

**PENDUGAAN CADANGAN KARBON DI ATAS PERMUKAAN PADA
HUTAN RAKYAT DENGAN MEMANFAATKAN DATA *SYNTHETIC
APERTURE RADAR* SENTINEL-1 (STUDI KASUS DI KABUPATEN
SUKOHARJO)**



**Disusun sebagai salah satu syarat menyelesaikan Program Studi Strata I pada Jurusan Geografi
Fakultas Geografi**

Oleh:

ATHAR ABDURRAHMAN BAYANUDDIN

E 100 150 113

**PROGRAM STUDI GEOGRAFI
FAKULTAS GEOGRAFI
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SURAKARTA**

2016

HALAMAN PERSETUJUAN

PENDUGAAN CADANGAN KARBON DI ATAS PERMUKAAN PADA
HUTAN RAKYAT DENGAN MEMANFAATKAN DATA *SYNTHETIC*
APERTURE RADAR SENTINEL-1 (STUDI KASUS DI KABUPATEN
SUKOHARJO)

PUBLIKASI ILMIAH

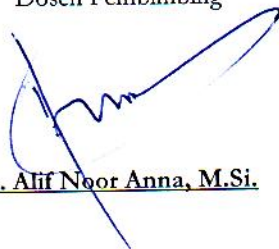
oleh:

ATHAR ABDURRAHMAN BAYANUDDIN

E 100 150 113

Telah diperiksa dan disetujui untuk diuji oleh:

Dosen Pembimbing



Dra. Alif Noor Anna, M.Si.

HALAMAN PENGESAHAN
PUBLIKASI ILMIAH

PENDUGAAN CADANGAN KARBON DI ATAS PERMUKAAN PADA
HUTAN RAKYAT DENGAN MEMANFAATKAN DATA *SYNTHETIC*
APERTURE RADAR SENTINEL-1 (STUDI KASUS DI KABUPATEN
SUKOHARJO)

OLEH
ATHAR ABDURRAHMAN BAYANUDDIN
E 100 150 113

Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
Fakultas Geografi
Universitas Muhammadiyah Surakarta
Pada hari Rabu, 26 Oktober 2016
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Dewan Penguji

1. Dra. Alif Noor Anna, M.Si.
(Ketua Dewan Penguji)
2. Choirul Amin, S.Si., M.M.
(Anggota I Dewan Penguji)
3. Drs. H. Yuli Priyana, M.Si.
(Anggota II Dewan Penguji)

Tanda Tangan

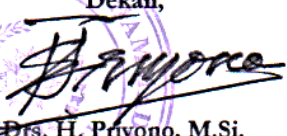
(.....)

(.....)

(.....)

Surakarta, 31 Oktober 2016

Dekan,


Drs. H. Priyono, M.Si.
NIK. 331

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam publikasi ilmiah ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila kelak terbukti ada ketidakbenaran dalam pernyataan saya di atas, maka akan saya pertanggungjawabkan sepenuhnya.

Surakarta, 31 Oktober 2016

Penulis



ATHAR ABDURRAHMAN BAYANUDDIN

E 100 150 113

PENDUGAAN CADANGAN KARBON DI ATAS PERMUKAAN PADA HUTAN RAKYAT DENGAN MEMANFAATKAN DATA *SYNTHETIC APERTURE RADAR SENTINEL-1* (STUDI KASUS DI KABUPATEN SUKOHARJO)

Abstrak

Tingginya jumlah karbondioksida di atmosfer merupakan salah satu penyebab terjadinya pemanasan global. Mempertahankan cadangan karbon hutan yang ada merupakan salah satu upaya untuk menurunkan emisi karbon, termasuk pada hutan rakyat yang perlu diinventarisir guna memonitoring emisi karbon. Penelitian ini menggunakan data penginderaan jauh SAR (*Synthetic Aperture Radar*) Sentinel-1 untuk mengetahui cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo. Penelitian ini bertujuan untuk: 1) menganalisis hubungan antara nilai hamburan balik data SAR Sentinel-1 dual polarisasi dengan nilai cadangan karbon hutan rakyat berdasarkan nilai biomassa hijau di atas permukaan; 2) menduga cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo dengan memanfaatkan data dual polarisasi SAR Sentinel-1; dan 3) menentukan jumlah dan agihan cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo berdasarkan data SAR Sentinel-1.

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode survei dengan teknik *purposive sampling* untuk melengkapi data penginderaan jauh terkait biomassa dan cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat menggunakan persamaan alometrik dan berdasarkan hasil ekstraksi nilai hamburan balik (*backscatter*) SAR Sentinel-1 setiap polarisasi VV (Vertikal-Vertikal), VH (Vertikal-Horizontal), dan *band* rasio VV/VH. Analisis statistik digunakan untuk memperoleh persamaan pendugaan cadangan karbon berdasarkan data SAR dan data lapangan. Sistem Informasi Geografi (SIG) digunakan untuk menyajikan data secara spasial sekaligus informasi jumlah cadangan karbon di atas permukaan dan analisis data menggunakan pendekatan spasial secara kuantitatif dan kualitatif.

Hasil penelitian menunjukkan: 1) hubungan yang signifikan dan berbanding terbalik antara nilai *backscatter* polarisasi VV ($R = -0,438$ (sangat rendah)) dan polarisasi VH ($R = -0,612$ (Rendah)) dengan cadangan karbon di atas permukaan; 2) Cara untuk menduga karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo diperoleh dari data SAR Sentinel-1 menggunakan polarisasi VH dengan persamaan regresi linear sederhana terpilih ($R^2 = 0,375$; $RMSE = 101,1648$) yaitu $Y = -493,268 + -61,499 X$. Jumlah cadangan karbon di atas permukaan di Kabupaten Sukoharjo yaitu sebesar 228.456,36 Ton pada 7.738,287 Ha hutan rakyat serta memiliki pola agihan menyebar secara acak dan mengelompok. Jumlah terbanyak di hutan rakyat Kecamatan Bulu 49.540,21 Ton (1.782,008 Ha) dan paling sedikit di Kecamatan Gatak 49,50 Ton (1,357 Ha).

Kata Kunci: Penginderaan Jauh, SAR (*Synthetic Aperture Radar*) Sentinel-1, *backscatter*, Cadangan Karbon di Atas Permukaan, Hutan Rakyat.

Abstracts

The high amount of carbon dioxide in the atmosphere is one of the causes of global warming. Preserve carbon stocks is an effort to reduce carbon emissions, including in the community forest which need to be recorded. Remote Sensing Data of Sentinel-1 SAR (Synthetic Aperture Radar) was used to determine the above ground carbon stocks on community forest in Sukoharjo Regency. The objectives of this research are: 1) analyze the relationship between the backscatter value of Sentinel-1 SAR dual polarization data and the value of carbon stock in community forest based on the above ground green biomass value; 2) to estimate above ground carbon stock of community forest in Sukoharjo Regency by utilizing the dual-polarization SAR Sentinel-1 data; and 3) to determine the total and the spatial distribution of above ground carbon stock on community forest in Sukoharjo Regency based on Sentinel-1 SAR data.

The method was used in this study is a survey method using purposive sampling to complement remote sensing data related to biomass and above ground carbon stock in community forest using allometric equations based on the the extraction result of backscatter value of each polarization VV (Vertical-Vertical), VH (Vertical-Horizontal), and band ratio VV/VH. Statistical analysis was used to generate equation for estimating carbon stocks based on the SAR data and field data. Geographic Information System (GIS) was used to represent data spatially well as information of above ground carbon stock value and used spatial data analysis approach both quantitatively and qualitatively.

The results showed that: 1) there is a significant and inversely relationship between the value of VV polarization backscatter ($R = -0.438$ (very low)) and VH polarization ($R = -0.612$ (Low)) on above ground carbon stock value. 2) How to Estimate Above ground carbon stock on community forest in Sukoharjo was obtained from Sentinel-1 SAR data using VH polarization with chosen simple linear regression equation ($R^2 = 0.375$; $RMSE = 101.1648$) is $Y = -61.499 - 493.268 + X$. The Total of above ground carbon stock in Sukoharjo Regency is 228,456.36 tons of 7738.287 hectares community forest and it has a spread spatial distribution pattern at random and clustered. The largest above ground biomass carbon stock is in the community forest of Bulu Sub-district is 49540.21 tons (1782.008 ha) and least in the Gatak Sub-district is 49.50 tons (1,357 ha).

Keywords: Remote Sensing, SAR (Synthetic Aperture Radar) Sentinel-1, Backscatter, Above Ground Carbon Stock, Community Forest.

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim menjadi perhatian seluruh dunia termasuk Indonesia. COP (*Conferences of the Parties*) ke-21 di Kota Paris, Prancis akhir tahun 2015 lalu diselenggarakan untuk menghasilkan suatu kesepakatan internasional yang baru terkait perubahan iklim yakni menjaga pemanasan global dibawah 2°C (COP21, 2015). Perubahan iklim ditandai dengan fenomena pemanasan global yang disebabkan oleh peningkatan kandungan gas-gas rumah kaca (GRK) di atmosfer khususnya semakin banyaknya karbondioksida (CO₂). GRK di atmosfer berfungsi menjaga suhu permukaan bumi agar tetap hangat, tetapi ketika komposinya tidak seimbang, terjadi peningkatan kandungan CO₂, radiasi sinar matahari terperangkap di bawah atmosfer oleh GRK dan dipantulkan kembali ke bumi sehingga menyebabkan peningkatan suhu permukaan bumi (efek rumah kaca) (TimARuPA, 2014).

Mempertahankan cadangan karbon yang ada untuk menurunkan emisi karbon merupakan salah satu cara yang dapat dilakukan saat ini untuk mengurangi dampak merugikan dari adanya perubahan iklim (mitigasi) (TimARuPA, 2014; Saputra, 2013). Sekitar 20% emisi GRK berasal dari deforestasi, konversi hutan menjadi peruntukan lain termasuk perubahan vegetasi penutup lahan menyebabkan semakin besarnya jumlah karbon pada biomassa tumbuhan terlepas ke atmosfer dan hilangnya fungsi penyerapan karbon (FWI, 2009). Hutan memiliki peran penting dalam penyimpanan dan penyerapan karbon, 32 milyar ton CO₂ yang dihasilkan oleh aktivitas manusia per tahunnya kurang dari 5 milyar ton diserap oleh hutan (CIFOR, 2010), namun kemampuan hutan dalam menyerap dan menyimpan karbon berbeda-beda tergantung pada jenis pohon, tipe tanah, dan topografi (Masripatin, dkk., 2010). Karbon yang diserap oleh vegetasi disimpan dalam bentuk biomassa kayu, sehingga cara yang paling mudah untuk meningkatkan cadangan karbon adalah dengan menanam dan memelihara pohon (Lasco, dkk., 2004 dalam Rahayu, dkk., 2006).

Kota Surakarta merupakan salah satu daerah perkotaan di Indonesia yang mengalami pertumbuhan pesat dalam hal pembangunan dan keberadaan berbagai fasilitas perkotaan, sehingga memicu terjadinya konversi lahan hijau menjadi lahan terbangun. Selain itu, tingginya aktivitas penduduk perkotaan memicu terjadinya mobilitas yang tinggi dalam hal ini transportasi dari dan keluar kota dengan kendaraan bermotor. Hal tersebut menyebabkan berkurangnya kemampuan penyerapan sekaligus penyimpanan karbon. Padahal kandungan karbon di atmosfer semakin banyak baik yang berasal dari emisi karbon kendaraan bermotor maupun penebangan vegetasi di lahan hijau itu sendiri. Suhu udara maksimum Kota Surakarta naik 5° C atau sudah mencapai 36 °C dalam 4 tahun (2011-2015), tercatat bahwa rata-rata suhu pada musim kemarau tahun 2011 mencapai 30,5 °C, pada periode yang sama tahun 2013 naik menjadi 33 °C, dan tahun 2015 mencapai 35 °C yang sudah termasuk kategori ekstrem (Afifah, 2015).

Kabupaten Sukoharjo yang terletak di sisi Selatan Kota Surakarta mendapat pengaruh yang besar dari perkembangan kota tersebut, termasuk pengurangan lahan hijau dan bertambahnya emisi karbon dari kegiatan transportasi ditambah lagi dengan terdapatnya berbagai pabrik industri. Salah satu ruang terbuka hijau yang memiliki potensi besar menyimpan cadangan karbon ialah hutan rakyat. Hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo perlu diinventarisasi jumlah potensi cadangan karbonnya. Luas hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo dari tahun 2010 sampai 2014 mengalami penurunan yang cukup signifikan berdasarkan Neraca Sumber Daya Hutan Provinsi Jawa Tengah Tahun 2014, pada tahun 2010 tercatat 16.192 ha, tahun 2012 seluas 17.932 ha, dan data terakhir tahun 2014 seluas 7984 Ha. Hal tersebut mengindikasikan telah terjadi penurunan cadangan karbon yang tersimpan di Kabupaten Sukoharjo sekaligus menyumbang emisi GRK. Hutan jati milik rakyat seluas 2 Ha di Desa Ngasih dan Desa Tiyaran, Kecamatan Bulu, Sukoharjo hangus terbakar (Sunaryo, 2015). Kejadian ini juga menunjukkan bahwa hutan rakyat memiliki pengaruh terhadap emisi GRK, hutan terbakar melepas kandungan cadangan karbon ke atmosfer. Namun baik jumlah cadangan karbon yang masih tersisa maupun yang diemisikan tidak dapat diketahui karena belum terdapat data inventarisasi secara kuantitatif dan spasial. Kedudukan perhitungan cadangan karbon di hutan rakyat dan penyajian agihannya secara spasial sangat penting sebagai implementasi kesepakatan COP 21. Dengan demikian perhitungan cadangan karbon di hutan rakyat dianggap sangat penting untuk dilakukan agar dapat diperkirakan kemampuan menyimpan karbon di dalam hutan.

Kandungan cadangan karbon dapat diperoleh secara konvensional melalui pengukuran biomassa lapangan (metode terestris) yang memiliki akurasi tinggi namun memerlukan banyak waktu, tenaga, dan biaya yang cukup tinggi untuk wilayah yang luas. Teknologi penginderaan jauh dapat mengatasi keterbatasan tersebut. Data satelit penginderaan jauh sistem aktif SAR (*Synthetic Aperture Radar*) Sentinel-1 dengan panjang gelombang C salah satu pemanfaatannya ialah mengestimasi biomassa sehingga memiliki peran dalam pemetaan cadangan karbon. Sistem SAR Sentinel-1 memiliki keunggulan dibanding sistem optik yaitu dapat menghasilkan citra bebas tutupan awan. Penelitian ini diharapkan bisa menjadi kajian yang baik terhadap bagaimana pemanfaatan data SAR Sentinel-1 untuk pendugaan cadangan karbon di atas permukaan.

Tujuan penelitian ini adalah: 1) menganalisis hubungan antara nilai hamburan balik data SAR Sentinel-1 dual polarisasi dengan nilai cadangan karbon hutan rakyat berdasarkan nilai biomassa hijau di atas permukaan; 2) menduga cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo dengan memanfaatkan data dual polarisasi SAR Sentinel-1; dan 3) menentukan jumlah dan agihan cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo berdasarkan data SAR Sentinel-1.

2. DATA DAN METODE

2.1 DATA

Penelitian ini dilakukan di Kabupaten Sukoharjo, Jawa Tengah, secara astronomis terletak antara $110^{\circ} 42' 6,79'' - 110^{\circ} 57' 33,70''$ BT dan $7^{\circ} 32' 17,00'' - 7^{\circ} 49' 32,00''$ LS, dengan objek kajian hutan rakyat. Data yang digunakan yaitu Data SAR C-band Sentinel-1 No. Orbit:9773; No. Track: 76; Tipe Level 1 GRDH (*Ground Range Detected High Resolution*), *Interferometric Wide-Swath Mode* (IW), Polarisasi VV+VH, perekaman 14 April 2016. Data vektor Peta Rupa Bumi Indonesia skala 1:25.000, data DEM SRTM 3Sec v.4, dan data primer hasil pengukuran lapangan berupa tinggi dan diameter tegakan hutan rakyat.

2.2 METODE

Penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap, mulai dari pengolahan citra digital, pengambilan data lapangan yang dilanjutkan dengan pengolahan data lapangan, analisis persamaan penduga cadangan karbon di atas permukaan, dan pembuatan peta cadangan karbon di atas permukaan (lihat Gambar 1).

2.3 Pengolahan Data SAR

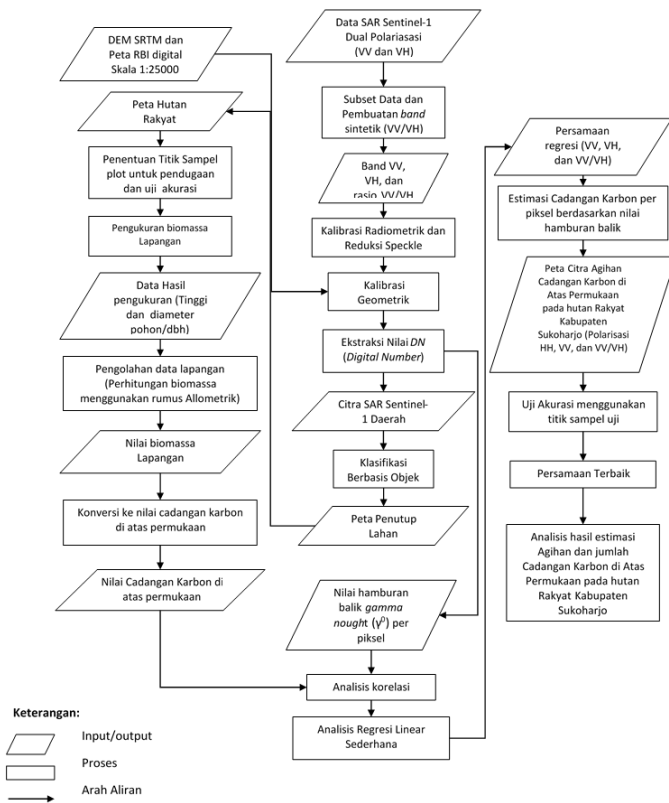
Pra-Pengolahan data SAR Sentinel-1 menggunakan perangkat lunak Sentinel-1 Toolbox (S1Tbx). Data SAR Sentinel-1 yang diolah hanya meliputi daerah penelitian, *band* dual polarisasi (VV dan VH) serta *band* sintetik yang merupakan rasio *band* VV dan VH (VV/VH) yang masing-masing diolah dan dianalisis. Kalibrasi radiometrik pada menghasilkan nilai *sigma nought* (σ^0). Nilai σ^0 dikonversi ke nilai *gamma nought* (γ^0). *Refined Lee Filter* digunakan untuk mengurangi efek *speckle* citra SAR.

Metode ortorektifikasi *Range Doppler Terrain Correction* digunakan untuk menghilangkan distorsi geometri dan data memiliki ukuran piksel 10×10 m, terproyeksi pada koordinat peta. Rektifikasi citra mengacu pada *base map* berupa peta RBI daerah penelitian dilakukan untuk meningkatkan akurasi geometrik citra SAR menggunakan 6 titik GCP (*Ground Control Point*). Nilai *gamma nought* (γ^0) dikonversi ke nilai DN (*Digital Number*) menjadi satuan desibel (dB) yang merupakan koefisien hamburan balik (*Backscatter*). Pembuatan sintetik *band* dilakukan agar klasifikasi berbasis objek menghasilkan klasifikasi yang semakin baik.

Klasifikasi berbasis objek *Object Based Image Analysis* (OBIA) digunakan untuk membuat peta penutup lahan di Kabupaten Sukoharjo yang kemudian diturunkan menjadi peta agihan hutan rakyat, memanfaatkan ketiga *band* (VV, VH, dan *band* sintetik VV/VH) kompositk RGB (*Red*: VV; *Green*: VH; dan *Blue*: VV/VH) menggunakan perangkat lunak ENVI dengan nilai segmen: 45 dan *Merge*: 50. Pemilihan sampel terbimbing untuk klasifikasi dengan memanfaatkan data lokasi penanaman hutan rakyat dan perbandingan kenampakan citra dengan *google earth*, guna mempermudah mengenali objek kajian.

2.3.1 Pengambilan Data Lapangan

Peta hutan rakyat hasil klasifikasi berbasis objek digunakan dalam menentukan titik sampel plot dengan teknik pengambilan sampel secara *purposive* untuk pengukuran biomassa lapangan, mempertimbangkan tingkat kerapatan vegetasi hutan rakyat dan aksesibilitas. Jumlah titik sampel sebanyak 35 titik sampel *plot* (lihat Gambar 3), pengukuran dilakukan pada tanggal 15 Juni 2016 -19



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Juni 2016. Penentuan titik-titik sampel plot tersebut untuk mewakili perbedaan kerapatan vegetasi hanya sebatas memperhatikan perbedaan dan variasi rona citranya karena untuk penentuan tingkat kerapatan berdasarkan nilai *backscatter* Sentinel-1 secara pasti masih sulit diterapkan dalam penelitian ini.

Bentuk plot yang digunakan ialah lingkaran. Ukuran luas area plot ditentukan berdasarkan ukuran piksel SAR Sentinel-1 (10 m x 10 m), jari-jari sampel plot lingkaran sepanjang 5 m. Parameter utama yang diukur adalah keliling dan tinggi pohon serta nama jenis pohon. Keliling pohon diukur untuk memperoleh nilai diameter pohon setinggi dada atau *dbh* (1,3 m). Penaksiran tinggi pohon dilakukan menggunakan alat distometer. Pengukuran hanya dilakukan pada tegakan yang masih hidup.

2.3.2 Pengolahan Data Lapangan

Perhitungan biomassa di atas permukaan dilakukan dengan menggunakan persamaan alometrik yang sudah tersedia (Tim AruPa, 2014), untuk perhitungan biomassa pada hutan rakyat di Jawa. Berdasarkan nilai total biomassa pohon tersebut dimasing-masing plot selanjutnya dihitung cadangan karbon di atas permukaan menggunakan persamaan (1) menurut SNI 7724:2011 sebagai berikut :

$$Cb = B \times \% C \text{ organik} \quad (1)$$

dalam hal ini C_b = kandungan karbon dari biomassa, dinyatakan dalam kilogram (kg); B = total biomassa, dinyatakan dalam (kg); $\%C$ organik = nilai persentase kandungan karbon, sebesar 0,47.

2.3.3 Metode Analisis Data

Analisis statistik dilakukan menggunakan SPSS. Analisis korelasi sederhana diterapkan pada masing-masing hubungan nilai hamburan balik data SAR Sentinel-1 baik polarisasi VV maupun VH terhadap nilai cadangan karbon di atas permukaan. Untuk memperoleh nilai korelasi sederhana digunakan metode *Product Moment Karl Pearson*, x dan y merupakan variabel nilai hamburan balik dan nilai cadangan karbon:

$$r = \frac{N \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[N \sum x^2 - (\sum x)^2] \times [N \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (2)$$

Analisis Regresi digunakan untuk menduga nilai cadangan karbon berdasarkan data hasil pengukuran lapangan (variabel terikat (y)) dan nilai hamburan balik data SAR (variabel bebas (x)). Model analisis regresi linear sederhana digunakan dalam penelitian ini dengan persamaan sebagai berikut (Tika, 2005):

$$y = a + bx \quad (3)$$

dalam hal ini y = variabel terikat yang diprediksi (cadangan karbon); x = variabel bebas (nilai hamburan balik); a = harga y bila $x=0$ (harga konstan); dan b = koefisien regresi.

Analisis regresi linear sederhana diterapkan pada nilai hamburan balik data SAR sentinel-1 polarisasi VV, VH, dan *band* sintetik rasio VV/VH. Penentuan persamaan terbaik dari masing-masing polarisasi mengacu pada koefisien determinasi (*R-Square*). Persamaan tersebut digunakan sebagai masukan persamaan untuk mengubah nilai piksel data SAR menjadi nilai kandungan cadangan karbon di atas permukaan dengan memanfaatkan perangkat lunak ENVI.

Analisis akurasi dilakukan untuk mengetahui keakuratan hasil pendugaan cadangan karbon di atas permukaan (persamaan) terhadap data acuan lapangan. Uji akurasi menggunakan data hasil perhitungan cadangan karbon sebagai data lapangan. Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) adalah sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}} \quad (4)$$

X_{obs} = nilai cadangan karbon hasil observasi lapangan dan X_{model} = nilai cadangan karbon hasil estimasi pada data ke-i, sedangkan n = jumlah data. Hasil pendugaan dengan nilai akurasi tertinggi atau nilai RMSE terendah dipilih untuk menganalisis agihan dan jumlah cadangan karbon di daerah penelitian.

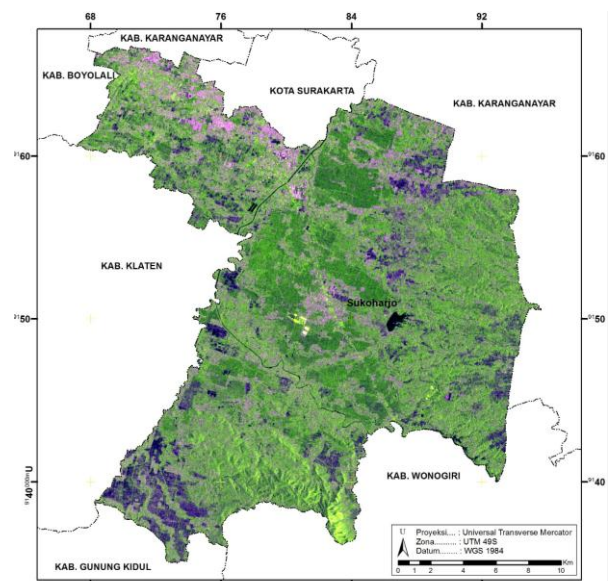
Analisis spasial dan analisis deskriptif kuantitatif digunakan untuk menjawab tujuan penelitian terakhir yaitu bagaimana jumlah dan agihan cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo menggunakan peta tematik dan grafik. Peta tersebut dihasilkan berdasarkan hasil estimasi cadangan karbon dan direpresentasikan dengan memanfaatkan Sistem Informasi Geografis (SIG) menggunakan perangkat lunak ArcGIS. Analisis spasial yang digunakan dalam penelitian ini berupa peta agihan cadangan karbon di atas permukaan dan kelas kerapatan jumlah kandungan cadangan karbon yang menunjukkan agihan jumlah cadangan karbon di atas permukaan hasil estimasi. Melalui peta tersebut dapat dianalisis agihan jumlah cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat Kabupaten Sukoharjo dalam kelas tertentu. Analisis deskriptif kuantitatif digunakan untuk menjelaskan jumlah cadangan karbon yang disajikan dalam bentuk grafik atau tabel. Berdasarkan grafik atau tabel tersebut kandungan cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di setiap kecamatan dapat di perbandingkan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hamburan Balik (*Backscatter*) Data SAR Sentinel-1 pada Hutan Rakyat

Gambar 2 merupakan data citra SAR Sentinel-1 perekaman tanggal 14 April 2016 hasil koreksi radiometri dan geometri, Kabupaten Sukoharjo. Nilai *backscatter gamma nought* (γ^0) citra SAR Sentinel-1, berdasarkan statistik citra dengan cakupan hutan rakyat Kabupaten Sukoharjo hasil klasifikasi OBIA (lihat Gambar 3) menunjukkan nilai *backscatter* pada polarisasi VH yang lebih rendah dibanding polarisasi VV (lihat Tabel 1). Hal tersebut membuktikan bahwa polarisasi yang berbeda berpengaruh terhadap besarnya nilai *backscatter* (Sarker, Md. L.R., dkk., 2013).

Citra SAR yang digunakan telah terkoreksi aspek geometri yakni distorsi geometri baik *layover*, *Shadow*, maupun *foreshortening* dapat memengaruhi nilai *backscatter* objek kajian. Posisi objek sangat berpengaruh terutama pada daerah yang tidak datar atau berbukit hingga bergunung, sehingga memengaruhi hasil penurunan informasi citra cadangan karbon. Pada Gambar 2 dapat diamati bahwa di area berbukit hingga bergunung utamanya di sisi selatan Kabupaten Sukoharjo terdapat perbedaan rona citra pada objek hutan rakyat. Hal tersebut disebabkan belum diterapkannya *slope correction* pada data SAR Sentinel-1 yang digunakan.

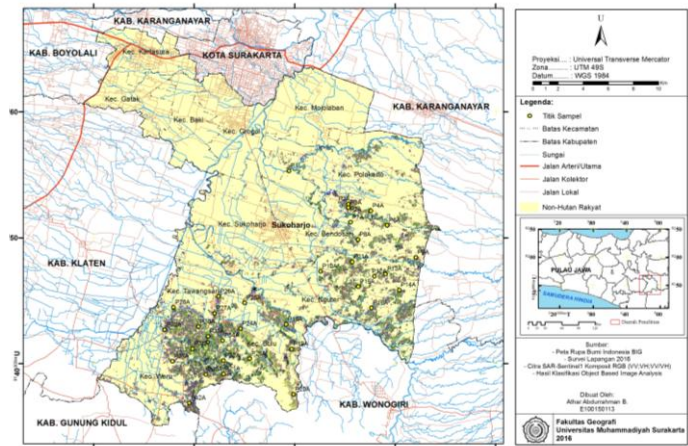


Gambar 2. Citra SAR Sentinel-1 Kabupaten Sukoharjo Tahun 2016 Komposit R:G:B (polarisasi VV:VH:VV/VH)

Tabel 1. Statistik Citra SAR Sentinel-1 Wilayah Hutan Rakyat Kabupaten Sukoharjo

Band	Julat (db)	Rata-rata <i>Backscatter</i> (db)
Polarisasi VV	(-16,532438) – (9,432840)	6,426250
Polarisasi VH	(-22,380007) – (1,569017)	-12,821458

Berdasarkan hasil klasifikasi OBIA dan pengolahan data diperoleh total luas hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo ialah 7.738,287 Ha (lihat Tabel 4). Jika dibandingkan dengan luas hutan rakyat pada tahun 2014 (7.984 Ha) maka hasil pemetaan tersebut dianggap layak digunakan untuk analisis selanjutnya karena tidak terjadi selisih luasan yang sangat signifikan, dengan asumsi bahwa tidak terjadi penambahan hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo ataupun pengurangan yang sangat besar. Sampel plot cukup sulit ditentukan di wilayah bagian Timur Kabupaten Sukoharjo karena blok hutan rakyat menyebar dan sangat rona citra atau perbedaan kerapatan vegetasinya cukup variatif, namun pada wilayah Selatan Kabupaten Sukoharjo cukup mudah karena hutan rakyat cenderung mengelompok dalam satu blok dengan luasan yang relatif luas.

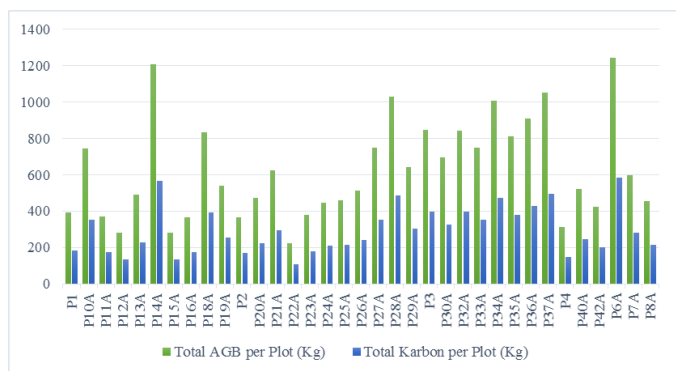


Gambar 3. Peta Titik Sampel Biomassa di Atas Permukaan Hutan Rakyat Kabupaten Sukoharjo

3.2 Kandungan Biomassa Aktual dan Total Cadangan Karbon di Atas Permukaan pada Hutan Rakyat

Berdasarkan hasil pengamatan sampel plot survei lapangan hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo didominasi oleh pohon jati. Selain itu, terdapat hutan rakyat dengan beberapa jenis pohon seperti pohon mahoni, sengon, dan akasia. Selain pada area datar terdapat pula plot sampel hutan rakyat yang berada pada area dengan kondisi lereng miring.

Total cadangan karbon di atas permukaan tertinggi ialah pada titik plot sampel P6A (583,7649 Kg) sedangkan terendah ialah pada titik P22A (105,5403 Kg). Perbandingan biomassa di atas permukaan (*Above Ground Biomass/AGB*) dan cadangan karbon antar plot dapat diamati pada Gambar 4. Variasi nilai *backscatter* data SAR Sentinel-1 dari masing-masing plot juga berbeda-beda untuk polarisasi yang berbeda pula.



Gambar 4. Grafik Jumlah Kandungan Biomassa dan Karbon di atas permukaan pada masing-masing plot sampel

3.3 Statistik Korelasi Nilai *Backscatter* dengan Cadangan Karbon di Atas Permukaan

Berdasarkan hasil analisis statistik (lihat Tabel 2) diperoleh besarnya hubungan antara *backscatter* polarisasi VV dengan cadangan karbon di atas permukaan adalah -0,438, menurut Tika (2005) termasuk hubungan sangat rendah moderat negatif dan signifikan pada alfa 5%. Oleh karena nilai *p-value* (nilai probabilitas pada kolom Sig.) sebesar 0,008 (kurang dari 0,05). Besarnya hubungan antara

backscatter polarisasi VH dengan cadangan karbon di atas permukaan adalah -0,612, termasuk hubungan rendah moderat negatif dan juga signifikan pada alfa 5%.

Tabel 2. Korelasi Nilai *Backscatter* dengan Cadangan Karbon di Atas Permukaan

Variabel	(R)	Sig. (2-tailed)
VV	-.438**	.008
VH	-.612**	.000

***. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).*

Variabel nilai *backscatter* VV dan VH memiliki hubungan yang tidak searah terhadap nilai cadangan karbon. Dapat ditarik kesimpulan bahwa keeratan hubungan yang ditunjukkan *backscatter* polarisasi VH lebih tinggi dibanding *backscatter* polarisasi VV. Hal ini juga diperkuat dengan nilai signifikan atau *p-value backscatter* VH yang lebih kecil daripada *p-value backscatter* VV, artinya tingkat kepercayaan bahwa kebenaran adanya hubungan antara nilai *backscatter* VH dengan cadangan karbon di atas permukaan lebih tinggi dibanding nilai *backscatter* VV. Hal tersebut disebabkan oleh kekuatan sinyal radar yang dikembalikan berbeda pula pada polarisasi sinyal yang berbeda atas respon terhadap objek tegakan hutan rakyat. Hubungan signifikan tetapi tidak kuat dapat disebabkan oleh kemampuan penetrasi sinyal radar Sentinel-1 (*C-band*) yang hanya sebatas bagian atas kanopi pohon, sehingga untuk merepresentasikan respon objek melalui nilai *backscatter* terhadap parameter biofisik (tinggi dan diameter pohon) hanya melalui kondisi kanopi. Oleh karena rendahnya nilai korelasi pada kedua polarisasi tersebut maka pada analisis selanjutnya juga dilakukan analisis regresi pada nilai *backscatter* dari *band* sintetik rasio (VV/VH).

3.4 Analisis Regresi Nilai *Backscatter* dengan Cadangan Karbon di Atas Permukaan Hutan Rakyat

Penelitian mengenai analisis hubungan nilai *backscatter* dengan jumlah jumlah cadangan karbon di atas permukaan berdasarkan nilai biomassa di lapangan telah

Tabel 3. Model Persamaan Linear Sederhana Penduga Cadangan Karbon berdasarkan nilai *backscatter* setiap polarisasi Citra SAR Sentinel-1

Polarisasi	Persamaan	R-Square	Sig.
VV	$Y = -15,465 + -46,420 X$	0,192	0,008
VH	$Y = -493,268 + -61,499 X$	0,375	0,000
Rasio (VV/VH)	$Y = 188,779 + 16,458 X$	0,028	0,338

banyak dilakukan. Penelitian tersebut pada umumnya menyimpulkan bahwa dual polarisasi mampu menjelaskan dengan baik pendugaan-pendugaan biomassa di lapangan dibanding dengan *single* polarisasi (Riska, 2011; Rosaliana, 2010; Sarker, dkk., 2013), namun dapat berbeda tergantung dari jenis objek atau hutan yang dikaji seperti pada penelitian Wijaya, dkk. (2015).

Penyusunan persamaan menggunakan *backscatter* VH menunjukkan nilai koefisien determinasi terbesar $R^2 = 0,375$ (37,5%) (lihat Tabel 3). Hal ini berarti variabel bebas berupa nilai *backscatter* VH lebih besar kemampuannya menjelaskan variabel terikat berupa cadangan karbon, dibanding pengaruh masing-masing variabel *backscatter* VV (19,2 %) atau pun *backscatter* rasio VV/VH (2,8 %).

Berdasarkan hasil uji ANOVA dengan ketentuan nilai signifikan pada taraf 5% (Sig.< 0,05), menunjukkan bahwa model persamaan regresi berdasarkan data penelitian hanya signifikan untuk persamaan *backscatter* VH ($Y = -493,268 + -61,499 X$) dan persamaan *backscatter* VV ($Y = -15,465 + -46,420 X$) saja, berarti kedua persamaan tersebut layak untuk digunakan karena nilai probabilitas jauh lebih kecil dari 0,05 (Santoso, 2012). Adapun untuk model regresi linear *backscatter* rasio VV/VH tidak bisa dipakai untuk memprediksi nilai cadangan karbon karena nilai probabilitas jauh lebih besar dari 0,05 (lihat Tabel 3).

Persamaan regresi yang diperoleh selanjutnya diuji apakah memang valid untuk memprediksi variabel dependen (cadangan karbon) menggunakan uji t untuk konstanta dan variabel dependen berdasarkan probabilitas untuk pengambil keputusan (Santoso, 2012). Hipotesis uji dua arah untuk kedua model tersebut ialah H_0 = koefisien regresi tidak signifikan; H_1 = Koefisien regresi signifikan. Terlihat bahwa pada kolom Sig. (lihat Tabel 3) menghasilkan nilai probabilitas 0,008 pada persamaan VV dan 0,000 pada persamaan VH, maka H_0 (probabilitas < 0,025), baik nilai *backscatter* VV maupun VH benar-benar berpengaruh secara signifikan terhadap pendugaan cadangan karbon. Adapun analisis konstanta -15,465 (persamaan VV) dan -493,268 (persamaan VH) diperoleh nilai probabilitas 0,891 pada persamaan VV dan 0,009 pada persamaan VH. Dengan demikian angka konstanta yang signifikan hanya dihasilkan oleh persamaan VH (0,009 < 0,025), sedangkan konstanta tidak signifikan pada persamaan VV (0,891 > 0,025). Oleh karena itu, penggunaan persamaan pendugaan cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo menggunakan polarisasi VH lebih disarankan dari pada polarisasi VV.

Hal ini menunjukkan bahwa data SAR Sentinel-1 *cross*-polarisasi (VH) secara umum lebih baik untuk memprediksi cadangan karbon di atas permukaan berdasarkan biomassa dibanding *co*-polarisasi (VV), sama halnya seperti hasil penelitian lainnya yang menyatakan bahwa polarisasi *co*-polarisasi (HH) kurang sensitif untuk pendugaan biomassa (Rosaliana, 2010; Sarker, 2015). Rendahnya nilai *R-Square* yang diperoleh dapat disebabkan oleh panjang gelombang *C-band* yang rendah hubungannya dengan kurang sesuai untuk pendugaan biomassa akibat dari masalah *saturation* citra SAR (Sarker, 2015) termasuk korelasi yang tidak signifikan terhadap karakteristik tegakan hutan seperti DBH dan rata-rata tinggi pohon (Wuryanta, 2016).

3.5 Agihan Jumlah Cadangan Karbon

Berdasarkan hasil pendugaan cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo dengan memanfaatkan citra SAR Sentinel-1 polarisasi VH, diperoleh bahwa cadangan karbon di atas permukaan memiliki variasi jumlah dengan nilai terkecil 0,0106 Kg hingga 883,08 Kg. Citra tersebut berdasarkan hasil perhitungan akurasi RMSE (*Root Mean Square Error*) memiliki nilai sebesar 101,1648, dapat terjadi selisih hasil pendugaan sebesar 101,1648 Kg, hal tersebut terjadi mengingat tidak begitu tingginya nilai *R-square* yang diperoleh.

Berdasarkan hasil abstraksi objek kajian yakni cadangan karbon di atas permukaan pada area hutan rakyat Kabupaten Sukoharjo (lihat Gambar 5 dan Gambar 6), cadangan karbon memiliki pola sebaran area yang mengelompok di bagian selatan yaitu pada Kecamatan Weru, Bulu, dan Tawang Sari. Pada wilayah bagian timur Kabupaten Sukoharjo cadangan karbon di atas permukaan pada area hutan rakyat memiliki pola sebaran acak, dapat diamati bahwa cadangan karbon pada hutan rakyat di Kecamatan Nguter, Bendosari, dan Polokarto memiliki luasan area hutan rakyat yang relatif sedikit lebih sempit dan tersebar secara acak. Selain itu keberadaan cadangan karbon hutan rakyat yang kurang menonjol berdasarkan hasil pengamatan peta citra (lihat

Tabel 4. Jumlah Cadangan Karbon di Atas Permukaan pada Hutan Rakyat Per Kecamatan di Kabupaten Sukoharjo

Kecamatan	Jumlah	
	Cadangan Karbon (Ton)	Luas (Ha)
Bulu	49.540,21	1.782,008
Nguter	45.786,55	1.530,288
Weru	41.226,99	1.341,577
Bendosari	31.230,21	1.028,607
Tawang Sari	27.811,72	959,048
Polokarto	27.066,88	906,714
Sukoharjo	4.538,85	149,691
Mojolaban	643,05	20,046
Grogol	470,38	16,257
Baki	92,02	2,694
Gatak	49,50	1,357
Kartasura	-	0,000
Total	228.456,36	7.738,287

Gambar 5) tersebar secara acak di 5 kecamatan lainnya yaitu Kecamatan Sukoharjo, Mojolaban, Grogol, Baki, dan Gatak.

Secara kuantitatif berdasarkan Tabel 4 diketahui bahwa jumlah cadangan karbon di atas permukaan paling sedikit berada di Kecamatan Gatak sejumlah 49,50 Ton dengan luasan total hutan rakyat 1,357 Ha, sedangkan jumlah terbesar berada pada Kecamatan Bulu sejumlah 49.540,21 Ton dengan hutan rakyat seluas 1.782,008 Ha. Secara umum dapat dilihat bahwa semakin luas hutan rakyat pada kecamatan tersebut maka semakin banyak juga cadangan karbon di atas permukaan yang terkandung, namun tidak menutup kemungkinan didominasi oleh konsentrasi kerapatan cadangan karbon di atas permukaan yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada peta kelas kerapatan cadangan karbon (lihat Gambar 6) dan secara rinci pada Tabel 5.

Wilayah Kecamatan Bulu bagian tengah hingga ke arah Selatan dan Barat cadangan karbon terkonsentrasi dengan nilai yang bervariasi, didominasi oleh lahan dengan topografi berbukit hingga bergunung. Karena kondisi lahan seperti itu hutan rakyat menjadi pemanfaatan lahan oleh masyarakat (petani hutan rakyat) tanah daripada daerah datar yang lebih dipilih untuk dimanfaatkan sebagai lahan pertanian sawah, ladang, ataupun permukiman. Hal ini dapat disebabkan oleh cadangan air tanah pada daerah yang berbukit hingga bergunung lebih sedikit dibanding pada daerah datar, sehingga tegakan tanaman keras (pohon) lebih mampu bertahan hidup. Jumlah cadangan karbon dengan kerapatan sekitar 200 – 400 Kg/100m² mendominasi (lihat Tabel 5 dan Gambar 6). Berdasarkan pola yang terbentuk cadangan karbon bernilai lebih tinggi berada di daerah yang cenderung datar dan lebih rendah atau menurun pada daerah berlereng semakin miring karena semakin jarang jarak pohon yang ditanam oleh masyarakat pada area yang makin miring. Namun cadangan karbon dengan kerapatan kelas 3 (>400 Kg/100m²), yang berarti jarak antar pohon semakin rapat ditanam ataupun lebih tinggi dan lebih besar diameternya, berpola menyebar dapat berada pada area datar maupun di daerah yang lebih tinggi seperti puncak perbukitan (lihat Gambar 5).

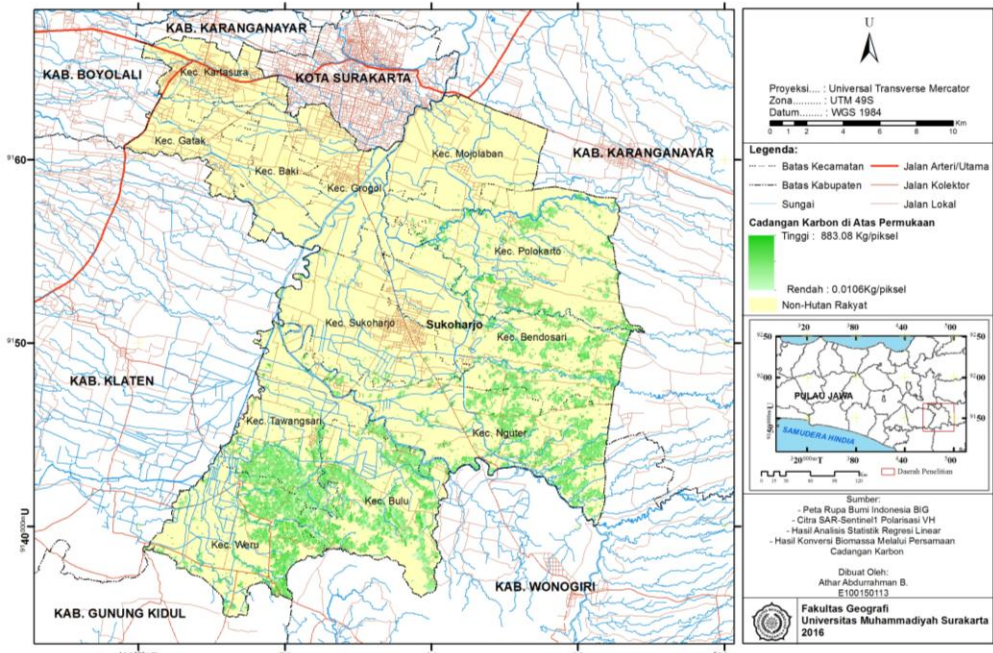
Cadangan karbon di atas permukaan dominan mengelompok di wilayah yang memiliki topografi bergelombang dan berbukit yang lebih dimanfaatkan untuk hutan rakyat (lihat Gambar 5), komposisi hutan rakyat berasosiasi pada wilayah permukiman masyarakat yang mengelola hutan rakyat di sekitarnya, sehingga kualitas hutan rakyat tetap terjaga dan terawat seperti pada Kecamatan Weru. Hutan rakyat pada Kecamatan Weru dan Bulu termasuk hutan rakyat yang dikatakan berhasil dikembangkan oleh Pemkab Sukoharjo (Widiyanto, 2015), tanaman tersebut tumbuh subur karena cocok di wilayah kering pada wilayah Selatan Kabupaten Sukoharjo dengan jenis tanah litosol, juga program penghijauan oleh Badan Lingkungan Hidup dan kerjasama masyarakat merawat tanaman agar tetap hidup. Kecamatan Tawang Sari memiliki cadangan karbon mengelompok pada hutan rakyat

Tabel 5. Persentase Luas Hutan Rakyat Per Kecamatan Kabupaten Sukoharjo untuk setiap Interval Kelas Kerapatan Cadangan Karbon di Atas Permukaan

Kecamatan	Luas (Ha)			Persentase (%)		
	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 3
Bulu	369,9771	1205,301	206,7298	4,768	15,532	2,664
Nguter	197,7823	1129,673	202,8332	2,552	14,579	2,618
Weru	167,4527	961,3423	212,7821	2,171	12,463	2,759
Bendosari	130,1205	751,3681	147,1186	1,685	9,727	1,905
Tawang Sari	152,8156	701,8809	104,3517	1,983	9,107	1,354
Polokarto	129,5604	654,6574	122,4966	1,673	8,454	1,582
Sukoharjo	17,49307	112,5559	19,64226	0,224	1,438	0,251
Mojolaban	1,956202	14,03351	4,056127	0,025	0,178	0,052
Grogol	3,041518	10,87572	2,339525	0,039	0,139	0,030
Baki	0,280284	1,561121	0,852113	0,004	0,020	0,011
Gatak	0,095832	0,812127	0,448616	0,001	0,010	0,005
Total	1.170,295	5.544,271	1.023,721	15,123	71,647	13,229

Ket. : Kelas 1= (0-200 Kg/100 m²); Kelas 2 = (200-400 Kg/100 m²) ; Kelas 3= (>400 Kg/100 m²).

dominan di bagian Selatan, berbatasan langsung dengan Kecamatan Weru dan Bulu, pada hutan rakyat berada pada lahan yang memiliki topografi bergelombang, karena pada wilayah yang datar di sisi Utara dimanfaatkan sebagai lahan sawah dan permukiman, dan kelas kerapatan cadangan karbon dominan pada kelas 2 ($200 - 400 \text{ Kg}/100\text{m}^2$).

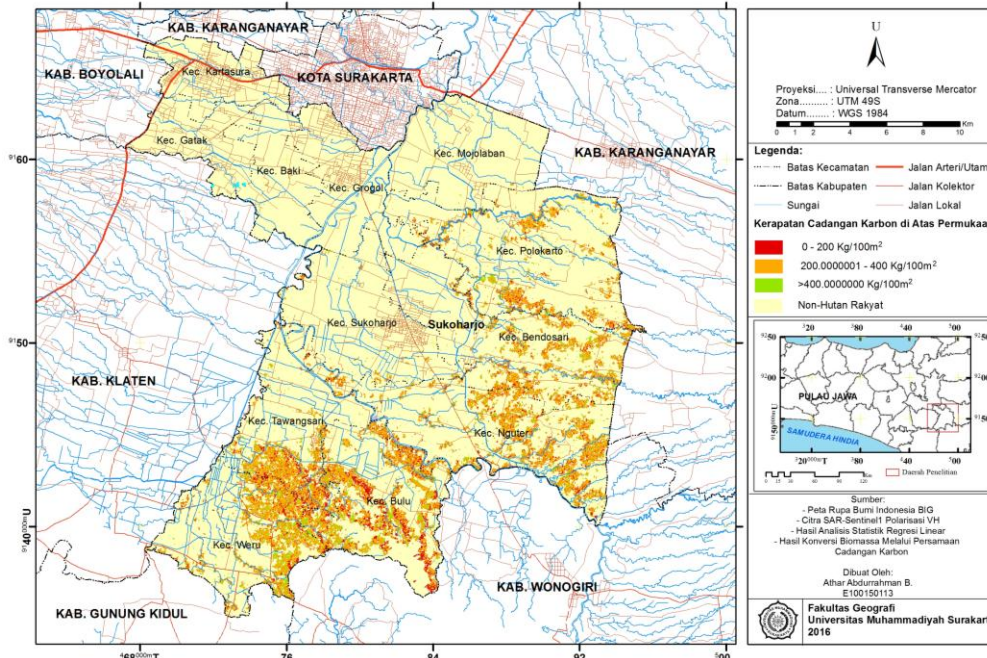


Gambar 5. Peta Cadangan Karbon di Atas Permukaan Pada Hutan Rakyat Kabupaten Sukoharjo, Berdasarkan Persamaan Regresi Polarisasi VH

Jumlah cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat di Kecamatan Nguter merupakan yang terbanyak setelah Kecamatan Bulu (lihat Tabel 4). Cadangan karbon hutan rakyat tersebar secara acak di bagian Timur yang merupakan lahan dengan topografi relatif landai dan berombak dan selain hutan rakyat pemanfaatan lahan oleh masyarakat seperti permukiman, sawah tadah hujan, dan ladang masih memungkinkan, tidak seperti di bagian Barat wilayah Kecamatan Nguter yang secara optimal digunakan sebagai lahan pertanian sawah karena bertopografi lebih datar (lihat Gambar 5). Jauh lebih kecilnya kelas kerapatan 1 ($0 - 200 \text{ Kg}/100\text{m}^2$) yang teridentifikasi di Kecamatan Nguter (lihat Gambar 6) daripada di Kecamatan Bulu menunjukkan bahwa sedikitnya hutan rakyat yang ditanam dengan jarak pohon yang jarang dan atau pohon muda.

Kecamatan Bendosari mempunyai cadangan karbon yang terserbar secara acak dengan luasan yang tidak terlalu luas (lihat Tabel 4) dan dominan di bagian Timur Bendosari (lihat Gambar 5), sedangkan di wilayah Barat hanya teridentifikasi pada daerah dekat sungai perbatasan Kecamatan Polokarto. Kelas kerapatan cadangan karbon dominan dan cukup homogen pada kelas kerapatan 2 hampir di seluruh bagian hutan rakyat, dan sedikit sekali teridentifikasi pada kelas kerapatan 1 dan 3 (lihat Gambar 6 dan Tabel 5).

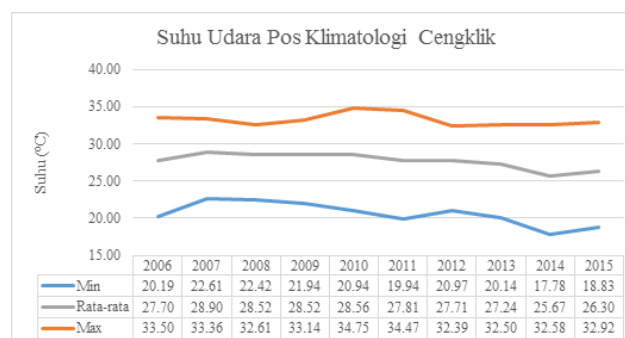
Kecamatan Polokarto menunjukkan selisih jumlah cadangan karbon di atas permukaan yang tidak jauh berbeda dengan Kecamatan Tawang Sari (lihat Tabel 4), namun hutan rakyat Polokarto memiliki pola sebaran yang acak di sisi Utara dan Selatan. Kecamatan Tawang Sari lebih kompak struktur keruangan hutan rakyatnya. Pada Kecamatan ini terdapat perkebunan hutan karet yang luas dan mendominasi wilayahnya, sehingga terlihat bahwa cadangan karbon di atas permukaan hutan rakyat tidak teridentifikasi di tengah wilayah kecamatan tersebut (lihat Gambar 5). Berdasarkan persentase kerapatannya juga dominan pada kelas 2.



Gambar 6. Peta Kelas Kerapatan Cadangan Karbon di Atas Permukaan Pada Hutan Rakyat Kabupaten Sukoharjo

Berdasarkan hasil pendugaan dan pemetaan cadangan karbon di atas permukaan (lihat Gambar 6), Kecamatan Sukoharjo dan Kecamatan Mojolaban memiliki pola menyebar pada area pinggir di sisi selatan dan timur. Cadangan karbon memiliki asosiasi dengan kecamatan yang berbatasan dengan wilayah sekitarnya sebagai satu kesatuan hutan rakyat tak terpisahkan. Kecamatan Sukoharjo bertopografi datar dijadikan pemanfaatan lahan pertanian dan pembangunan area perkotaan, asosiasi hutan rakyat terlihat pada sisi sungai yang membatasi wilayahnya dengan kecamatan yang dominan oleh hutan rakyat. Kecamatan Mojolaban menunjukkan hal yang serupa, bahwa lahan pertanian sawah dan permukiman diprioritaskan dan cadangan karbon yang dimiliki berasosiasi dengan hutan rakyat di Kecamatan Polokarto. Homogen pada kelas kerapatan 2. Adapun pada Kecamatan Grogol cadangan karbon tidak begitu banyak (lihat Tabel 4), pola hampir sama dengan Kecamatan Mojolaban, Hutan rakyat Kecamatan Baki dan Kecamatan Gatak memiliki cadangan karbon di atas permukaan yang paling rendah (lihat Tabel 4), berdasarkan hasil pemetaan, hutan rakyat di dua kecamatan tersebut memang teridentifikasi tidak mendominasi dan dengan total luasan hutan rakyat yang sangat sedikit, yaitu dibawah 3 Ha. Disebabkan oleh lokasinya yang jauh dari kecamatan yang didominasi oleh hutan rakyat dan pemanfaatannya lahannya didominasi oleh lahan pertanian di sisi Selatan dan permukiman di sisi Utara.

Perubahan iklim ditandai dengan terjadinya pemanasan global. Berdasarkan data perubahan suhu udara sepuluh tahun terakhir (2006-2015) di Kabupaten Sukoharjo dari Pos Klimatologi Cengklik yang posisinya sudah dapat mewakili kondisi suhu udara di Kabupaten Sukoharjo pada wilayah bertopografi relatif datar, sedangkan Pos Klimatologi Kedung Uling yang terletak di Selatan Kabupaten Sukoharjo diasumsikan juga memiliki suhu udara yang relatif sama dengan



Gambar 7. Grafik Perubahan Suhu Udara Tahun 2006-2015 di Pos Klimatologi Cengklik, Kecamatan Ngemplak, Kabupaten Boyolali.

suhu udara di wilayah Kabupaten Sukoharjo bagian Selatan yang relatif bertopografi berbukit hingga bergunung.

Berdasarkan grafik perubahan suhu (lihat Gambar 7) diketahui bahwa daerah di Kabupaten Sukoharjo mengalami trend perubahan suhu yang fluktuatif, namun cenderung sedikit menurun 5 tahun terakhir (2010-2015). Suhu udara maksimum tercatat cukup tinggi yang merupakan ciri-ciri iklim daerah sekitar perkotaan seperti Kota Surakarta atau daerah dengan tutupan vegetasi rendah. Tercatat bahwa suhu udara maksimum Kota Surakarta naik 5° C atau sudah mencapai 36° C dalam 4 tahun (2011-2015) (Afifah, 2015), hal tersebut mengindikasikan adanya pengaruh perubahan iklim. Tidak terdapat hutan rakyat yang begitu dominan di wilayah bagian Utara Kabupaten Sukoharjo dengan topografi relatif datar (lihat Gambar 6), hal tersebut menunjukkan bahwa peran hutan rakyat sebagai penyerap dan penyimpan karbon sekaligus menjaga suhu udara agar tidak terlalu panas di daerah tersebut tidak terlalu mendominasi, namun dapat dilengkapi dengan ruang terbuka hijau lainnya di daerah tersebut.

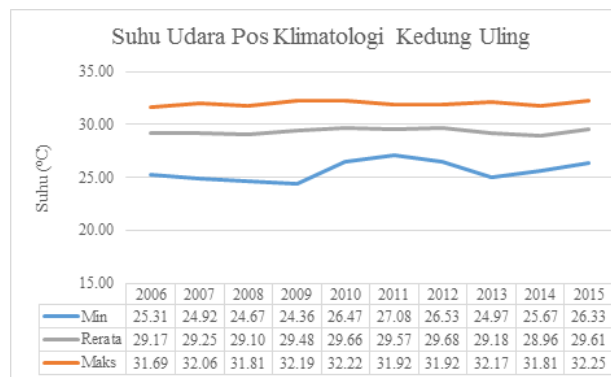
Berebeda dengan di wilayah bagian Selatan Kabupaten Sukoharjo tercatat bahwa trend perubahan suhu udara cenderung relatif naik meskipun dengan (lihat Gambar 8) meskipun suhu maksimum tidak lebih tinggi dibanding pada wilayah Utara Kabupaten Sukoharjo. Selain karena elevasi yang berbeda, suhu udara maksimum yang sedikit lebih rendah dapat dipengaruhi oleh keberadaan tutupan vegetasi termasuk hutan rakyat (Kecamatan Weru, Tawangasari, dan Bulu) dengan cadangan karbon yang lebih banyak (lihat Gambar 5). Terjadinya kenaikan suhu udara tersebut sebagai indikator perubahan iklim, berarti keberadaan hutan rakyat sebagai penyerap dan penyimpan karbon untuk mitigasi perubahan iklim yang terjadi untuk Kabupaten Sukoharjo dan sekitarnya sangat penting, terutama pada wilayah sekitar Kecamatan Bulu, Tawangasari, dan Weru. Juga dapat didukung oleh hutan rakyat ataupun jenis hutan lain yang terdapat di Kabupaten Wonogiri dan Gunungkidul, sehingga kenaikan suhu udara dapat dicegah.

4. PENUTUP

4.1 Kesimpulan

Nilai hamburan balik data SAR (*Synthetic Aperture Radar*) Sentinel-1 polarisasi VV dan VH dengan nilai cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat memiliki hubungan yang signifikan dan berbanding terbalik, sehingga semakin tinggi nilai *backscatter* semakin rendah nilai cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat hasil pendugaan. Adapun keeratan hubungan nilai hamburan balik polarisasi VH lebih tinggi dibanding *backscatter* polarisasi VV.

Citra SAR Sentinel-1 dapat dimanfaatkan untuk menduga agihan cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat Kabupaten Sukoharjo dengan cara menggunakan persamaan regresi linear sederhana $Y = -493,268 + -61,499 X$ berdasarkan nilai *backscatter* polarisasi VH dengan nilai RMSE yang lebih kecil dibanding berdasarkan nilai *backscatter* polarisasi VV ataupun rasio (VV/VH).



Gambar 8. Grafik Perubahan Suhu Udara Tahun 2006-2015 di Pos Klimatologi Kedung Uling, Kecamatan Wuryantoro, Kabupaten Wonogiri.

Jumlah cadangan karbon di atas permukaan hasil estimasi pada hutan rakyat di Kabupaten Sukoharjo yaitu sebesar 228.456,36 Ton pada 7.738,287 Ha hutan rakyat, tersebar di sebelas kecamatan dengan jumlah paling banyak di Kecamatan Bulu dan paling sedikit di Kecamatan Gatak dan dominan pada kelas kerapatan 200-400 Kg/100m² di 6 kecamatan yaitu Kecamatan Weru, Tawang Sari, dan Bulu dengan pola mengelompok serta Kecamatan Nguter, Bendosari, dan Polokarto dengan pola sebaran acak.

4.2 Saran

Perlu dilakukan proses *slope correction* untuk penelitian selanjutnya dalam memanfaatkan data SAR Sentinel-1 untuk menduga nilai cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat terutama apabila daerah kajian relatif berbukit hingga bergunung agar menghasilkan keakuratan hasil pendugaan yang semakin baik.

Rendahnya koefisien determinasi yang diperoleh diperkirakan dipengaruhi oleh model linier yang digunakan sehingga perlu dilakukan kajian lebih lanjut pada beberapa model persamaan regresi lainnya dalam memanfaatkan data SAR Sentinel-1 untuk menduga nilai cadangan karbon di atas permukaan pada hutan rakyat.

Keberadaan hutan rakyat yang memiliki peran besar dalam menyimpan karbon baik di atas permukaan maupun di bawah permukaan di Kabupaten Sukoharjo perlu dipertahankan, ditingkatkan perawatan dan pemanfaatannya oleh pemerintah dan masyarakat terutama pada hutan rakyat di Kecamatan Weru, Tawang Sari, Bulu, Nguter, Bendosari, dan Polokarto, dengan demikian dapat mencegah semakin naiknya suhu udara di Kabupaten Sukoharjo dan sekitarnya sebagai salah satu upaya mitigasi perubahan iklim sejak dini. Jenis tanaman jati memiliki potensi menyimpan cadangan karbon di atas permukaan cukup besar pada hutan rakyat, sehingga penghijauan berkelanjutan menggunakan tanaman ini direkomendasikan.

PERSANTUNAN

Artikel ilmiah ini merupakan bagian dari penelitian Skripsi Sarjana Strata 1 Athar A. Bayanudin dan oleh karena itu kami ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada Bapak Choirul Amin, S.Si., M.M. dan Bapak Drs. H. Yuli Priyana, M.Si. selaku dosen penguji skripsi atas saran dan diskusi dalam penulisan penelitian ini. Terakhir, kami ingin mengucapkan terima kasih banyak kepada Haris Mustaqim, S.Si. atas bantuannya selama survei lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Afifah, N. M. 2015. 'Panas! Suhu Udara Solo Naik 5,5 Derajat dalam 4 Tahun', [online] *solopos.com*, 4 November.
- CIFOR [Center for International Forestry Research]. 2010. *REDD Apakah itu? Pedoman CIFOR tentang hutan, perubahan iklim dan REDD*. Bogor, Indonesia: CIFOR.
- COP21. 2015. *What Was COP 21?*, [online], dari: www.cop21.gouv.fr [24 Maret 2008].
- FWI [Forest Watch Indonesia]. 2009. *Penghitungan Potensi Karbon di Kawasan Hutan Pengelolaan oleh Masyarakat Secara Lestari dan Berkelanjutan*. Bogor: Forest Watch Indonesia, [diunduh online], dari: www.fwi.or.id [25 Maret 2016].
- Masripatin, N., Ginoga, K., Pari, G., Dharmawan, W.S., Siregar, C.A., Wibowo, A., Puspasari, D., Utomo, Setiyo, A., Sakuntaladewi, N, Lugina, M., Indartik, Wulandari, W., Darmawan, S., Heryansah, I., Heriyanto, N.M., Siringoringo, H.H., Damayanti, R., Anggraeni, D., Krisnawati,

- H., Maryani, R., Apriyanto, D., dan Subekti, B. 2010. *Cadangan Karbon pada berbagai Tipe Hutan dan Jenis Tanaman di Indonesia*. Bogor: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perubahan Iklim dan Kebijakan.
- Rahayu, S., Lusiana, B., dan Noordwijk, M.V. 2006 *Pendugaan Cadangan Karbon Di Atas Permukaan Tanah Pada Berbagai Sistem Penggunaan Lahan Di Kabupaten Nunukan, Kalimantan Timur*. Bogor: World Agroforestry Center.
- Riska, A. 2011. Pendugaan Biomassa Atas Permukaan Pada Tegakan Pinus (*Pinus Merkusii Jungh Et De Vriese*) Menggunakan Citra Alos Palsar Resolusi Spasial 50 m dan 12,5 m (Studi Kasus di KPH Banyumas Barat). [Skripsi]. Bogor: Departemen Manajemen Hutan Fakultas Kehutanan, IPB.
- Rosaliana. 2010. Penggunaan *Synthetic Aperture Radar* untuk Biomassa hutan rakyat di Kabupaten Kulon Progo. [Tesis]. Yogyakarta: S2 Ilmu Kehutanan UGM.
- Santoso, S. 2012. Panduan Lengkap SPSS Versi 20. Jakarta: PT Elex Media Komputindo.
- Saputra, E.E. 2013. Potensi Cadangan Karbon Permukaan Pada Berbagai Jenis Pola Tanam di Hutan Rakyat Desa Labuaja Kecamatan Cenrana Kabupaten Maros. [Skripsi]. Makassar: Fakultas Kehutanan Universitas Hasanuddin.
- Sarker, Md. L. R., Nichol, J., Iz, H. B., Ahmad, B.B., dan Rahman, A.A. (2013). Forest Biomass Estimation Using Texture Measurements of High-Resolution Dual-Polarization C-Band SAR Data. *IEEE Transactions On Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 51, No. 6, p.3371-3384 Juni 2013.
- SNI 7724:2011. 2011. *Pengukuran dan penghitungan cadangan karbon –Pengukuran lapangan untuk penaksiran cadangan karbon hutan (ground based forest carbon accounting)*. Jakarta: BSN.
- Sunaryo, A. 2015. ‘Kekeringan, hutan jati milik rakyat di Sukoharjo terbakar’, [online] *merdeka.com*, 24 Agustus.
- Tika, M.P. 2005. *Metode Penelitian Geografi*. Jakarta: Sinar Grafika Offset.
- TimARuPA. 2014. *Menghitung Cadangan Karbon di Hutan Rakyat Panduan bagi Para Pendamping Petani Hutan Rakyat*. Yogyakarta: Biro Penerbit AruPA.
- Widiyanto, D. 2015. ‘Pemkab Sukoharjo Berhasil Kembangkan Hutan Rakyat di Weru’, [online] *krjogja.com*, 24 Maret
- Wijaya, A., Liesenberg, V., Susanti, A., Karyanto, O., dan Verchot, L.V. 2015. Estimation of Biomass Carbon Stocks Over Peat Swamp Forests Using Multi-Temporal And Multi-Polarizations Sar Data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-7/W3, 2015 36th International Symposium on Remote Sensing of Environment, 11–15 May 2015, Berlin, Jerman.
- Wuryanta, A. (2016). Radar Data for Identifying the Characteristics of Tropical Forest Stands. *Forum Geografi*. Vol 30, no.1, July, pp: 69-76.