

ANALISIS MULTI TEMPORAL CITRA SATELIT LANDSAT UNTUK PEMANTAUAN CADANGAN KARBON NASIONAL

(Multi Temporal Analisis of Landsat Satellite Imagery for Monitoring of National Carbon Stock)

Anna Tosiani¹, Ruandha Agung Sugardiman¹, Sigit Nugroho¹, Ahmad Basyirudin Usman¹, Riva Rovani²

Direktorat Inventarisasi dan Pemantauan Sumber Daya Hutan, KLHK¹
Indonesian Embassy, Tokyo²

Gedung Manggala Wanabakti Blok I Lantai 7, Jalan Gatot Subroto, Jakarta
E-mail: annatosiani95@gmail.com

ABSTRAK

Indonesia adalah salah satu negara tropis yang mempunyai luas kawasan hutan terbesar ketiga di dunia setelah Brazil dan Congo. Namun berdasarkan data dari FAO (2015), Indonesia merupakan negara dengan kehilangan hutan yang besar. Berdasarkan *Second National Communication* (2010) dan *First Biennial Update Report* (2016), perubahan penutupan hutan dan lahan merupakan sektor yang menyumbangkan emisi gas rumah kaca terbesar, termasuk di dalamnya adalah kebakaran di lahan gambut. Melalui *Nationally Determined Contribution* (NDC), Indonesia menyampaikan komitmen untuk menurunkan emisi gas rumah kaca sebesar 29% dengan usaha sendiri dan 41% dengan dukungan Internasional di tahun 2030. Pemetaan dan pemantauan cadangan karbon di sektor kehutanan adalah bagian dari proses untuk menentukan kebijakan dalam rangka memenuhi komitmen tersebut. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghitung dan memetakan cadangan, emisi dan serapan karbon di atas permukaan (*Aboveground Carbon*) berdasarkan series data citra resolusi sedang. Penelitian ini menggunakan metode penghitungan perubahan cadangan karbon (*Stock Difference Approach*) dengan melakukan analisis spasial data penutupan lahan nasional hasil penafsiran citra Landsat tahun 2009-2014 dan data biomassa hasil Inventarisasi Hutan Nasional dengan menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG). Hasil dari penelitian ini adalah cadangan karbon, emisi dan serapan karbon untuk skala nasional dan sub nasional (7 pulau besar) yang disajikan dalam bentuk tabel, grafik dan peta cadangan karbon. Penelitian ini menunjukkan bahwa data citra satelit resolusi sedang (Landsat) dapat secara efektif memetakan sebaran cadangan karbon serta menghitung serapan dan emisi gas rumah kaca pada skala nasional.

Kata kunci: citra penginderaan jauh, cadangan karbon, faktor emisi, penutupan lahan, analisis spasial

ABSTRACT

Indonesia is the tropical countries having third largest forest coverage in the world after Brazil and Democratic Republic of Congo. However, based on FAO data (2015), it set a record as the highest annual net forest cover loss. Based on Second National Communication (2010) and First Biennial Update Report (2016), the land use/land cover changes are calculated as the largest GHG emissions contributing sector, including peat fire. Those conditions motivated Indonesia to make a pledge to reduce carbon emissions 29% (independently) or 41% (internationally supported) by 2030 through Nationally Determined Contribution (NDC). Carbon stocks mapping and monitoring in forested region is basic part of policy arrangement to meet Indonesian commitment and to mitigate the climate change impacts. The study aims to calculate and map the national above ground carbon stocks, emissions, and absorptions based on series of the medium resolution imagery. The analysis conducted using Stock Difference Approach based on Geographic Information System (GIS) spatial analysis of national land cover data that was obtained from Landsat image interpretation year 2009-2014 and biomass data from National Forest Inventory (NFI). The study is resulting the national and sub national (seven archipelagoes) carbon stocks and emissions/removals (as illustrated on table, graphic and map). This results show medium resolution satellite image data (Landsat) can effectively to map the distribution of carbon stocks as well as calculate national greenhouse gas emissions and sinks.

Kata kunci: remote sensing imagery, carbon stock, emission factor, land cover, spatial analysis

PENDAHULUAN

Hutan tropis merupakan salah satu topik yang menjadi isu menarik dalam perdebatan perubahan iklim karena peran pentingnya sebagai penyerap karbon dan sekaligus penyebab besarnya emisi yang dikaitkan dengan hilangnya luas hutan (Avitabile et al., 2011). Indonesia adalah salah satu negara tropis yang mempunyai luas kawasan hutan terbesar ketiga di dunia setelah Brazil dan Congo. Namun berdasarkan data dari FAO (2015), Indonesia juga merupakan negara dengan kehilangan hutan yang besar. Berdasarkan *Second National Communication* (2010) dan *First Biennial Update Report* (2016), perubahan penutupan hutan dan lahan merupakan sektor yang menyumbangkan emisi gas rumah kaca terbesar, termasuk di dalamnya adalah kebakaran di lahan gambut.

Untuk menjawab permasalahan tersebut, skema REDD+ disusun oleh *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)* dalam rangka memberikan insentif pendanaan bagi negara-negara tropis yang dapat menurunkan emisi dari deforestasi dan degradasi hutan (REDD) di bawah tingkat referensi sejarah deforestasinya (*Business as Usual/BAU*) (Gullison et al., 2007). Sebagai salah satu negara tropis yang berpartisipasi dalam skema REDD+, Indonesia mempunyai kewajiban untuk menyusun estimasi cadangan karbon hutan dan perubahannya pada skala nasional yang dilaporkan ke UNFCCC (UNFCCC, 2009). Penghitungan jumlah dan perubahan biomassa kayu di atas permukaan (*Above Ground Biomass/AGB*) juga merupakan elemen penting untuk perencanaan nasional di berbagai negara tropis, di mana komunitas lokal mengandalkan kayu sebagai sumber utama produksi dan energi (Avitabile et al., 2011).

Pada pertemuan G-20 di Pittsburgh tahun 2008, Pemerintah berkomitmen untuk menurunkan emisi sebesar 26% dengan usaha sendiri dan 41% dengan bantuan internasional pada tahun 2020. Pada tahun 2016, Indonesia kembali menyampaikan Dokumen *Nationally Determined Contribution* (NDC) dengan komitmen menurunkan emisi gas rumah kaca sebesar 29% dengan usaha sendiri dan 41% dengan dukungan internasional di tahun 2030. Untuk dapat menentukan kebijakan dalam rangka mewujudkan komitmen Indonesia tersebut, maka perlu diketahui seberapa besar sebenarnya cadangan karbon dan emisi gas rumah kaca yang terjadi di Indonesia.

Data penginderaan jauh merupakan sumber kunci data untuk penghitungan biomassa dan perubahannya secara spasial, terkini, dan konsisten, khususnya di negara-negara yang luas dengan akses terbatas (DeFries et al., 2007; GOCF-GOLD, 2009; Herold & Johns, 2007; Penman et al., 2003; UNFCCC, 2007; UNFCCC, 2008; Avitabile et al., 2011). Beberapa pendekatan dilakukan untuk memetakan biomassa di atas permukaan menggunakan pengamatan satelit yang dilakukan secara langsung (pemetaan cadangan karbon) dan tidak langsung (pemetaan tutupan hutan) terhadap kepadatan biomassa (Avitabile et al., 2011).

Beberapa penelitian membuktikan sensitivitas panjang gelombang tampak dan inframerah dekat terhadap struktur dan berat jenis vegetasi yang berkaitan dengan biomassa di atas permukaan tanah (Baccini et al., 2004; Gemmell, 1995; Lu Batistella & Moran, 2005; Lu et al., 2004). Data citra resolusi sedang (seperti Landsat, ASTER, SPOT) biasanya digunakan untuk analisis biomassa pada skala lokal (Foody et al., 2001; Powell et al., 2010; Avitabile et al., 2011). Meskipun citra resolusi sedang memberikan detail spasial yang kompatibel dengan ukuran unit vegetasi dan pengamatan biomassa di lapangan, namun citra bebas awan untuk daerah luas dengan resolusi temporal baik sulit diperoleh. Data Landsat banyak digunakan untuk analisis daerah yang luas karena merupakan data yang terbuka dan gratis untuk umum (Woodcock et al., 2008) dimana, data ini mempunyai cakupan global dan periodenya hampir 40 tahun (Goward et al., 2006; Williams et al., 2006). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghitung dan memetakan cadangan, emisi dan serapan karbon di atas permukaan (*Aboveground Carbon*) berdasarkan series data citra resolusi sedang (Landsat).

METODE

Cakupan area penelitian ini adalah wilayah daratan Indonesia (nasional) dan 7 pulau besar (sub nasional) yaitu Sumatera, Kalimantan, Jawa, Sulawesi, Bali-Nusa Tenggara, Maluku, dan Papua, baik yang berhutan maupun tidak berhutan. Periode data citra penginderaan jauh yang

dipakai adalah tahun 2009-2014. Ketersediaan data citra Landsat *series* untuk seluruh wilayah Indonesia dan data inventarisasi hutan nasional mendukung dalam proses analisis data untuk penentuan cadangan karbon, serapan dan emisinya.

Indonesia terletak di antara 6°08'LU - 11°15'LS dan 94°45'BT - 141°05'BT dengan luas area ± 191 juta ha dan total panjang garis pantai 95.181 km. Indonesia juga merupakan rumah bagi 14,9 juta ha lahan gambut (Kementan, 2011). Berdasarkan hasil rekalkulasi penutupan lahan tahun 2015, luas kawasan hutan daratan adalah 120,6 juta ha, yang meliputi hutan primer dan hutan sekunder dan Areal Penggunaan Lain (APL) seluas 67,2 juta ha (KLHK, 2017).

Data Penutupan Lahan

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data penutupan lahan Indonesia 23 kelas yang dibuat oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). Data ini merupakan hasil interpretasi citra visual (*visual on screen digitizing*) pada data mosaik citra Landsat 7 *Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)* dan Landsat 8 *Operational Land Imager (OLI)* dengan tutupan awan kurang dari 50% tahun 2009-2014 secara *wall-to-wall*. Delineasi setiap obyek dilakukan secara akurat dan manual pada layar komputer dengan menggunakan *software* SIG. Proses ini menggunakan skala interpretasi maksimum 1:50.000 dengan luas pemetaan terkecil (*minimal mapping unit*) adalah 6,25 ha atau setara dengan 2,5 cm x 2,5 cm pada perbesaran layar skala 1:50.000 (Belinda et al., 2016).

Data Biomassa

Inventarisasi Hutan Nasional (IHN) sudah dilaksanakan sejak tahun 1989 dengan tujuan untuk menghitung potensi sumber daya hutan yang dibuat dengan sistem kisi-kisi berukuran 20 km x 20 km, 10 km x 10 km, dan 5 km x 5 km di seluruh wilayah hutan Indonesia. Parameter tanaman berupa diameter setinggi dada (*diameter at breast height-dbh*) 5 cm *up* dan kerapatan jenis pohon dianalisis pada 4.450 data pengukuran klaster periode tahun 1990-2013 untuk mendapatkan biomassa di atas permukaan tanah pada skala nasional dan 7 pulau besar yang meliputi 4 kelas penutupan lahan, yaitu hutan lahan kering primer, hutan lahan kering sekunder, hutan rawa primer, dan hutan rawa sekunder (KLHK, 2014). Biomassa pohon di atas tanah dihitung dengan menggunakan model alometrik biomassa yang dikembangkan untuk hutan pan tropis oleh Chave et al, 2005 dengan menggunakan parameter diameter dan kerapatan jenis pohon seperti pada **Persamaan 1** (KLHK, 2014).

$$AGB = \rho * Exp \left\{ -1.499 + (2.148 * |\ln D) + \left(0.207 * (\sqrt[3]{\ln D}) \right) - \left(0.0281 * (\sqrt[3]{\ln D}) \right) \right\} \dots\dots\dots(1)$$

dimana:

- AGB = biomassa pohon di atas tanah (kg)
- D = diameter pohon setinggi dada (cm)
- P = kerapatan jenis

Penghitungan Karbon

Penghitungan cadangan karbon serta serapan dan emisi gas rumah kaca (GRK) dilakukan melalui analisis spasial berbasis SIG dengan menggunakan data aktivitas dan data cadangan karbon/faktor emisi/faktor serapan untuk tiap tipe penutupan lahan. Penghitungan cadangan karbon pada penelitian ini menggunakan metode *stock difference*, yaitu metode yang berdasarkan *stock-based approach*, berupa estimasi stok karbon pada setiap *pool* karbon dengan mengukur cadangan aktual biomassa pada periode awal dan akhir penghitungan. Wilayah yang penutupan lahannya tidak berubah dalam periode waktu tertentu, diasumsi tidak mengemisi atau menyerap karbon (emisi dan serapan nol). Untuk lahan yang mengalami perubahan penutupan lahan akan mengemisi/menyerap sejumlah karbon yang dikandung oleh tutupan lahan awal dikurangi dengan cadangan karbon tutupan lahan berikutnya.

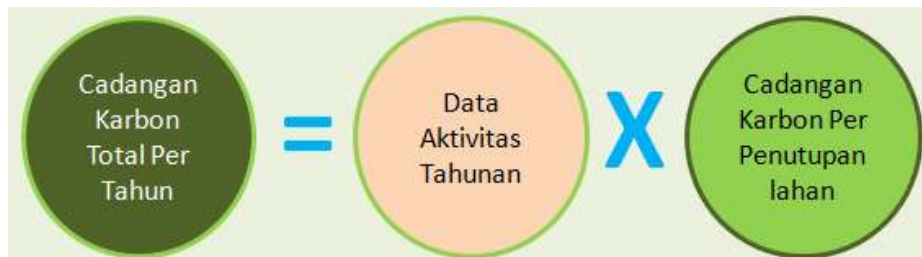
Metode ini cocok digunakan pada negara-negara yang mempunyai sistem inventarisasi nasional hutan dan penggunaan lahan yang lain, dimana cadangan biomassa setiap *pool* dapat diukur secara periodik dengan menggunakan **Persamaan 2**.

$$\Delta C = (Ct2 - Ct1)/(t2 - t1) \dots\dots\dots(2)$$

dimana:

- ΔC = perubahan stok karbon tahunan pada setiap pool (tC/tahun)
- $Ct1$ = stok karbon setiap pool di awal (tC)
- $Ct2$ = stok karbon setiap pool di akhir (tC)

Penghitungan cadangan karbon dilakukan dengan menghitung luas dari masing-masing tipe penutupan lahan Indonesia pada tahun 2009-2014 yang disebut sebagai data aktivitas tahunan. Luas setiap tipe penutupan lahan dikalikan dengan angka cadangan karbonnya, kemudian dijumlah total cadangan karbon per tahun seperti disajikan pada **gambar 1**.



Gambar 1. Deskripsi penghitungan cadangan karbon.

Penghitungan emisi dan serapan karbon diperoleh dari hasil tumpang-susun (*overlay*) dua waktu perekaman data penutupan lahan, yaitu tahun 2009-2011, 2011-2012, 2012-2013 dan 2013-2014. Angka perubahan penutupan lahan ini menunjukkan adanya peningkatan atau penurunan cadangan karbon per hektar. Luas perubahan penutupan lahan tersebut dikalikan dengan selisih kandungan karbon per hektarnya. Penghitungan untuk serapan karbon ini tidak memperhitungkan pertumbuhan riap pada penutupan lahan kelas hutan sekunder dan hutan tanaman yang tetap pada tahun 2009-2014. Peta cadangan karbon tahun 2014 dibuat melalui analisis spasial data penutupan lahan dengan data cadangan karbon per penutupan lahan per hektar. Peta ini dibuat dengan menggunakan fasilitas *Geoprocessing* pada *Software ArcGIS*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Aktivitas

Data aktivitas adalah data tentang besaran kuantitatif kegiatan atau aktivitas manusia yang dapat melepaskan dan/atau menyerap gas rumah kaca pada periode waktu tertentu. Data aktivitas yang digunakan dalam penelitian ini adalah data penutupan lahan dan perubahannya dengan menggunakan klasifikasi 23 kelas selama 5 periode waktu, yaitu tahun 2009, 2011, 2012, 2013, dan 2014 seperti disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel1. Luas penutupan lahan tahun 2009-2014.

Tipe Penutupan Lahan	Luas (juta ha)				
	2009	2011	2012	2013	2014
Hutan lahan kering primer	40,83	40,27	39,20	38,18	38,07
Hutan lahan kering sekunder	39,17	38,54	39,18	38,56	38,47
Hutan mangrove primer	1,51	1,50	1,54	1,53	1,52
Hutan rawa primer	5,56	5,49	5,43	5,36	5,33
Hutan tanaman	4,34	4,70	4,73	4,90	4,84
Semak belukar	13,96	14,53	14,47	14,89	14,73
Perkebunan	9,81	10,23	10,46	11,10	11,59
Pemukiman	2,53	2,56	2,57	2,61	2,62
Tanah terbuka	3,00	3,15	3,31	3,50	3,59
Awan	0,03	0,03	-	-	-

Tipe Penutupan Lahan	Luas (juta ha)				
	2009	2011	2012	2013	2014
Rumput	3,13	3,10	2,95	2,91	2,90
Tubuh air	3,76	3,76	3,77	3,77	3,77
Hutan mangrove sekunder	1,41	1,41	1,43	1,42	1,42
Hutan rawa sekunder	7,41	7,01	6,74	6,41	6,29
Semak belukar rawa	8,63	8,34	8,39	8,44	8,37
Pertanian lahan kering	9,81	9,97	10,07	9,85	10,01
Pertanian lahan kering campuran	26,31	26,58	26,88	27,52	27,44
Sawah	7,56	7,52	7,56	7,72	7,68
Tambak	0,82	0,83	0,85	0,86	0,86
Bandara/pelabuhan	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Transmigrasi	0,30	0,30	0,30	0,27	0,27
Pertambangan	0,46	0,51	0,54	0,56	0,58
Rawa	1,56	1,57	1,57	1,57	1,56

Luas kelas penutupan lahan hutan alam cenderung menurun yang disebabkan oleh deforestasi dan degradasi hutan. Namun untuk luas hutan tanaman cenderung naik. Sebaliknya untuk kelas penutupan lahan nonhutan, terjadi penambahan luas, seperti pada kelas semak belukar, pertanian lahan kering, dan pemukiman. Dinamika luas penutupan lahan ini akan berpengaruh terhadap dinamika cadangan karbon di permukaan.

Faktor Emisi

Faktor emisi/faktor serapan untuk perubahan penutupan lahan adalah perbedaan jumlah cadangan karbon akibat perubahan suatu tipe penutupan lahan tertentu menjadi penutupan lahan lain. Dalam penelitian ini digunakan perubahan cadangan karbon di atas permukaan pada 23 kelas penutupan lahan dari hasil analisis data IHN dan berbagai literatur dalam skala nasional seperti disajikan pada **tabel 2**. Semua angka cadangan karbon diperoleh dengan menggunakan konversi stok (BCEF) sebesar 1,67 (IPCC, 2006). Nilai konversi dari biomassa ke karbon menggunakan angka 0,50 sebagai fraksi karbon biomassa (berat kering). Untuk konversi dari karbon ke CO₂-eq menggunakan hasil perkalian cadangan karbon (C) dengan faktor 3,67 (44/12).

Tabel 2. Cadangan karbon per hektar untuk 23 tipe penutupan lahan skala nasional.

Tipe Penutupan Lahan	Cadangan Karbon (C ton/ha)	Sumber Data
Hutan lahan kering primer	132,99	NFI (1996-2013), 2014
Hutan lahan kering sekunder	98,84	NFI (1996-2013), 2014
Hutan mangrove primer	188,30	Litbanghut, 2014
Hutan rawa primer	96,35	NFI (1996-2013), 2014
Hutan tanaman	98,38	Juknis PEP RAD GRK, 2013
Semak belukar	30,00	Juknis PEP RAD GRK, 2013
Perkebunan	63,00	Juknis PEP RAD GRK, 2013
Pemukiman	4,00	Juknis PEP RAD GRK, 2013
Tanah terbuka	2,50	Juknis PEP RAD GRK, 2013
Awan	0,00	Juknis PEP RAD GRK, 2013
Rumput	4,00	Juknis PEP RAD GRK, 2013
Tubuh air	0,00	Juknis PEP RAD GRK, 2013
Hutan mangrove sekunder	94,07	Litbanghut, 2014
Hutan rawa sekunder	79,67	NFI (1996-2013), 2014
Semak belukar rawa	30,00	Juknis PEP RAD GRK, 2013
Pertanian lahan kering	10,00	Juknis PEP RAD GRK, 2013
Pertanian lahan kering campuran	30,00	Juknis PEP RAD GRK, 2013
Sawah	2,00	Juknis PEP RAD GRK, 2013
Tambak	0,00	Juknis PEP RAD GRK, 2013
Bandara/pelabuhan	0,00	Juknis PEP RAD GRK, 2013
Transmigrasi	10,00	Juknis PEP RAD GRK, 2013
Pertambangan	0,00	Juknis PEP RAD GRK, 2013
Rawa	0,00	Juknis PEP RAD GRK, 2013

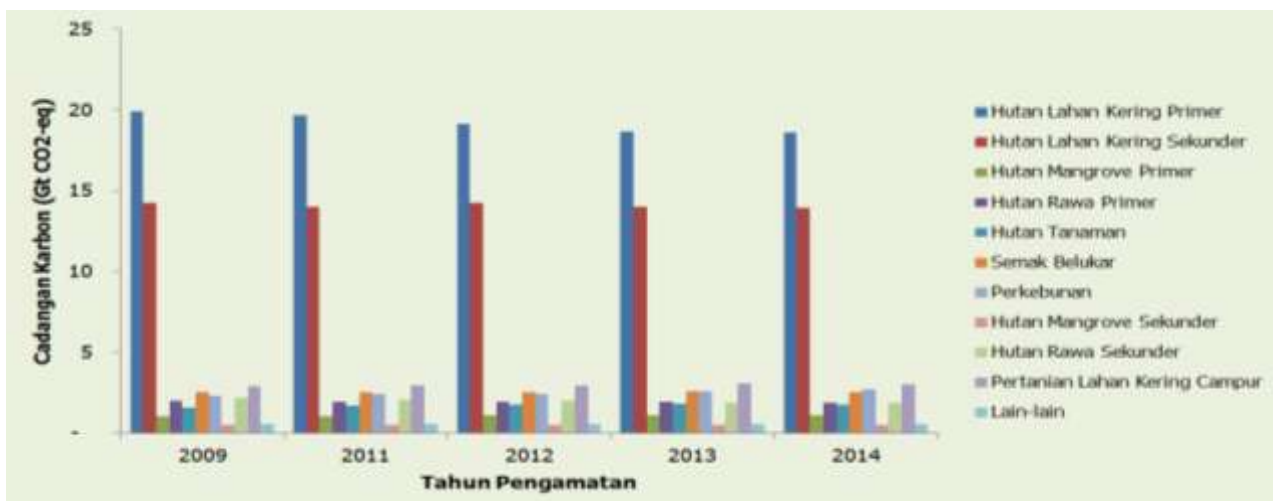
Cadangan Karbon

Cadangan karbon yang dihitung dalam penelitian ini adalah dalam skala nasional dan regional (7 pulau besar). Grafik cadangan karbon pada **gambar 2**. menunjukkan perubahan cadangan karbon skala nasional dari tahun 2009 sampai dengan tahun 2014 yang dibagi ke dalam 7 pulau besar. Berdasarkan grafik tersebut, total cadangan karbon nasional cenderung menurun dari 49,6 Gt CO₂-eq pada tahun 2009 menjadi 48,3 Gt CO₂-eq pada tahun 2014, khususnya untuk Pulau Sumatera dan Kalimantan. Penurunan cadangan karbon ini dapat dilihat secara lebih detail untuk setiap tipe penutupan lahan pada **gambar 3**.



Gambar 2. Grafik perbandingan cadangan karbon Indonesia per pulau tahun 2009-2014.

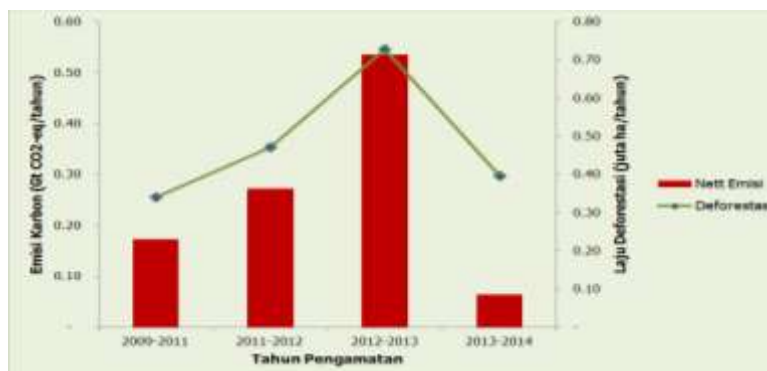
Penurunan cadangan karbon terjadi pada kelas hutan lahan kering primer yang mempunyai cadangan karbon cukup tinggi, sehingga jika terjadi deforestasi maupun degradasi hutan yang cukup luas akan berpengaruh terhadap total cadangan karbon. Total penurunan cadangan karbon dari hutan lahan kering pada tahun 2009 ke 2014 adalah 1,60 Gt CO₂-eq. Untuk kelas penutupan lahan nonhutan, seperti pemukiman dan lahan pertanian walaupun ada peningkatan luas lahan, namun karena cadangan karbonnya sangat kecil (di bawah 10 ton/ha), peningkatan cadangan karbonnya tidak terlihat signifikan. Peningkatan cadangan karbon dari hutan tanaman juga cukup signifikan, mengingat ada kenaikan luas penutupan lahan hutan tanaman dengan cadangan karbon hampir setengah dari cadangan karbon kelas penutupan lahan berhutan. Untuk tipe penutupan lahan nonhutan yang mempunyai cadangan karbon cenderung meningkat dari tahun 2009-2014 adalah kelas perkebunan, semak belukar, dan pertanian lahan kering campur.



Gambar 3. Grafik perbandingan cadangan karbon berdasarkan tipe penutupan lahan tahun 2009-2014.

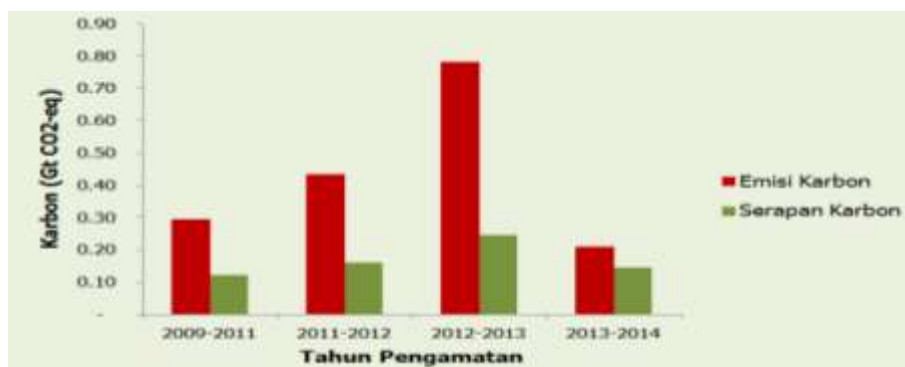
Emisi dan Serapan Karbon

Penurunan angka cadangan karbon di tingkat nasional berhubungan erat dengan perubahan angka emisi tahun 2009-2014. **Gambar 4** menunjukkan hubungan yang berbanding lurus antara emisi karbon dengan laju deforestasi dari tahun 2009 sampai dengan tahun 2014.



Gambar 4. Grafik perbandingan emisi karbon dan laju deforestasi tahun 2009-2014.

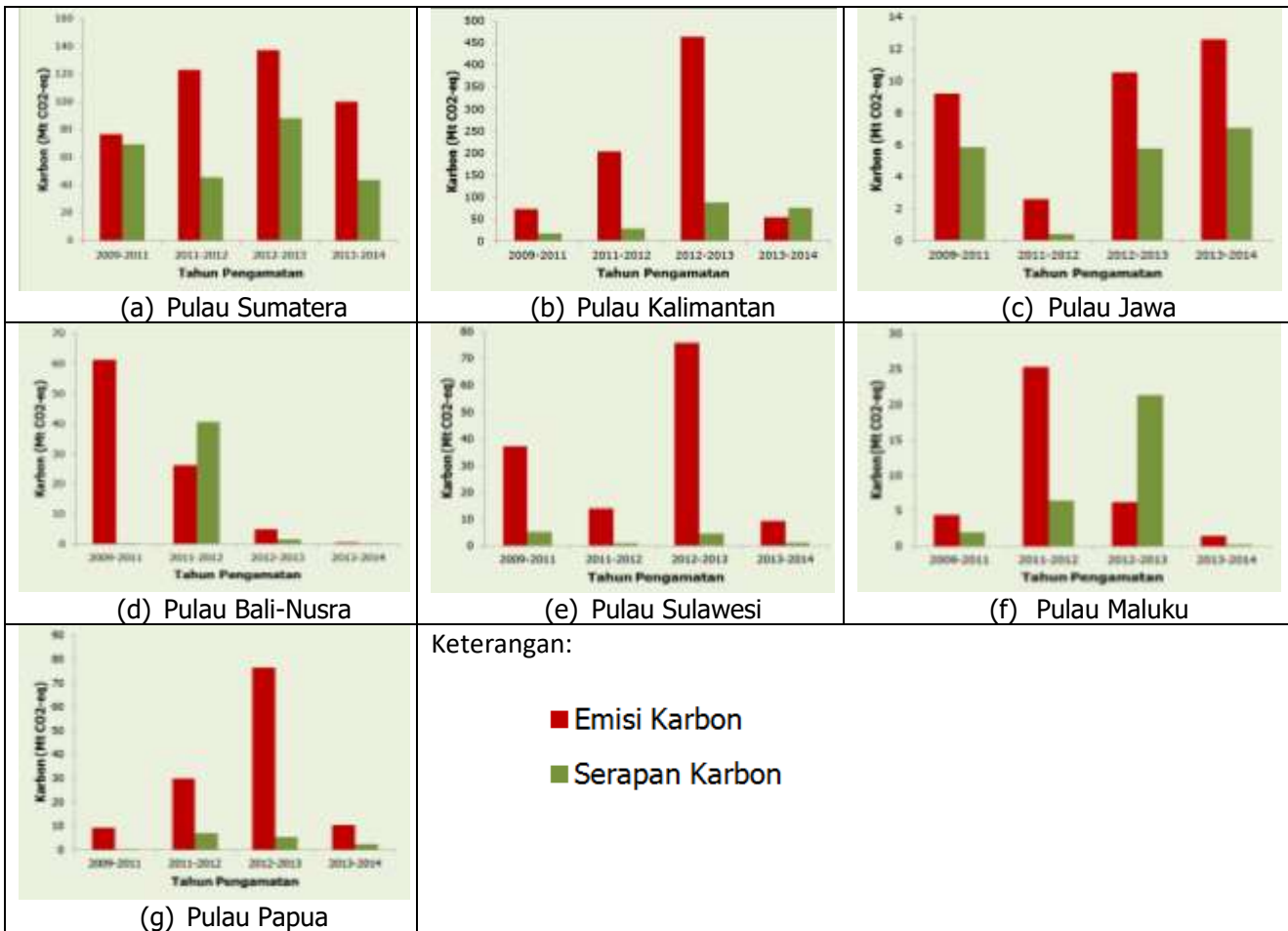
Angka emisi karbon pada periode tahun 2009-2011, 2011-2012 dan 2012-2013, sangat dipengaruhi oleh proses deforestasi. Namun pada periode tahun 2013-2014, selain deforestasi dan degradasi hutan, angka emisi karbon juga dipengaruhi oleh perubahan penutupan lahan nonhutan dengan cadangan karbon tinggi menjadi penutupan lahan nonhutan lainnya yang mempunyai cadangan karbon lebih rendah.



Gambar 5. Grafik perbandingan emisi dan serapan karbon tahun 2009-2014.

Kecenderungan laju emisi karbon pada periode 2009-2014 sebanding dengan laju serapan karbonnya, seperti ditunjukkan pada **gambar 5**. Emisi karbon yang cukup tinggi pada periode tahun 2012-2013 disebabkan oleh deforestasi yang merupakan perubahan dari penutupan lahan tipe hutan lahan kering sekunder menjadi semak belukar, perkebunan dan pertanian lahan kering campur, yang mencapai 50% lebih. Untuk serapan karbon lebih banyak dihasilkan dari perubahan tipe penutupan lahan dengan kandungan karbon rendah menjadi tipe penutupan lahan lain yang mempunyai kandungan karbon tinggi, seperti lahan terbuka menjadi perkebunan, semak belukar, dan pertanian lahan kering campur. Ketiga tipe penutupan lahan tersebut mempunyai cadangan karbon yang cukup tinggi. Pada periode tahun 2012-2013 ini, reforestasi juga menghasilkan serapan karbon yang cukup tinggi. Reforestasi terjadi dari lahan terbuka menjadi hutan tanaman dan semak belukar.

Laju emisi dan serapan karbon tahun 2009-2014 di tingkat sub nasional (7 pulau besar) sangat bervariasi, seperti yang ditunjukkan pada **gambar 6 (a)** sampai dengan **gambar 6 (g)**. Secara umum emisi karbon di semua pulau lebih tinggi dibandingkan serapan karbonnya, kecuali periode tahun 2013-2014 di Pulau Kalimantan, tahun 2011-2012 di Pulau Bali-Nusa Tenggara, dan tahun 2012-2013 di Pulau Maluku. Perbandingan antara angka serapan dan emisi karbon yang cukup signifikan pada tahun 2012-2013 di Pulau Maluku disebabkan oleh serapan karbon yang cukup tinggi dari perubahan tipe penutupan lahan pertanian lahan kering menjadi pertanian lahan kering campur.



Gambar 6. Grafik perbandingan emisi dan serapan karbon per pulau tahun 2009-2014.

Angka serapan karbon yang lebih besar dibandingkan emisi di Pulau Kalimantan tahun 2013-2014 disebabkan oleh perubahan tipe lahan terbuka dan semak belukar menjadi perkebunan. Untuk angka serapan yang tinggi di Pulau Bali-Nusa Tenggara pada periode tahun 2011-2012 disebabkan oleh reforestasi dari tipe penutupan lahan semak belukar menjadi tipe hutan lahan kering sekunder dan savanna (rumput) menjadi semak belukar.

Peta Cadangan Karbon

Data cadangan karbon berdasarkan data penutupan lahan per hektar tahun 2014 juga disajikan dalam bentuk peta cadangan karbon skala nasional yang disajikan pada **gambar 7**.



Gambar 7. Peta cadangan karbon Indonesia tahun 2014.

Pada tahun 2014, Papua merupakan pulau yang memiliki cadangan karbon tertinggi. Provinsi Kalimantan Timur dan sebagian Kalimantan Tengah juga masih memiliki cadangan karbon cukup tinggi seperti Provinsi Aceh dan sebagian wilayah Sumatera Barat, serta Provinsi Gorontalo dan Sulawesi Tengah. Wilayah di Indonesia yang memiliki cadangan karbon rendah adalah Pulau Jawa dan sebagian Provinsi Nusa Tenggara Timur.

KESIMPULAN

Peta sebaran cadangan karbon hutan yang akurat, detail dan terbaru sangat diperlukan di negara-negara tropis untuk berbagai kepentingan, seperti REDD+, perencanaan pembangunan nasional dan kegiatan perubahan iklim lainnya. Data penginderaan jauh dapat menjadi cara yang efektif untuk memetakan hasil pengukuran biomassa di lapangan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa citra resolusi sedang (Landsat) dengan resolusi 30 meter yang digabungkan dengan nilai biomassa di atas permukaan, hasil analisis data IHN menggunakan alometrik dapat digunakan untuk estimasi cadangan karbon, serapan dan emisi gas rumah kaca dari sektor lahan pada skala nasional dengan hasil yang bagus. Metode ini sangat sesuai diaplikasikan untuk negara dengan wilayah yang luas dan aksesibilitas terbatas, seperti Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didukung sepenuhnya oleh Direktorat Inventarisasi dan Pemantauan Sumber Daya Hutan (IPSDH), Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Penulis mengucapkan terimakasih kepada Direktur IPSDH, Dr. Ruandha Agung Sugardiman, M.Sc. dan Kepala Subdit Pemantauan Sumber Daya Hutan, Dr. Sigit Nugroho, M.T. yang sudah memberikan dukungan untuk menuliskan hasil penelitian ini dalam bentuk buku maupun *paper*. Ucapan terima kasih juga Penulis sampaikan kepada Dr. Riva Rovani (Indonesian Embassy di Tokyo) yang telah mendorong Penulis untuk melakukan penelitian ini dan membantu memberikan koreksi pada hasilnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Avitabile, V., Baccini, A., Friedl, M.A., Schumullius, C. (2011). *Capabilities and Limitations of Landsat and Land Cover Data for Aboveground Woody Biomass Estimation of Uganda. Remote Sensing of Environment*, 117(2012), 366-380.
- Baccini, A., Friedl, M.A., Woodcock, C.E., & Warbington, R. (2004). *Forest Biomass Estimation Over Regional Scales using Multisource Data. Geophysical Research Letters*, 31, 1-4.
- Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (BAPPENAS). (2014). *Buku I: Landasan Ilmiah Pedoman Teknis Penghitungan Baseline Emisi dan Serapan Gas Rumah Kaca Sektor Berbasis Lahan*. Jakarta.
- Chave, J., Kira, T., Lescure, J.P., Nelson, B.W., Ogawa, H., Puig, H., Riera, B., Yamakura, T., Andalo, C. Brown, S., Cairns, M.A., Chambers, J.Q., Eamus, D., Folster, H., Fromard, F., Higuchi, N. (2005). *Tree Allometry and Improved Estimation of Carbon Stocks and Balance in Tropical Forests. Oecologia* 145, 87-99.
- DeFries, R., Achard, F., Brown, S.L., Herold, M., Murdiyarso, D., Schlamadinger, B., et al. (2007). *Earth Observations for Estimating Greenhouse Gas Emissions from Deforestation in Developing Countries. Environmental Science & Policy*, 10, 385-394.
- Direktorat Inventarisasi dan Pemantauan Sumber Daya Hutan. (2014). *Potensi Sumber Daya Hutan Dari Plot Inventarisasi Hutan Nasional*. Direktorat Jenderal Planologi Kehutanan, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Jakarta.
- FAO (Food and Agriculture Organization) *Global Forest Resources Assessment 2015*. How Are the World's Forestry Changing?. Second Edition. 2015. Rome
- Foody, G. M., Cutler, M. E., McMorrow, J., Pelz, D., Tangki, H., Boyd, D. S., et al. (2001). *Mapping the Biomass of Bornean Tropical Rain Forest from Remotely Sensed Data. Global Ecology and Biogeography*, 10, 379-387.
- Gemmel, F. M. (1995). *Effects of Forest Cover, Terrain, and Scale on Timber Volume Estimation with Thematic Mapper Data in a Rocky Mountain Site. Remote Sensing of Environment*. 51, 291-305.
- GOFC-GOLD (2009). *A Sourcebook of Methods and Procedures for Monitoring and Reporting Anthropogenic Greenhouse Gas Emissions and Removals Caused by Deforestation, Gains and Losses of Carbon Stocks in Forest Remaining Forests, and Forestation. GOFC GOLD Report Version COP15-1, GOFC GOLD Project Office*. Alberta, Canada: Natural Resources Canada.

- Goward, S. N., Arvidson, T., Williams, D. L., Faundeen, J., Irons, J., Franks, S., et al. (2006). *Historical Record of Landsat Global Coverage: Mission Operations, NSLRSDA, and International Cooperator Stations. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(10), 1155-1169.
- Gullison, R. E., Frumhoff, P. C., Canadell, J. G., Field, C. B., Nepstad, D. C., Hayhoe, K., et al. (2007). *Tropical Forests and Climate Policy. Science*, 316, 985-986.
- Herold, M., & Johns, T. (2007). *Linking Requirements with Capabilities for Deforestation Monitoring in the Context of the UNFCCC-REDD Process. Environmental Research Letters*, 2, 1-7.
- IPCC. (2007), *IPCC Fourth Assessment Report Climate Change 2007*, Pachauri, R.K and Reisinger, A (eds). Published: Geneva, Swiss.
- IPCC. (2006), *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, In H. S. Eggleston, L. Buendia., K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe (Eds). *Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Japan: IGES.
- IPCC (1997). *Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories*. Houghton J.T., Meira Filho L.G., Lim B., Tréanton K., Mamaty I., Bonduki Y., Griggs D.J. Callander B.A. (Eds). *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, IPCC/OECD/IEA, Paris, France.
- Kementerian Lingkungan Hidup. (2010). *Indonesia's Second National Communication*. Jakarta.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.(2017). *Rekalkulasi Penutupan Lahan Tahun 2015*. Jakarta.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.(2016). *Statistik Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Tahun 2015*. Jakarta.
- Kementerian Pertanian. (2011). *Peta Lahan Gambut Indonesia Skala 1:250.000*. Jakarta.
- Lu, D. (2005). *Aboveground Biomass Estimation using Landsat TM Data in the Brazilian Amazon. International Journal of Remote Sensing*, 26(12), 2509-2525.
- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., & Moran, E. (2004). *Relationships between Forest Stand Parameters and Landsat TM Spectral Responses in the Brazilian Amazon Basin. Forest Ecology and Management*, 198, 149-167.
- Margono, B. A., Usman, A. B., Budharto, Sugardiman, R., A. (2016). *Indonesia's Forest Resource Monitoring. Indonesian Journal of Geography*. 48(1), 7-20.
- NASA (2009). *Landsat 7 Science Data Users Handbook*. Last update August 4, 2009. http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook/handbook_toc.html.
- Penman, J., Gytarsky, M., Hirashi, T., Krug, T., Kruger, D., Pippati, R., et al. (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme and Institute for Global Environmental Strategies (Kanagawa, Japan)*. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpplulucf/gpplulucf.htm>.
- Powell, S. L., Cohen, W. B., Healey, S. P., Kennedy, R. E., Moisen, G. G., Pierce, K. B., et al. (2010). *Quantification of Live Aboveground Forest Biomass Dynamics with Landsat Time-Series and Field Inventory Data: A Comparison of Empirical Modeling Approaches. Remote Sensing of Environment*, 114, 1053-1068.
- Pusat Penelitian dan Pengembangan Perubahan Iklim dan Kebijakan. (2014). *Cadangan Karbon Pada Berbagai Tipe Hutan dan Jenis Tanaman di Indonesia Seri 2*. Badan Litbang Kehutanan, Kementerian Kehutanan, Bogor.
- The Ministry of Environment and Forestry. 2016. *First Nationally Determined Contribution Republic of Indonesia*. Jakarta
- The Ministry of Environment and Forestry. 2015. *National Forest Reference Emission Level for REDD+ in the Context of Decision 1/CP.16 Paragraph 70*. Jakarta
- UNFCCC (2007). *Report on the Second Workshop on Reducing Emissions from Deforestation in Developing Countries*. <http://unfccc.int/resource/docs/2007/sbsta/eng/03.pdf>.
- UNFCCC (2008). *Report on the Workshop on Methodological Issues relating to Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation in Developing Countries*. FCCC/SBSTA/2008/11.
- UNFCCC (2009). *Reducing Emissions from Deforestation in Developing Countries: Approaches to Stimulate Action*. FCCC/SBSTA/2009/19/Add.1.
- Williams, D. L., Goward, S. N., & Arvidson, T. (2006). *Landsat: Yesterday, Today, and Tomorrow. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(10), 1171-1178.
- Woodcock, C. E., Allen, R., Anderson, M., Belwrd, A., Bindschadler, R., Cohen, W., et al. (2008). *Free Access to Landsat Imagery. Science*, 320(5879), 1011.