

PENILAIAN KESEHATAN TERUMBU KARANG MENGGUNAKAN CITRA SATELIT WORLDVIEW-2 DI PULAU PAHAWANG, LAMPUNG, INDONESIA

(Coral Health Assessment Using Worldview-2 Satellite Imagery in Pahawang Island, Lampung, Indonesia)

Lukman Hakim, Wahyu Lazuardi, Indinna Shofia Astuty, Afif Al Hadi, Rima Hermayani, Dimas Novandias D.P., dan Anisa Chandra Dewi

Departemen Sains Informasi Geografi, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada.

Sekip Utara, Bulaksumur, Sinduadi, Sleman, D.I. Yogyakarta. Kode pos: 55281

E-mail: lukman.pro@mail.ugm.ac.id

ABSTRAK

Perairan laut Lampung sebagai bagian kecil dari ekosistem terumbu karang Indonesia terindikasi memiliki tren penurunan kualitas karena aktivitas pelayaran dan pariwisata yang ekstensif khususnya di Pulau Pahawang. Kontrol kondisi terumbu karang pada wilayah ini menjadi kegiatan vital dalam rangkaian konservasi sumber daya laut. Sayangnya, pemetaan kesehatan terumbu karang memerlukan survei detail yang memakan banyak waktu, biaya, dan tenaga. Citra sebagai produk data penginderaan jauh hadir sebagai solusi monitoring terumbu karang secara cepat, murah, dan dalam jangkauan wilayah yang relatif luas. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memetakan kesehatan terumbu karang melalui citra WorldView-2 (WV-2) serta menguji akurasi peta yang dihasilkan. Metode yang digunakan untuk memetakan kesehatan terumbu karang adalah transformasi nilai *pixel* pada *band-band* WV-2 menjadi nilai original objek dengan urutan: 1) koreksi atmosfer (*Top of Atmospheric Reflectance*), 2) koreksi kilap air (*sun glint*), dan 3) koreksi kolom air (metode *lyzenga*) menghasilkan 15 *band* DII (*depth invariant bottom index*). Kelima belas *band* DII tersebut diubah menjadi nilai kesehatan terumbu karang dengan cara regresi antara nilai *pixel* pada *band* DII dengan nilai rasio kesehatan terumbu karang aktual yang diperoleh dari proses kalkulasi acak titik foto transek di lapangan. Tiga tipe regresi (linier, eksponen, dan polinomial) dilakukan untuk melihat persamaan terbaik yang bisa digunakan untuk mentransformasi nilai *pixel* ke nilai kesehatan terumbu karang. Persamaan terbaik kemudian diimplementasikan menjadi model kesehatan terumbu karang untuk kemudian diuji akurasi menggunakan metode *Standard Error Estimation*. Hasil terbaik diperoleh pada regresi antara rasio kesehatan terumbu karang dengan *band* DII *Coastal Red-Edge* dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,6553 dan akurasi pemetaan sebesar 70,191%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa citra WV-2 memiliki potensi untuk menjadi instrumen monitoring ekosistem marine yang layak.

Kata Kunci: Depth Invariant Bottom Index, Kesehatan Terumbu Karang, Lyzenga, Regresi, WorldView-2.

ABSTRACT

Sea waters of Lampung as one part of massive Indonesian coral ecosystem has some indication that its quality is degradating specifically in Pahawang Island due to the extensive tourism and sailing. Hence, coral reef monitoring in this area becomes one vital process in marine resource conservation. The coral health assessment process requires a detailed survey which cost a lot of money, energy, and time. Satellite imagery as the data product of remote sensing is presented as a solution to assess the coral health efficiently. This paper's goal is to map coral health using WorldView-2 (WV-2) satellite imagery and examine its accuracy. To achieve this goal, pixel transformation is needed as the mainframe of the method by the following step 1) atmospheric correction (ToA level), 2) sunglint correction, and 3) water column correction (lyzenga) producing 15 depth invariant bottom index (DII) bands. Those DII bands are then transformed into coral health value by regression between pixel value of DII bands and actual coral health ratio from random point calculation photo transect in fieldwork activity. Linear, exponential, and polynomial regression was performed to select the best equation which can transform DII band to the coral health model. The better result is gained in the regression between coral health ratio and DII B16 (coastal and red-edge band) with the R^2 of 0.6553, and the accuracy of 70.191%. This accuracy value shows that WorldView-2 imagery has a considerably good potential as an instrument of coral ecosystem monitoring.

Keywords: Coral Health, Depth Invariant Bottom Index, Lyzenga, Regression, WorldView-2.

PENDAHULUAN

Terumbu karang adalah ekosistem yang hidup pada perairan dangkal tropis. Ia hidup bersimbiosis bersama dengan alga (Suharsono, 2008). Spalding *et al.* (1997) menyatakan bahwa tidak kurang dari 25% spesies laut hidup di terumbu karang. Selain itu, terumbu karang juga berperan penting dalam menghambat abrasi laut terhadap mangrove dan padang lamun. Pada saat bersamaan, mangrove dan padang lamun menahan sedimentasi fluvial sekaligus menjadi lokasi sumber pangan berbagai organisme laut (Moberg & Folke, 1999). Simbiosis ini memberikan jasa lingkungan yang besar dalam sektor pariwisata, perikanan, dan perlindungan kawasan pesisir. Di sisi lain, ekosistem terumbu karang sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan. Kualitas ekosistem terumbu karang sangat dipengaruhi oleh temperatur, salinitas, kedalaman, gelombang, arus, kekeruhan, dan penyinaran. Namun, tren pemanasan global, kenaikan muka air laut, pengasaman laut, dan polusi telah menurunkan level kesehatan terumbu karang secara dramatis hingga menyebabkan penyakit, *bleaching*, dan fraktur fisik yang kemudian mengarahkan terumbu karang pada kematian. Terumbu karang dapat dikatakan sehat jika persentase terumbu karang hidup pada suatu area lebih dominan daripada terumbu karang mati. Indikator lain yang bisa digunakan untuk menentukan ketidaksehatan suatu terumbu karang antara lain tumbuhnya lumut dan alga serta ditemukannya patahan-patahan di beberapa bagian terumbu karang. Lindahl *et al.* (2001) juga menyebutkan bahwa terumbu karang mati ditunjukkan dengan warna yang semakin memutih dan mulai tumbuh koloni herbivora.

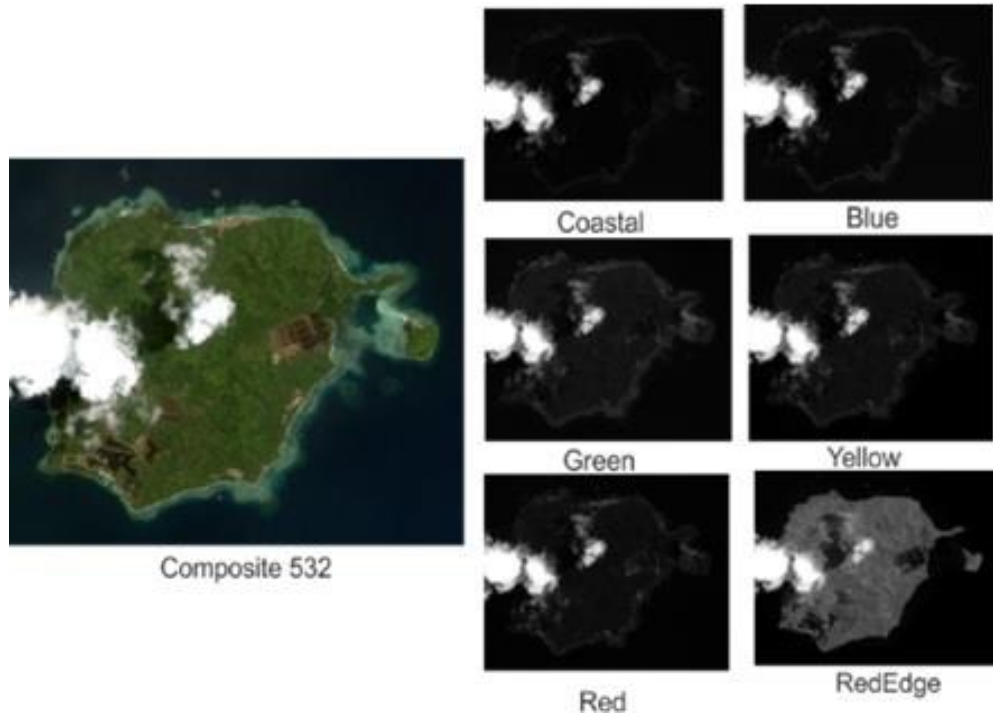
Indonesia sebagai bagian dari segitiga besar terumbu karang merupakan habitat marine dengan luas yang sangat masif. Provinsi Lampung merupakan salah satu bagian minor dari ekosistem tersebut, khususnya pada wilayah Pulau Pahawang. Pulau Pahawang terdiri dari Pulau Pahawang Besar dan Pulau Pahawang Kecil dengan luas 1.084 ha, terletak berdekatan dengan Teluk Punduh secara spesifik di 5°41'53"-5°39'02" LS dan 105°11'44"-105°14'59" BT. Keberadaan terumbu karang menjadikan Pulau Pahawang sebagai destinasi wisata unggulan Provinsi Lampung. Hal ini berimplikasi secara langsung pada degradasi terumbu karang yang sangat cepat karena aktivitas pariwisata dan pelayaran yang semakin meningkat (BPS, 2010). Untuk mengatasi permasalahan tersebut, proses monitoring terumbu karang menjadi satu langkah penting dalam konservasi sumber daya marine agar dapat mengetahui dinamika kondisi ekosistem terumbu karang secara periodik. Hingga kini, metode monitoring terumbu karang yang paling dipercaya adalah survei lapangan. Sayangnya, survei kesehatan terumbu karang pada keseluruhan ekosistem dapat memakan banyak waktu, tenaga, dan biaya. Untuk mengatasi masalah efisiensi monitoring terumbu karang ini, citra satelit mulai dinilai sebagai satu solusi yang menjanjikan. Berbagai teknik pemrosesan citra digital terus berkembang hingga pada titik ia mampu memetakan kesehatan terumbu karang dengan nilai akurasi yang dapat diterima. Penelitian ini memiliki tujuan untuk memetakan kesehatan terumbu karang di Pulau Pahawang melalui citra WorldView-2 (WV-2) dan menguji akurasi peta yang dihasilkan sehingga dapat menjadi justifikasi keabsahan peta kesehatan terumbu karang hasil pemodelan.

METODOLOGI

Bahan

Alat-alat standar survei kelautan berupa GPS dan kamera *underwater* digunakan sebagai instrumen survei lapangan. Transek foto yang dihasilkan dari proses survei lapangan kemudian diproses menggunakan perangkat lunak CPCE (*Coral Point Count with Excel Extension*) oleh Nova Southeastern University untuk menyelidiki kesehatan terumbu karang. Citra WorldView-2 yang disediakan oleh The DigitalGlobe Foundation digunakan sebagai basis pemodelan untuk menghasilkan raster kesehatan terumbu karang. Citra WorldView-2 yang digunakan dalam penelitian ini direkam pada 3 Agustus 2015. Citra ini memiliki enam *band* saluran tampak, yaitu *coastal* (400-450 nm), biru (450-510 nm), hijau (510-580 nm), kuning (585-625 nm), merah (630-690 nm), dan *read-edge* (705-745 nm) dan dua saluran inframerah dekat (770-895 dan 860-1040

nm). Citra WorldView-2 memiliki resolusi radiometrik 16 bit dan resolusi spasial 1,8 m. Untuk mengolah citra WorldView-2, digunakan perangkat lunak ENVI oleh Harris Geospatial.



Gambar 1. Citra WorldView-2 Pulau Pahawang, Lampung

Metode

a. Pra-Lapangan

Koreksi Radiometrik

Koreksi radiometrik berguna untuk memperbaiki nilai *pixel* akibat gangguan atmosfer sehingga nilai *pixel* yang ada pada citra sesuai dengan nilai pantulan objek di lapangan. Danoedoro (2012) menyatakan bahwa koreksi radiometrik yang ditujukan untuk memperbaiki nilai *pixel* supaya sesuai dengan yang seharusnya juga bisa dilakukan dengan mempertimbangkan faktor gangguan atmosfer sebagai sumber kesalahan utama.

$$\text{Radiance} = (\text{DN value} - 1) \cdot \text{Unit Conversion Coefficient} \dots\dots\dots(1)$$

$$P_{TOA} = \frac{\pi \cdot L_{rad \lambda} \cdot d^2}{E_{sun \lambda} \cdot \cos(\theta_s)} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

- Esun = *Band-Averaged Solar Spectral Irradiance*
- θ_s = *Solar Zenith Angle (90°-sun elevation)*
- Lrad () = *Specific Band*
- n = 3,14
- d = *Earth-Sun Distance*
- P_{TOA} = *Corrected Top of Atmospheric pixel value*

Koreksi Sunlint

Penghilangan efek *sunlint* dilakukan dengan menggunakan kanal inframerah dekat mengikuti algoritma yang dikembangkan oleh Hochberg & Atkinson (2000); dan Hedley *et al.* (2005). Koreksi ini dilakukan untuk menghilangkan efek *sunlint* akibat pantulan sinar matahari yang mengenai objek searah dengan sudut perekaman sensor objek.

$$R_{vis}' = R_{vis} - r (R_{NIR} - R_{min(NIR)}) \dots\dots\dots(3)$$

Dimana R_{vis}' adalah nilai *pixel* deglinted, R_{vis} adalah pantulan dari *band* tampak I, r adalah kemiringan regresi, NIR dalam pantulan dari *band* NIR, $R_{min} (NIR)$ adalah nilai minimum *band* NIR.

Koreksi Kolom Air

Koreksi kolom air dilakukan untuk mengekstraksi informasi objek dasar perairan dengan menggunakan metode Lyzenga (1978). Pada metode Lyzenga dibutuhkan dua kanal spektral citra serta rasio antara koefisien atenuasi antara $R(i)$ *band* and $R(j)$. Perhitungan algoritma ini dipengaruhi oleh pasangan kanal i (kanal biru) panjang gelombang terpendek dan j (kanal hijau) panjang gelombang terpanjang. Kanal biru dan kanal hijau memiliki panjang gelombang dengan penetrasi paling baik diantara kanal yang lain (Suwargana, 2008).

$$i_j(Y_{ij}) = \ln(L_i) - [(k_i/k_j) \cdot \ln(L_j)] \dots\dots\dots(4)$$

- Keterangan
 $i_j(Y_{ij})$ = *water column corrected pixel value*
 $\ln(L_i)$ = *log natural band with shorter wave length*
 k_i/k_j = *attenuation coefficient ratio*
 $\ln(L_j)$ = *log natural band with longer wavelength*

$$a = (\sigma_i - \sigma_j) / \sigma_{ij} \dots\dots\dots (5)$$

$$k_i/k_j = a + \sqrt{(a^2 + 1)} \dots\dots\dots(6)$$

- Keterangan
 σ_i = *varians L_i band*
 σ_j = *varians L_j band*
 σ_{ij} = *covarians Y_{ij} band*

Citra WorldView-2 Pulau Pahawang yang telah terkoreksi metode Lyzenga memiliki 15 *band Depth Invariant Index (DII)*. Kemudian *band-band* tersebut akan digunakan untuk melakukan pemodelan kesehatan terumbu karang.

Masking Area Perairan dan Non-Perairan

Pixel yang merepresentasikan area perairan dan non-perairan dilakukan proses *masking* dengan menggunakan *software* ENVI.

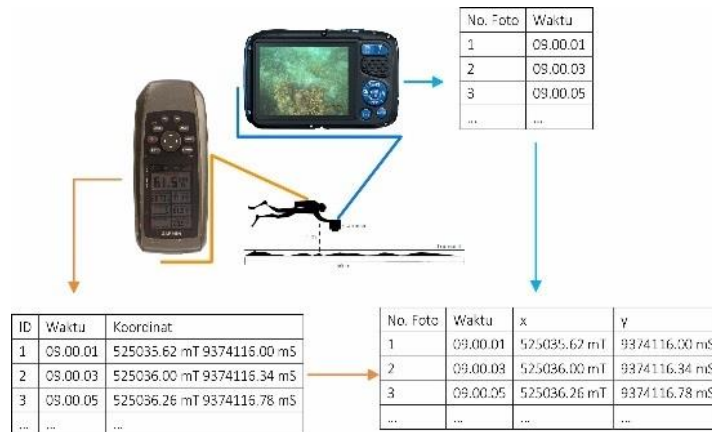
Pemilihan Lokasi Sampel

Metode transek digunakan sebagai kerangka sampling untuk survei kesehatan terumbu karang di Pulau Pahawang seperti yang direkomendasikan oleh Suharsono & Sumadhiharga (2014). Beberapa garis lurus dipilih di beberapa daerah berdasarkan penggunaan lahan yang berbeda di seluruh pulau seperti daerah lahan terbangun, hutan bakau, hutan campuran, dan lahan kosong. Jalur transek digunakan untuk mewakili struktur komunitas karang dengan melihat karang hidup, karang mati, bentuk substrat, alga, dan biota lainnya. Jumlah garis sampel transek yang telah kita lewati adalah 8 garis di Pulau Pahawang atau panjangnya kira-kira 2 km.

b. Tahap Lapangan

Tujuan utama tahap lapangan adalah untuk pengambilan foto terumbu karang dan koordinat menggunakan kamera bawah air dan GPS (Roelfsema & Phinn, 2010) pada sampel jalur transek yang dipilih di Pulau Pahawang. GPS yang telah diatur ke dalam mode *tracking* diletakkan di tas kering mengapung yang terpasang pada snorkeler (Gambar 2). Saat foto

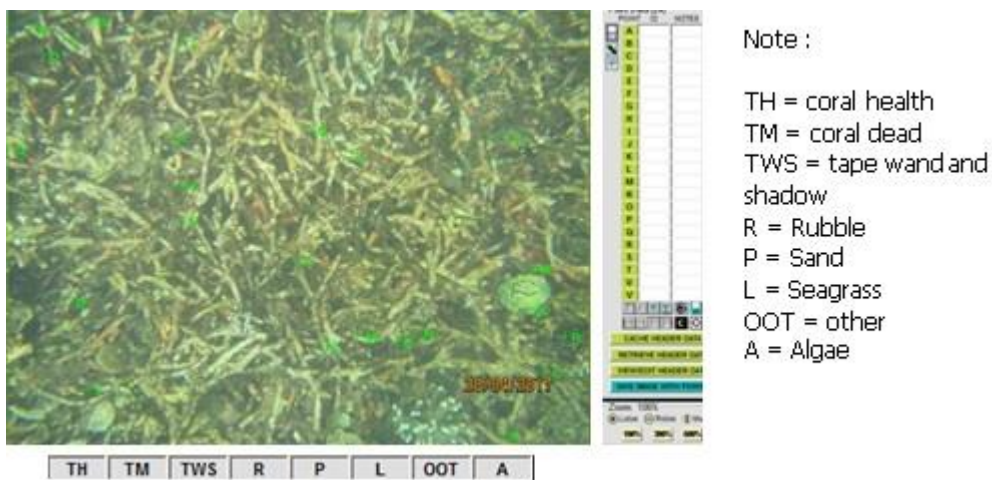
diambil, GPS secara simultan merekam koordinat sehingga diperoleh foto dan lokasi yang sesuai dengan sinkronisasi waktu dalam setiap dua detik. Tahap lapangan ini memberikan hasil 2754 foto mentah melintasi jalur sampel transek dan koordinat per foto.



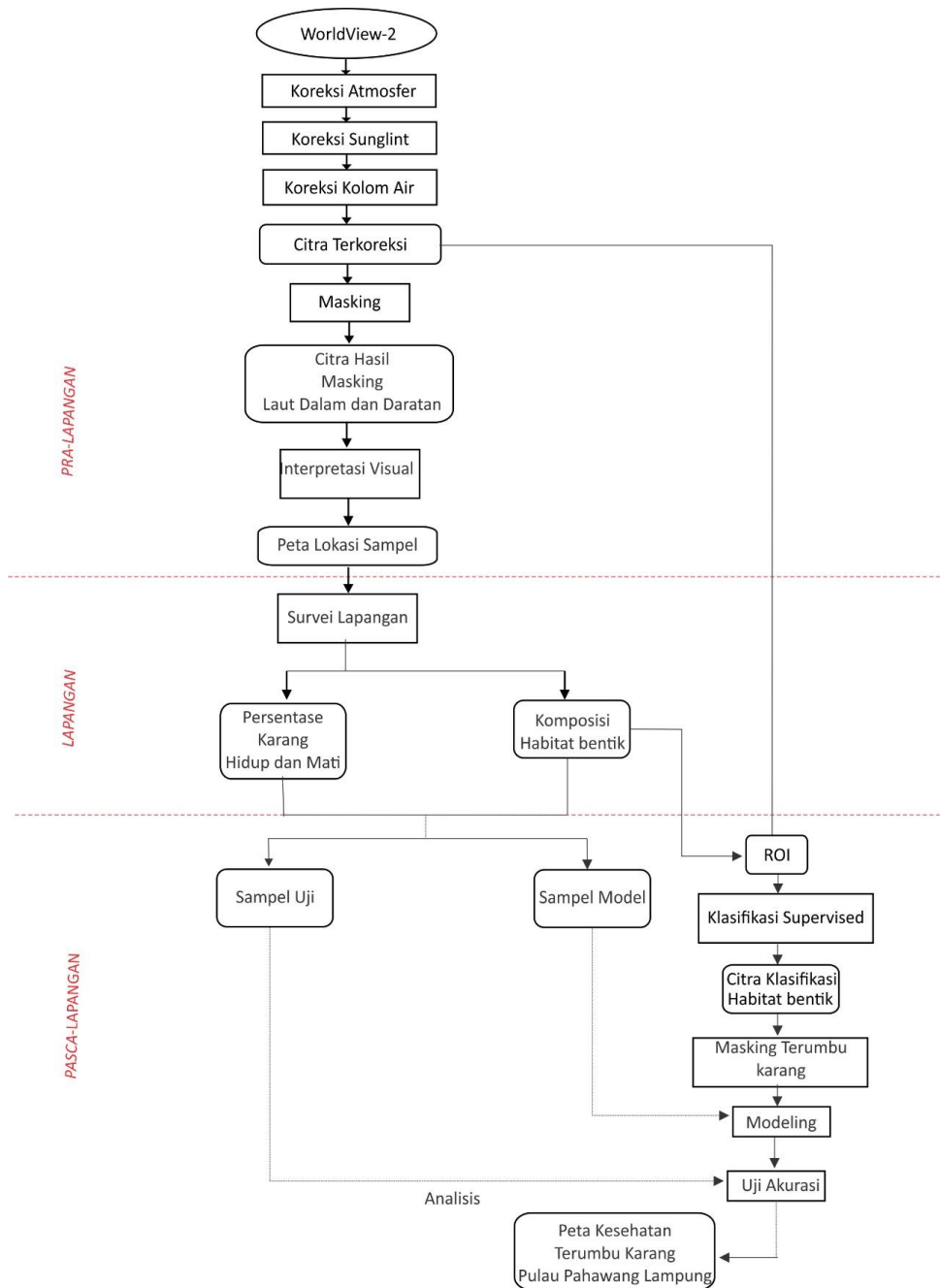
Gambar 2. Ilustrasi Tahap Lapangan

c. Pasca-Lapangan

Koordinat dan foto yang diperoleh dengan kerja lapangan kemudian disinkronkan secara otomatis (*geo-tagged*) dengan mencocokkan waktu yang direkam (Gambar 2). Beberapa foto yang berisi anomali, seperti multi koordinat atau foto buram, dieliminasi untuk meminimalkan kesalahan sehingga berkurang dari 2754 menjadi 1001 foto. Setiap foto dengan *tag-geo* dianggap sebagai perwakilan dari satu *pixel* dalam citra. Tipe habitat bentik foto tersebut kemudian disintesis dalam basis titik terdistribusi acak melalui perangkat lunak CPCe (Gambar 3). Tipe habitat bentik utama mengacu pada Wicaksono (2015) menjadi enam kelas: karang sehat, karang mati, reruntuhan, rumput laut, alga makro, substrat terbuka, dan lainnya. Interpretasi *pixel* tersebut sebagian digunakan sebagai input sampel pelatihan untuk menghasilkan "Peta Habitat Bentik", sementara data yang lain digunakan untuk menilai keakuratan melalui *confusion matrix* (Congalton & Green, 2009). Kelas karang di habitat bentik itu sendiri kemudian diisolasi (*masking*) dari kelas lainnya sehingga terbedakan antara karang mati dan hidup sebagai dasar penilaian kesehatan terumbu karang. Kesehatan terumbu karang yang diteliti dalam paper ini didefinisikan sebagai rasio daerah terumbu karang aktual (sehat) per total luas terumbu karang (sehat dan mati) di area *pixel* satuan tunggal. Data rasio yang dihitung oleh CPCe sebagian digunakan sebagai input untuk sampel model sedangkan yang lainnya digunakan sebagai sampel validasi. Model ini dibuat dengan melakukan analisis statistik bivariat (regresi linear, eksponensial, dan polinomial) antara nomor digital pada *band* DII dan nilai rasio kesehatan terumbu karang (dari perhitungan CPCe) untuk kemudian diukur akurasinya menggunakan metode *Standard Error Estimation*.



Gambar 3. Identifikasi Kelas Habitat Bentik



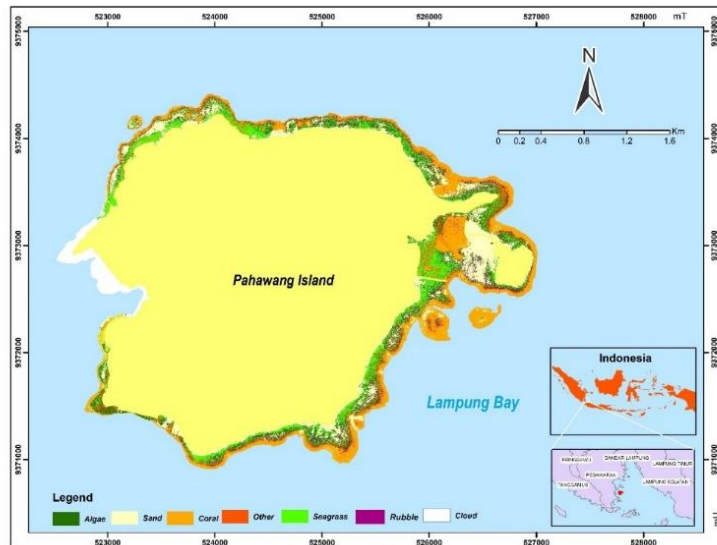
Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemetaan Habitat Bentik

Ekstraksi informasi habitat bentik adalah tahap awal dalam memetakan kesehatan terumbu karang. Pemetaan habitat bentik bertujuan untuk memisahkan setiap kelas tutupan dasar perairan, terutama memisahkan tutupan terumbu karang dengan yang lainnya (Gambar 3.) Informasi habitat bentik diperoleh melalui proses klasifikasi multispektral menggunakan algoritma *maksimum likelihood*. Duapuluh saluran yang digunakan terdiri dari 15 *band* DII dan 6 *band* visible (*coastal, blue, green, yellow, red*) dari WorldView-2 sebagai input citra dan 501 sampel model lapangan sebagai sampel model. Untuk mengetahui akurasi hasil klasifikasi habitat bentik, dilakukan uji akurasi menggunakan *confussion matrix* (Tabel 1). 526 sampel uji data lapangan digunakan untuk memvalidasi hasil klasifikasi habitat bentik. Hasil klasifikasi dengan akurasi habitat bentik terbaik diperoleh melalui saluran komposit 532 pada saluran *visible*, dengan nilai akurasi 40,30% dan koefisien kappa 0,4028. Meskipun akurasinya kurang tinggi, persentase tersebut dapat membenarkan bahwa hasil klasifikasi habitat bentik dengan saluran multispektral dianggap sebagai

referensi yang cukup baik untuk memisahkan tutupan terumbu karang dengan tutupan dasar perairan lainnya.



Gambar 5. Peta Klasifikasi Habitat Bentik Pulau Pahawang, Lampung, Indonesia

Tabel 1. Confussion Matrix

Predict	Algae	Sand	Rubble	Other	Sea grass	Coral	Total	%	a
Algae	12	1	20	3	22	62	120	10.00	0.228137
Sand	3	5	0	0	1	10	19	26.32	0.036122
Rubble	4	0	93	1	0	40	138	67.39	0.262357
Other	10	2	9	8	12	26	67	11.94	0.127376
Sea grass	11	2	5	14	58	46	136	42.65	0.258555
Coral	1	0	9	0	0	36	46	78.26	0.087452
Total	41	10	136	26	93	220	526		
%	29	50	68	31	62	16		212	
A	0.0779	0.0190	0.2586	0.0494	0.1768	0.4183			40.30418
agreement	12	5	93	8	58	36		212	
by chance	0.01778	0.00069	0.06783	0.00630	0.04571	0.03658		0.17489	
Kappa	0.4028		Overall acc.	40.30418					

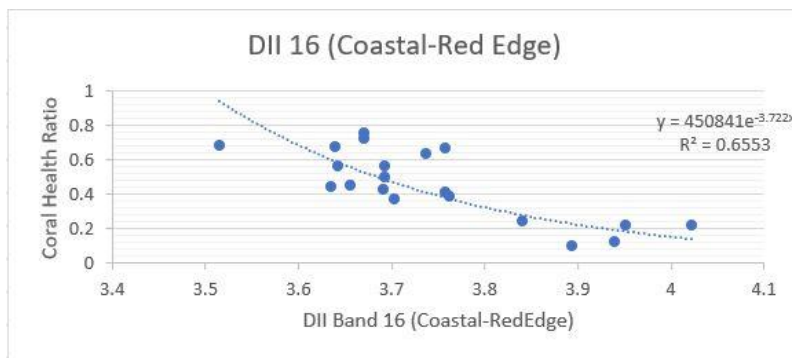
Pemetaan Kesehatan Terumbu Karang

Memetakan kesehatan terumbu karang membutuhkan dua data utama untuk memodelkan kesehatan terumbu karang: nilai rasio kesehatan terumbu karang dan sebaran *pixel* terumbu karang di 15 *band* DII. Nilai rasio kesehatan terumbu karang diambil melalui perangkat lunak CPE dengan membagi persentase karang hidup dengan persentase total karang hidup dan karang mati. Sementara untuk sebaran tutupan terumbu karang di *band* DII diperoleh melalui transformasi citra menggunakan algoritma lyzenga dan pemotongan citra sesuai sebaran tutupan terumbu karang menggunakan perangkat lunak ENVI. Data rasio kesehatan terumbu karang perlu dipastikan apakah memiliki distribusi normal atau tidak dengan proses normalisasi menggunakan statistik Kolmogorov Smirnov. Tes ini penting untuk membantu kita menentukan apakah data rasio kesehatan terumbu karang akan diproses lebih lanjut menggunakan teknik statistik parametrik atau nonparametrik. Hasil uji Kolmogorov-Smirnov menunjukkan bahwa semua nilai D_n max lebih rendah dari $D_{n\alpha}$. Kita dapat menyimpulkan bahwa data rasio kesehatan terumbu karang terdistribusi normal ($mean = 0$, standar deviasi = 1) oleh karena itu teknik statistik parametrik digunakan untuk analisis lanjutan data tersebut. Pemodelan kesehatan terumbu karang dilakukan dengan menilai arah hubungan, kekuatan, dan bentuk antara nilai *pixel* (*band* DII) dan rasio kesehatan terumbu karang. Untuk mengetahui hal tersebut, digunakan regresi sebagai teknik analisis statistik bivariat. Tiga jenis regresi yang diterapkan untuk menghasilkan model kesehatan

terumbu karang yaitu regresi linier, regresi polinomial, dan regresi eksponensial. Variabel dependen untuk regresi tersebut adalah nilai *pixel* pada 15 *band* DII sedangkan variabel independen adalah sampel model lapangan yang berupa nilai rasio kesehatan terumbu karang. Hasil regresi prediktor terbaik ditunjukkan dengan nilai koefisien determinasi dan persentase akurasi yang tinggi. Persentase akurasi dihitung dari *standard error* antara nilai kesehatan terumbu karang yang diprediksi dan nilai kesehatan terumbu karang aktual sebagai sampel validasi. Berdasarkan tabel, regresi eksponensial yang melibatkan DII B16 (Saluran Coastal dan Red Edge) dengan persamaan $y = 450841e^{-3.722x}$ memiliki nilai determinasi tertinggi (R^2) sebesar 0,6553 dan akurasi 70,191%.

Tabel 2. Regresi Model Kesehatan Terumbu Karang

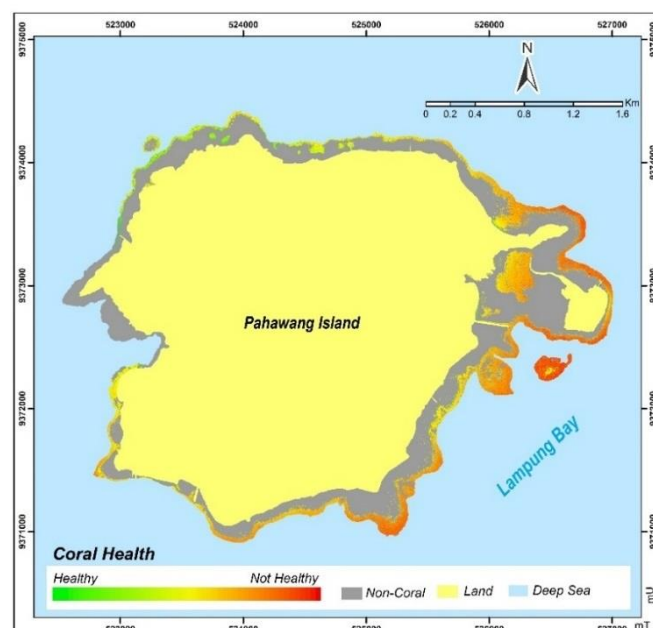
DII Band	Linear	R ²	Polynomial	R ²	Exponential	R ²
B12	$y = 1.593x + 1.7285$	$R^2 = 0.0134$	$y = 124.17x^2 + 200.89x + 81.666$	$R^2 = 0.0391$	$y = 5.9898e^{3.3877x}$	$R^2 = 0.0072$
B13	$y = 2.2622x + 2.8842$	$R^2 = 0.0533$	$y = 96.363x^2 + 210.36x + 115.19$	$R^2 = 0.0912$	$y = 194.01e^{5.7614x}$	$R^2 = 0.0412$
B14	$y = 1.0304x + 1.3039$	$R^2 = 0.0158$	$y = 111.67x^2 + 186.59x + 78.317$	$R^2 = 0.1351$	$y = 3.3317e^{2.5762x}$	$R^2 = 0.0118$
B15	$y = -0.6877x + 0.0467$	$R^2 = 0.0111$	$y = 42.563x^2 + 52.038x + 16.314$	$R^2 = 0.0555$	$y = 0.0948e^{-2.418x}$	$R^2 = 0.0163$
B16	$y = -1.2547x + 5.1536$	$R^2 = 0.6251$	$y = -0.3286x^2 + 1.2326x + 0.4518$	$R^2 = 0.6261$	$y = 450841e^{-3.722x}$	$R^2 = 0.6553$
B23	$y = 4.2645x + 2.7355$	$R^2 = 0.1267$	$y = -5.8157x^2 - 1.9369x + 1.0839$	$R^2 = 0.1268$	$y = 223.33e^{11.833x}$	$R^2 = 0.1162$
B24	$y = 0.735x + 0.4727$	$R^2 = 0.0097$	$y = 44.112x^2 + 3.48x + 0.4815$	$R^2 = 0.0364$	$y = 0.42e^{2.1575x}$	$R^2 = 0.0099$
B25	$y = -1.1631x + 1.0298$	$R^2 = 0.0605$	$y = -1.3351x^2 + 0.0503x + 0.7584$	$R^2 = 0.0607$	$y = 2.3057e^{-3.551x}$	$R^2 = 0.0672$
B26	$y = -0.5676x + 6.3221$	$R^2 = 0.6421$	$y = -0.0075x^2 - 0.4118x + 5.5099$	$R^2 = 0.6421$	$y = 1E+07e^{-1.677x}$	$R^2 = 0.6678$
B34	$y = -0.6045x + 1.0191$	$R^2 = 0.0173$	$y = 5.8612x^2 - 11.548x + 6.1161$	$R^2 = 0.0213$	$y = 1.8443e^{-1.641x}$	$R^2 = 0.0152$
B35	$y = -1.1329x + 2.5404$	$R^2 = 0.1573$	$y = -3.7721x^2 + 12.374x - 9.5243$	$R^2 = 0.18$	$y = 194.15e^{-3.362x}$	$R^2 = 0.165$
B36	$y = -0.3664x + 6.5354$	$R^2 = 0.6522$	$y = 0.018x^2 - 0.9695x + 11.584$	$R^2 = 0.6525$	$y = 2E+07e^{-1.081x}$	$R^2 = 0.6758$
B45	$y = -2.6161x + 2.1871$	$R^2 = 0.2254$	$y = -23.457x^2 + 27.702x - 7.5741$	$R^2 = 0.2792$	$y = 75.339e^{-7.917x}$	$R^2 = 0.2459$
B46	$y = -0.5462x + 6.3963$	$R^2 = 0.6794$	$y = 0.1352x^2 - 3.5189x + 22.719$	$R^2 = 0.6822$	$y = 2E+07e^{-1.612x}$	$R^2 = 0.7046$
B56	$y = -0.704x + 6.4653$	$R^2 = 0.6847$	$y = 0.3922x^2 - 7.4775x + 35.684$	$R^2 = 0.6921$	$y = 2E+07e^{-2.073x}$	$R^2 = 0.7069$



Gambar 6. Grafik regresi eksponen *band* DII B16 dan Ratio kesehatan terumbu karang

Persamaan $y = 450841e^{-3.722x}$ menunjukkan bahwa rasio kesehatan terumbu karang dan pantulan objek bawah laut memiliki korespondensi negatif. Rasio kesehatan terumbu karang yang lebih tinggi dibandingkan *band* lainnya, reflektansi spektral yang lebih rendah mengikuti pola eksponensial. Nilai koefisien determinasi (R^2) adalah 0,655 yang berarti bahwa mereka memiliki korespondensi yang kuat. Nilai 0,655 menunjukkan bahwa 65% kesehatan terumbu karang dapat dijelaskan melalui pantulan spektrum bawah laut sedangkan 35% lainnya dijelaskan oleh variabel

lain yang tidak diketahui. Reflektansi spektral yang digunakan pada percobaan tersebut memiliki pola yang sama satu sama lain. Ada kecenderungan menunjukkan bahwa *band* DII red-edge kemungkinan besar memiliki korespondensi yang kuat dengan rasio kesehatan terumbu karang. Hal tersebut yang sama dengan fakta bahwa *band* red-edge memiliki respon spektral yang sensitif terhadap karang di antara *band* lainnya. Akurasi pemodelan 70,191% mengindikasikan prediksi kesehatan terumbu karang cukup efisien. Sebagian percaya bahwa jumlah persentase ini kurang memuaskan. Dalam kasus ini, akurasi rendah bisa terjadi karena beberapa alasan. Pertama, indikasi kesalahan karena isolasi (karang dari kelas habitat bentik lainnya) dimulai sehingga permulaan klasifikasi habitat bentik tidak begitu bagus. Kedua, dapat terjadi bias pada informasi spektral objek bawah laut karena beberapa karang memiliki alga di atasnya dan secara langsung mempengaruhi pantulan spektral dengan nilai *pixel* yang rendah dan dianggap sehat (lihat persamaan regresi) walaupun mungkin memiliki penyakit (ditunjukkan dengan alga). Ketiga, WorldView-2 yang digunakan dalam penelitian ini dicatat pada bulan Agustus 2015, sementara penelitian lapangan dilakukan pada bulan Maret 2017. Dapat terjadi kemungkinan adanya perubahan kondisi karang selama rentang waktu tersebut sehingga menghasilkan sampel yang salah dan menyebabkan adanya kesalahan di beberapa bagian model tersebut.



Gambar 6. Peta kesehatan terumbu karang pulau Pahawang menggunakan regresi eksponen dari *band* ratio dan DII *band red-edge*

Berdasarkan peta kesehatan terumbu karang yang dihasilkan (Gambar 6), ekosistem perairan dangkal di Pulau Pahawang didominasi oleh terumbu karang yang sakit. Distribusi spasial terumbu karang sehat terkonsentrasi di bagian barat laut Pulau Pahawang sedangkan wilayah lainnya didominasi oleh terumbu karang yang sakit. Bagian barat laut Pulau Pahawang didominasi oleh vegetasi alami yang tidak terganggu dengan intervensi manusia di Pulau ini. Selain wilayah ini, ada indikasi bahwa terumbu karang yang sakit dipengaruhi oleh aktivitas manusia, misalnya aktivitas keluar-masuk kapal, pembangunan infrastruktur, budidaya perikanan, dan pariwisata di Pulau Pahawang. Kondisi ini memungkinkan adanya dampak negatif terhadap komposisi dan kesehatan terumbu karang. Jika degradasi ini terus terjadi, spesies laut yang tak terhitung jumlahnya akan kehilangan tempat tinggal dan sumber makanannya, sehingga tidak dapat bertahan hidup. Hal ini dapat menyebabkan keanekaragaman hayati menurun sehingga ekosistem laut tidak seimbang.

KESIMPULAN

Pemodelan kesehatan terumbu karang terutama dilakukan dengan analisis regresi antara nilai pantulan spektral objek bawah laut dan nilai rasio kesehatan terumbu karang. Nilai pantulan spektral objek bawah laut diambil dari citra WorldView-2 yang dikoreksi sampai tingkat kolom air

menggunakan metode Lyzenga. Metode Lyzenga menghasilkan 15 *band Depth Invariant Bottom Index* (DII) yang terpisah. Masing-masing *band* DII yang berhubungan dengan gelombang *red-edge* cenderung memberi akurasi lebih tinggi dibanding *band* DII lainnya. Hasil yang lebih baik dihasilkan dengan regresi eksponensial antara nilai DII B16 (*coastal* dan *red*) dan rasio kesehatan terumbu karang memberikan akurasi 70,191% dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,6553. Hal ini menunjukkan hasil yang efisien yang membuktikan bahwa ada hubungan yang kuat antara DII B16 dan rasio kesehatan terumbu karang.

Beberapa asumsi dapat menjelaskan mengapa akurasi pemetaan kesehatan karang tidak lebih tinggi: 1) adanya kemungkinan kesalahan dari pembuatan peta habitat bentik; 2) bias dari kondisi aktual; 3) waktu yang berbeda antara perekaman citra dan perolehan data lapangan. Meskipun kesalahan masih dapat ditemukan, namun tidak mengubah fakta bahwa citra penginderaan jauh memiliki potensi besar untuk menjadi instrumen pemantauan ekosistem. Asumsi penyebab kesalahan dapat menjadi tantangan bagi peneliti untuk meminimalisirnya dan memanfaatkan penginderaan jauh secara maksimal

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada The DigitalGlobe Foundation yang telah mendukung penelitian kami di Pulau Pahawang, Lampung, Indonesia dan menyediakan citra WorldView-2 secara gratis mencakup seluruh area kajian.

DAFTAR PUSTAKA

- BPS (Badan Pusat Statistik) Provinsi Lampung. (2017). Provinsi Lampung dalam Angka 2017. <https://lampung.bps.go.id/>
- Congalton, R.G. & K. Green. (2009). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices: Second Edition*. CRC Press, Taylor & Francis Group. Boca Raton.
- Danoedoro, P. (2012). Introduction to Digital Remote Sensing. Penerbit Andi. Yogyakarta.
- Hedley, J.D., A.R. Harborne, & P.J. Mumby. (2005). Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*, 26(10): 2107-2112.
- Hochberg, E.J & M.J. Atkinson. (2000). Spectral discrimination of coral reef benthic communities. *Coral Reefs*, 19:164-171.
- Moberg, F. & C. Folke. (1999). Ecological goods and services of coral reef ecosystem. *Ecological Economics*, 29: 215-233.
- Lindahl, U., M.C. Ohman, & C.K. Schelten. (2001). The 1997/1998 mass mortality of corals: effects on fish communities on a Tanzanian coral reef. *Marine Pollution Bulletin*, 42:127-131.
- Lyzenga, D.R. (1978). Passive Remote Sensing Techniques for Mapping Water Depth and Bottom Features. *Applied Optics*, 17(3): 379-383.
- Reid, C., N.J. Marshall, B. Logan, & D. Kleine. (2009). *Coral Reef and Climate Change: the guide for education and awareness*. CoralWatch, The University of Queensland. Brisbane.
- Roelfsema, C. & S. Phinn. (2010). Integrating field data with high spatial resolution multispectral satellite imagery for calibration and validation of coral reef benthic community maps. *Journal of Applied Remote Sensing*, 4:1-28.
- Suharsono. (2008). *Jenis-jenis karang di Indonesia*. Program COREMAP II - LIPI. Jakarta. pp 372
- Suharsono & O.K. Sumadhiharga. (2014). *Panduan Monitoring Kesehatan Terumbu Karang*. COREMAP CTI LIPI. Jakarta.
- Spalding, M.D., F. Blasco, & C.D. Field (Eds.). (1997). *World Mangrove Atlas*. The International Society for Mangrove Ecosystem. Okinawa, Japan: 5-15.
- Suwargana, N. (2008). Mangrove Landuse Change Analysis Using Remote Sensing Dara in Bahagia Island, Muara Gembong, Bekasi. *Jurnal Penginderaan Jauh*, 5(1):64-74.
- Wicaksono, P. (2015). *Benthic Habitat Landscape Mapping Using Multi Spectral Remote Sensing in Kemujan Island, Karimun Jawa*. Proceeding of National Seminary and Workshop on Applied Technology, Vocational School Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, November, 14th 2015.