

ANALISIS SPEKTRAL DARI SERAPAN DAN PANTULAN DAUN LAMUN MENGUNAKAN SPEKTORADIOMETER TRIOS-RAMSES DI NUSA LEMBONGAN DAN PEMUTERAN, BALI

(SPECTRAL ANALYSIS FROM ABSORPTION AND REFLECTANCE OF SEAGRASS LEAVES USING TRIOS-RAMSES SPECTRORADIOMETER IN NUSA LEMBONGAN AND PEMUTERAN, BALI)

Alvidita Beatrix Indayani^{1,a}, Projo Danoedoro², Pramaditya Wicaksono²,
Gathot Winarso³, Kuncoro Teguh Setiawan³

¹Program Studi Magister Penginderaan Jauh, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada

²Departemen Sains Informasi Geografi, Program S2 Penginderaan Jauh Fakultas Geografi,
Universitas Gadjah Mada

³Pusat Pemanfaatan Penginderaan Jauh, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

^aKontributor Utama

alvidita.beatrix.i@mail.ugm.ac.id

Diterima 7 Agustus 2020; Direvisi 4 November 2020; Disetujui 6 November 2020

ABSTRACT

In-situ hyperspectral data from downwelling irradiance and upwelling irradiance measurements can be used for various analyzes, one of them is looking at the spectral response characteristics of the physical condition of seagrass leaves using an underwater sensor. The interaction between the sun's electromagnetic waves and the physical conditions of seagrass leaves in the water produces a different spectral responses pattern related to the content and concentration of pigments in plant tissues. This study aims to determine the absorption and reflectance features as well as the specific location of the spectral channels of various seagrass leaf conditions. Spectral measurements were carried out on three species of seagrass, namely *Cymodocea rotundata* (Cr), *Thalassia hemprichii* (Th), and *Enhalus acoroides* (Ea) along with the physical conditions attached to seagrass leaves (green, yellow to brown, black, and covered leaves by epiphytic organisms) in shallow sea waters. Spectral measurements using a spectroradiometer equipped with an irradiance hyperspectral radiometer sensor from TriOS-RAMSES, have a spectral range of 320-950 nm and a spectral channel width of 3.3 nm. The continuum removal algorithm is used to identify the spectral response features of various seagrass leaf conditions. The results show the location of absorption channels and reflections close together. The location of the absorption feature occurs in the blue channel region (463-493 nm) and the red-red edge channel (671-674 nm). The location of the reflected peaks in the green channel (560-577 nm) and red channel (648 nm) of various seagrass leaf conditions.

Keywords: *Sustainable Development Goals (SDGs)*, *seagrass*, *hyperspectral radiometer*, *spectral*, *spektoradiometer*, *TriOS-RAMSES*, *continuum removal*

ABSTRAK

Data hiperspektral *in situ* yang berasal dari pengukuran *downwelling irradiance* $Ed(\lambda)$ dan *upwelling irradiance* $Lu(\lambda)$ dapat digunakan untuk berbagai analisis, salah satunya melihat karakteristik respons spektral terhadap kondisi fisik daun lamun menggunakan sensor bawah air. Interaksi antara gelombang elektromagnetik matahari terhadap kondisi fisik daun lamun di dalam air menghasilkan suatu pola respons spektral berbeda yang berkaitan dengan kandungan dan konsentrasi pigmen di dalam jaringan tumbuhan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui fitur serapan dan pantulan serta spesifik lokasi saluran spektral dari berbagai kondisi daun lamun. Pengukuran spektral dilakukan pada tiga jenis spesies lamun, yaitu *Cymodocea rotundata* (Cr), *Thalassia hemprichii* (Th), dan *Enhalus acoroides* (Ea) beserta kondisi fisik yang melekat dari daun lamun (berwarna hijau, kuning hingga cokelat, hitam, dan daun yang tertutup oleh organisme epifit) di perairan laut dangkal. Pengukuran spektral menggunakan spektrometri yang dilengkapi dengan sensor *irradiance hyperspectral radiometer* TriOS-RAMSES, memiliki julat spektral 350-950 nm dan lebar saluran spektral 3,3 nm. Algoritma *continuum removal* digunakan untuk mengidentifikasi fitur respon spektral dari berbagai kondisi daun lamun. Hasil menunjukkan lokasi saluran serapan dan pantulan saling berdekatan. Lokasi fitur serapan terjadi di wilayah saluran biru (463-493 nm) dan saluran merah-merah tepi (671-674 nm). Lokasi puncak pantulan di saluran hijau (560-577 nm) dan saluran merah (648 nm) dari berbagai kondisi daun lamun.

Kata kunci: *Sustainable Development Goals (SDGs)*, lamun, radiometer hiperspektral, spektral, spektrometri, TriOS-RAMSES, *continuum removal*

1 PENDAHULUAN

Ilmu pengetahuan dan perkembangan teknologi saat ini diperlukan untuk mencapai tujuan pembangunan yang berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*) ke-14, yaitu kehidupan di bawah air (*life below water*). Target SDGs yang ingin dicapai dalam konteks tersebut, ialah melestarikan dan secara berkelanjutan menggunakan samudera, laut dan sumberdaya kelautan untuk pembangunan berkelanjutan.

Perkembangan teknologi penginderaan jauh yang salah satunya, ialah data hiperspektral untuk analisis spektrometri menggunakan sensor bawah air telah dimanfaatkan dalam tujuh tahun terakhir. Di Indonesia, beberapa penelitian yang sudah mengkaji terkait respon spektral lamun secara *in-situ* menggunakan spektrometri, diantaranya Kurniasih (2013) di Pulau Panggang, Kep. Seribu, Jakarta; Aziizah (2016) di Pulau Tunda, Serang, Banten; Wicaksono (2017) di Pulau Karimunjawa; Wicaksono & Kamal (2017) di Pulau Karimunjawa, Jepara, Jawa Tengah dan luar Indonesia seperti di pantai Florida, USA (Thorhaug *et al.*, 2007); Groetsch (2011) dan Dierssen, (2014) di Elkhorn Slough, California.

Data penginderaan jauh hiperspektral yang memanfaatkan alat spektrometri memberikan informasi kedetilan lebih dari suatu

penciri spektral/*fingerprint spectral*. Penciri spektral tersebut dapat digunakan untuk menduga properti yang ada di kolom air, seperti koefisien *diffuse* atenuasi (K_d) di perairan dangkal (Prasetyo *et al.*, 2017), mengukur kedalaman perairan dan warna dasar perairan di perairan dangkal (Dekker *et al.*, 2011). Penggunaan data hiperspektral juga memanfaatkan wilayah spektrum sempit, yang sangat optimal dan memungkinkan dalam membedakan tumbuhan air terendam, seperti konsentrasi pigmen dan struktur seluler dari tumbuhan (Silva *et al.*, 2008).

Berdasarkan dinamika kondisi perairan laut di pesisir Bali, tepatnya bagian utara Nusa Lembongan, lingkungan ekosistem padang lamun dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya ialah aksi gelombang, sedimentasi, dan eutrofikasi, sedangkan lingkungan ekosistem padang lamun di Gili Putih, Desa Sumberkima, Pemuteran, dikelilingi oleh aktivitas perikanan budidaya. Menurut Lazuardi & Ardiyanto (2019), perubahan distribusi tutupan lamun pada tahun 2019 berkurang seluas 86 ha dibandingkan tahun 2015. Perubahan tersebut didominasi oleh substrat pasir yang lokasinya terjadi dekat dengan aktivitas keramba dan tidak terlindung dari proses dinamika perairan laut. Penyebab lainnya ialah aktivitas keramba jaring apung, eksploitasi kerang (kima) dan produk perikanan yang tidak terkontrol

dan bersifat merusak, buangan limbah akibat perkembangan kawasan pemukiman dan penginapan disekitar lokasi. Hal tersebut salah satunya dapat mempengaruhi pertumbuhan padang lamun dari tiap spesies lamun yang memiliki karakteristik dan toleransi yang berbeda-beda terhadap kondisi lingkungannya.

Dilihat dari kondisi fisik aktual, daun lamun akan memberikan respon berbeda berkaitan dengan kandungan dan konsentrasi pigmen di dalam jaringan tumbuhan. Utamanya, pigmen-pigmen yang terkandung pada semua tumbuhan tingkat tinggi, diantaranya klorofil-a, klorofil-b, xantofil, dan karoten (Pinnel *et al.*, 2003). Karakteristik pantulan daun ditentukan oleh properti pada permukaan, fitur struktur internal, dan komponen biokimia dari daun (Thorhaug *et al.*, 2007).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui fitur-fitur serapan dan pantulan serta memastikan lokasi spesifik saluran spektral dari berbagai kondisi daun lamun. Algoritma *continuum removal* digunakan dalam analisis spektral untuk mengidentifikasi fitur tersebut dari kondisi daun lamun yang hijau, hijau-kekuningan, hijau-kecokelatan, coklat, dan tertutup organisme epifit dari tiga jenis lamun yang diukur, diantaranya *Cymodocea rotundata* (Cr), *Thalassia hemprichii* (Th), dan *Enhalus acoroides* (Ea). Manfaat dari penelitian ini adalah mengetahui lokasi saluran atau panjang gelombang spesifik dari fitur serapan dan pantulan dari berbagai kondisi fisik daun lamun yang diukur didalam air (*submerged*) menggunakan sensor *hyperspectral radiometer* TriOS-RAMSES.

2 METODOLOGI

Metode dalam penelitian ini terbagi menjadi dua, yakni pengukuran spektral di lapangan dengan spektrometri dan analisis respons spektral lapangan (fitur serapan dan pantulan dari berbagai kondisi daun lamun).

Alat yang digunakan dalam penelitian, yaitu spektrometri *portable* TriOS-RAMSES[®] tipe sensor ACC-2 VIS dan ARC-VIS dengan rentang panjang gelombang 320-950 nm dengan rata-rata resolusi spektral 3,3 nm dan akurasi spektral yang baik dari 0,3 nm (Groetsch, 2011), laptop tipe DELL yang

sudah terinstall MSDA_XE[®] (proses perekaman data spektral dan mengoperasikan perangkat akuisisi TriOS-RAMSES), GPS Receiver Trimble Series[®] Juno 3B, Kamera *underwater* NIKON COOLPIX *Waterproof*, alat dasar selam (*snorkle*, masker/*googles*, *booties*, dan *fins*), kertas sabak/bahan *newtop*, papan jalan, pulpen, lembar identifikasi jenis lamun, serta kapal survei.

2.1 Lokasi dan Data

Pengukuran spektral dilakukan pada tanggal 26 April, 1 Mei & 3 Mei 2019 di Pulau Nusa Lembongan, Pantai Gili putih Desa Sumberkima, dan Pulau Putri Menjangan, Pemuteran, Kabupaten Buleleng, Provinsi Bali, Indonesia.

Perairan dangkal bagian utara Pulau Nusa Lembongan dan Gili Putih Desa Sumberkima dipilih menjadi lokasi survei lamun dengan pertimbangan memiliki distribusi ekosistem lamun yang luas dilihat dari perekaman citra satelit SPOT-7 menggunakan algoritma klasifikasi, yaitu kurang lebih 80,25 ha (Indayani, 2020), keanekaragaman jenis lamun tinggi, dan kondisi wilayah perairan perairan Gili Putih yang dikelilingi oleh aktivitas perikanan budidaya, seperti tambak ikan, keramba jaring apung, dan rumah makan *seafood* yang berpotensi mempengaruhi keanekaragaman, distribusi, dan kondisi pertumbuhan padang lamun di masa mendatang.

2.2 Standarisasi Data

Pengukuran dilakukan di dalam air (*submerged*) dengan bukaan sudut sensor/*field of view* sebesar tujuh derajat (7°) dengan jarak pengukuran yang konsisten, yakni 10-15 cm terhadap penampang daun. Ilustrasi seperti Gambar 2-1 di bawah ini.



Gambar 2-1: Pengukuran spektral lamun di lapangan

Posisi sensor Ed(λ) dan sensor A(λ) saling berlawanan arah di dalam air.

Sensor $Ed(\lambda)$ menghadap ke atas untuk mengukur radiasi energi matahari yang masuk ke dalam perairan, sedangkan *upwelling radiance* ($Lu(\lambda)$) diperoleh dari sensor $A(\lambda)$ yang menghadap ke bawah. Sensor $A(\lambda)$ mengukur radiasi kembali menuju sensor terhadap objek lamun. Dalam satu kali pengukuran, sensor $Ed(\lambda)$ dan sensor $A(\lambda)$ mengukur spektral secara bersamaan namun memiliki rentang waktu perekaman 1-2 menit. Pengukuran spektral dilakukan pengulangan minimal sebanyak tiga kali per kategori/spesies kondisi daun. Hal tersebut dimaksudkan untuk melihat pola spektral yang sama dan menghindari apabila terdapat data yang rusak.

Terdapat tiga spesies lamun yang menjadi sampel pengukuran spektral, diantaranya *Enhalus acoroides* (Ea), *Thalassia hemprichii* (Th), dan *Cymodocea rotundata* (Cr). Tiga spesies tersebut dipilih dalam penelitian ini karena umumnya ditemukan di seluruh perairan pantai Giliputih. Umumnya ketiga spesies tersebut termasuk spesies dominan yang menutupi substrat dasar perairan, serta spesies lamun yang paling sering ditemukan di wilayah perairan Indonesia (Wicaksono, 2017a).

Pada umumnya pengukuran spektral objek dalam air akan mengambil data pengukuran properti optik perairan, diantaranya pengukuran nilai *downwelling irradiance* $Ed(\lambda)$, dan pengukuran pantulan spektral objek yang kembali, seperti pengukuran nilai *upwelling radiance* $Lu(\lambda)$. Pengukuran nilai *spectral remote sensing reflectance* (R_{rs}) dilakukan dengan pengaturan pada sensor $Lu(\lambda)$ dipasang bersamaan dengan sensor $Ed(\lambda)$ yang berlawanan arah. Proses perekaman data spektral lamun dilakukan di atas kapal dengan seperangkat laptop dan perangkat akuisisi data dari TriOS-RAMSES. Data spektral yang telah terekam secara radiometrik dikalibrasi menggunakan *calibration files (nominal calibration constants)* untuk masing-masing sensor.

2.3 Metode Penelitian

Data spektral hasil pengukuran TriOS-RAMSES berupa data *Apparent Optical Properties (AOP)*, yaitu *downwelling irradiance* ($Ed(\lambda)$), *upwelling radiance* ($Lu(\lambda)$). *Apparent Optical*

Properties (AOP) merupakan properti optik yang terlihat, tidak bergantung pada air dan materi yang terkandung di dalamnya tetapi juga struktur cahaya yang datang ke medium air tersebut (Mobley, 1994). Dari data AOP tersebut dapat dihitung nilai R_{rs} berdasarkan persamaan (Mobley, 1999).

$$R_{rs}(\theta, \varphi, \lambda) = \frac{\text{upwelling water - leaving radiance}}{\text{downwelling plane irradiance}} \quad (2-1)$$

$$R_{rs}(\text{in air}, \theta, \varphi, \lambda) = \frac{L_w(\text{in air}, \theta, \varphi, \lambda)}{E_d(\text{in air}, \lambda)} [sr^{-1}] \quad (2-2)$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa nilai R_{rs} dievaluasi menggunakan *water-leaving radiance* (L_w) dan *downwelling irradiance* (E_d) di atas permukaan air. Setiap spektrum R_{rs} berkaitan dengan serangkaian properti air, spektrum pantulan dari dasar perairan (tipe dasar), dan kedalaman perairan (Mobley *et al.*, 2005). Berdasarkan persamaan (2-2) teknis pengukuran dari dua sensor ($Ed(\lambda)$ & $Lu(\lambda)$) berada di atas permukaan air, sedangkan dalam penelitian ini, ada perbedaan pengukuran spektral dari dua sensor tersebut yang dilakukan di dalam air. Namun dalam perhitungan nilai R_{rs} menggunakan prinsip perhitungan yang sama seperti persamaan diatas, dimana spektrum objek lamun dan spektrum radiasi matahari yang masuk kedalam air secara bersamaan didapat (Mobley, 1999).

3 HASIL PEMBAHASAN

Perbedaan respon spektral (serapan dan pantulan) berbagai kondisi daun lamun yang diukur di dalam air dapat dilihat dan dianalisis pada wilayah spektrum cahaya tampak/*visible* (400-700 nm). Respon spektral lamun untuk daun hijau, hijau kekuningan, cokelat, hingga yang tertutup oleh epifit menunjukkan pola spektral yang bervariasi sepanjang saluran tampak. Menurut Durako (2006), perbedaan optik antar kondisi spesies daun lamun terlihat pada panjang gelombang hijau (500-600 nm) dan inframerah dekat (700-750 nm).

Pada rentang panjang gelombang 400-500 nm (gelombang biru) dan panjang gelombang 600-700 nm (gelombang merah) berkaitan dengan fitur penyerapan utama dari vegetasi

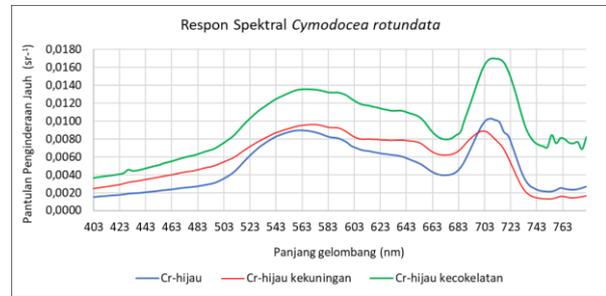
untuk proses fotosintesis. Selebihnya spektrum dengan panjang gelombang lebih dari 700 nm tidak masuk analisis spektral dikarenakan energi gelombang elektromagnetik diserap habis oleh medium air dan apabila memberikan respon spektral diduga disebabkan oleh gangguan/*noise* dari material kolom air. Menurut Pinnel *et al.* (2003), sifat air secara kuat menyerap radiasi elektromagnetik dalam wilayah spektral optik, hasilnya secara signifikan mengurangi atau meredam sinyal radiometrik yang ada. Oleh karena itu, nilai pantulan yang terukur untuk spesies bawah air (*submerged*) biasanya sangat rendah, kurang lebih $10 \times 10^{-3} \text{ Sr}^{-1}$ atau biasa dinyatakan dalam persen (%).

Tabel 3-1: CONTOH NILAI IRRADIANSI DAN RADIANSI SPESIES CR

λ	Intensitas Ed (mW/m ² nm)	Intensitas A (mW/m ² nm.sr)	Lw=Lu	Rrs=Lw/Ed (sr ⁻¹)
403	517,7402	0,7888	0,7888	0,00152
406	530,5629	0,8337	0,8337	0,00157
409	540,2693	0,8740	0,8740	0,00161
413	553,6262	0,9150	0,9150	0,00165
416	558,0664	0,9535	0,9535	0,00170
419	554,1727	0,9601	0,9601	0,00173
423	545,3968	0,9667	0,9667	0,00177
426	522,7136	0,9580	0,9580	0,00183
429	512,4625	0,9761	0,9761	0,00190
433	531,9635	1,0344	1,0344	0,00194
436	561,6895	1,1047	1,1047	0,00196
440	585,8239	1,1743	1,1743	0,00200
443	610,6731	1,2638	1,2638	0,00206
446	637,2924	1,3493	1,3493	0,00211
450	654,8977	1,4210	1,4210	0,00216

Respon spektral dari tiga kondisi daun lamun *Cymodocea rotundata* menunjukkan pola/bentuk spektral yang sama (Gambar 3-1(a)). Perbedaannya hanya pada intensitas pantulan dari masing-masing fisik daun Cr. Jumlah sampel pengukuran daun Cr-hijau sebanyak 5 kali, Cr-hijau kekuningan sebanyak 3 kali, Cr-hijau kecokelatan sebanyak 3 kali. Dalam satu kali pengukuran memiliki 3 data dari 3 sensor (Ed, A, B), namun pada penelitian ini hanya menggunakan data dari sensor Ed dan sensor A. Sensor B mengukur radiasi atmosfer yang kegunaan datanya untuk koreksi awal citra satelit. Lebih jelasnya seperti di bawah ini contoh data sampel salah satu kategori lamun spesies Cr.

Dari respon spektral Cr, kondisi daun Cr-hijau (c), Cr-hijau kekuningan (d), dan Cr-hijau kecokelatan (e) sama-sama memiliki satu lokasi puncak pantulan atau pantulan maksimum yang berada pada lokasi panjang gelombang yang sama 543-603 nm (Gambar 3-1(a)).



(a)



(b)

(c)

(d)

(e)

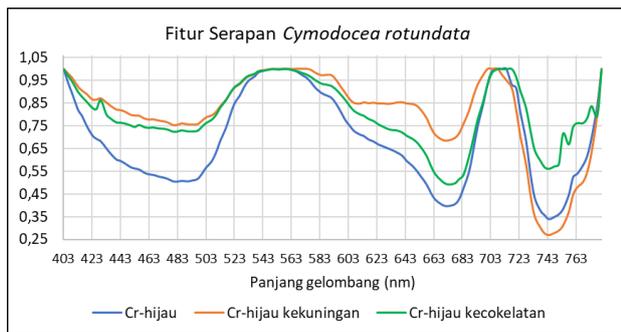
Gambar 3-1: (a) Respon spektral dari 3 kondisi daun Cr, (b) Kenampakan fisik lengkap Cr, (c) Daun Cr-hijau, (d) Daun Cr-hijau kekuningan, dan (e) Daun Cr-hijau kecokelatan

Kurva spektral dari tiap kategori *Cymodocea rotundata* dipilih satu terbaik dari jumlah sampel data yang ada melihat pola spektral yang dibuat sama dan halus. Rerata data sampel pengukuran spektral tidak dilakukan karena ditemukan kerusakan data, seperti nilai spektral yang negatif pada panjang gelombang tertentu atau akibat pengaruh bayangan gelap saat melakukan pengukuran sehingga nilai spektral tidak bisa digunakan.

Berdasarkan Gambar 3-1(a), respon spektral Cr-hijau kecokelatan menunjukkan nilai Rrs tertinggi, sedangkan respon spektral Cr-hijau menunjukkan nilai Rrs terendah. Dari data statistik sebaran nilai spektral Cr-hijau kecokelatan terdistribusi normal, tidak ada nilai yang terlalu besar dan terlalu kecil. Data statistik Cr-hijau kecokelatan memiliki nilai minimum 0,0037 Sr⁻¹, maksimum 0,0170 Sr⁻¹, rata-rata 0,0095 Sr⁻¹ dan standar deviasi 0,0035 Sr⁻¹. Cr-hijau kekuningan memiliki nilai minimum 0,0013 Sr⁻¹, maksimum 0,0096 Sr⁻¹, rata-rata 0,0058 Sr⁻¹, dan standar deviasi 0,0027 Sr⁻¹. Cr-hijau memiliki nilai minimum sebesar

0,0015 Sr^{-1} , maksimum 0,0103 Sr^{-1} , rata-rata 0,0051 Sr^{-1} dan standar deviasi 0,0027 Sr^{-1} .

Nilai standar deviasi yang lebih kecil dari nilai rata-rata pada tiga kategori kondisi Cr menjelaskan sebaran nilai sampel data cenderung dekat dengan reratanya. Oleh karena itu, nilai rata-rata dapat digunakan sebagai representasi dari keseluruhan data spektral lamun.



Gambar 3-2: Fitur serapan *Cymodocea rotundata* dengan analisis *continuum-removal*

Dalam Gambar 3-2, fitur serapan dengan analisis *continuum removal* menunjukkan perbedaan kontras dari kondisi daun lamun Cr-hijau, Cr-hijau-kekuningan dan Cr-hijau-kecokelatan. Di rentang 403-503 nm dan 603-663 nm, daun Cr-hijau memiliki intensitas serapan terbesar diikuti kedalaman serapan yang besar pula, spesifiknya di 483 nm dan 671 nm.

Fitur serapan Cr-hijau kekuningan dan Cr-hijau kecokelatan memiliki selisih kedalaman serapan yang berdekatan pada panjang gelombang 403-503 nm. Namun, Cr-hijau kecokelatan memiliki serapan lebih besar dibandingkan Cr-hijau kekuningan pada panjang gelombang 663-703 nm (saluran merah tepi). Hal tersebut dipengaruhi oleh keberadaan pigmen daun Cr.

Dalam membangun kurva spektral dari masing-masing kategori daun Th dipilih satu data terbaik dari jumlah sampel data yang ada melihat pola spektral yang sama dan halus. Jumlah sampel untuk Th-hijau kekuningan sebanyak 4 kali pengulangan dan Th-hijau kecokelatan sebanyak 3 pengulangan. Contoh data Th dari masing-masing sensor dapat dilihat dalam Tabel 3-2.

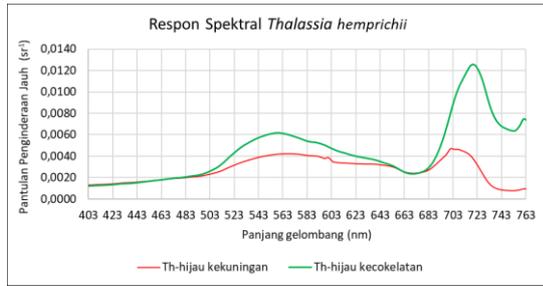
Tabel 3-2: CONTOH NILAI IRRADIANSI DAN RADIANSI SPESIES TH

λ	Intensitas Ed (mW/m ² nm)	Intensitas A (mW/m ² nm.sr)	Lw=Lu	Rrs=Lw/Ed (sr ⁻¹)
403	298,9811	0,25182	0,25182	0,00084
406	304,3504	0,26087	0,26087	0,00085
409	307,8570	0,26815	0,26815	0,00087
413	313,2231	0,27488	0,27488	0,00087
416	313,5903	0,27829	0,27829	0,00088
419	309,4640	0,27797	0,27797	0,00089
423	302,6068	0,27446	0,27446	0,00090
426	288,2880	0,26691	0,26691	0,00092
429	280,7248	0,26659	0,26659	0,00094
433	289,4330	0,27803	0,27803	0,00096
436	303,8215	0,29275	0,29275	0,00096
440	314,8783	0,30715	0,30715	0,00097
443	326,1964	0,32458	0,32458	0,00099
446	338,4497	0,34253	0,34253	0,00101
450	346,0235	0,35642	0,35642	0,00103

Sumber: Data Lapangan 2019

Kondisi daun lamun yang sehat atau hijau, di saluran merah hingga saluran merah tepi akan mengalami penyerapan maksimum/besar yang disebabkan adanya konsentrasi klorofil tinggi yang digunakan untuk proses fotosintesis. Pada Gambar 3-3(a), kurva respon spektral dari Th-hijau kekuningan (c) dan Th-hijau kecokelatan (d) menunjukkan pola yang sama. Lokasi pantulan dari kedua kondisi daun Th, yaitu sama di saluran hijau (503-603 nm) serta lokasi serapan, yaitu saluran biru (403-503 nm) dan saluran merah (643-683 nm). Kurva respon spektral Th-hijau kecokelatan menunjukkan nilai pantulan atau intensitas lebih besar di saluran hijau dibandingkan kurva respon spektral Th-hijau kekuningan (Gambar 3-3a). Di wilayah spektrum inframerah (>700 nm) tidak dilakukan analisis spektral disebabkan pengaruh atenuasi sinyal yang besar akibat serapan oleh medium air.

Berdasarkan Gambar 3-3(a), sebaran nilai statistik Th-hijau kekuningan untuk nilai minimum adalah 0,0008 Sr^{-1} , maksimum 0,0047 Sr^{-1} , rata-rata 0,0026 Sr^{-1} dan standar deviasi 0,0012 Sr^{-1} . Th-hijau kecokelatan memiliki nilai minimum 0,0012 Sr^{-1} , maksimum 0,0125 Sr^{-1} , rata-rata 0,0046 Sr^{-1} , dan standar deviasi 0,0027 Sr^{-1} . Hal ini menjelaskan sebaran nilai spektral Th cenderung mendekati reratanya.



(a)



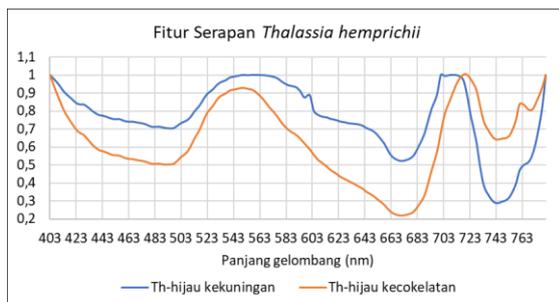
(b)

(c)

(d)

Gambar 3-3: (a) Respon spektral dari 2 kondisi daun Th, (b) Penampang daun Th, (c) Daun Th-hijau kekuningan, dan (d) Daun Th-hijau kecokelatan

Fitur serapan dari dua kondisi daun Th menunjukkan perbedaan intensitas fitur serapannya. Fitur serapan Th-hijau kecokelatan memiliki intensitas jauh lebih besar dibandingkan Th-hijau kekuningan. Hal ini dipengaruhi oleh beberapa hal, seperti: pigmen hijau daun/klorofil yang masih sangat besar, adanya organisme epifit/mikroalga yang menutupi daun, lebar pengukuran spektral yang sempit, dan kedalaman perairan yang terlalu dangkal.

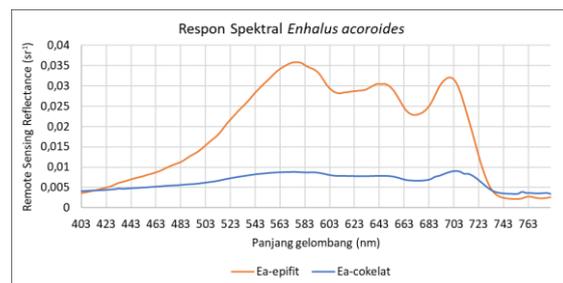


Gambar 3-4: Fitur serapan *Thalassia hemprichii* dengan analisis *continuum-removal*

Di saluran biru, fitur serapan maksimum Th-hijau kekuningan terjadi di panjang gelombang 493 nm, dan Th-hijau kecokelatan di panjang gelombang 490 nm. Intensitas serapan besar terlihat di saluran merah untuk kedua kondisi daun Th berada di panjang gelombang yang sama, spesifiknya di panjang gelombang 671 nm untuk fotosintesis (Gambar 3-4). Menurut hasil penelitian yang dilakukan Thorhaug (2006), fitur serapan *Thalassia* menunjukkan pergeseran pada saluran merah-tepi

(671-674 nm) dipengaruhi oleh faktor penuaan, morbiditas dan pergeseran pada saluran merah-tepi terjadi ketika lamun terpapar sinar matahari hingga salinitas yang sangat rendah.

Berdasarkan Gambar 3-5(a), kurva respon spektral dari Ea-cokelat hanya memiliki satu pantulan, sedangkan Ea-epifit memiliki dua puncak pantulan. Ea-cokelat di panjang gelombang 574 nm dan Ea-epifit di panjang gelombang 577 nm dan 648 nm (Gambar 3-5(a)). Dalam hal ini klorofil tidak lagi mengontrol pantulan, tetapi epifit yang melekat pada daun yang mengubah pola spektral dari Ea. Hasil penelitian serupa juga menyebutkan bahwa pada daun Ea tertutup epifit memiliki dua puncak kecil untuk saluran tampak, yaitu pada panjang gelombang 561 nm dan 590 nm, sedangkan daun Ea yang rusak di panjang gelombang 590 nm dan 656 nm namun pengukuran dilakukan secara *harvest* (diatas permukaan air) (Wicaksono, 2017).



(a)



(b)

(c)

Gambar 3-5: (a) Respon spektral dari 2 kondisi daun Ea, (b) Daun Ea-cokelat dan, (c) Daun Ea-epifit

Berdasarkan kurva respon spektral Ea Gambar 3-5(a), sebaran nilai statistik untuk Ea-cokelat memiliki nilai Rrs minimum 0,0034 Sr^{-1} , Rrs maksimum 0,0090 Sr^{-1} , rata-rata 0,0065 Sr^{-1} dan standar deviasi 0,0018 Sr^{-1} . Sedangkan Ea-epifit memiliki nilai Rrs minimum 0,0021 Sr^{-1} , maksimum 0,035 Sr^{-1} , rata-rata 0,0187 Sr^{-1} , dan standar deviasi 0,0116 Sr^{-1} . Dapat dikatakan sebaran nilai spektral dari masing-masing

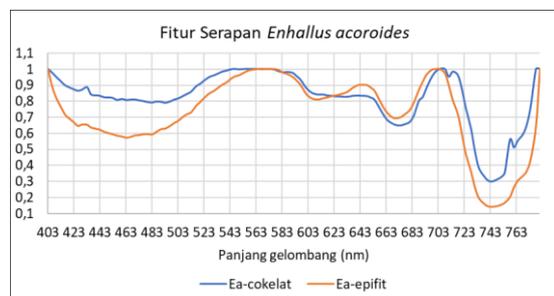
kategori Ea cenderung mendekati reratanya.

Tabel 3-3: CONTOH NILAI IRRADIANSI DAN RADIANSI SPESIES EA

λ	Intensitas Ed (mW/m ² nm)	Intensitas A (mW/m ² nm.sr)	Lw=Lu	Rrs=Lw/Ed (sr ⁻¹)
403	690,9867	2,4965	2,4965	0,00361
406	699,3435	2,6118	2,6118	0,00373
409	683,6793	2,7129	2,7129	0,00396
413	672,4784	2,8171	2,8171	0,00418
416	655,5310	2,8933	2,8933	0,00441
419	629,2409	2,9374	2,9374	0,00466
423	598,9725	2,9565	2,9565	0,00493
426	562,6679	2,9336	2,9336	0,00521
429	529,0515	2,9951	2,9951	0,00566
433	522,8440	3,1831	3,1831	0,00608
436	537,8613	3,4200	3,4200	0,00635
440	551,3211	3,6654	3,6654	0,00664
443	565,4875	3,9491	3,9491	0,00698
446	583,2717	4,2405	4,2405	0,00727
450	596,3446	4,4901	4,4901	0,00752

Sumber: Data Lapangan 2019

Pada kurva respon spektral Ea keduanya terlihat memiliki intensitas yang berbeda. Pada saluran biru (400-500 nm), serapan maksimum Ea-cokelat terjadi di panjang gelombang 493 nm dan Ea-epifit di panjang gelombang 463 nm. Sebaliknya fitur serapan maksimum pada saluran merah (600-700 nm) dari keduanya hanya selisih 3 nm, yaitu Ea-cokelat di panjang gelombang 674 nm dan Ea-epifit di panjang gelombang 671 nm. Dari Gambar 3-6, pada panjang gelombang 643 nm terlihat kontras perbedaan Ea-epifit mengalami pantulan spektral, sedangkan spektral Ea-cokelat cenderung datar. Pengukuran spektral Ea-epifit di lapangan dilakukan di kedalaman perairan 0,7 m dan Ea-cokelat di 0,6 m.



Gambar 3-6: Fitur serapan *Enhallus acoroides* dengan analisis *continuum-removal*.

Dari beberapa kategori kondisi daun lamun mulai dari hijau, hijau-

kekuningan, hijau-kecokelatan, dan cokelat, memiliki persamaan hanya pada satu puncak pantulan dan jarak puncak pantulan yang berdekatan atau selisih 7-10 nm. Hal sebaliknya terjadi pada Ea-epifit yang mengalami pergeseeran spektral ke panjang gelombang lebih panjang sehingga memiliki dua puncak pantulan. Ringkasnya dapat dilihat pada Tabel 3-4. Hal tersebut secara objektif dipengaruhi oleh adanya kandungan pigmen yang melekat pada epifit. Epifit yang berwarna cokelat mengandung konsentrasi tinggi dari pigmen berwarna kuning-cokelat (*carotenoids*), yang mengubah fitur serapan dan spektral dari daun *Enhallus acoroides*. Oleh karena itu, baik klorofil-a atau klorofil-b bukan lagi pigmen yang dominan mengontrol pantulan pada Ea-epifit (Wicaksono, 2017a).

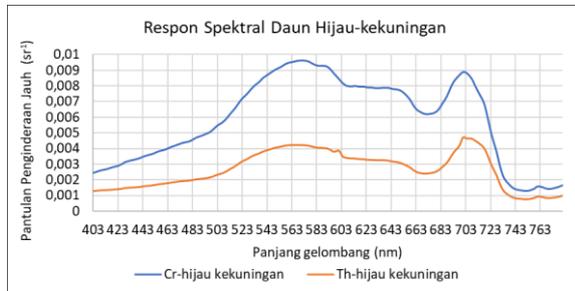
Berdasarkan Tabel 3-4, Cr-hijau memiliki intensitas kedalaman serapan terbesar di panjang gelombang 483 nm, yaitu 0,50 kedalaman dan di panjang gelombang 671 nm sebesar 0,60 kedalaman dibandingkan dua kondisi Cr lain. Pada kondisi daun lamun yang sehat atau hijau, di saluran merah hingga merah tepi akan mengalami penyerapan maksimum yang disebabkan adanya konsentrasi klorofil tinggi yang digunakan untuk proses fotosintesis. Intensitas serapan terbesar untuk Th dimiliki Th-hijau kecokelatan di panjang gelombang 490 nm sebesar 0,50 kedalaman dan di panjang gelombang 671 nm sebesar 0,78 kedalaman. Sedangkan untuk Ea intensitas serapan terbesar pada saluran biru dimiliki oleh Ea-epifit di panjang gelombang 463 nm dengan 0,43 serapan kedalaman, sedangkan pada saluran merah Ea-cokelat memiliki serapan lebih unggul selisih 0,045 kedalaman dari Ea-epifit, yaitu sebesar 0,35 kedalaman di panjang gelombang 674 nm.

Secara spesifik serapan pigmen klorofil-a terjadi di sekitar panjang gelombang 673 nm (Carrère, 2003). Hasil penelitian sama seperti (Carrère, 2003), di panjang gelombang 671-674 nm dari semua kondisi daun lamun mengalami serapan klorofil-a, namun kedalaman serapan klorofil-a pada semua spesies berbeda-beda (Tabel 3-4).

Tabel 3-4: RINGKASAN DARI SALURAN SERAPAN (NM) DARI CR, TH, DAN EA

Species	Cr-h	Cr-hk	Cr-hc	Th-hk	Th-hc	Ea-c	Ea-e
Epuncak	1	1	1	1	1	1	2
Lokasi puncak (nm)	560	570	567	567	560	574	577 648
Posisi saluran fitur serapan dalam nm (kedalaman)	483 (0,50)	480 (0,25)	480 (0,28)	493 (0,30)	490 (0,50)	493 (0,21)	463 (0,43)
	671 (0,60)	671 (0,32)	674 (0,51)	671 (0,48)	671 (0,78)	674 (0,35)	671 (0,31)

Ket: h (hijau), hk (hijau-kekuningan), hc (hijau-kecoklatan), c (cokelat), e (epifit)

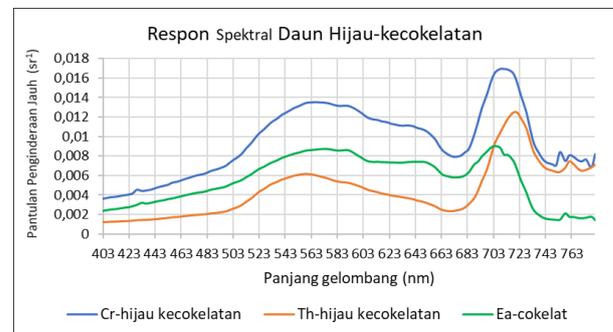


Gambar 3-7: Respon spektral dari daun hijau-kekuningan

Respon spektral dari semua kategori daun lamun hijau-kekuningan, hijau-kecoklatan, dan cokelat dibandingkan untuk melihat pola respon spektralnya. Berdasarkan Gambar 3-7, respon spektral daun lamun hijau-kekuningan dari *Cr* dan *Th* menunjukkan kemiripan pola spektral pada seluruh wilayah spektrum cahaya tampak (403 nm-703 nm). *Cr* memiliki respon spektral yang lebih tinggi dibandingkan *Th*. Sehingga pola serapan yang dihasilkan *Th* lebih besar baik pada saluran biru maupun saluran merah hingga merah tepi. Selain itu, waktu dan kedalaman pengukuran *Cr* dan *Th* berbeda. Pengukuran spektral *Cr* dilakukan pukul 11:57 WITA dan *Th* pukul 14:57 WITA. Kedalaman perairan saat pengukuran *Th*, yaitu 0,8 m dan *Cr*, yaitu 0,7 m. Faktor tersebut dapat mempengaruhi variasi spektral lamun terkait pelemahan sinyal/cahaya yang masuk kedalam kolom air.

Pola yang sama juga ditampilkan dari kurva respon spektral kategori hijau-kecoklatan dan cokelat dari *Cr*, *Th* dan *Ea*. Ketiga respon spektral tersebut dibandingkan memperlihatkan *Cr*-hijau kecoklatan memiliki respon spektral paling tinggi dan *Th*-hijau kecoklatan dengan spektral terendah (Gambar 3-8). Hal ini berkaitan dengan kenampakan helai permukaan daun *Cr* di lapangan atau saat pengukuran seluruhnya berwarna cokelat gelap hampir mendekati hitam dan tertutup oleh mikroba epifit. Hal serupa juga dijumpai pada permukaan helai daun *Ea*. Menurut

Wicaksono & Kamal (2017), perbedaan utama yang mendasari kedalaman dari saluran serapan dan nilai puncak pantulan spektral spesies kondisi daun lamun tersebut, yakni berkaitan dengan konsentrasi dan komposisi dari pigmen daun. *Cr*-cokelat dan *Ea*-cokelat diukur pada kedalaman perairan, berturut-turut 0,6 m dan 0,7 m, pukul 13:35 WITA dan 11:56 WITA.



Gambar 3-8: Respon spektral dari daun hijau-kecoklatan

Kandungan pigmen dalam jaringan tumbuhan memiliki sifat fisika dan kimia yang tidak stabil karena dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan yang ekstrim, salah satunya cahaya. Faktor tekanan fisiologis dapat mempengaruhi variabilitas spektral dari tumbuhan. Sumber lainnya dari variasi pantulan tumbuhan air terendam adalah karena kehadiran dari organisme epibiont, khususnya epifit, yang mana menutupi permukaan tumbuhan (Silva, Costa, Melack, & Novo, 2008). Kehadiran epifit membuat kurva spektral menjadi halus, mengurangi perbedaan pantulan antar panjang gelombang, dan menutupi fitur spektralnya (Armstrong, 1993).

4 KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa lokasi saluran serapan untuk semua kondisi spesies adalah sama, terjadi di wilayah spektrum biru (403-503 nm) dan wilayah spektrum merah hingga merah tepi (603-

703 nm). Spesifiknya dari serapan klorofil maksimum pada saluran biru untuk kategori daun lamun hijau, hijau-kekuningan, hijau-kecokelatan, cokelat, dan tertutup epifit berada pada kisaran panjang gelombang 463-493 nm. Sedangkan untuk serapan maksimum pada saluran merah hingga merah tepi, berada pada rentang panjang gelombang 671-674 nm. Lokasi puncak pantulan dari kelima kondisi fisik daun lamun, umumnya sama, yaitu pada rentang panjang gelombang 560-577 nm pada saluran biru, kecuali untuk kondisi daun tertutup epifit memiliki puncak pantulan kedua pada saluran merah di panjang gelombang 648 nm. Hal tersebut dipengaruhi oleh keberadaan mikroba epifit yang mengubah kurva spektral.

Saluran serapan dari semua jenis dan kondisi lamun saling tumpang tindih karena adanya kehadiran dari berbagai jenis klorofil dan pigmen tambahan. Semakin berubah fisik daun lamun atau perubahan dalam kandungan dan konsentrasi pigmen hijau (klorofil) dalam jaringan daun mengakibatkan respon spektral (serapan dan pantulan) bergeser ke panjang gelombang yang lebih panjang (Wicaksono dan Kamal, 2017).

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih diucapkan kepada Pusat Pemanfaatan Penginderaan Jauh, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) yang telah memberikan izin untuk mengikuti kegiatan Survei Budidaya, Kualitas Perairan, Batimetri, dan Terumbu Karang pada tanggal 26 April - 5 Mei 2019 di Nusa Lembongan dan Pemuteran, Bali dan Bapak Syarif Budhiman, M.Sc. telah memberikan izin dalam penggunaan *hyperspectral radiometer* TriOS-RAMES. Terima kasih kepada Tim Redaksi Jurnal Penginderaan Jauh dan Mitra Bestari.

DAFTAR RUJUKAN

- Armstrong, R. A. (1993). Remote sensing of submerged vegetation canopies for biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 14:3(03), 621-627.
<https://doi.org/10.1080/01431169308904363>
- Aziizah, N. N. (2016). *Analisis Reflektansi Spektral Lamun dari Hasil Pengukuran In-situ Menggunakan Spektrometer*

dan Citra Satelit WorldView-2 di Pulau Tunda Serang, Banten. Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor. Institut Pertanian Bogor.

- Carrère, V. (2003). Mapping microphytobenthos in the intertidal zone of Northern France using high spectral resolution field and airborne data Université du Littoral Côte d ' Opale, (May), 13-16.
- Dekker, A. G., Phinn, S, R., Anstee, J., Bissett, P., Brando, V, E., Casey, B., Fearn, P., Hedley, J., Klonowski, W., et al. (2011). *Intercomparison of shallow water bathymetry, hydro-optics, and benthos mapping techniques in Australian and Caribbean coastal environments. Limnol Ocean. Methods* 9, 396-425.
- Dierssen, H. M. (2014). *Overview of Hyperspectral Remote Sensing for Mapping Marine Benthic Habitats from Airborne and Underwater Sensors. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering* (Vol. 8870).
<https://doi.org/10.1117/12.2026529>
- Groetsch, P. M. M. (2011). *Optimization and Verification of a New Analytical Radiative Transfer Model*. Vrije Universiteit Amsterdam.
- Indayani, A. B. (2020). *Analisis Spektrometri dan Pemetaan Komposisi Spesies Lamun Menggunakan Citra SPOT-7 di Gili Putih, Desa Sumberkima, Kab.Buleleng, Pemuteran, Bali*. Universitas Gadjah Mada.
- Kurniasih. (2013). *Karakteristik Reflektansi Spektral Lamun di Pulau Panggang, Kepulauan Seribu*. Institut Pertanian Bogor.
- Lazuardi, W., & Ardiyanto, R. (2019). *Kajian Multitemporal Tutupan Padang Lamun di Gili Sumber Kima, Kabupaten Buleleng, Bali.pdf*. Yogyakarta.
- Mobley, C. D. (1994). *Optical Properties of Water, Light and waters: Radiative Transfer in Natural Waters*, hal. 60-144.
- Mobley, C. D. (1999). Estimation of The Remote-Sensing Reflectance from Above-Surface Measurements. *Applied Optics*, 38(12), 7442-7455.
<https://doi.org/10.1364/AO.38.007442>
- Pinnel, N., Heege, T., & Zimmermann, S. (2003). Spectral Discrimination of Submerged Macrophytes in Lakes Using Hyperspectral Remote Sensing

- Data. In *SPIE Proceedings on Ocean Optics XVII* (pp. 1–16).
- Prasetyo, B. A., Siregar, V. P., Agus, S. B., & Asriningrum, W. (2017). Pengukuran Koefisien Diffuse Atenuasi (Kd) di Perairan Dangkal Sekitar Karang Lebar, Kepulauan Seribu, DKI Jakarta. *Jurnal Teknologi Perikanan Dan Kelautan*, 8 (2)(11), 127–138.
- Silva, T. S. F., Costa, M. P. F., Melack, J. M., & Novo, E. M. L. M. (2008). Remote sensing of aquatic vegetation: theory and applications. *SPIE Proceedings on Ocean Optics XVII*, 131–145. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9855-3>
- Thorhaug, A., Richardson, A. D., & Berlyn, G. P. (2006). Spectral reflectance of *Thalassia testudinum* (Hydrocharitaceae) seagrass: Low salinity effects. *American Journal of Botany*, 93(1), 110–117. <https://doi.org/10.3732/ajb.93.1.110>
- Thorhaug, A., Richardson, A. D., & Berlyn, G. P. (2007). Spectral Reflectance of The Seagrasses: *Thalassia testudinum*, *Halodule wrightii*, *Syringodium filiforme* and Five Marine Algae. *International Journal of Remote Sensing*, 28 (7)(04), 1487–1501. <https://doi.org/10.1080/01431160600954662>
- Wicaksono, P. (2017a). Karakterisasi Respon Spektral Spesies Lamun Enhalus acoroides dan *Cymodocea rotundata* di Pulau Karimunjawa. *Majalah Ilmiah Globe*, 19(03), 1–10. <https://doi.org/10.24895/MIG.2017.19-1.551>
- Wicaksono, P. (2017b). Karakterisasi Respon Spektral Spesies Lamun Enhalus di Pulau Karimunjawa, 1–10.
- Wicaksono, P., & Kamal, M. (2017). Spectral Response of Healthy and Damaged Leaves of Tropical Seagrass Enhalus acoroides, *Thalassia hemprichii*, and *Cymodocea rotundata*. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIX*, 10421, 7. <https://doi.org/10.1117/12.2278027>