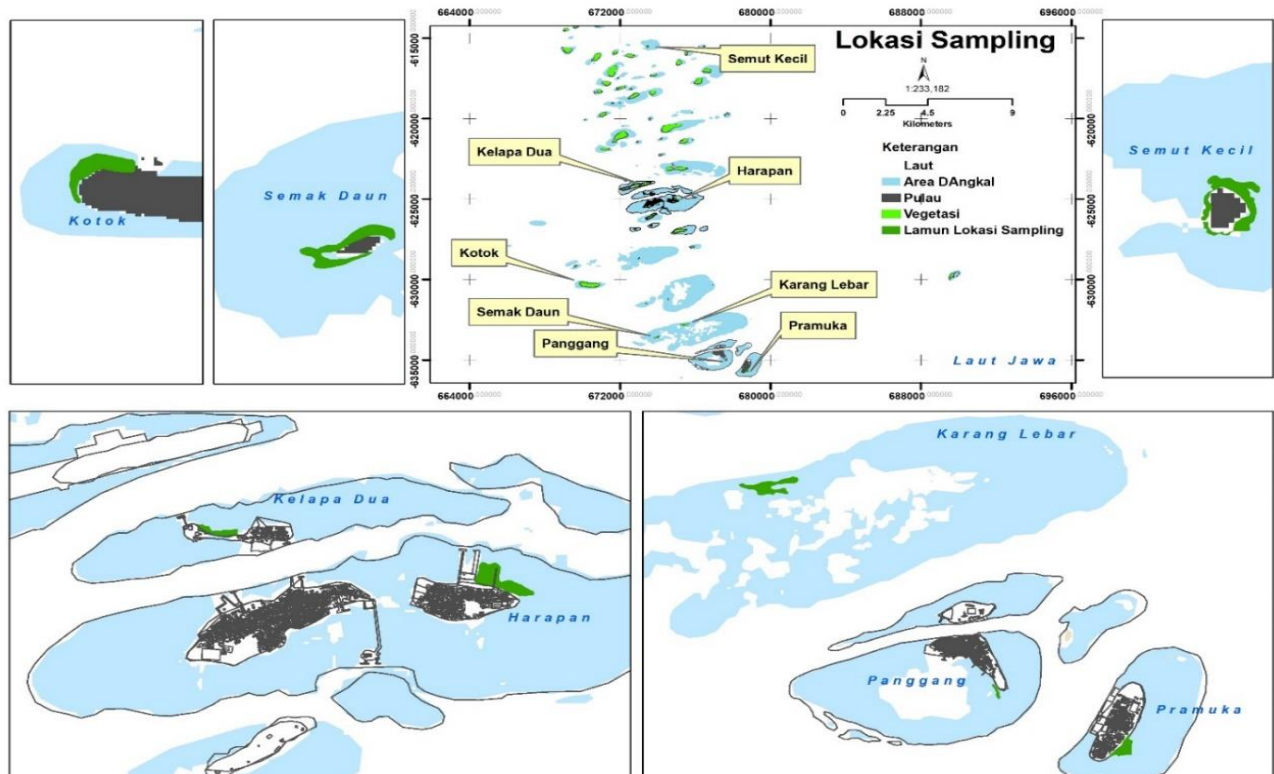
Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui struktur interaksi antar-metrik (allometrik dan biomasa) pada wilayah dengan tekanan antropogenik yang tinggi (pemukiman) dan wilayah dengan tekanan antropogenik yang rendah (nonpemukiman) menggunakan lamun *T.hemprichii*.

## METODE PENELITIAN

### Lokasi

Pengambilan data lapangan dilakukan pada bulan Juli–Oktober 2018 di Taman Nasional Laut, Kepulauan Seribu (TnLKs) Jakarta (Gambar 1).

Delapan padang lamun dipilih dalam wilayah pemukiman (wilayah dengan tekanan antropogenik



Gambar 1 Lokasi penelitian di Taman Nasional Laut, Kepulauan Seribu, Jakarta.

tinggi) dan nonpemukiman (wilayah dengan tekanan antropogenik rendah). Pada masing-masing wilayah dipilih sebanyak 4 lokasi padang lamun. Wilayah pemukiman dan nonpemukiman yang dipilih, yaitu:

- **Pemukiman**  
Pulau Panggang, Pramuka, Kelapa Dua, dan Harapan merupakan pulau berpenduduk sangat padat dengan tingkat pembangunan dan reklamasi pantai yang sangat ekspansif.

- **Nonpemukiman**  
Terdiri atas tiga pulau yang tidak berpenghuni (Pulau Semut Kecil, Kotok, dan Semak Daun) dan satu paparan karang (Karang Lebar). Dua pulau (Pulau Semut Kecil dan Kotok) merupakan pulau pribadi dengan akses terbatas, sedangkan Pulau Semak Daun merupakan pulau wisata. Karang Lebar merupakan area paparan karang dengan banyak laguna (goba) tanpa pulau.

**Desain Penelitian dan Akuisisi Data**

Pengambilan sampel dilakukan menggunakan metode sampling tersarang bertingkat (*hierarchical nested sampling design*), di mana lokasi (8 Lokasi padang lamun) tersarang dalam status (pemukiman dan nonpemukiman). Zona (intertidal dan subtidal) tersarang dalam lokasi dan status. Sebanyak 121 kuadrat (0,25 x 0,25 m<sup>2</sup>) disebar dengan pola acak sistematis (*systematic random pattern of points*) menggunakan perangkat lunak R v.3.6.1 (*R Core Team, 2019*) dan paket *R spatstat* (Baddeley *et al.* 2015). Jarak antar-kuadrat dalam satu lokasi berkisar antara 30–34 m. Status dianggap merupakan prediktor atau variabel bebas dengan pengaruh tetap (*fixed effect*). Lokasi dan zona merupakan prediktor dengan pengaruh acak (*random efect*). Zona pada masing-masing status dan lokasi diberikan identitas (ID) yang berbeda pada analisis sehingga setiap zona mempunyai ID yang unik untuk tiap status dan lokasi.

Pengamatan tutupan *T. hemprichii* dan jenis lamun lainnya dilakukan secara visual pada tiap kuadrat, kepadatan *T. hemprichii* dihitung dalam tiap kuadrat berdasarkan jumlah tegakan (*shoot*). Semua *T. hemprichii* yang ada dalam kuadrat diambil meng-

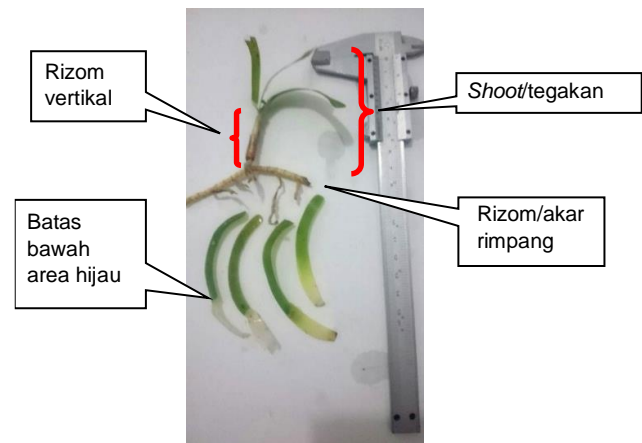
gunakan sekop, untuk dilakukan pengukuran morfometrik dan biomassa. Panjang daun, lebar daun, diameter rizom, dan rizom vertikal diukur menggunakan jangka sorong (rataan dari 5–10 daun dan 3–5 rizom). Lebar daun berasal dari rataan bagian atas (dekat ujung bagian atas daun), tengah daun, dan batas bawah area hijau daun. Biomassa diukur dalam gram bobot kering (g DW). Bagian-bagian *T. hemprichii* yang diukur ditunjukkan pada Gambar 2 dan metrik-metrik yang digunakan disajikan dalam Tabel 1.

**Analisis Data**

Tahapan analisis penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- Uji sebaran normal ganda pada data mentah dilakukan sebelum analisis utama, menggunakan uji Mardia dalam paket *R MVN* (Korkmaz *et al.* 2014).
- Penentuan model dasar (model konseptual) untuk analisis lajur yang dibangun berdasarkan hasil-hasil penelitian yang telah disebutkan pada bagian pendahuluan di atas, disajikan pada Gambar 3.

Analisis lajur merupakan bagian *Structural Equation Modeling* (SEM) yang hanya melibatkan variabel yang

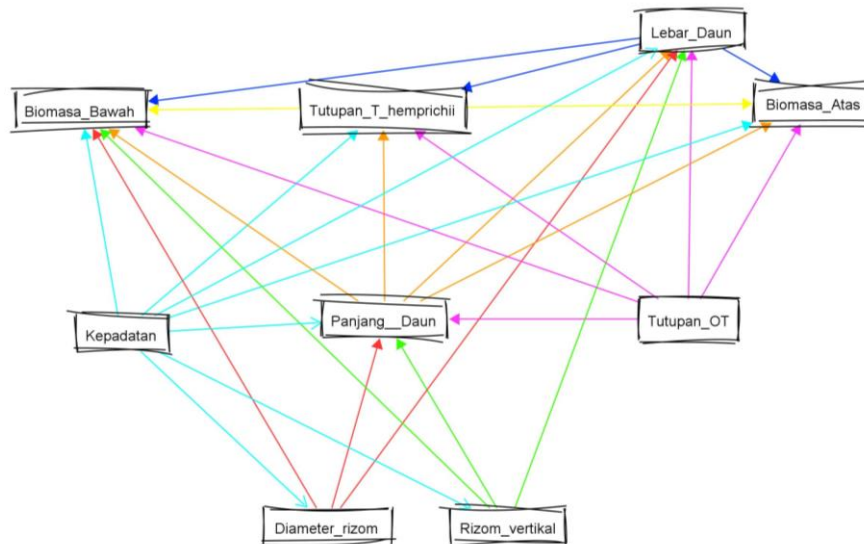


Gambar 2 Bagian-bagian *T. hemprichii* yang diukur (sebagai metrik atau indikator).

Tabel 1 Metrik dan deskripsi lamun yang digunakan dalam penelitian

Metrik (unit)	Kode	Deskripsi
Panjang daun (cm)	Pd	Rataan panjang area hijau daun
Lebar daun (cm)	Ld	Rataan lebar area hijau daun
Panjang rizom vertikal (cm)	Rv	Panjang rizom vertikal
Diameter rizom (cm)	Dr	Diameter rizom
Biomassa bawah (g bobot kering/g DW)	Bb	Rataan bobot rizom dan area nonfotosintetik setelah dikeringkan selama 48 jam pada suhu 60°C
Biomassa atas (g DW)	Ba	Rataan bobot area hijau daun setelah dikeringkan selama 48 jam pada suhu 60°C
Tutupan <i>T. hemprichii</i> (%)	Tut_Th	Estimasi visual tutupan <i>T. hemprichii</i> dalam kuadrat 0,25 x 0,25 m <sup>2</sup>
Kepadatan (jumlah tegakan m <sup>-2</sup> )	K	Jumlah tegakan dalam kuadrat 0,25 x 0,25 m <sup>2</sup>
Total tutupan jenis lain (%)	Tut_OT	Estimasi visual tutupan jenis lainnya dalam kuadrat 0,25 x 0,25 m <sup>2</sup>

Sumber: Buia *et al.* (2004).



Gambar 3 Model konseptual analisis lajur (*path analysis*). Pengaruh satu komponen metrik ditunjukkan oleh warna panah yang sama.

diobservasi. Sistem persamaan simultan diterapkan menggunakan diagram lajur melalui penguraian ragam dan korelasi, pemisahan antara pengaruh langsung dan tidak langsung serta pengaruh total suatu variabel pada variabel lain (Mattjik & Sumertajaya 2011).

Terdapat 5 variabel respons (variabel terikat) dalam model konseptual lajur yang disajikan pada Gambar 3 yaitu:

- Tutupan *T. hemprichii* sebagai respons kepadatan, lebar daun, panjang daun, dan tutupan jenis lain.
- Biomassa atas sebagai respons panjang daun, tutupan jenis lain, tutupan *T. hemprichii*, kepadatan, dan lebar daun.
- Biomasa bawah sebagai respons diameter rizom, rizom vertikal, kepadatan, lebar daun, tutupan *T. hemprichii*, tutupan jenis lain, dan panjang daun.
- Panjang daun sebagai respons kepadatan, diameter rizom, rizom vertikal, dan tutupan jenis lain.
- Lebar daun sebagai respons kepadatan, diameter rizom, rizom vertikal, tutupan jenis lain, dan panjang daun.

Tahapan analisis lajur pada model konseptual menggunakan paket *R piecewise SEM* (Lefcheck 2016) yang meliputi:

- Pengujian model konseptual apakah terdapat potensi hubungan antar-metrik yang tidak terwakili dalam model yang seharusnya ada berdasarkan informasi dari data mentah, menggunakan metode *d* separasi (*d-separated*) atau *directed acyclic graphs* (DAGs) (Shiple 2009). Berdasarkan rujukan penelitian terdahulu, terdapat 8 hubungan yang diasumsikan tidak signifikan dalam model konseptual penelitian ini (tidak ada notasi tanda panah dalam diagram lajur pada Gambar 3). Jika hasil uji *d* separasi menunjukkan hasil *p value* > 0,05 mengindikasikan justifikasi penghilangan

hubungan tersebut dalam diagram lajur. Uji struktur model dasar secara keseluruhan dilihat melalui nilai *Fisher's C* yang dihitung menggunakan rumus (Shiple 2009):

$$C = -2 \sum_{i=1}^k \ln(pi)$$

di mana *k* adalah jumlah klaim ketidakberhubungan dalam model konseptual (8 hubungan), *i* adalah klaim ke-*i*, dan *p* adalah nilai *p value* uji signifikansi lajur terkait. Nilai probabilitas hasil uji (*p value*) > 0,05 mengimplikasikan bahwa hipotesis struktur model konseptual tidak berbeda dari struktur korelasi dalam data mentah, artinya tidak terindikasi adanya potensi kemungkinan hilangnya lajur yang signifikan dalam model konseptual.

- Estimasi koefisien lajur menggunakan analisis model efek campuran (*mixed effect models* dengan 2 efek acak, yaitu lokasi dan zona) pada masing-masing struktur hubungan 5 variabel respons (Pd, Ld, Tut\_Th, Ba, dan Bb) dengan variabel-variabel bebasnya yang dilakukan secara simultan menggunakan paket *R nlme* (Pinheiro et al. 2019).
- Analisis lajur multikelompok (*multigroup analysis*) menggunakan model hasil analisis tahap kedua dengan status (pemukiman dan nonpemukiman) sebagai kelompok.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Uji Sebaran Normal Ganda dan Kondisi Umum Lamun *T. hemprichii*

Hipotesis nol uji Mardia untuk sebaran normal ganda adalah data tidak berbeda dari sebaran normal.

Hasil uji menunjukkan simpangan sebaran normal pada dua Lokasi (karang lebar dan semak daun) dengan nilai kurtosis -2,19 ( $p$  value 0,03 pada  $\alpha$  0,05) untuk karang lebar dan -2,24 ( $p$  value 0,03 pada  $\alpha$  0,05) untuk semak daun. Dua Lokasi ini tetap dimasukkan ke dalam analisis dengan pertimbangan hasil tersebut tidak terlalu jauh menyimpang dari pola sebaran normal.

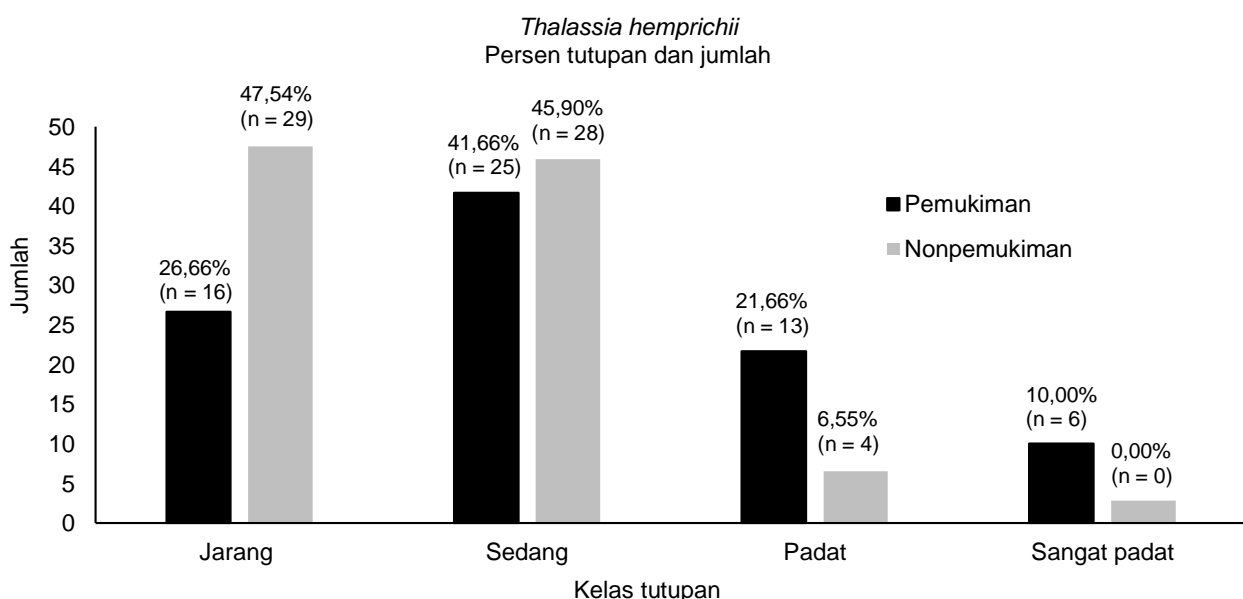
*T. hemprichii* banyak ditemukan dan dominan di perairan dangkal dekat pantai dan pemukiman, pada beberapa kuadrat dekat pemukiman malah hanya ditemukan jenis *T. hemprichii*. Gambar 4 menunjukkan sebaran *T. hemprichii* pada wilayah pemukiman dan nonpemukiman. *Thalassia hemprichii* dengan tutupan sangat padat hanya dijumpai pada wilayah pemukiman, sedangkan pada wilayah nonpemukiman kondisi tutupan *T. hemprichii* didominasi oleh tutupan jarang dan sedang dan semakin jauh ke arah utara wilayah kajian (wilayah yang didominasi oleh pulau-pulau pribadi dan tidak berpenghuni) jenis ini semakin jarang ditemukan. Kegiatan monitoring selama periode 2005–2009 yang dilakukan oleh Setyawan *et al.* (2011) juga melaporkan kondisi serupa, yaitu pada umumnya lamun dengan tutupan yang padat banyak dijumpai pada wilayah pemukiman.

Ali *et al.* (2018) juga menemukan lamun *T. hemprichii* yang dekat dengan area industri dan aktivitas maritim (pemukiman) menunjukkan karakter daun yang lebih panjang dan lebih berat dibandingkan wilayah lain di Singapura, dan berargumen bahwa hal ini merefleksikan ketersediaan nutrisi yang tinggi pada perairan. Pemupukan lamun (nitrat, ammonia, total nitrat, fosfat, dan kalium) yang secara eksperimental dilakukan oleh Agawin *et al.* (1996) menunjukkan lonjakan pertumbuhan dan morfologi lamun *Enhalus acoroides* dan *T. hemprichii* dibandingkan dengan padang lamun yang tidak ditambahkan pengayaan pupuk di perairan Filipina. Jones & Unsworth (2016)

menyatakan padang lamun *Zostera marina* di Selat Inggris yang terpapar *input* nutrisi menunjukkan kepadatan yang lebih tinggi dan membentuk padang yang lebih luas. Burkholder *et al.* (2007) dalam ulasannya menyatakan adanya peningkatan pertumbuhan lamun dalam kondisi pengayaan nutrisi baik pada level rendah maupun moderat.

Secara umum *T. hemprichii* pada wilayah pemukiman menunjukkan kecenderungan nilai metrik yang lebih besar pada bagian atas (daun) sedangkan *T. hemprichii* pada wilayah nonpemukiman menunjukkan nilai metrik yang lebih tinggi pada bagian bawah (Tabel 2).

Lyon *et al.* (2015) dan Congdon *et al.* (2017) menyatakan adanya keterkaitan linear antara persen tutupan atau kelimpahan lamun dengan biomassa bagian atas dan Christon *et al.* (2012) menyatakan produktivitas daun yang lebih tinggi (bagian atas lamun) ditunjukkan oleh lamun dengan kepadatan yang tinggi. Akan tetapi, Vonk *et al.* (2015) dan Congdon *et al.* (2017) menyatakan hubungan linear antara persen tutupan atau kelimpahan dengan biomassa bagian bawah lamun menunjukkan respons yang beragam dan tidak kuat, dalam arti hubungan antara persen tutupan dan kelimpahan lamun tidak selalu berbanding lurus dengan nilai biomassa bagian bawahnya. Kecenderungan metrik bagian bawah yang lebih tinggi pada area nonpemukiman yang mempunyai kelimpahan dan persen tutupan yang lebih rendah dibandingkan dengan area pemukiman pada penelitian ini, menegaskan hal tersebut. Tutupan dan kepadatan (jenis *T. hemprichii* maupun jenis lamun lain) yang lebih rendah pada area nonpemukiman, mengindikasikan tingkat kompetisi ruang yang lebih rendah pada padang lamun area nonpemukiman, dan memungkinkan lebih tingginya ekspansi dan/atau pertumbuhan bagian bawah lamun (akar rimpang atau rizom).



Gambar 4 Perbandingan tutupan *T. hemprichii* pada wilayah pemukiman dan nonpemukiman.



**Analisis Lajur (Path analysis)**

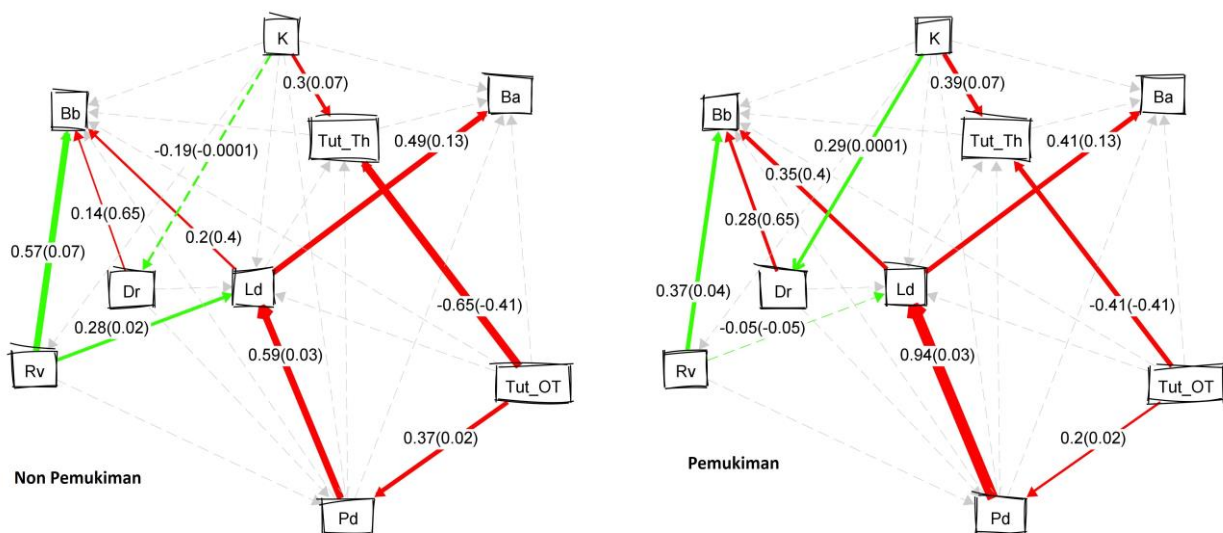
Uji *d* separasi menunjukkan tidak terdapat potensi lajur yang tidak terwakili dalam model konseptual (semua *p value* > 0,05 dengan nilai Fisher's *C* = 18,266, *p value* = 0,309, dan derajat bebas 16). Analisis model efek campuran memperlihatkan beberapa hubungan yang tidak signifikan dalam model. Hasil analisis multikelompok menunjukkan struktur model dasar yang tidak berbeda antara wilayah pemukiman dan nonpemukiman (nilai Fisher's *C* =

10,688, *p value* = 0,828, dan derajat bebas 16), tetapi analisis model campuran dalam hubungan lajur menunjukkan dua lajur yang berbeda secara signifikan antara wilayah pemukiman dan nonpemukiman, yaitu respons Biomassa bawah (Bb) dan lebar daun (Ld) terhadap rizom vertikal (Rv) serta respons diameter rizom (Dr) terhadap kelimpahan (K) (Gambar 5). Walaupun pengaruh K pada Dr dan pengaruh Rv pada Ld menunjukkan signifikansi yang berbeda antara wilayah pemukiman dan nonpemukiman, pengaruh K

Tabel 2 Deskripsi metrik *T. hemprichii* pada wilayah pemukiman dan nonpemukiman

Status	Metrik	Min	Maks	Rataan	Median	Simpangan baku
Pemukiman	Pd (cm)	5,56	15,54	9,25	8,77	2,51
	Ld (cm)	0,56	0,93	0,75	0,75	0,09
	Rv (cm)	0,54	6,52	2,06	1,84	1,06
	Dr (cm)	0,30	0,62	0,39	0,38	0,04
	Tut_Th (%)	10,00	90,00	42,06	38,25	21,34
	K (jumlah shoot m <sup>2</sup> )	24,00	640,00	215,67	200,00	127,69
	Bb (g DW)	0,29	0,67	0,44	0,45	0,10
	Ba (g DW)	0,01	0,21	0,05	0,04	0,03
	Tut_OT (%)	25,00	90,00	57,58	62,50	21,42
Nonpemukiman	Pd (cm)	5,71	12,27	8,03	7,58	1,57
	Ld (cm)	0,51	1,01	0,67	0,66	0,09
	Rv (cm)	0,95	7,46	3,22	3,08	1,44
	Dr (cm)	0,29	0,46	0,36	0,36	0,04
	Tut_Th (%)	8,00	70,00	29,78	30,00	15,14
	K (jumlah tegakan m <sup>2</sup> )	10,00	320,00	109,95	112,00	69,48
	Bb (g DW)	0,30	1,27	0,57	0,53	0,18
	Ba (g DW)	0,01	0,13	0,04	0,04	0,02
	Tut_OT (%)	20,00	85,00	46,31	40,00	19,08

Keterangan: Pd = Panjang daun; Ld = Lebar daun; Rv = Rizom vertikal; Dr = Diameter rizom; Tut\_Th = Tutupan *T. hemprichii*; K = Kelimpahan; Bb = Biomassa bawah; Ba = Biomasa atas; dan Tut\_OT = Tutupan lamun selain jenis *T. hemprichii*.



Gambar 5 Diagram lajur hasil analisis multikelompok. Angka dalam kurung merupakan nilai ragam/*variance*, garis putus-putus menunjukkan lajur yang tidak signifikan. Warna merah menunjukkan lajur yang tidak berbeda secara signifikan antar-wilayah pemukiman dan nonpemukiman, tetapi signifikan dalam masing-masing wilayah; Warna hijau menunjukkan lajur yang berbeda secara signifikan antar-wilayah (ketebalan garis berdasarkan skala nilai korelasi).

pada Dr hanya signifikan dalam wilayah pemukiman, sedangkan pengaruh Rv pada Ld hanya signifikan dalam wilayah nonpemukiman.

Wilayah nonpemukiman menunjukkan kovariansi positif yang lebih kuat antara Bb dan Rv dibandingkan dengan wilayah pemukiman, kovariansi Ld dan Rv pada wilayah pemukiman menunjukkan kovariansi negatif, sedangkan pada wilayah nonpemukiman sebaliknya. Lamun pada kedua wilayah rata-rata terbenam dalam pasir (*sediment burial*), tetapi lebih jelas terlihat pada wilayah pemukiman, dampak aktivitas penambangan pasir lokal, reklamasi, dan penangkapan ikan. Keterbenaman ini diduga merupakan penyebab perbedaan kondisi Rv pada kedua wilayah. Cabaco *et al.* (2008) menyatakan respons lamun terhadap kondisi keterbenaman bervariasi antar-jenis dan memengaruhi panjang Rv dan seludang daun (*sheath*) yang membungkus Rv pada lamun. Kepadatan *T. hemprichii* yang lebih tinggi pada wilayah pemukiman berpengaruh pada Dr, dan fenomena ini berbanding terbalik pada wilayah nonpemukiman dan peran Dr dalam Bb lebih besar pada wilayah pemukiman. Berdasarkan hasil ulasannya dari berbagai literatur, Duarte (1991) menyatakan hubungan yang kuat antara Dr dan metrik lamun lainnya pada berbagai jenis lamun, termasuk *T. hemprichii*, tetapi pada penelitian ini hanya menemukan hubungan antara K, Bb, dan Dr.

Secara umum, tutupan (Tut\_Th) signifikan dipengaruhi oleh kelimpahan (K) dan tutupan jenis lain (Tut\_OT) (kovariansi negatif), Ba hanya dipengaruhi oleh Ld, Bb dipengaruhi oleh Ld, Rv dan Dr, Pd dipengaruhi oleh Tut\_OT, sedangkan Ld dipengaruhi oleh Pd dan Rv. Hubungan Tut\_OT yang negatif dengan Tut\_Th pada kedua wilayah menunjukkan kompetisi spasial antara *T. hemprichii* dengan jenis lainnya, terutama pada padang lamun jenis campuran di wilayah nonpemukiman di mana *T. hemprichii* tidak banyak ditemukan pada area utama padang lamun, tetapi tersebar di sekitar pinggiran area padang lamun.

Bagian atas *T. hemprichii* yang signifikan memengaruhi biomassa bawah secara langsung hanya ditunjukkan oleh Ld, sedangkan pengaruh Pd pada Bb melalui mediasi Ld (untuk wilayah nonpemukiman sebesar  $0,2 \times 0,59 = 0,12$  dan  $0,33$  untuk wilayah pemukiman). Pd dan Ld memengaruhi area luasan daun dan indeks area daun (Buia *et al.* 2004) dan menentukan kemampuan lamun dalam berfotosintesis serta menyerap karbon (Samper-Villareal *et al.* 2016). Potensi ini lebih tampak dalam wilayah pemukiman. Hal ini diduga karena kepadatan yang tinggi dan adanya asupan nutrisi dari buangan limbah rumah tangga pada wilayah pemukiman seperti yang disimpulkan oleh Ali *et al.* (2018). Rizom vertikal (Rv) kuat memengaruhi Biomassa bawah (Bb) karena terdapat seludang daun (*sheath*) yang membungkus Rv (semakin panjang Rv seludang daun juga semakin tebal dan panjang) dan mengindikasikan Rv pada wilayah nonpemukiman relatif lebih panjang dibandingkan dengan di wilayah pemukiman. Hal ini mengindikasikan keterbenaman (*burial*) lamun pada

area nonpemukiman lebih rendah dibandingkan dengan area pemukiman, seperti yang dinyatakan oleh Cabaco *et al.* (2008) bahwa keterbenaman akan memengaruhi morfologi Rv. Biomassa atas (Ba) hanya signifikan dipengaruhi secara langsung oleh lebar daun (Ld), Panjang daun (Pd) memengaruhi Ba melalui Ld (wilayah nonpemukiman sebesar 0,3 dan wilayah pemukiman 0,4). Lyon *et al.* (2015) dan Congdon *et al.* (2017) memberikan kesimpulan serupa dalam membangun model linear hubungan antara biomassa atas dan panjang dan lebar daun, yang menyimpulkan keterkaitan yang cukup kuat antara bagian atas dan morfologi daun.

Berbeda dari kesimpulan Congdon *et al.* (2017) untuk 3 jenis lamun pada wilayah nontropis (*Thalassia testudinum*, *Halodule wrightii*, dan *Syringodium filiforme*), penelitian ini tidak menunjukkan hubungan signifikan antara persen tutupan *T. hemprichii* dan biomassa atas dan bawahnya. Perbedaan ini karena Congdon *et al.* (2017) melakukan analisis *bivariate* antara biomassa dan persen tutupan dengan metode regresi linear sederhana, sedangkan dalam penelitian ini menggunakan analisis model campuran dengan memperhitungkan zona dan lokasi tersarang dalam status serta lebih dari satu prediktor untuk biomassa.

## KESIMPULAN

*Thalassia hemprichii* banyak ditemukan dan dominan di perairan dangkal dekat pantai dan wilayah pemukiman yang merefleksikan adanya *input* nutrisi yang tinggi pada wilayah pemukiman. *Thalassia hemprichii* pada wilayah pemukiman menunjukkan kecenderungan nilai metrik yang lebih besar pada bagian atas (daun), sedangkan *T. hemprichii* di wilayah nonpemukiman menunjukkan nilai metrik yang lebih tinggi pada bagian bawah. Bagian atas *T. hemprichii* yang memberikan dampak langsung pada biomassa atas dan bawahnya adalah lebar daun, sedangkan panjang daun mempunyai dampak tidak langsung. Hasil penelitian mengimplikasikan adanya pengaruh antropogenik pada struktur hubungan antar-metrik lamun *T. hemprichii*. Struktur hubungan allometrik lamun jenis *T. hemprichii* menunjukkan beberapa kovariansi metrik berbeda secara signifikan antar- dan dalam kedua wilayah pemukiman dan nonpemukiman, yang terutama dipengaruhi oleh tingkat kepadatan *T. hemprichii* yang berbeda. Panjang daun, lebar daun, kelimpahan dan tutupan *T. hemprichii* berpotensi dapat digunakan sebagai komponen indeks dan bioindikator kualitas lingkungan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) Kementerian Keuangan Republik Indonesia.

## DAFTAR PUSTAKA

- Agawin NSR, Duarte CM, Fortes MD. 1996. Nutrient limitation of Philippine seagrasses (Cape Bolinao, NW Philippines): in situ experimental evidence. *Marine Ecology Progress Series*. 138: 233–243. <https://doi.org/10.3354/meps138233>
- Ali MS, He J, Goh PLB, Sin MT. 2018. Environmental correlates of *Thalassia hemprichii* status descriptors: an evaluation of tools for diagnostic monitoring. *Botanica Marina*. 61: 3 <https://doi.org/10.1515/bot-2017-0083>
- Angelina I, Sartimbul A, Wahyudi J. 2019. The potential of seagrass beds on the coast of Putri Menjangan as a carbon sequestration ecosystem on Bali Island. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 241: 012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/241/1/012010>
- Armitage AR, Fourqurean JW. 2016. Carbon storage in seagrass soils: long-term nutrient history exceeds the effects of near-term nutrient enrichment. *Biogeosciences*. 13: 313–321. <https://doi.org/10.5194/bg-13-313-2016>
- Baddeley A, Rubak E, Turner R. 2015 *Spatial Point Patterns: Methodology and Applications with R*. London (EN): Chapman and Hall/CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19708>
- Buia MC, Gambi MC, Dappiano M. 2004. Seagrass System. *Biologia Marina Mediterranea*. 11: 133–183.
- Burkholder JM, Tomasko DA, Touchette BW. 2007. Seagrasses and eutrophication. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 350: 46–72. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.06.024>
- Cabaço S, Santos R, Duarte CM. 2008. The impact of sediment burial and erosion on seagrasses: A review. *Estuarine, Coastal, and Shelf Science*. 79: 354–366. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.04.021>
- Christon, Djunaedi OS, Purba NP. 2012. Pengaruh Tinggi Pasang Surut Terhadap Pertumbuhan dan Biomassa Daun Lamun Enhalus acoroides di Pulau Pari Kepulauan Seribu Jakarta. *Jurnal Perikanan dan Kelautan*. 3: 287–294.
- Congdon VM, Wilson SS, Dunton KH. 2017. Evaluation of Relationships Between Cover Estimates and Biomassa in Subtropical Seagrass Meadows and Application to Landscape Estimates of Carbon Storage. *Southeastern Geographer*. 57(3): 231–245. <https://doi.org/10.1353/sgo.2017.0023>
- Duarte CM. 1991. Allometric Scaling of Seagrass Form and Productivity. *Marine Ecology Progress Series*. 77: 289–300. <https://doi.org/10.3354/meps 077289>
- El Shaffai A. 2016. *Field Guide to Seagrasses of the Red Sea*. Second Edition. 56 pp. Gland (CH) : IUCN
- Feryatun F, Hendrarto B, Widyorini N. 2012. Kerapatan dan distribusi lamun (seagrass) berdasarkan zona kegiatan yang berbeda di perairan Pulau Pramuka, Kepulauan Seribu. *Journal of management of aquatic resources*. Halaman 1–7.
- Fraser MW, Kendrick GA. 2017. Belowground stressors and long-term seagrass declines in a historically degraded seagrass ecosystem after improved water quality. *Scientific Reports*. 7: 14469. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14044-1>
- Jones BL, Unsworth RKF. 2016. The perilous state of seagrass in the British Isles. *Royal Society Open Science*. 3: 150596. <https://doi.org/10.1098/rsos.150596>
- Hogarth PJ. 2015. *The Biology of Mangroves and Seagrasses*. Third Edition. Oxford (EN): Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198716549.001.0001>
- Korkmaz S, Goksuluk D, Zararsiz G. 2014. MVN: An R Package for Assessing Multivariate Normality. *The R Journal*. 6(2): 151–162. <https://doi.org/10.32614/RJ-2014-031>
- Lefcheck JS. 2016. piecewiseSEM: piecewise structural equation modelling in r for ecology, evolution, and systematics. *Methods in Ecology and Evolution*. 7: 573–579. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12512>
- Lyons M, Roelfselma C, Covacs E, Samper-Villareal J, Saunders M., Maxwell P, Phinn S. 2015. Rapid monitoring of seagrass biomass using a simple linear modelling approach, in the field and from space. *Marine Ecology Progress Series*. 530: 1–14. <https://doi.org/10.3354/meps11321>
- Marbà N, Krause-Jensen D, Alcoverro T, Birk S, Pedersen A, Neto JS, Orfanidis S, Garmendia JM, Muxika I, Borja A, Dencheva K, Duarte CM. 2013. Diversity of European seagrass indicators: patterns within and across regions. *Hydrobiologia*. 704: 265–278. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1403-7>
- Mattjik AA, Sumertajaya IM. 2011. *Sidik Peubah Ganda*. Bogor (ID): IPB Press.
- Pinheiro JC, Bates DM. 2000. *Mixed-effects models in S and S-plus*. New York (US): Springer.
- R Core Team. 2019. *Perangkat lunak yang saya gunakan, yang saya tahu seperti ini sitasinya*. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Tersedia pada <https://www.R-project.org/>.
- Roca G, Alcoverro T, Krause-Jensen D, Balsby TJS, van Katwijk MM, Marbà N, Santos R, Arthur R, Mascaró O, Fernández-Torquemada Y, Pérez M,



- Duarte CM, Romero J. 2016. Response of seagrass indicators to shifts in environmental stressors: a global review and management synthesis. *Ecological Indicator*. 63: 310–323. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.12.007>
- Samper-Villarreal J. 2016. Seagrass morphometrics at species level in Moreton Bay, Australia from 2012 to 2013. *Scientific Data*. 4:170060. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.60>
- Setyawan E, Yusri S, Timotius S. 2011. Terumbu Karang Jakarta: Laporan Pengamatan Jangka Panjang Terumbu Karang Kepulauan Seribu (2005–2009). Yayasan Terumbu Karang Indonesia. 110 p.
- Shipley B. 2009. Confirmatory path analysis in a generalized multilevel context. *Ecology*. 90: 363–368. <https://doi.org/10.1890/08-1034.1>
- Van Tussenbroek BI, Vonk JA, Stapel J, Erftemijer PLA, Middelburg JJ, Zieman JC. 2006. *The biology of Thalassia: Paradigms and recent advances in research*. In: Larkum AWD, Orth RJ, Duarte CM. Eds. *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*. Netherlands (NL): Springer. pp. 227–254.
- Vonk JA, Christianen MJA, Stapel J, O'Brien KR. 2015. What lies beneath: Why knowledge of belowground biomass dynamics is crucial to effective seagrass management. *Ecological Indicators*. 57: 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.008>
- Wahab I, Madduppa H, Kawaroe M. 2017. Seagrass species distribution, density and coverage at Panggang Island, Jakarta. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 54 012084. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/54/1/012084>