

PENDUGAAN POTENSI CADANGAN KARBON HUTAN DI ATAS PERMUKAAN PADA EKOSISTEM MANGROVE BERBASIS SYNTHETIC APERTURE RADAR L-BAND

Yudi Fatwa Hudaya¹, Hartono² dan Sigit Heru Murti³

Balai Besar Penelitian Bioteknologi dan Pemuliaan Tanaman Hutan, Kementerian Kehutanan, Indonesia¹, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia^{2,3}
yudi210@yahoo.com

Diterima : Februari 2014 ; Direvisi : April 2014; Dipublikasikan: 30 September 2014

ABSTRAK Kebijakan pemerintah untuk menurunkan tingkat emisi GRK (Gas Rumah Kaca) dari sektor kehutanan membutuhkan sistem pendugaan kandungan karbon hutan untuk cakupan wilayah geografis yang luas dan waktu pengukuran yang cepat. Salah satu alternatifnya melalui pemanfaatan citra satelit synthetic aperture radar (SAR). Penelitian ini bertujuan untuk membuktikan sensitivitas gelombang-L dari citra ALOS PALSAR terhadap nilai kandungan karbon di atas permukaan pada hutan mangrove. Penelitian dilakukan pada kawasan hutan mangrove, di Kabupaten Kubu Raya, Provinsi Kalimantan Barat. Metode penyusunan model dilakukan berdasarkan analisis kuantitatif menggunakan persamaan regresi, dengan cara mengkorelasikan nilai backscatter yang diekstrak dari citra ALOS PALSAR Res.50m pada polarisasi HH dan HV dengan nilai kandungan biomassa aktual hasil pengukuran lapangan berbasis plot alometrik. Model penduga yang dihasilkan kemudian digunakan untuk menghitung jumlah cadangan karbon dan sebarannya secara geografis. Ditemukan hubungan yang kuat dengan koefisien determinasi (R^2) mencapai 62% pada polarisasi HH dengan bentuk persamaan $Y=1647e0,358BS_HH$ dan, 98,6% pada polarisasi HV dengan bentuk persamaan $Y = 6,828BS_HV2 + 279,4BS_HV + 2870$; Berdasarkan model persamaan tersebut dihasilkan dua buah peta kelas kerapatan karbon model-1 (HH) dan model-2 (HV). Kandungan biomassa di atas permukaan (Aboveground biomass-AGB) pada hutan mangrove di Kabupaten Kubu Raya diketahui sebesar 178,43 Mg/ha; sedangkan potensi karbon di atas permukaan (aboveground biomass carbon) diketahui sebesar 5.334.454,9 Mg (Megagram) atau 5,3 Mt (Megaton) karbon, dan kemampuan dalam menyerap karbondioksida (CO_2) adalah sebesar 19,451 Mt (Megaton) CO_2 equivalent. Sensitivitas gelombang-L citra ALOS PALSAR terhadap objek yang diamati diperkirakan akan menurun pada saat karbon aktual tertinggi di lapangan mencapai 335,15 Mg ha⁻¹. Dalam konteks mitigasi perubahan iklim, hutan mangrove di Kubu Raya dengan luas 71.069,21 Ha apabila dipertahankan keberadaannya maka akan berkontribusi mengurangi tingkat emisi GRK dari sektor kehutanan sebesar 0,76 %.

Kata kunci : ALOS PALSAR, mangrove, Gas Rumah Kaca, alometrik, karbon

ABSTRACT The government policy to reduce the GHG (Green House Gas) emission from forestry sector, the need for sufficient forest carbon stock measurement system which encompass a faster measurement and covering broader geographic area to estimate the potential of forest carbon stock is now growing, one of which is the use of synthetic aperture radar (SAR) in radar remote sensing systems. The objectives of this study are to demonstrate the strong relationship between the L-band backscatter of ALOS PALSAR and the aboveground carbon stock in mangrove forest; and its sensitivity level. The information resulted from this study can be useful in reducing strategies of GHG (Green House Gases) emission, due to the climate change mitigation efforts in Indonesia. The study site was located at the area of mangrove forest, in Kubu Raya regency, West Kalimantan. The estimation models for aboveground biomass carbon stock was obtained from a quantitative analysis using regression method; i.e. by correlating the values of ALOS PALSAR 50m Res. backscatters at HH and HV polarization with the actual biomass total amount resulted from field-based allometric plots measurements. The estimation models were subsequently use for forest carbon stocks quantification in mangroves, and its distribution geographically. Strong relationship was found with coefficient of determination (R^2) 62 % on HH polarization based on the equation model of $Y=1647e0,358BS_HH$ and , 98.6 % on HV polarization based on the equation model of $Y = 6,828BS_HV2 + 279,4BS_HV + 2870$; two models of carbon density classification maps i.e. model-1 (HH) and model-2 (HV) are also resulted from the two equation models. The quantity of AGB (aboveground biomass) of mangrove forest in Kubu Raya district found as 178.43 Mg/ ha, while the aboveground biomass carbon is 5,334,454.9 Mg (Mega grams) or 5,3 Mt (Mega tons) of carbon, and the capacity of carbon dioxide (CO_2) sequestration is 19.451 Mt (megatons) CO_2 equivalent. The Sensitivity of L-band of ALOS PALSAR illumination on the object was expected to reach its saturation point when the highest total amount of actual carbon stock at field achieved the 335,15 Mg ha⁻¹. In the context of climate change mitigation, the 71,069.21 ha area of mangrove forests in Kubu Raya if it remain save and be avoided from further deforestation and forest degradation, it will contribute to reduce the rate of GHG emissions from forestry sector by 0.76 %.

Key words: ALOS PALSAR, mangrove, Green House Gas, allometry, carbon

PENDAHULUAN

Perubahan iklim terjadi karena adanya peningkatan kandungan karbon dioksida (CO₂) di atmosfer. Sebagaimana diketahui CO₂ merupakan unsur penyusun GRK (Gas Rumah Kaca) yang paling dominan yaitu mencapai 99,4% dari keseluruhan GRK [U.S. Department of Energy, 2001]. Indonesia telah menjadi negara penghasil emisi GRK ketiga terbesar di dunia setelah Amerika Serikat dan China, hal ini disebabkan oleh pelepasan karbondioksida secara signifikan terutama akibat meluasnya deforestasi (konversi hutan menjadi penggunaan lain seperti pertanian, perkebunan, pemukiman, pertambangan, prasarana wilayah) dan degradasi (penurunan kualitas hutan akibat *illegal logging*, kebakaran, *over cutting*, perladangan berpindah, dan perambahan hutan). Angka rata-rata deforestasi tahunan periode 2006-2009 di Indonesia mencapai 0,83 juta hektar per tahun. [Kemenhut \[2011\]](#), sebelumnya sumber lain menyebutkan 2 juta ha per tahun [Hansen, 2006]. Berdasarkan data historis sampai dengan tahun 2003, diperkirakan tingkat emisi karbon dari sektor kehutanan di Indonesia mencapai 2.563 Mt (Megaton) CO₂ equivalent [PEACE, 2007]. Hutan mangrove terbukti memiliki simpanan karbon terbesar dibandingkan dengan tipe hutan lainnya di kawasan tropis [Murdiyarto *et al.*, 2009]. Akan tetapi tingginya tingkat emisi karbon dari sektor kehutanan akibat deforestasi dan degradasi hutan menyebabkan hutan mangrove juga berpotensi sebagai penyumbang emisi GRK yang signifikan.

Berdasarkan Perpres Nomor 61 Tahun 2011 tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca, pemerintah saat ini telah menetapkan target pengurangan emisi GRK sampai dengan tahun 2020, yaitu sebesar 26% atas usaha sendiri atau sebesar 41% apabila dibantu dengan pendanaan Internasional. Mekanisme insentif atas jasa lingkungan dengan tujuan untuk mengurangi emisi GRK yang berasal dari deforestasi dan degradasi hutan dilakukan melalui mekanisme REDD+ (*Reducing Emission from Deforestation and Forest Degradation plus*) yang merupakan kelanjutan dari Protokol Kyoto terkait kesepakatan internasional tentang perubahan iklim global sebelumnya yang telah berakhir pada tahun 2012.

REDD+ di Indonesia telah dipersiapkan oleh pemerintah sejak tahun 2007 dan implementasinya dilaksanakan mulai tahun 2013 [Kemenhut, 2010]. Dalam skema REDD+ terdapat dua parameter yang digunakan untuk menilai keberhasilannya yaitu: 1) perubahan luas tutupan hutan, dan 2) perubahan

cadangan karbon hutan [IFCA, 2008]. Ketersediaan basis data dari kedua parameter ini sangat penting dalam penyelenggaraan REDD+, karena diperlukan dalam penentuan tingkat acuan emisi karbon (*Reference Emission Level*) di tingkat nasional, sehingga kegiatan pengukuran perubahan luas tutupan hutan dan perubahan cadangan karbon ini akan terus menerus dibutuhkan dan dikembangkan teknologinya.

Diantara teknologi penginderaan jauh yang tersedia, penggunaan data SAR untuk tujuan pendugaan dan pendeteksian perubahan cadangan karbon masih merupakan yang terbaik yang bisa dicapai [Scott, 2009; Pons, 2010]. Berdasarkan studi pustaka dan hasil penelitian sebelumnya diketahui terdapat hubungan yang kuat antara nilai *backscatter* pada citra ALOS PALSAR dan nilai kandungan karbon di atas permukaan pada tipe-tipe vegetasi hutan di kawasan tropis, dengan koefisien determinasi mencapai 61% - 76%, tingkat saturasi atau penurunan sensitivitas penanda *backscatter* terjadi pada saat biomassa yang diamati telah mencapai 100 - 200 Mg ha⁻¹ [Ni, 2012; Lucas, 2010; Mitchard, 2009; Lucman *et al.*, 1997], sehingga nilai *backscatter* citra ALOS PALSAR ini diyakini cocok untuk digunakan sebagai penanda dalam pendugaan volume biomassa untuk tegakan hutan mangrove.

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk membuktikan adanya hubungan yang kuat antara nilai *backscatter* gelombang-L dari citra ALOS PALSAR dengan nilai kandungan karbon di atas permukaan pada hutan mangrove dan tingkat sensitivitas-nya. Disamping itu penelitian ini juga memiliki tiga sasaran yaitu untuk:

1. Menyusun model pendugaan karbon di atas permukaan pada tipe hutan mangrove berdasarkan citra ALOS PALSAR.
2. Menghitung jumlah cadangan karbon di atas permukaan pada hutan mangrove di Kabupaten Kubu Raya berdasarkan citra ALOS PALSAR.
3. Menyusun peta kelas kerapatan karbon di atas permukaan pada hutan mangrove di Kabupaten Kubu Raya berdasarkan citra ALOS PALSAR.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di kawasan hutan mangrove Kabupaten Kubu Raya, Propinsi Kalimantan Barat, secara astronomis terletak pada 108°35' BT - 109°58' BT; 0°44'LU - 1°01' LS. Bahan yang digunakan dalam penelitian yaitu berupa: 1) Data level 1.5 citra ALOS PALSAR (1270 MHz Saluran-L) dengan spesifikasi: resolusi spasial 50m; tahun perekaman 2009; tipe polarisasi FBD (*Fine Beam Dual*) HH dan HV; sudut

perekaman 34,3 derajat; ROI: Kabupaten Kubu Raya, Kalimantan Barat; dan 2) Data hasil pengukuran lapangan berbasis plot, berupa data dimensi pohon jenis-jenis mangrove, dan data hasil pengukuran sampah kayu (*nekromassa*). Disamping data pendukung lainnya yaitu terdiri dari Peta Topografi Kabupaten Kubu Raya, skala 1: 50.000, dan Peta Lingkungan Laut Nasional, skala 1 : 500.000.

Penelitian ini difokuskan pada pengujian sensitivitas sinyal volumetrik (*volume scattering*) dari FBD (*Fine Beam Dual*) gelombang-L (1270 MHz/ 23,6 cm) polarisasi HH dan HV citra ALOS PALSAR resolusi 50 m, terhadap parameter biomassa di atas permukaan (*aboveground biomass, AGB*) pada hutan mangrove, kemudian ditentukan model penduganya. Metode penyusunan model dilakukan melalui analisis kuantitatif menggunakan metode regresi, yaitu dengan mengkorelasikan nilai *backscatter* dari citra ALOS PALSAR pada polarisasi HH dan HV dengan nilai kandungan biomassa aktual hasil pengukuran lapangan berbasis plot alometrik. Tahapan kegiatan dalam penelitian ini meliputi pengolahan citra digital, pengambilan data lapangan berdasarkan penentuan sampel hasil pengolahan citra, pengolahan data lapangan, pengolahan data citra, pembuatan model penduga biomassa, dan pemetaan karbon (Gambar 1).

Nilai *backscatter* diperoleh dengan cara membuat buffer pada titik pengamatan dilapangan dengan ukuran 2×2 piksel pada resolusi 50 m atau setara dengan 100×100 meter menggunakan ekstensi square buffer pada ArcGIS 9.3; hal ini dilakukan berdasarkan pertimbangan pergeseran citra dengan RMSE 0,493. *Square buffer* yang dihasilkan kemudian digunakan sebagai ROI (*Region of Interest*), untuk selanjutnya dikalibrasi menjadi nilai hamburan balik (*backscatter*) dengan menggunakan formulasi dari [Shimada et al. \[2009\]](#) sebagai berikut:

$$NRCS(dB) = 10 \cdot \log_{10}(\langle DN^2 \rangle) + CF \dots \dots \dots (1)$$

dimana NRCS = Nilai *backscatter*, DN^2 = derajat nilai digital, dan CF = -83,0 (faktor kalibrasi). Dari perhitungan tersebut dihasilkan nilai *sigma naught* (σ_0).

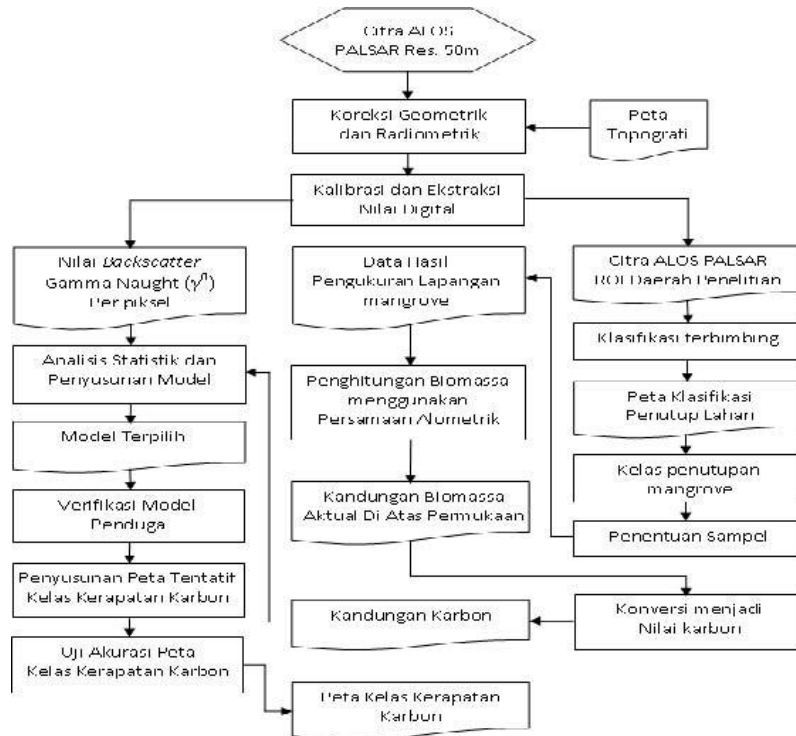
Selanjutnya nilai *sigma naught* (σ_0) tersebut dikoreksi menjadi nilai *gamma naught* (γ_0) menggunakan rumus:

$$\gamma^{\circ} \text{linier} = \sigma^{\circ} \text{linier} \cos \theta \dots \dots \dots (2)$$

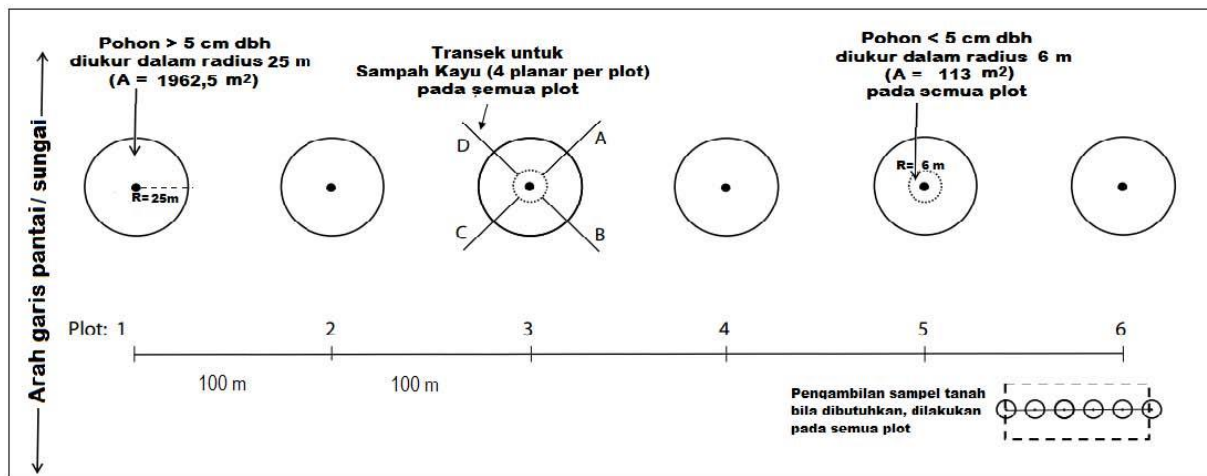
dimana θ adalah sudut insiden.

Teknik pengambilan data lapangan untuk mengetahui nilai biomassa aktual dilakukan berdasarkan perhitungan model alometrik untuk jenis-jenis pohon mangrove yang disusun oleh [Kauffman & Donato \[2012\]](#), dimana diameter pohon (dbh) dan nilai kerapatan kayu digunakan sebagai parameter penduga biomassa. Bentuk plot yang dipilih yaitu plot kluster model linier menurut [Kauffman & Donato \[2012\]](#), dimana masing-masing kluster terdiri dari 6 plot. Modifikasi dilakukan terhadap ukuran plot, yaitu dengan merubah luas plot menjadi seluas 0,2 ha dan jarak antar sub plot menjadi 100 meter, awalnya rancangan plot berukuran luas 0,02 ha dengan jarak antar sub plot 25 m, tujuannya adalah untuk menyesuaikan dengan lebar piksel citra ALOS PALSAR, seperti terlihat pada Gambar 2.

Dalam penyusunan model hubungan antara biomassa di atas permukaan dengan nilai *backscatter* pada citra ALOS PALSAR digunakan beberapa model matematika seperti disajikan pada Tabel 1. Berdasarkan model persamaan tersebut kemudian dibuat peta kelas kerapatan karbon, dan diuji akurasi menggunakan *overall accuracy* dan *kappa accuracy*.



Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian



Gambar 2. Lay Out Plot Contoh Untuk Pengukuran Karbon pada Hutan Mangrove [Dimodifikasi dari Sumber: [Kauffman Dan Donato, 2012](#)]

Tabel 1. Model Matematik yang Digunakan Untuk Pendugaan Karbon AGB

Jenis Model	Bentuk Model
Model Linier	$Y = \beta_0 + \beta_1 X$
	$Y = \beta_0 + (1/\beta_1) X$
Model Polinomial	$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2$
	$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 X^2 + \beta_3 X^3$
Model Eksponensial	$Y_i = a e^{\beta x_i}$
	$\ln Y_i = \ln a + \beta X_i$

Keterangan : Y= karbon AGB; X=Backscatter ALOS PALSAR

HASIL DAN PEMBAHASAN

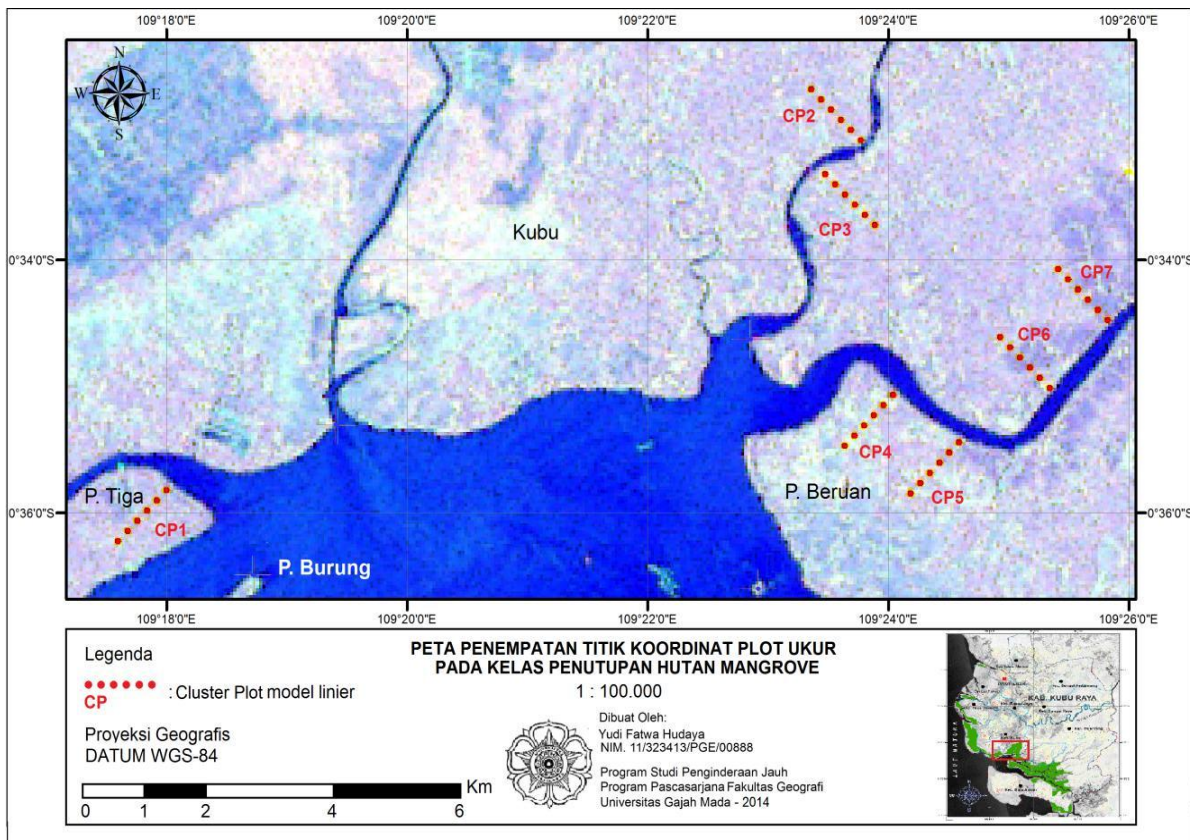
Titik koordinat plot untuk pengukuran lapangan ditempatkan secara purposive di dalam batas kawasan hutan mangrove mengacu pada hasil pengolahan citra, yaitu tersebar di 7 lokasi meliputi Pulau Tiga, Kubu I, Kubu II, Pulau Beruan I, Pulau Beruan II, Kubu III, dan Kubu IV, masing-masing lokasi terdiri atas satu plot kluster (*cluster plot*) model linier, dimana setiap *cluster* beranggotakan 6 plot, sehingga seluruhnya berjumlah 42 plot (Tabel 2). Masing-masing plot kluster linier tersebut ditempatkan secara tegak lurus

membentuk sudut 90° (transek) terhadap garis pantai atau garis tepi sungai sesuai dengan rancangan plot (Gambar 3).

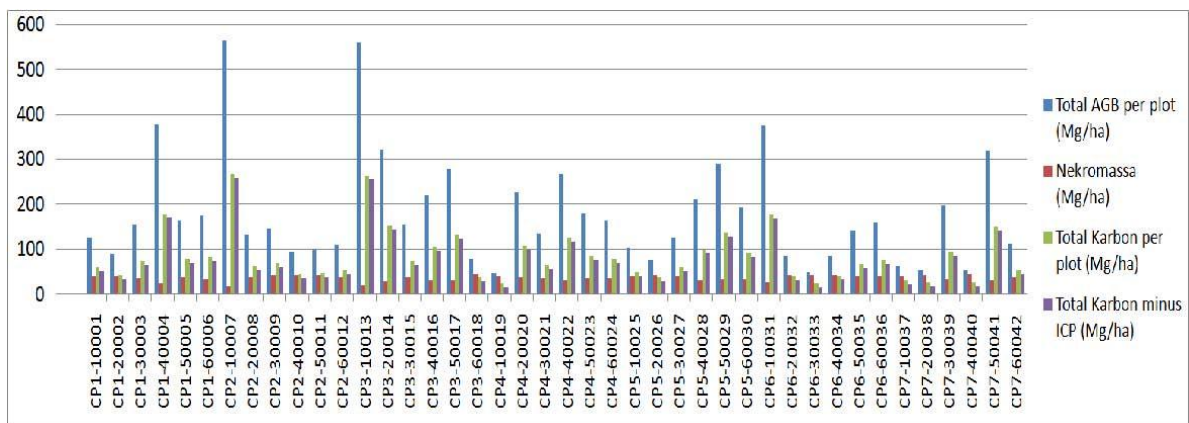
Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan pendekatan alometrik diketahui bahwa rata-rata potensi biomassa pohon dengan diameter < 5 cm, dan > 5 cm di lapangan yaitu 143,77 Mg/ha, sedangkan rata-rata potensi biomassa sampah kayu (*nekromassa*) 34,66 Mg/ha. Perbandingannya pada masing-masing plot ukur dapat dilihat pada Gambar 4.

Tabel 2. Lokasi Penempatan Plot Kluster

No	Plot Kluster	Koordinat Geografis		DATUM	Azimuth transek	Lokasi
1	CP1	0°35'46,28" S	109°17'57,58" E	WGS 84	222	P. Tiga
2	CP2	0°32'59,55" S	109°23'45,91" E	WGS 84	320	Kubu I
3	CP3	0°33'15,74" S	109°23'29,70" E	WGS 84	135	Kubu II
4	CP4	0°35'01,03" S	109°23'58,83" E	WGS 84	227	P. Beruan I
5	CP5	0°35'23,72" S	109°24'31,23" E	WGS 84	227	P. Beruan II
6	CP6	0°34'57,82" S	109°25'18,21" E	WGS 84	316	Kubu III
7	CP7	0°34'25,43" S	109°25'47,38" E	WGS 84	316	Kubu IV



Gambar 3. Peta Penempatan Titik Koordinat Plot Ukur di Lapangan



Gambar 4. Jumlah Kandungan Biomassa di Atas Permukaan (AGB-Aboveground Biomass) pada Masing-Masing Plot Ukur.

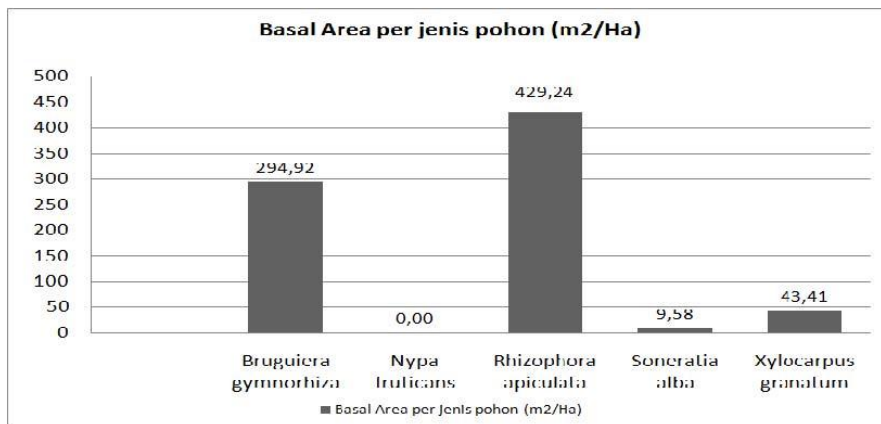
Nilai potensi biomassa tersebut kemudian dikonversi menjadi nilai karbon yaitu diketahui sebesar 83,86 Mg/ha. Setelah itu dilakukan koreksi terhadap nilai karbon yang dihasilkan menggunakan angka koreksi untuk ICP (*Increment Carbon Pool*) yaitu 2,2 Mg/ha/tahun mengacu pada buku pedoman [IPCC \[2003\]](#). Rata-rata potensi karbon di atas permukaan (*aboveground biomass carbon*) di Kabupaten Kubu Raya setelah dikoreksi diketahui sebesar 75,06 Mg/ha.

Koreksi perubahan ICP (*Increment Carbon Pool*) terhadap nilai karbon yang dihasilkan ini mutlak diperlukan sebelum dilakukan penyusunan model, karena sesungguhnya terdapat diskrepansi data yang diakibatkan adanya perbedaan waktu perekaman citra tahun 2009 dengan waktu pengukuran di lapangan tahun 2013.

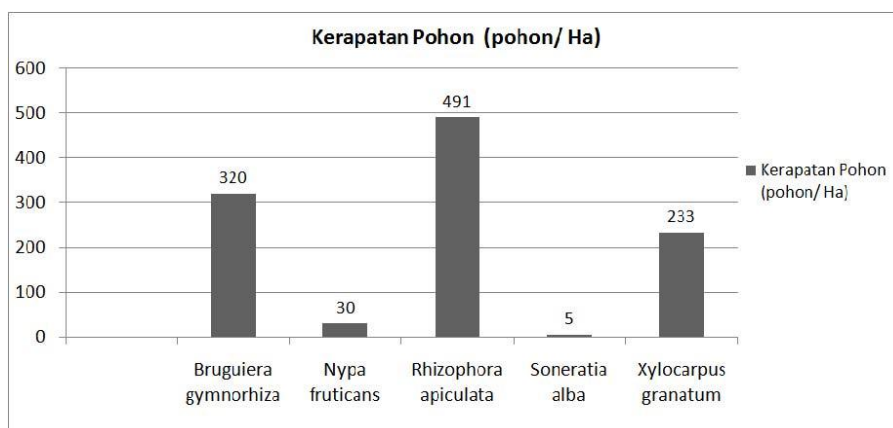
Plot ditempatkan secara transek dengan harapan titik-titik tersebut dapat mewakili keragaman objek sepanjang batas perubahan ekologis baik dari aspek struktur maupun komposisinya, disamping itu juga sekaligus berfungsi sebagai *proxy* untuk meliputi keragaman nilai *backscatter* yang muncul di sepanjang garis transek tersebut. Berdasarkan hasil pengukuran pada seluruh plot dengan luas total 8,4 ha (42 plot radius 25 m) ditemukan 5 jenis pohon mangrove, yaitu meliputi jenis yang dikenal baik oleh penduduk setempat sebagai pohon Tumu (*Bruguiera gymnorhiza*) dari keluarga *Rhizophoraceae*, pohon Perepat (*Sonneratia alba*) dari keluarga *Sonneratiaceae*, pohon Bakau (*Rhizophora apiculata*) dari keluarga *Rhizophoraceae*, pohon Nipah (*Nypa fruticans*) dari keluarga *Palmae*, dan pohon Nyirih (*Xylocarpus*

granatum) dari keluarga *Meliaceae*. Tingkat dominasi dan kerapatan jenis dari masing-masing jenis disajikan pada Gambar 5 dan 6. Untuk jenis pohon Nipah (*Nypa fruticans*) tingkat dominasi dalam satuan m²/ha tidak diketahui karena tidak memiliki data luas penampang batang, akan tetapi frekuensi kemunculannya masih dapat dibandingkan melalui nilai kerapatan jenis dalam satuan individu per ha.

Seperti yang dilakukan oleh [Crapolicchio \[2003\]](#) dan [Shimada \[2012\]](#) citra radar yang telah dikalibrasi hingga dihasilkan nilai NRCS (*Normalized Radar Cross Section*) atau *sigma naught* (σ_0) dianggap masih memiliki kelemahan, karena sistem perekaman gambar miring (*slant range*) pada citra radar biasanya menyebabkan perolehan nilai *backscatter* pada titik-titik tertentu dari permukaan objek hanya efektif terlihat oleh antena melalui sudut insiden-nya (θ) saja. Untuk menghilangkan ketergantungan ini, maka dilakukan koreksi nilai kecerahan menggunakan formulasi *gamma naught* (γ_0), sehingga dihasilkan nilai *gamma naught* (γ_0) citra ALOS PALSAR. Pada perhitungan ini permukaan bumi dikoreksi menjadi seolah-olah datar atau tidak ada perbedaan elevasi, tujuannya adalah untuk menghilangkan kemungkinan objek yang sama terekam lebih cerah atau lebih gelap, sehingga selalu diperoleh nilai *backscatter* dengan kecerahan normal. Setelah itu baru dilakukan ekstraksi nilai digital untuk memperoleh koefisien nilai *backscatter* pada masing-masing titik koordinat plot yang ditentukan.



Gambar 5. Tingkat Dominasi Pohon dari Masing-Masing Jenis Mangrove dalam Satuan m²/ha (*Basal Area*).



Gambar 6. Tingkat Kerapatan Pohon Dari Masing-Masing Jenis Mangrove dalam Satuan Pohon/ha (*Tree density*).

Kisaran nilai koefisien *backscatter* dari seluruh titik koordinat plot (42 plot) pada band HH diketahui yaitu terendah -13,6001 dB dan tertinggi -6,01964 dB, sedangkan pada band HV kisaran nilai *backscatter* terendah -21,5065 dB dan tertinggi -14,2311 dB (Gambar 7).

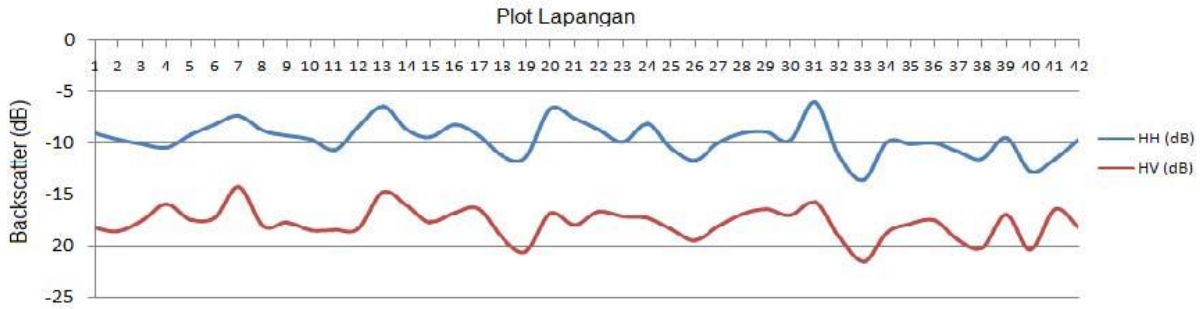
Pemeriksaan bentuk garis regresi dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui hubungan pola sebaran antara nilai *backscatter* citra ALOS PALSAR dengan nilai kandungan karbon. Bentuk garis regresi yang baik secara teoritis harus bisa menerangkan bidang ilmu yang diteliti tetapi tidak boleh menyimpang dari data yang diperoleh, sehingga hubungan kuantitatif dapat dijelaskan melalui model persamaan tersebut dan grafik yang menyertainya. Pada tahap ini digunakan data yang berasal dari 27 plot yang telah disiapkan untuk uji sampel.

Dari hasil pemeriksaan menggunakan grafik *scatterplot* terlihat bahwa bentuk hubungan antara nilai *backscatter* citra ALOS PALSAR dengan nilai potensi karbon aktual tidak memiliki pola linier garis lurus, akan tetapi menyerupai bentuk kurva pertumbuhan. Sementara itu *scatterplot* pada band HV

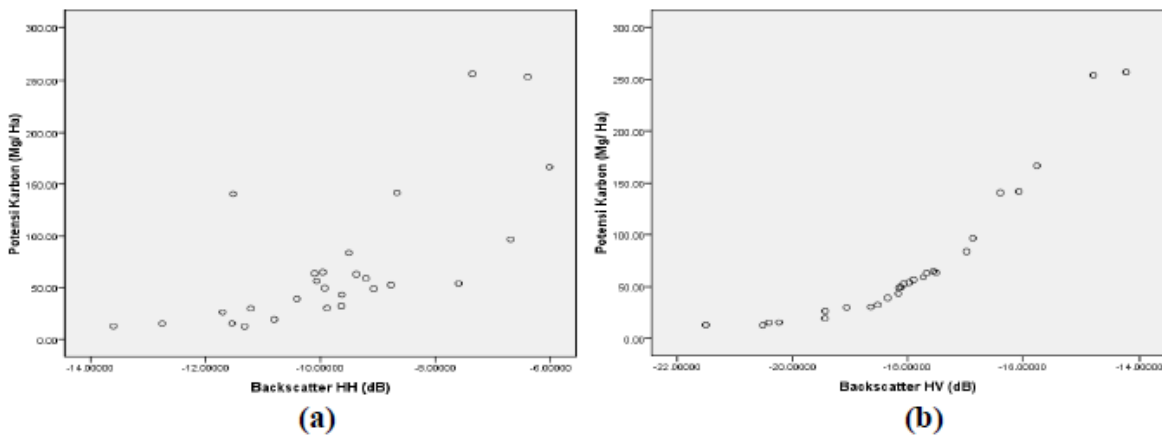
(b) terlihat lebih konsisten dibandingkan dengan band HH (a) (Gambar 8).

Untuk mencari model yang terbaik pada penelitian ini digunakan bentuk-bentuk persamaan regresi-korelasi meliputi model linier, model kuadrat (polinom derajat 2), model kubik (polinom derajat 3), dan model eksponensial. Selain bentuk garis linier, ketiga model lainnya dipilih berdasarkan kemiripan bentuk garis regresi yang menyerupai kurva pertumbuhan, dimana grafiknya cenderung naik dan cembung ke bawah.

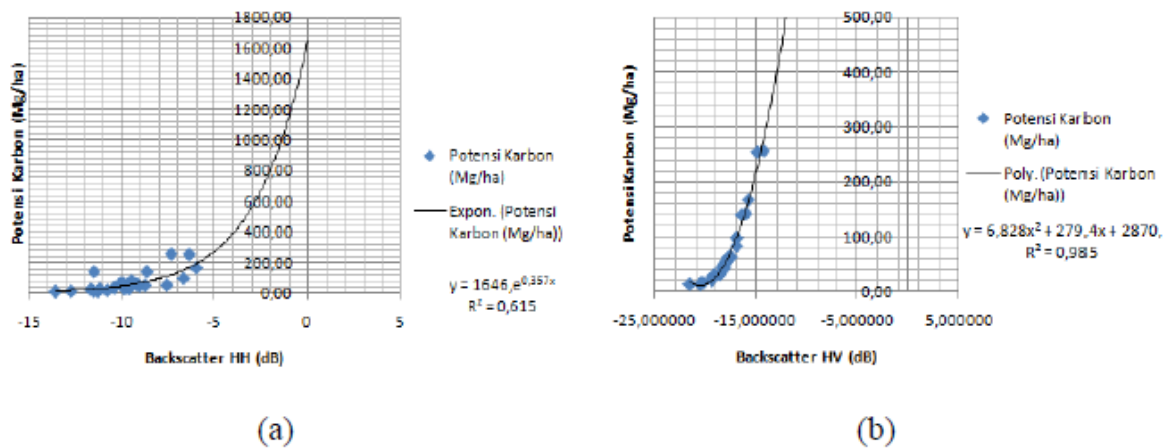
Bentuk persamaan regresi yang dihasilkan sebagai model penduga potensi karbon terpilih berdasarkan nilai *backscatter* HH citra ALOS PALSAR yaitu $Y = 1647e^{0,358x}$, dengan koefisien determinan (R²) 0,615; nilai koefisien korelasi (R) 0,784 dan nilai signifikansi 0,000. Sedangkan model penduga potensi karbon berdasarkan nilai *backscatter* HV yaitu $Y = 6,828x^2 + 279,4x + 2870$, dengan koefisien determinan (R²) 0,986; koefisien korelasi (R) 0,993; dan nilai signifikansi 0,000 (Gambar 9).



Gambar 7. Kisaran Nilai Koefisien Backscatter-Gamma Naught (Γ_0) Band HH dan HV yang Diekstrak dari Citra ALOS PALSAR Res.50m Sesuai dengan Titik Koordinat Plot Ukur Lapangan.



Gambar 8 Grafik Scatterplot yang Menunjukkan Hubungan Pola Sebaran Nilai Potensi Karbon dengan Nilai Backscatter pada Band HH (a) dan Band HV (b).



Gambar 9. Bentuk Garis Persamaan Regresi Model Eksponensial dan Quadratik Sebagai Model Penduga Potensi Karbon Terpilih pada Band HH (a), Dan Band HV (b).

Peta kelas kerapatan karbon disusun berdasarkan citra ALOS PALSAR yang ditransformasikan secara digital menggunakan bentuk persamaan model 1 dan model 2 terverifikasi, hingga dihasilkan informasi kandungan karbon tersimpan dan distribusinya secara geografis. Klasifikasi kelas kerapatan karbon untuk

penyusunan peta dibagi menjadi 4 kelas menggunakan interval kelas lihat Tabel 3.

Pembagian jumlah kandungan karbon tersimpan kedalam kelas kerapatan karbon dimaksudkan semata-mata untuk visualisasi dalam penyusunan peta kelas kerapatan karbon, sehingga lebih mudah untuk

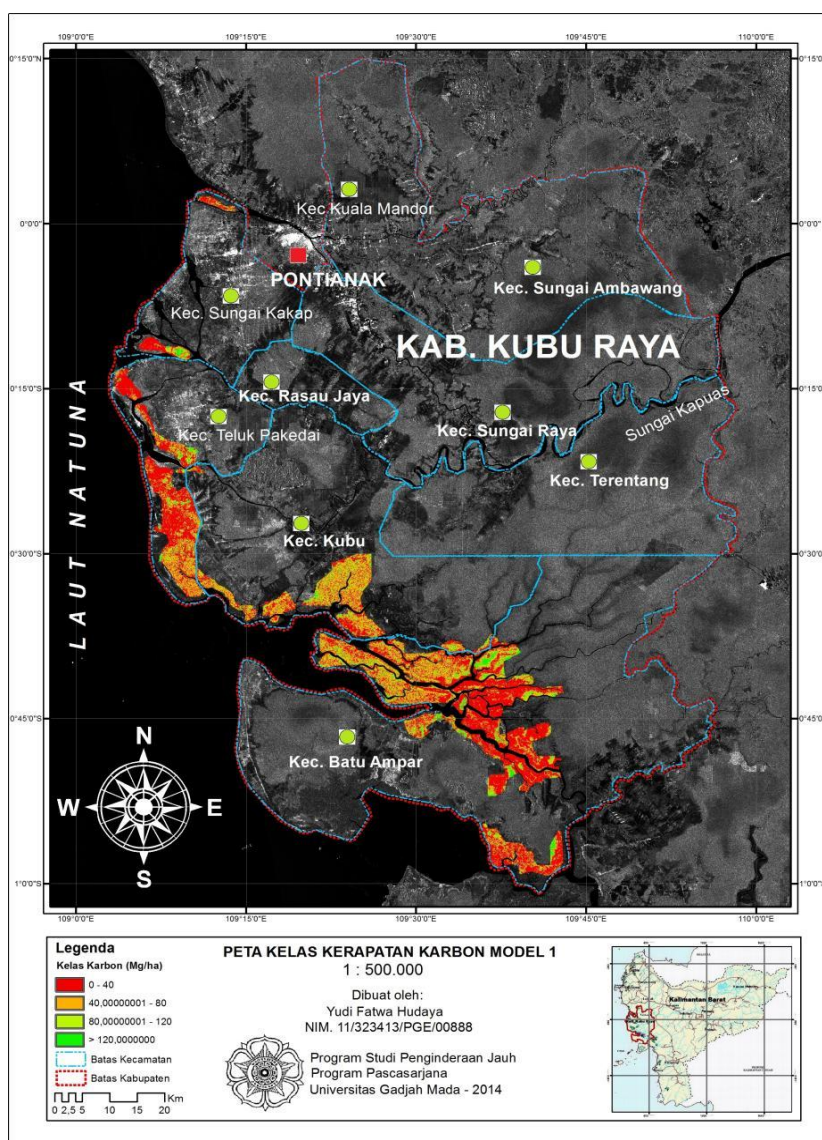
dipahami dalam menggunakannya; sesungguhnya pada peta digital tersebut setiap nilai piksel dari citra ALOS PALSAR resolusi 50 meter telah ditransformasikan menjadi nilai karbon, sehingga pada titik koordinat manapun yang diinginkan bisa langsung diketahui nilai kandungan karbonnya, dimana informasi kandungan karbon pada setiap satuan unit piksel tersebut mewakili luas 100 x 100 meter di lapangan (RMSE 0,493). Peta kelas kerapatan karbon yang disusun berdasarkan model pendugaan 1 dan 2 tersebut seperti disajikan pada Gambar 10 dan 11.

Berdasarkan hasil uji akurasi pada peta kelas kerapatan karbon model 1 menggunakan uji *overall accuracy* (OA) dan *Kappa accuracy* (KA) dihasilkan nilai OA= 33,33 % dan KA= 0,0625, yang menunjukkan tingkat akurasi dan kesesuaian antara kelas hasil klasifikasi model dengan kelas hasil pengukuran lapangan pada Peta Model 1 berpredikat

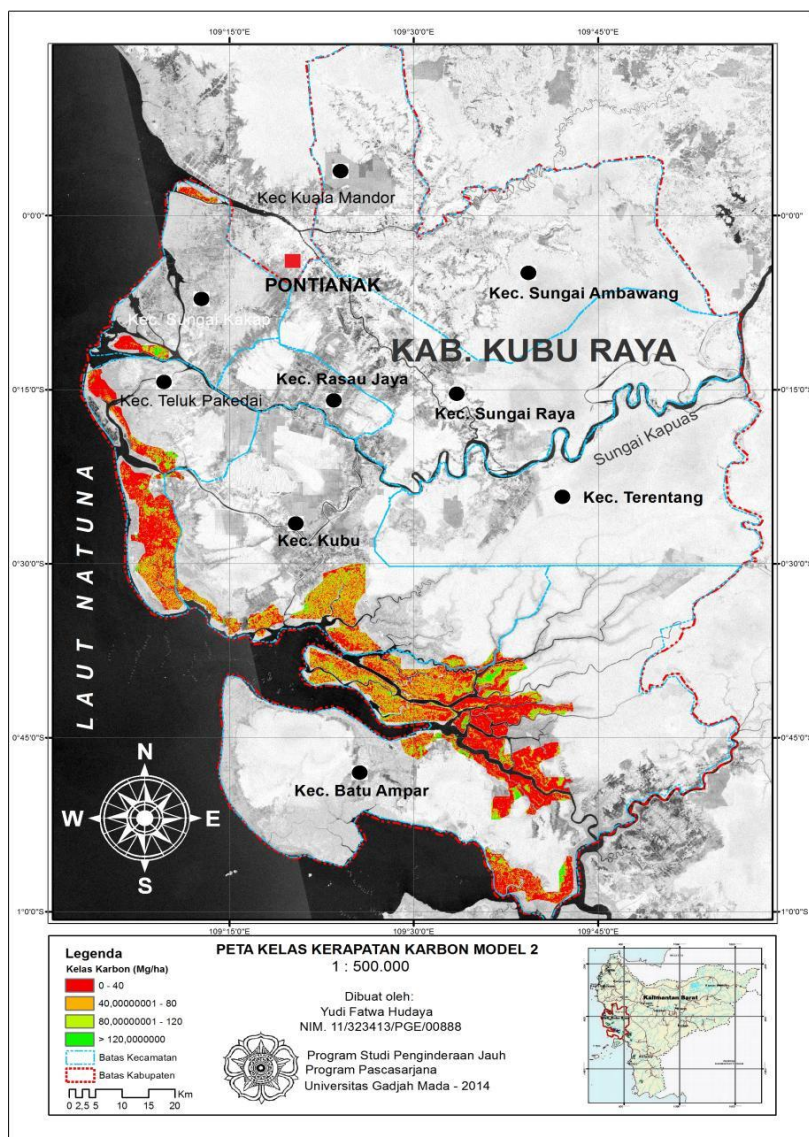
buruk. Dengan demikian penggunaan Peta Model 1 tidak disarankan untuk pendugaan potensi karbon; Sedangkan hasil uji akurasi pada peta kelas kerapatan karbon model 2 dihasilkan nilai OA= 80,00 % dan KA= 0,7289, yang menunjukkan tingkat akurasi dan kesesuaian antara antara kelas hasil klasifikasi model dengan kelas hasil pengukuran lapangan pada peta model 2 berpredikat cukup baik (*fair to good*). Dengan demikian penggunaan peta model 2 disarankan untuk digunakan dalam pendugaan potensi karbon.

Tabel 3. Klasifikasi Kelas Kerapatan Karbon

Klasifikasi Kerapatan Karbon	Interval Kelas (Mg/ha)
Kelas 1	0 - 40
Kelas 2	40,00000001 - 80
Kelas 3	80,00000001 - 120
Kelas 4	> 120



Gambar 10. Peta Kelas Kerapatan Karbon Berdasarkan Model-1: Y=1647e0,358BS_HH



Gambar 11. Peta Kelas Kerapatan Karbon Berdasarkan Model-2: $Y = 6,828BS_HV2 + 279,4BS_HV + 2870$.

Berdasarkan data historis sampai dengan tahun 2003 diperkirakan tingkat emisi karbon dari sektor kehutanan di Indonesia mencapai 2.563 Mt (Megaton) CO₂ equivalent, (PEACE, 2007). Saat ini Indonesia telah menetapkan target pengurangan emisi GRK atas usaha sendiri sebesar 26 % pada tahun 2020 dan 41 % apabila dibantu dengan pendanaan Internasional [Kemenhut, 2010; Perpres Nomor 61 Tahun 2011 tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca].

Hasil pendugaan jumlah simpanan karbon di atas permukaan (*Aboveground biomass carbon*) pada hutan mangrove di Kubu Raya menggunakan citra ALOS PALSAR diketahui 5.334.454,9 Mg (Megagram) atau 5,3 Mt (Megaton) karbon; sedangkan kemampuannya dalam menyerap karbondioksida (CO₂) diketahui 19,451 Mt (Megaton) CO₂ equivalent; sehingga dalam

konteks mitigasi perubahan iklim, hutan mangrove di Kubu Raya dengan luas 71.069,21 Ha apabila dipertahankan keberadaannya maka akan berkontribusi mengurangi tingkat emisi GRK dari sektor kehutanan sebesar $19,451 / 2.563 = 0,76 \%$.

KESIMPULAN

1. Ditemukan hubungan yang kuat antara nilai *backscatter* pada citra ALOS PALSAR dengan nilai kandungan karbon di atas permukaan pada tipe hutan mangrove dengan koefisien determinasi mencapai 62% pada polarisasi HH dan 98,6% pada polarisasi HV, sehingga disimpulkan nilai *backscatter* tersebut layak untuk digunakan sebagai penanda dalam pendugaan potensi karbon hutan mangrove.
2. Saturasi atau penurunan sensitivitas sinyal-L citra

ALOS PALSAR terhadap objek yang diamati diperkirakan akan mengalami penurunan pada saat karbon aktual di atas permukaan lapangan mencapai 335,15 Mg ha⁻¹.

3. Dihasilkan 2 model penduga potensi karbon di atas permukaan berdasarkan citra ALOS PALSAR pada polarisasi HH yaitu: $Y=1647e0,358BS_HH$, dan pada polarisasi HV yaitu: $Y = 6,828BS_HV2 + 279,4BS_HV + 2870$.
4. Pada kedua model tersebut tidak ditemukan cukup bukti adanya perbedaan yang signifikan

antara nilai karbon hasil pendugaan model dengan hasil pengukuran lapangan; Pendugaan potensi karbon menggunakan polarisasi HV lebih baik dibanding polarisasi HH, yaitu ditunjukkan dengan nilai signifikansi model hasil uji t-student berpasangan pada polarisasi HV (0,1400) yang lebih tinggi dibanding HH (0,1002). Oleh karena itu penggunaan model pendugaan potensi karbon dengan polarisasi HV lebih disarankan dari pada polarisasi HH.

5. Dihasilkan 2 buah peta kelas kerapatan karbon yaitu Peta Model-1 (HH) yang disusun berdasarkan bentuk persamaan $Y=1647e0,358BS_HH$ dan Peta Model-2 (HV) berdasarkan bentuk persamaan $Y = 6,828BS_HV2 + 279,4BS_HV + 2870$;
6. Hasil uji akurasi pada Peta Model-1 (HH) menggunakan uji *overall accuracy* (OA) dan *Kappa accuracy* (KA) yaitu OA= 33,33 % dan KA= 0,0625 menunjukkan bahwa tingkat akurasi dan kesesuaian antara kelas hasil klasifikasi model dengan kelas hasil pengukuran lapangan pada Peta Model-1 (HH) berpredikat buruk (*poor*). Dengan demikian penggunaan Peta Model-1 (HH) untuk pendugaan potensi karbon tidak disarankan.
7. Hasil uji akurasi yang dilakukan pada Peta Model-2 (HV) menggunakan uji *overall accuracy* (OA) dan *Kappa accuracy* (KA) yaitu OA= 80,00 % dan KA= 0,7289 menunjukkan bahwa tingkat akurasi dan kesesuaian antara kelas hasil klasifikasi model dengan kelas hasil pengukuran lapangan pada Peta Model-2 (HV) berpredikat cukup baik (*fair to good*). Dengan demikian penggunaan Peta Model-2 (HV) disarankan untuk digunakan dalam pendugaan potensi karbon.
8. Nilai kandungan biomassa di atas permukaan (*Aboveground biomass-AGB*) pada hutan mangrove di Kabupaten Kubu Raya merupakan jumlah rata-rata biomassa pohon (143,77 Mg/ha) ditambah

jumlah rata-rata biomassa sampah kayu atau *Nekromassa* (34,66 Mg/ha) yaitu sebesar 178,43 Mg/ha.

9. Potensi karbon di atas permukaan (*Aboveground biomass carbon*) diketahui sebesar 5.334.454,9 Mg (Megagram) atau 5,3 Mt (Megaton) karbon.
10. Kemampuan dalam menyerap karbondioksida (CO₂) diketahui sebesar 19,451 Mt (Megaton) CO₂ *equivalent*, dan kontribusi dalam mengurangi tingkat emisi GRK dari sektor kehutanan sebesar 0,76%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Bapak Dr. Ir. R. Iman Santoso, M.Sc selaku Kepala Badan Litbang Kehutanan - Kemenhut, Bapak Dr. Agus Justianto selaku Kepala Pusdiklat Kehutanan - Kemenhut, dan Bapak Dr. Ir. Amir Wardhana, M.For.Sc selaku Kepala Balai Besar PBP Tanaman Hutan atas segala dukungan dan kesempatan yang diberikan untuk melakukan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Bapak Prof. Dr. Hartono, DEA, DESS, Bapak Sigit Heru Murti, S.Si, M.Si, Bapak Dr. R. Suharyadi, M.Sc, dan Bapak Drs. Projo Danoedoro, M.Sc, Ph.D atas bimbingannya dalam penyusunan dan penyempurnaan penelitian ini. Pada kesempatan ini ucapan terima kasih juga ingin saya sampaikan kepada Bapak Dr. Daniel Murdiyarto selaku peneliti senior pada Lembaga Penelitian Kehutanan Internasional - CIFOR atas bimbingan informal yang banyak diberikan di awal penelitian dan Bapak Dr. Katmoko Ari Sambodo, M.Eng selaku peneliti senior dan penanggung jawab data ALOS PALSAR pada Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional - LAPAN atas bimbingan dan bantuan pengadaan data citra ALOS PALSAR sebagai data primer dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Crapolicchio, R., P. Lecomte. (2003). On the stability of Amazon rainforest backscattering during the ERS-2 Scatterometer mission lifetime. *Paper presented at ASAR workshop 2003 "Amazon Calibration" session*.
- Hansen, M., P. Potapov, K. Pittman, Wardoyo, Belinda Arunawarti, A Basyiruddin, Saipul Rahman, Retno Sari. (2006). Forest Change in Indonesia 2000-2006. *Proceedings of a workshop convened by University of South Dakota GIS Center of Excellence. Indonesian Ministry of Forestry, WRI, US Geological Survey*. Jakarta. World Bank.
- Indonesian Forest Climate Alliance (IFCA). (2008).

- Reducing Emission from Deforestation and Forest Degradation in Indonesia. *IFCA Consolidation Report*. ISBN. 978-979-8452-26-0. Forestry Research and Development Agency (FORDA). Ministry of Forestry of the Republic of Indonesia.
- Lucas, Richard. M., Armston, & John D. (2010). An Evaluation of the ALOS PALSAR L-Band Backscatter—Above Ground Biomass Relationship Queensland, Australia. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, *IEEE Journal*. 3, 576 – 593.
- Luckman, A. J., Baker, J. R., Kuplich, T. M., Yanasse, C. C. F. and Frery, A. C. (1997). A Study of the Relationship between Radar Backscatter and Regenerating Forest Biomass for Spaceborne SAR Instruments. *Journal Remote Sensing of Environment*. 60, 1-13.
- Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry. *Buku Panduan*. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme.
- Kauffman, J.B. and Donato, D.C. (2012). Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests. *Working Paper* 86. Bogor. CIFOR Indonesia.
- Kemenhut. (2010). Strategi Nasional REDD-Indonesia Fase Readiness dan Progress Implementasinya. Jakarta, April 2010. *Kertas Kerja*. AusAID/FCP/ UN-REDD/CIF-FIP/TNC/ KFS-KOICA.
- Kemenhut. (2011). *Statistik Kehutanan 2011, Laporan Tahunan*. Sub Direktorat Statistik dan Jaringan Komunikasi Data Kehutanan. Direktorat Perencanaan Kawasan Hutan, Direktorat Jenderal Planologi Kehutanan.
- Mitchard, E.T.A., S.S. Saatchi, I. H. Woodhouse. (2009). Using Satellite Radar Backscatter to Predict Above-ground Woody Biomass: A consistent relationship across four different African landscapes. *Geophysical Research Letters*. 36, L23401, doi:10.1029/2009GL040692.
- Murdiyarso, D. (2003). *Sepuluh Tahun Perjalanan Negosiasi Konvensi Perubahan Iklim*. ISBN. 979-709-071. Jakarta. Buku Kompas.
- Murdiyarso, D., Daniel Donato, J. Boone Kauffman, Sofyan Kurnianto, Melanie Stidham, Markku Kanninen. (2009). Carbon storage in mangrove and peatland ecosystems: A preliminary account from plots in Indonesia. *Working Paper*. CIFOR.
- Ni, Wenjian., Guoqing Sun, Zhifeng Guo. (2012). Retrieval of Forest Biomass from ALOS PALSAR Data Using a Lookup Table Method. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing*.
- PEACE. (2007). Executive Summary: Indonesia and Climate Change. *Working Paper*. Current Status and Policies. DFID. The World Bank.
- Pons, Diego Hernán. (2010). Remote Sensing Technologies for Forest Monitoring and Carbon Stocks Estimations. *Diktat Kuliah*. Universidad Nacional de Cordoba. CONAE.
- Scott, J.G., Baccini, A., Nadine T Laptorte, Tracy Jhons, Wayne Walker, Josef Kelldorfer, Houghton, R.A. and Sun, M. (2009). Mapping and Monitoring Carbon Stock with Satellite Observation: a Comparison of Methods. *Journal Carbon Balance Management*.
- Shimada, M., M. Watanabe, T. Motooka, T. Shiraiishi, R. Thapa. (2012). Stability of Gamma-Naught and The PALSAR based Forest MRV System. JAXA, EORC. GEOS-AP Forest Session.
- U.S. Department of Energy. (2001). *Emissions of Greenhouse Gases in the United States 2000*. Energy Information Administration Office of Integrated Analysis and Forecasting Washington, DC. Diakses 2 November 2012 dari <http://ftp.eia.doe.gov/pub/oiaf/1605/cdrom/pdf/ggrpt/057300.pdf>.