

3. PENDUGAAN CADANGAN KARBON DI ATAS PERMUKAAN TANAH PADA BERBAGAI SISTEM PENGGUNAAN LAHAN DI KABUPATEN NUNUKAN, KALIMANTAN TIMUR

Subekti Rahayu, Betha Lusiana dan Meine van Noordwijk

Pendahuluan

Peran ekosistem daratan dalam siklus karbon global merupakan topik yang menarik bagi peneliti dan pembuat kebijakan lingkungan. Aliran karbon dari atmosfer ke vegetasi merupakan aliran yang bersifat dua arah, yaitu pengikatan CO₂ ke dalam biomasa melalui fotosintesis dan pelepasan CO₂ ke atmosfer melalui proses dekomposisi dan pembakaran. Diperkirakan sekitar 60 Pg¹ karbon mengalir antara ekosistem daratan dan atmosfer setiap tahunnya, dan sebesar 0,7 ± 1,0 Pg karbon diserap oleh ekosistem daratan (Lasco, 2004). Alih guna lahan dan konversi hutan merupakan sumber utama emisi CO₂ dengan jumlah sebesar 1,7 ± 0,6 Pg karbon per tahun (Watson *et al.*, 2000). Apabila laju konsumsi bahan bakar dan pertumbuhan ekonomi global terus berlanjut seperti yang terjadi pada saat ini, maka dalam jangka waktu 100 tahun yang akan datang suhu global rata-rata akan meningkat sekitar 1,7 - 4,5°C (Houghton *et al.*, 2001).

Kegiatan konversi hutan menjadi lahan pertanian melepaskan cadangan karbon ke atmosfer dalam jumlah yang cukup berarti. Namun jumlah tersebut tidak memberikan dampak yang berarti terhadap jumlah CO₂ yang mampu diserap oleh hutan dan daratan

secara keseluruhan. Dampak konversi hutan ini baru terasa apabila diikuti dengan degradasi tanah dan hilangnya vegetasi, serta berkurangnya proses fotosintesis akibat munculnya hutan beton serta lahan yang dipenuhi bangunan-bangunan dan aspal sebagai pengganti tanah atau rumput. Meskipun laju fotosintesis pada lahan pertanian dapat menyamai laju fotosintesis pada hutan, namun jumlah cadangan karbon yang terserap lahan pertanian jauh lebih kecil. Selain itu, karbon yang terikat oleh vegetasi hutan akan segera dilepaskan kembali ke atmosfer melalui pembakaran, dekomposisi sisa panen maupun pengangkutan hasil panen. Masalah utama yang terkait dengan alih guna lahan adalah perubahan jumlah cadangan karbon. Pelepasan karbon ke atmosfer akibat konversi hutan berjumlah sekitar 250 Mg ha⁻¹ C yang terjadi selama penebangan dan pembakaran, sedangkan penyerapan kembali karbon menjadi vegetasi pohon relatif lambat, hanya sekitar 5 Mg C ha⁻¹ year⁻¹.

Untuk mengurangi dampak perubahan iklim, upaya yang dapat dilakukan saat ini adalah meningkatkan penyerapan karbon (Sedjo and Salomon, 1988) dan/atau menurunkan emisi karbon (Lasco, 2004). Penurunan emisi karbon dapat dilakukan dengan: (a) mempertahankan cadangan karbon yang telah ada dengan: mengelola hutan lindung, mengendalikan deforestasi,

¹ 1 Pg = 10¹⁵ g = 10⁹ Mg = 1 Gt

menerapkan praktek silvikultur yang baik, mencegah degradasi lahan gambut dan memperbaiki pengelolaan cadangan bahan organik tanah, (b) meningkatkan cadangan karbon melalui penanaman tanaman berkayu dan (c) mengganti bahan bakar fosil dengan bahan bakar yang dapat diperbarui secara langsung maupun tidak langsung (angin, biomasa, aliran air), radiasi matahari, atau aktivitas panas bumi (Lasco *et al.*, 2004).

Peningkatan penyerapan cadangan karbon dapat dilakukan dengan (a) meningkatkan pertumbuhan biomasa hutan secara alami, (b) menambah cadangan kayu pada hutan yang ada dengan penanaman pohon atau mengurangi pemanenan kayu, dan (c) mengembangkan hutan dengan jenis pohon yang cepat tumbuh (Sedjo and Salomon, 1988). Karbon yang diserap oleh tanaman disimpan dalam bentuk biomasa kayu, sehingga cara yang paling mudah untuk meningkatkan cadangan karbon adalah dengan menanam dan memelihara pohon (Lasco *et al.*, 2004).

Komponen cadangan karbon daratan terdiri dari cadangan karbon di atas permukaan tanah, cadangan karbon di bawah permukaan tanah dan cadangan karbon lainnya. Cadangan karbon di atas permukaan tanah terdiri dari tanaman hidup (batang, cabang, daun, tanaman menjalar, tanaman epifit dan tumbuhan bawah) dan tanaman mati (pohon mati tumbang, pohon mati berdiri, daun, cabang, ranting, bunga, buah yang gugur, arang sisa pembakaran). Cadangan karbon di bawah permukaan tanah meliputi akar tanaman hidup maupun mati, organisme tanah dan bahan organik tanah. Pemanenan hasil kayu (kayu bangunan, pulp, arang atau kayu bakar), resin, buah-buahan, daun untuk makanan ternak menyebabkan berkurangnya cadangan karbon dalam skala plot, tetapi belum tentu demikian jika kita perhitungkan dalam skala global. Demikian juga halnya dengan hilangnya bahan organik tanah melalui erosi. Beberapa sistem penilaian karbon global

memperhitungkan aliran karbon (khususnya yang berkaitan dengan pohon/kayu) dan dekomposisi yang terjadi. Tetapi memperoleh hasil penilaian yang konsisten cukup sulit apabila metode penilaian tidak memperhitungkan keseluruhan cadangan karbon yang ada, khususnya di daerah perkotaan. Sebagai contoh, memperhitungkan lama hidup alat-alat rumah tangga yang terbuat dari kayu yang tetap tersimpan dalam bentuk kayu untuk jangka waktu yang lama dan tidak menjadi sumber emisi karbon. Canadell (2002), mengatakan bahwa untuk memperoleh potensial penyerapan karbon yang maksimum perlu ditekankan pada kegiatan peningkatan biomasa di atas permukaan tanah bukan karbon yang ada dalam tanah, karena jumlah bahan organik tanah yang relatif lebih kecil dan masa keberadaannya singkat. Hal ini tidak berlaku pada tanah gambut (van Noordwijk *et al.*, 1997; Paustian *et al.*, 1997).

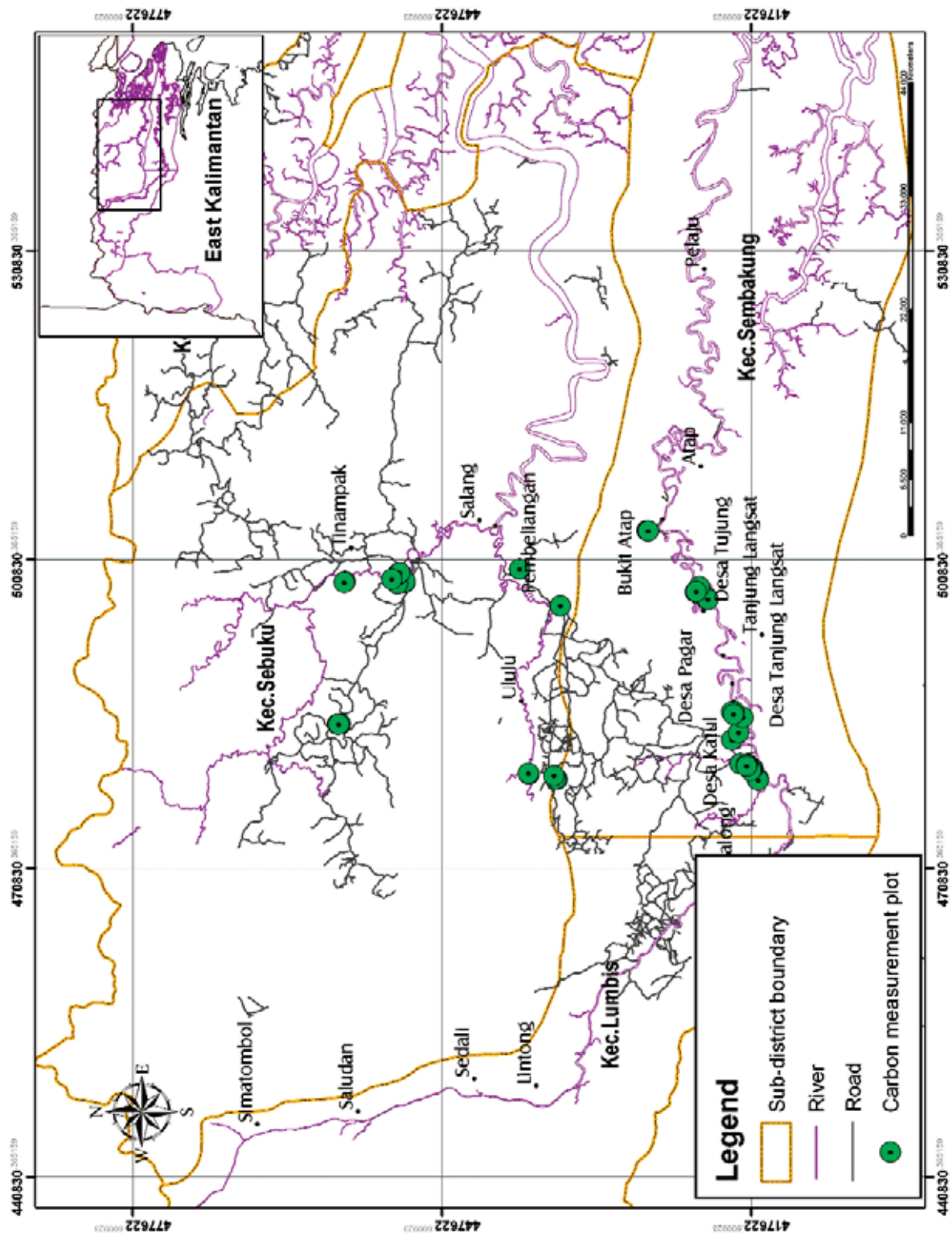
Tulisan ini memaparkan studi yang dilakukan di Kabupaten Nunukan, Kalimantan Timur untuk mengukur cadangan karbon pada berbagai sistem penggunaan lahan. Studi dilakukan oleh proyek FORMACS (Pengelolaan Sumber Daya Alam untuk Penyerapan Karbon) yang bertujuan untuk:

1. mengetahui cadangan karbon pada berbagai sistem penutupan lahan terutama pada sistem penggunaan lahan yang ada di lokasi studi.
2. mengetahui sistem penggunaan lahan yang dapat memberikan keuntungan bagi masyarakat di sekitar hutan tetapi tetap mempertahankan cadangan karbon di alam.

Metode

Skala plot

Sebelum melakukan pengukuran dilakukan survei terlebih dahulu di Kecamatan Sebuku dan Sembakung untuk mengidentifikasi sistem penggunaan lahan yang ada dan menentukan



Gambar 3.1. Peta plot-plot pengukuran karbon.

kelas-kelas penutupan lahan yang berkaitan dengan siklus dari masing-masing sistem penggunaan lahan. Pada survei ini ditentukan 'strata' yang dianggap sebagai 'skema stratified sampling'.

Pengukuran dilakukan pada 54 plot contoh (lihat Tabel Lampiran 8) selama periode Desember 2003 - Maret 2004, meliputi hutan primer, hutan bekas tebangan² (3, 10, 30, 50 tahun setelah tebang pertama), padi ladang, jakaw (1, 2, 3, 4, 5, 7, dan 15 tahun setelah pembukaan lahan), agroforestri (9, 11-20, 21-30 tahun) dan alang-alang. Pada tiap-tiap plot dilakukan pengukuran diameter dan tinggi tanaman hidup dan tanaman mati. Tanaman hidup maupun mati yang berdiameter 5-30 cm diukur pada plot berukuran 10 m x 30 m, dan yang berdiameter > 30 cm diukur pada plot 20 m x 100 m. Pengambilan contoh tumbuhan bawah dan seresah dilakukan dengan kuadran berukuran 2 x 0.5 m x 0.5 m yang ditempatkan di dalam plot 10 m x 30 m. Protokol pengambilan contoh cadangan

karbon secara lengkap dapat dilihat dalam Hairiah *et al.*, 2001. Pada survei ini pengukuran cadangan karbon hanya dilakukan di atas permukaan tanah.

Pohon

Cadangan karbon pada suatu sistem penggunaan lahan dipengaruhi oleh jenis vegetasinya. Suatu sistem penggunaan lahan yang terdiri dari pohon dengan spesies yang mempunyai nilai kerapatan kayu tinggi, biomasanya akan lebih tinggi bila dibandingkan dengan lahan yang mempunyai spesies dengan nilai kerapatan kayu rendah.

Biomasa pohon (dalam berat kering) dihitung menggunakan "*allometric equation*" berdasarkan pada diameter batang setinggi 1,3 m di atas permukaan tanah³ (dalam cm). Tabel 3.1 berisi daftar allometric equation yang digunakan dalam mengestimasi biomasa pada berbagai jenis vegetasi. Nilai kerapatan kayu diambil dari 'literature review' yang dikemas dalam database⁴.

Tabel 3.1. Allometric equation yang digunakan pada penghitungan biomass pohon.

Jenis pohon	Allometric equation	Sumber
Pohon-pohon bercabang	$B = 0.11\rho D^{2.62}$	Ketterings, 2001
Pohon tidak bercabang	$B = (\pi/40) \rho H D^2$	Hairiah, 2002
Nekromas (pohon mati)	$B = (\pi/40) \rho H D^2$	Hairiah, 2002
Kopi	$B = 0.281 D^{2.06}$	Arifin, 2001; Van Noordwijk, 2002
Pisang	$B = 0.030 D^{2.13}$	Arifin, 2001; Van Noordwijk, 2002
Sengon	$B = 0.0272 D^{2.831}$	Sugiarto, 2002; Van Noordwijk, 2002
Palm	$B = BA^* H^* \rho$	Hairiah, 2000

BK = berat kering (kg pohon⁻¹)

H = tinggi tanaman (cm)

ρ = kerapatan kayu (Mg m⁻³, kg dm⁻³ atau g cm⁻³)

D = diameter (cm) setinggi dada (1.3 m)

BA = Basal area (cm²)

³ Australian Greenhouse Office (2002) merekomendasikan tiga metode untuk model biomasa yaitu: (i) allometric equations antara diameter dan/atau tinggi untuk biomasa di atas permukaan tanah, (ii) model volume batang dan konversi ke biomasa di atas permukaan tanah menggunakan suatu faktor (iii) hubungan basal area dengan biomasa http://www.greenhouse.gov.au/land/bush_workbook_a3/index.html

² Hutan bekas tebangan adalah sisa hutan yang ditebang oleh perusahaan pemegang Hak Pengusahaan Hutan (HPH). Perusahaan pemegang HPH hanya menebang pohon yang berdiameter > 50 cm dan kemudian meninggalkan hutan tersebut.

⁴ Nilai kerapatan kayu dipeloreh dari referensi yang telah dikemas dalam database. Sampai saat ini telah tersedia data kerapatan kayu dari 4000 species dari seluruh dunia di: <http://www.worldagroforestry.org/sea/Products/AFModels/treenwood/treenwood.htm>

Dari berat kering komponen penyimpan karbon dalam suatu luasan tertentu kemudian dikonversi ke nilai karbonnya dengan perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Karbon biomasa} = \text{Total berat kering} \times 0.45$$

'Time-averaged' cadangan karbon

Untuk membandingkan potensi penyerapan karbon pada berbagai sistem penggunaan lahan, perlu diketahui waktu siklus karbon, nilai minimum dan maksimum karbon yang diharapkan pada suatu lanskap. Jika tidak ada proses kegiatan intensifikasi atau adopsi cara baru, diasumsikan bahwa semua fase dari siklus karbon yang mewakili secara spasial sesuai dengan proporsinya secara total. "Time-averaged" cadangan karbon didefinisikan sebagai integral antar waktu dari cadangan karbon pada masing-masing fase dari suatu siklus, dibagi dengan lama siklus. Untuk sistem pertanian rotasional (bergilir), 'time-averaged' cadangan karbon dapat digunakan untuk menduga pada skala lanskap (Palm, 1995). Di Nunukan, sistem jakaw-padi adalah suatu sistem rotasi. Dengan mengasumsikan laju penyerapan karbon selama 'bera' dengan 'time-independent', maka 'time-averaged' cadangan karbonnya dapat dihitung dengan:

$$C [\text{Mg ha}^{-1}] = f_{\text{crop}} C_{\text{crop}} + f_{\text{fallow}} C_{\text{fallow}} = f_{\text{crop}} C_{\text{crop}} + f_{\text{fallow}} (T_{\text{fallow}} C_{\text{incr,fallow}}) / 2 \quad (1)$$

Dimana f_{crop} dan f_{fallow} merupakan fraksi dari waktu ketika lahan ditanami tanaman pangan atau di'bera'kan, C_{crop} dan C_{fallow} adalah cadangan karbon $[\text{Mg ha}^{-1}]$ pada fase tanaman pangan dan 'bera', T_{fallow} adalah waktu yang digunakan dalam satu kali siklus 'bera' (tahun) dan $C_{\text{incr,fallow}}$ adalah laju penyerapan karbon $[\text{Mg ha}^{-1} \text{ tahun}^{-1}]$ selama fase 'bera'.

Hasil dan Pembahasan

Keragaman pohon

Keragaman kerapatan jenis kayu

Rangkuman dari nilai kerapatan kayu (berdasarkan database) untuk spesies yang ditemukan pada berbagai sistem penggunaan lahan di Kabupaten Nunukan dicantumkan dalam Tabel 3.2. Hutan primer mempunyai prosentase spesies dengan kerapatan kayu berat hingga sangat berat sekitar 42%, hutan bekas tebangan 32%, agroforestri 11% dan jakaw 19%. *Jakaw* dan agroforestri didominasi oleh pohon dengan kerapatan kayu rendah hingga sedang (sekitar 80%).

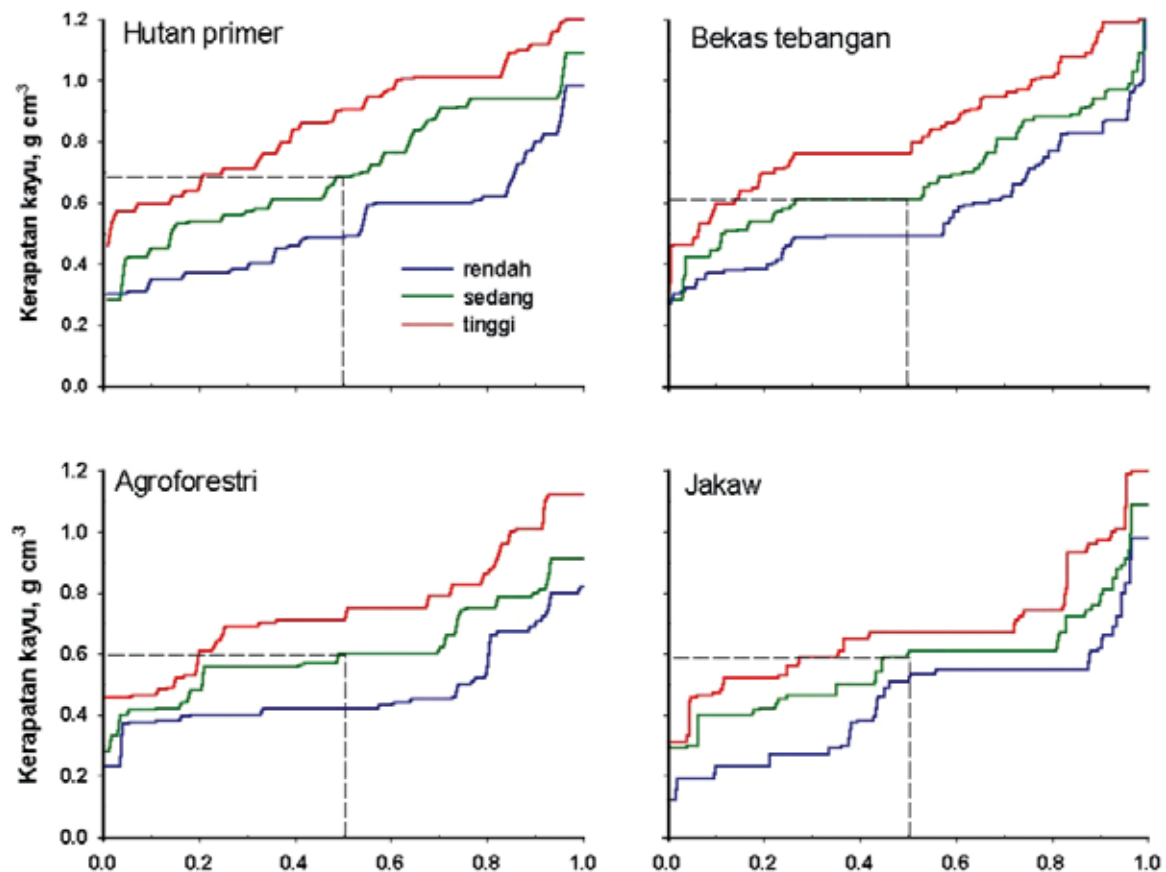
Tabel 3.2. Kerapatan kayu dan sebaran kualitasnya pada berbagai sistem penggunaan lahan.

Sistem penggunaan lahan	Nilai Tengah ⁵ Kerapatan kayu ($\text{Mg}^6 \cdot \text{m}^{-3}$)	Sebaran spesies ⁷ (%)			
		Ringan	Sedang	Berat	Sangat berat
Hutan primer	0.68	34.2	23.4	11.7	30.6
Hutan bekas tebangan	0.61	25.9	41.3	17.6	15.2
Agroforestri	0.60	50.1	38.1	7.0	4.7
Jakaw	0.59	61.7	18.8	12.5	7.0

⁵ Nilai Kerapatan kayu diperoleh dari referensi berdasarkan penelitian. Sebagai contoh: Tengawang (*Shorea stenoptera* Burck.) mempunyai nilai kerapatan kayu of 0,31 - 0,57 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Dengan demikian nilai tengah kerapatan kayu Tengawang adalah 0.42 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

⁶ $\text{Mg} = 10^6 \text{ g} = 1 \text{ ton}$. Dalam studi ini, kita menggunakan satuan $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ untuk menggantikan satuan $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, dengan alasan satuan Internasional tersebut setara dengan $\text{gr} \cdot \text{cm}^{-3}$ (sementara $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} = 1000 \times \text{gr} \cdot \text{cm}^{-3}$).

⁷ Kayu digolongkan ringan apabila kerapatannya $< 0,6 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-3}$, sedang $0,6 - 0,75 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-3}$, berat $0,75 - 0,9 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-3}$ and sangat berat $> 0,9 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-3}$ (Pendidikan Industri Kayu Atas, 1979).



Gambar 3.2. Frekuensi kumulatif kerapatan kayu pada hutan primer, hutan bekas tebangan, agroforestri dan jakaw di Kabupaten Nunukan.

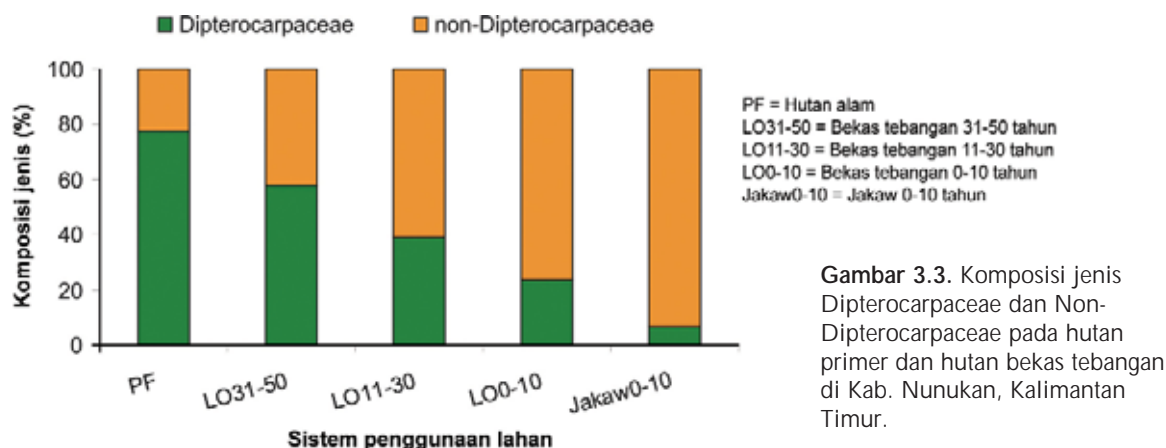
Spesies pohon di hutan primer mempunyai nilai tengah kerapatan kayu yang relatif tinggi yaitu $0,68 \text{ g cm}^{-3}$, sedangkan pada hutan bekas tebangan $0,61 \text{ g cm}^{-3}$, pada agroforestri $0,6 \text{ g cm}^{-3}$ dan jakaw hanya sekitar $0,59 \text{ g cm}^{-3}$ seperti terlihat pada Gambar 3.2.

Keragaman spesies

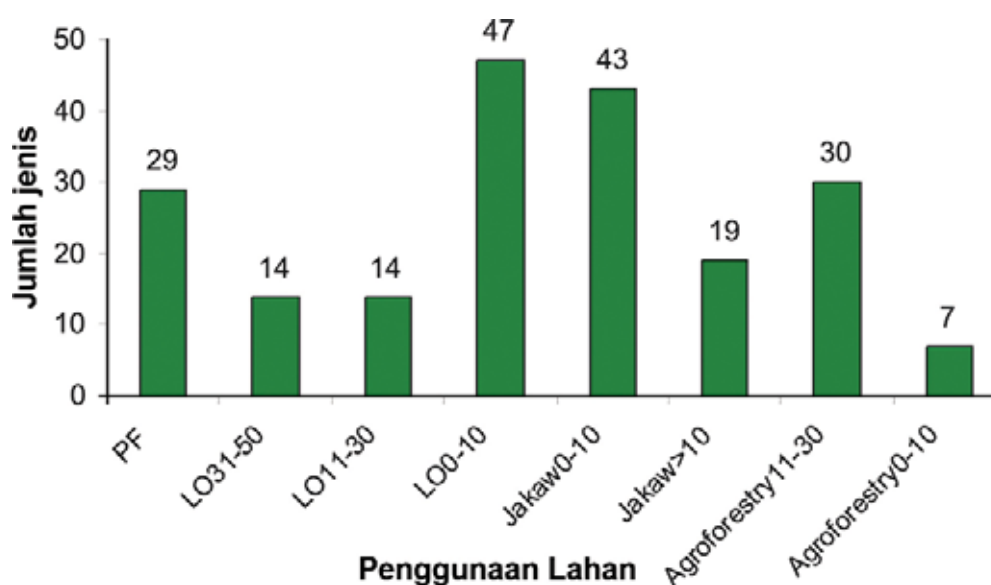
Pada hutan primer di lokasi studi, jenis-jenis vegetasi didominasi oleh kayu komersial dari famili Dipterocarpaceae seperti keruing (*Dipterocarpus* sp.), meranti (*Shorea* sp.) dan kayu kapur (*Dryobalanops* sp.) yang menempati 40%, sedangkan 60% diantaranya terdiri dari jenis-jenis dari famili Ebenaceae (*Diospyros* sp.), Meliaceae (*Aglaia* sp.), Lauraceae (*Beilschmiedia* sp., *Eusiderixylon* sp.), Rutaceae (*Muraya* sp.), Sterculiaceae (*Pterospermum* sp.)

yang memiliki kisaran kerapatan kayu dari berat hingga sangat berat dan Sapotaceae (*Palaquium* sp.), Anacardiaceae (*Buchanania* sp., *Gluta* sp.), Myristicaceae (*Horsfieldia* sp.) yang memiliki kerapatan kayu sedang. Sedangkan pada hutan bekas tebangan umur 0-10 tahun dan 11-30 tahun, jenis-jenis pohon dari famili Dipterocarpaceae telah berkurang menjadi sekitar 30%, karena ditebang. Pada hutan bekas tebangan 31-50 tahun, pohon dari famili Dipterocarpaceae menempati 78% dari total pohon seperti ditampilkan pada Gambar 3.3.

Pada *jakaw* yang ditinggalkan selama 1 tahun, vegetasi yang ada hanyalah pisang hutan. Tumbuhan perintis seperti sedaman (*Macaranga* sp.) dari famili Euphorbiaceae mulai tumbuh pada *jakaw* yang ditinggalkan antara 2 sampai 6 tahun.



Gambar 3.3. Komposisi jenis Dipterocarpaceae dan Non-Dipterocarpaceae pada hutan primer dan hutan bekas tebangan di Kab. Nunukan, Kalimantan Timur.



Gambar 3.4. Jumlah jenis tanaman berkayu yang ditemukan pada berbagai sistem penggunaan lahan di Kab. Nunukan, Kalimantan Timur.

Apabila dilihat berdasarkan jumlah jenis tanaman berkayu yang ditemukan pada sistem agroforestri, jakaw, hutan bekas tebangan dan hutan primer, jumlah jenis tertinggi terdapat pada hutan bekas tebangan 0-10 tahun (47 jenis) dan jakaw 0-10 tahun (43 jenis) seperti terlihat pada Gambar 3.4.

Sistem agroforestri yang umum dikelola oleh petani-petani di Nunukan adalah sistem agroforestri berbasis pohon buah-buahan. Pada sistem agroforestri yang berumur 0-10 tahun, selain pohon buah-buahan, masih terdapat jenis-jenis kayu kualitas rendah yang merupakan sisa tebangan seperti terap

(*Artocarpus* sp.) dan sedaman (*Macaranga* sp.). Pada sistem agroforestri lebih dari 10 tahun, terdapat lebih banyak spesies buah-buahan. Pohon buah-buahan yang umum ditanam antara lain durian (*Durio zibethinus*), mangga (*Mangifera indica*), langsung (*Lansium domesticum*), cempedak (*Artocarpus integer*), rambutan (*Nephelium lappaceum*) dan kelapa (*Cocos nucifera*). Pada beberapa kebun ada juga tanaman kopi (*Coffea* sp.) dan cacao (*Theobroma cacao*) dalam komponen agroforestri. Dalam sistem agroforestri ini jumlah species yang ada hampir sama dengan di hutan, tetapi mempunyai komposisi yang berbeda (Gambar 3.4)

Keragaman ukuran

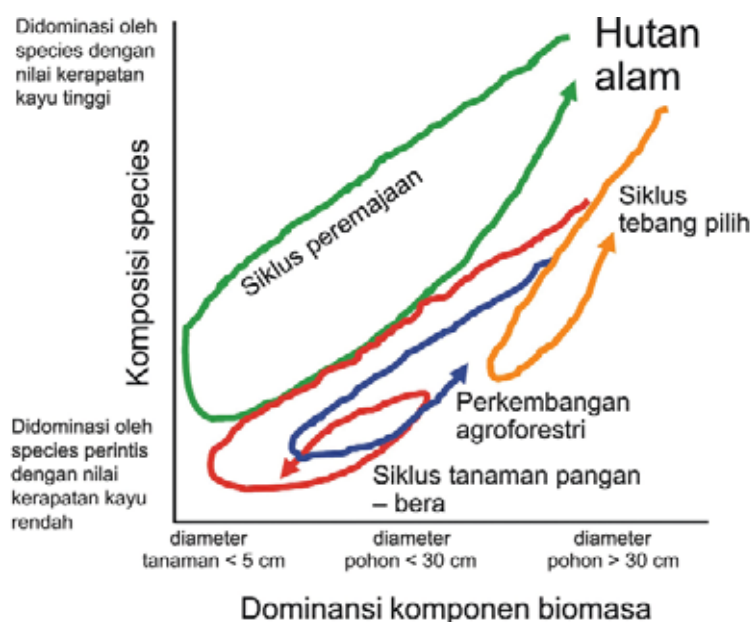
Keberadaan pohon yang berdiameter > 30 cm pada suatu sistem penggunaan lahan, memberikan sumbangan yang cukup berarti terhadap total cadangan karbon. Pada hutan primer 70% dari total biomasa berasal dari pohon yang berdiameter > 30 cm, sedangkan pohon yang berdiameter antara 5-30 cm hanya sekitar 30%. Hairiah dan Murdiyarso (*in press*), mengatakan bahwa pada hutan alam pohon yang berdiameter 5-30 cm (sapling) hanya ada apabila terjadi celah akibat pohon tumbang.

Pada hutan bekas tebangan, cadangan karbon pada pohon yang berdiameter > 30 cm mengalami peningkatan seiring umur hutan bekas tebangan tersebut. Secara berturut turut persentase cadangan karbon dari pohon yang berdiameter > 30 cm adalah 75%, 78% dan 83% pada hutan bekas tebangan umur 0-10, 11-30 dan 31-50 tahun.

Pohon yang berdiameter > 30 cm memberikan sumbangan cadangan karbon sebanyak 30% dari total karbon pada sistem agroforestri umur 0-10 tahun dan 15% pada umur 11-30 tahun. Perbedaan komposisi ukuran pada sistem agroforestri terjadi karena perbedaan jenis pohon yang ditanam. Pada

agroforestri umur 0-10 tahun, lahan yang diambil sebagai contoh didominasi oleh pohon buah-buahan, sedangkan pada agroforestri 11-30 tahun merupakan kebun kopi campuran, sehingga sumbangan cadangan karbon lebih banyak berasal dari pohon yang berdiameter 5-30 cm. Kopi (berdiameter 5-30 cm) yang ditanam secara multistrata di Lampung, pada umur kebun antara 20-30 tahun memberikan sumbangan cadangan karbon sebesar 41% dari total cadangan karbon yang ada (Rahayu *et al.*, *submitted*).

Pada jakaw umur 0-10 tahun cadangan karbon 100% berasal dari pohon yang berdiameter antara 5-30 cm karena belum terdapat pohon yang berdiameter > 30 cm. Pada sistem jakaw petani membabat habis semua vegetasi yang ada, sehingga pertumbuhan bermula dari awal. Pada jakaw umur > 10 tahun, pohon yang berdiameter > 30 tahun sudah memberikan sumbangan biomasa sebanyak 80% dari total biomasa. Jakaw umumnya didominasi oleh tanaman perintis yang cepat tumbuh sehingga dalam waktu 15 tahun sudah banyak pohon yang mencapai diameter > 30 cm.



Gambar 3.5. Skema hubungan antara komposisi spesies dengan komposisi biomasa pada berbagai bentuk penggunaan lahan yang merupakan perubahan dari hutan alam di Kab. Nunukan.

Biomasa karbon

Total biomasa karbon

Estimasi cadangan karbon di atas permukaan tanah pada berbagai sistem penggunaan lahan di Kab. Nunukan berkisar antara 4,2 - 230 Mg ha⁻¹, seperti tercantum dalam Tabel 3.3.

Cadangan karbon di atas permukaan tanah pada hutan primer di Kec. Sebuk dan Sembakung, Kab. Nunukan masih tergolong cukup baik, yaitu 230 Mg ha⁻¹. Studi dari proyek Alternatives to Slash-and-Burn (ASB) di Sumatra menemukan bahwa cadangan karbon pada hutan primer mencapai 300 Mg C ha⁻¹ (Hairiah and Murdiyarso, *in press*). Hutan di Indonesia diperkirakan mempunyai cadangan karbon berkisar antara 161-300 Mg C ha⁻¹ (Murdiyarso *et al.*, 1995). Lasco (2002) telah mereview berbagai studi mengenai cadangan karbon di Asia Tenggara. Cadangan karbon di hutan tropik Asia berkisar antara 40-250 Mg C ha⁻¹ untuk vegetasi dan 50-120 Mg C ha⁻¹ untuk tanah. Pada studi inventarisasi gas rumah kaca, IPCC merekomendasikan suatu nilai cadangan karbon 138 Mg C ha⁻¹ (atau 250 Mg ha⁻¹ dalam berat kering biomasa) untuk hutan-hutan basah di Asia (Lasco, 2002).

Cadangan karbon di hutan alam dijadikan sebagai acuan dalam studi ini. Pengukuran pada hutan bekas tebangan mendapatkan nilai

cadangan karbon berkisar antara 80-92%. Dari nilai tersebut, tidak diketahui polanya dengan jelas mengenai periode waktu setelah penebangan. Faktor yang mempengaruhi adalah:

- Komposisi asli dari hutan: hal yang menarik dari hutan adalah jumlah spesies yang dapat diambil maupun lokasi; hutan yang ditebang lebih awal mungkin berbeda dengan hutan yang ditebang belakangan.
- Perubahan dalam praktek penebangan dari waktu ke waktu, dalam kaitannya dengan pasar (dengan upah yang lebih besar per pohon, merupakan hal yang menarik secara ekonomi untuk melakukan penebangan), teknik pemanenan, peraturan pemerintah dan monitoring sesuai dengan hukum

Karena tidak ada analisis lebih lanjut mengenai faktor-faktor di atas, maka dari berbagai plot bekas tebangan diambil rata-rata dan digunakan sebagai indikasi untuk 'hutan bekas tebangan', tanpa melihat komponen waktu pemulihannya. Lasco (2002), mengatakan bahwa aktivitas penebangan hutan untuk pemanenan kayu berperan dalam menurunkan cadangan karbon di atas permukaan tanah minimal 50%. Di hutan tropis Asia, penurunan cadangan karbon akibat aktivitas tersebut berkisar antara 22%-67%, di Indonesia diperkirakan 38%-75%. Meskipun demikian, kerusakan akibat

Tabel 3.3. Rata-rata cadangan karbon di atas permukaan tanah pada berbagai sistem penggunaan lahan di Kabupaten Nunukan.

Jenis penggunaan lahan	Cadangan karbon (Mg ha ⁻¹)	Persentase (%)
Hutan primer	230,1	100
Hutan bekas tebangan 0-10 tahun	206,8	90
Hutan bekas tebangan 11-30 tahun	212,9	92
Hutan bekas tebangan 31-50 tahun	184,2	80
Jakaw 0-10 tahun	19,4	8
Jakaw > 10 tahun	58,0	25
Agroforestri 0-10 tahun	37,7	16
Agroforestri 11-30 tahun	72,6	31
Imperata	4,2	2
Padi	4,8	2

penebangan dapat diturunkan dengan praktek penebangan yang sesuai (menggunakan tektik pengarahannya rebahnya pohon dan perencanaan untuk pengangkutan).

Cadangan karbon di atas permukaan tanah pada agroforestri umur 0-10 tahun adalah 37.7 Mg ha⁻¹ dan pada umur 11-30 tahun mencapai 72,6 ton ha⁻¹ atau sekitar 16% dan 32% dari hutan primer. Sistem jakaw umur 0-10 tahun mempunyai cadangan karbon di atas permukaan tanah 19 ton ha⁻¹ dan pada umur 15 tahun 58 ton ha⁻¹ atau 8% dan 25% dari hutan primer. Pada sistem agroforestri cadangan karbonnya lebih tinggi bila dibandingkan dengan sistem jakaw, karena pada agroforestri masih terdapat sisa-sisa pohon bekas tebangan sedangkan pada jakaw petani melakukan menebang dan membakar semua vegetasi yang ada.

Pada lahan alang-alang dan padi di lokasi studi cadangan karbon di atas permukaan tanah hanya 4 Mg ha⁻¹ dan 4,8 Mg ha⁻¹. Cadangan karbon yang berupa biomasa pada tanaman padi, akan dilepaskan kembali ketika panen melalui hasil panen berupa padi maupun pembakaran jerami atau dekomposisi jerami. Selain itu, penurunan cadangan karbon juga terjadi akibat penyiangan gulma, pengolahan tanah dan pengairan (Hairiah dan Murdiyarto, *in press*).

Komposisi komponen penyusun cadangan karbon

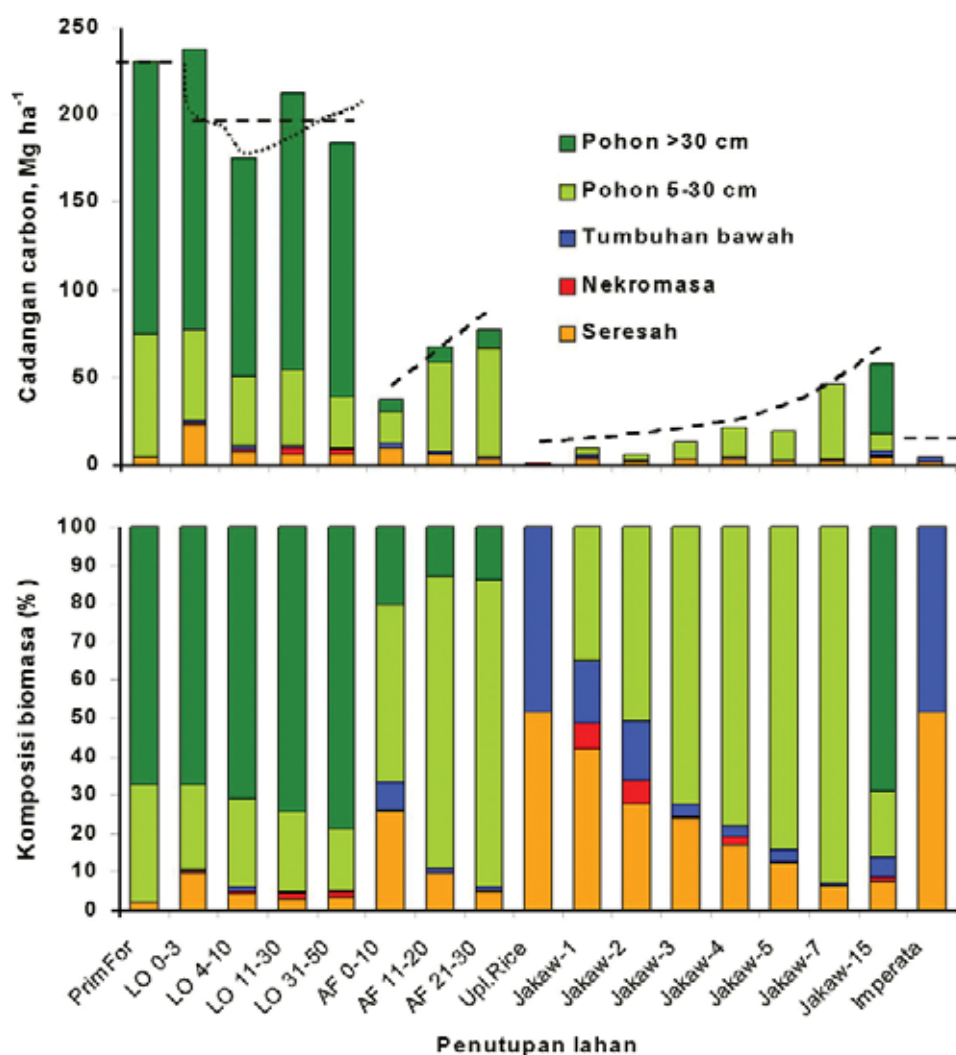
Pohon merupakan komponen terbesar dari biomasa di atas permukaan tanah. Hasil dari studi ini menunjukkan bahwa biomasa pohon dari hutan primer, hutan bekas tebangan dan agroforestri umur 11-30 tahun menyumbangkan 90% dari total karbon (Gambar 3.6). Nekromasa, tumbuhan bawah dan seresah hanya memberikan sekitar 10%. Kondisi ini hampir sama dengan pengamatan yang pernah dilakukan di hutan sekuder Sumberjaya, Lampung yaitu 8% (Van Noordwijk *et al.*, 2002).

Pada jakaw 0-10 tahun, cadangan karbon yang berasal dari biomasa pohon paling kecil bila dibandingkan dengan sistem penggunaan lahan lainnya yaitu 68%. Nekromasa menempati 2,5%, tumbuhan bawah 7% dan seresah 21,5%. Sistem agroforestri umur 0-10 tahun mempunyai 78,3%, 0,4%, 5% dan 17,6% dari total karbon dalam bentuk biomas, nekromasa, tumbuhan bawah dan seresah. Pada agroforestri, biomasa pohon mengalami peningkatan seiring dengan waktu. Plot jakaw mempunyai nekromasa yang lebih tinggi (secara relatif maupun secara mutlak). Keadaan ini sangat erat kaitannya dengan teknik pembukaan lahan yang dilakukan oleh petani. Sistem tebang-bakar yang dilakukan petani menyisakan nekromasa dan seresah relatif banyak. Seiring pertambahan waktu, dekomposisi nekromas dan seresah terjadi, sehingga komposisi nekromas mengalami penurunan. Demikian juga terjadi pada tumbuhan bawah, semakin rapat kanopi pohon, biomasa tumbuhan bawah semakin berkurang karena berkurangnya cahaya matahari yang mencapai lantai kebun. Pada imperata sumber cadangan karbon hanya terdapat pada tumbuhan bawah (48%) dan seresah (52%).

Time-averaged cadangan karbon

Nilai cadangan karbon mencerminkan dinamika karbon dari sistem penggunaan lahan yang berbeda, yang nantinya digunakan untuk menghitung 'time-averaged karbon' di atas permukaan tanah pada masing-masing sistem. Time-averaged karbon tergantung pada laju akumulasi karbon, karbon maksimum dan minimum yang tersimpan dalam suatu sistem penggunaan lahan, waktu untuk mencapai karbon maksimum dan waktu rotasi (Palm *et al.*, *in press*).

Pada hutan alam diasumsikan bahwa contoh yang diambil secara langsung dapat mewakili 'time-averaged' cadangan karbon, karena telah mencerminkan skala mosaik dari bagian siklus regenerasi.



Gambar 3.6. Cadangan karbon di atas permukaan tanah dan komposisinya di Kab. Nunukan.

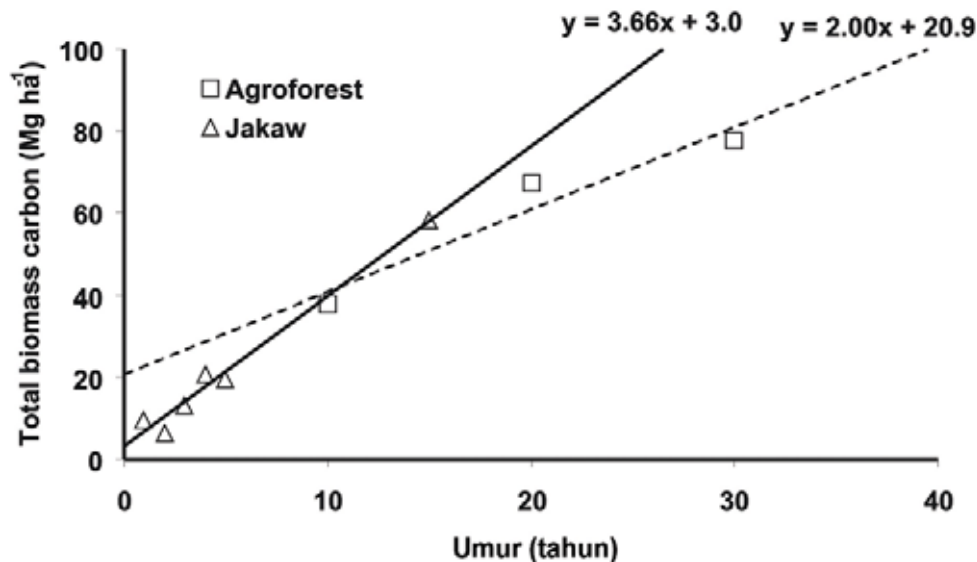
Data untuk bekas tebangan, dengan melihat perbedaan waktu setelah penebangan tidak menunjukkan pola yang diharapkan (garis titik-titik pada Gambar 3.6), penurunan secara langsung terjadi karena pengambilan biomasa, diikuti oleh kematian pohon dan selanjutnya terjadi pertumbuhan kembali vegetasi. Pada plot bekas tebangan 31-50 tahun khususnya, tidak ada hubungan yang sesuai. Tidak adanya pola antar waktu yang dapat menginterpretasikan data ini, maka akan digunakan rata-rata dari plot-plot bekas tebangan tanpa memperhitungkan waktu untuk mengestimasi 'time-averaged' cadangan karbon.

Pada sistem penggunaan lahan agroforestri dan jakaw-padi, cadangan karbon antar waktu menunjukkan adanya peningkatan seperti yang diharapkan (Gambar 3.7). Peningkatan secara linear dengan intersep yang sangat kecil terlihat pada sistem jakaw, sementara pada agroforestri menunjukkan intersep yang lebih tinggi secara substansial (adanya sisa pohon dari hutan), begitu juga laju peningkatannya lebih rendah.

Laju penyerapan karbon pada jakaw diperkirakan 3,66 Mg ha⁻¹ tahun⁻¹ dan pada sistem agroforestri adalah 2,00 Mg ha⁻¹ tahun⁻¹ (Gambar 3.7), dapat dibandingkan dengan sistem 'bera' (fallow) yang diamati di

Sumberjaya, Lampung yaitu $3,44 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ tahun}^{-1}$ (Van Noordwijk *et al.*, 2002). Berdasarkan pada peningkatan secara linier dari total cadangan karbon antar waktu, dapat

diturunkan "time-averaged" cadangan karbon sebagai suatu fungsi panjang rotasi untuk sistem jakaw-padi dengan menggunakan rumus 1.



Gambar 3.7. Pertumbuhan cadangan karbon pada agroforestri dan jakaw di Kec. Sebuku dan Sembakung, Kab. Nunukan, Kalimantan Timur.

Tabel 3.4. Nilai 'time-averaged' cadangan karbon pada empat sistem penutupan lahan/penggunaan lahan utama pada lahan kering Kab. Nunukan; pada sistem agroforestri dideskripsikan dua tipe strategi peremajaan pohon yang berbeda (sistem rotasi atau sistem sisipan); jenis yang dominan saat ini ditandai dengan sistem penggunaan lahan dengan huruf tebal.

	Lama siklus (tahun)	Time-averaged Cadangan karbon (Mg ha^{-1})	Relatif terhadap hutan
Hutan primer (sisa hutan)		230,1	100,0
Hutan bekas tebangan (pada berbagai intensitas penebangan)		202,7	88,1
Agroforestri	15	25,5	11,1
(rotational)	25	35,5	15,4
	40	50,5	21,9
(sisipan)			
umur rata-rata	25	70,9	30,8
umur rata-rata	40	100,9	43,8
Jakaw-padi	4	7,0	3,0
1 tahun tanaman pangan	6	10,5	4,6
X-1 tahun 'bera' (fallow)	8	14,1	6,1
	10	17,8	7,7
	15	26,9	11,7
	20	36,0	15,6
Imperata (alang-alang)		4,2	1,8
(kebakaran setiap tahun)			

Pada sistem agroforestri ada dua situasi yang perlu dijelaskan: salah satu dari sistem agroforestri yang ada merupakan peremajaan dengan menempatkan tanaman baru atau menyisipkannya pada ruang kosong dalam suatu lahan ('sisipan') dan memilih beberapa pohon hutan untuk dipertahankan. Pada kasus ini 'time-averaged' cadangan karbonnya tergantung pada rata-rata 'umur suksesi' dari sistem tersebut. Pada sistem lainnya, agroforestri diperbarui pada tingkat lahan dengan menebang pohon dan mulai membangun dari titik nol suatu siklus. Sistem agroforestri yang ada di Kab. Nunukan sebagian besar berupa sistem 'sisipan'. Penanaman pohon yang lebih intensif sebagai tanaman pangan cenderung dilakukan pada tipe rotasi (pergiliran tanaman).

Kesimpulan

Hutan alam di Kabupaten Nunukan mempunyai cadangan karbon sebanyak 230 Mg ha⁻¹. Nilai ini masih dalam kisaran dari perkiraan cadangan karbon di Sumatra maupun pada tempat lain di Kalimantan. Dampak penebangan terhadap cadangan karbon relatif kecil (hanya menurunkan 12% dari cadangan karbon yang ada), tetapi sebenarnya ada kemungkinan cadangan karbon di hutan alam tersebut lebih tinggi dan kehilangan akibat penebangan menjadi lebih tinggi dengan asumsi bahwa hutan alam yang lebih baik kondisinya telah ditebang sebelumnya sehingga hutan yang tersisa tidak dapat mewakili kondisi aslinya.

Ada dua sistem yang umum dilakukan petani di Kecamatan Sebakung dan Sembakung yaitu (i) sistem Jakaw-padi, dimana petani menebang dan membakar pada plot bekas tebangan dan menanam padi lahan kering selama satu tahun atau lebih sebelum petani meninggalkan lahannya dan membiarkannya dalam keadaan 'bera' (fallow), dan (ii) sistem agroforestri, dimana petani menanam pohon

buah-buahan di antara pohon-pohon sisa tebangan yang masih ditinggalkan.

Pengukuran pada skala plot menemukan bahwa cadangan karbon pada sistem agroforestri lebih tinggi dari pada sistem jakaw, dengan nilai antara 19 Mg ha⁻¹ dan 58 Mg ha⁻¹ pada jakaw yang diberakan 0-10 tahun dan lebih dari 10 tahun, 38 Mg ha⁻¹ dan 73 Mg ha⁻¹ pada agroforestri yang dikelola 0-10 tahun dan 11-30 tahun. Perkiraan cadangan karbon pada agroforestri berbasis buah dan kayu yang ditemukan di lokasi studi terlihat lebih rendah bila dibandingkan dengan sistem agroforestri lainnya, seperti agroforestri berbasis kopi dan karet. Hal ini terjadi karena jenis pohon yang ada pada agroforestri berbasis buah dan kayu merupakan jenis-jenis dengan nilai kerapatan kayu rendah (sebagian besar merupakan pohon sisa tebangan yang nilai komersialnya rendah).

Laju penyerapan karbon tahunan setelah penebangan pada sistem agroforestri yang berada pada stadia suksesi muda berkisar antara 2-4 Mg ha⁻¹ tahun⁻¹, lebih rendah dari laju pertumbuhan pada hutan tanaman yang dikelola yaitu 5-7 Mg ha⁻¹ tahun⁻¹. Meskipun demikian, laju penyerapan karbon tidak diperlukan dalam perhitungan, sebagai perbandingan digunakan 'time-averaged' cadangan karbon karena dapat memberikan perbandingan langsung.

Konversi dari hutan ke lahan pertanian untuk padi lahan kering – siklus pertumbuhan 'bera' (fallow) akan menurunkan cadangan karbon lebih dari 85%, tergantung pada lamanya siklus 'bera'. Agroforestri merupakan penggunaan lahan yang dapat dipilih, karena pengelolaan pohon secara intensif dapat memberikan pendapatan, dan diharapkan berfungsi sebagai penyerap karbon (cadangan karbonnya 31% dari hutan alam).

Berdasarkan data yang diperoleh, disarankan bahwa bentuk pengelolaan yang baik terhadap hutan bekas tebangan dengan

menghindari degradasi hutan memberikan peluang yang paling baik dalam mempertahankan cadangan karbon di Kab. Nunukan, selain itu juga memberikan pendapatan bagi masyarakat lokal. Dalam prakteknya, penebangan merupakan awal dari degradasi selanjutnya. Untuk mengurangi hilangnya cadangan karbon, suatu pengelolaan lahan yang berkelanjutan dengan pertanian yang dikelola secara intensif merupakan hal pokok yang diperlukan. Agroforestri dan sistem penggunaan lahan berbasis pohon lainnya menyediakan 'income' (pendapatan) dengan cadangan karbon sekitar 20-40% dari hutan alam, tergantung pada pengelolaan yang dilakukan.

Secara keseluruhan, pengelolaan terhadap aktivitas penebangan merupakan prioritas utama dalam upaya menurunkan kehilangan cadangan karbon. Sementara itu, penekanan pada bentuk penggunaan lahan sistem agroforestri dapat menyediakan suatu bagian dari upaya penurunan kehilangan cadangan karbon. Diskusi selanjutnya, seperti pilihan masyarakatan (option), yang berkaitan dengan cadangan karbon perlu dikombinasikan dengan profitabilitas, kesempatan kerja dan 'return to labour', seperti didiskusikan pada bab terakhir dari laporan ini.

4. ALIH GUNA LAHAN DI KABUPATEN NUNUKAN: PENDUGAAN CADANGAN KARBON BERDASARKAN TIPE TUTUPAN LAHAN DAN KERAPATAN VEGETASI PADA SKALA LANSKAP

Atiek Widayati, Andree Ekadinata dan Ronny Syam

Pendahuluan

Latar Belakang

Hutan memiliki cadangan karbon yang sangat besar. Pulau Kalimantan merupakan pulau terbesar di Indonesia dengan areal hutan yang cukup luas, tetapi juga memiliki laju penurunan areal dan kualitas hutan yang sangat cepat. Dengan kondisi seperti ini, Kalimantan telah menjadi pusat perhatian dalam diskusi yang menyangkut dinamika tutupan hutan beserta dampaknya terhadap cadangan dan penyerapan karbon.

Proyek FORMACS di Kabupaten Nunukan dicanangkan untuk menguji pengelolaan hutan berbasis masyarakat sebagai sebuah pendekatan dalam memperbaiki taraf kehidupan masyarakat lokal dan mengurangi akses terhadap perubahan tutupan hutan. Pemantauan cadangan karbon diperlukan untuk mengevaluasi efektivitas pendekatan yang dilakukan pada proyek ini dalam mencapai tujuan dan untuk menentukan informasi dasar mengenai laju perubahan lahan, sebelum proyek dapat sepenuhnya berjalan secara efektif.

Teknologi penginderaan jauh merupakan salah satu cara yang efektif dalam melakukan

pemantauan perubahan lahan dari waktu ke waktu. Integrasi data perubahan tutupan vegetasi dengan data hasil pengukuran cadangan karbon pada skala plot dapat memberikan pendugaan perubahan cadangan karbon pada skala lanskap. Secara umum dua metode yang akan dilakukan dalam studi ini adalah:

1. Pendekatan yang dilakukan dengan membangun relasi kuantitatif antara informasi dari skala piksel pada citra satelit dengan cadangan karbon. Relasi ini kemudian digunakan sebagai dasar untuk melakukan ekstrapolasi spasial.
2. Pendekatan yang dilakukan dengan mengklasifikasikan kelas-kelas penutupan lahan menjadi kelas-kelas penggunaan lahan yang kemudian dikonversi menjadi kelas cadangan karbon berdasarkan atribut cadangan karbon dari kelas penggunaan lahan tersebut.

Kedua pendekatan di atas memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, oleh karena itu tidak tertutup kemungkinan untuk memadukan kedua pendekatan tersebut. Studi ini dilakukan dengan menggunakan kedua metode di atas, yang kemudian dilanjutkan dengan analisa tingkat ketidakpastian (*uncertainty*) dari setiap metode.

Tujuan

Tujuan dari studi ini adalah:

1. Melakukan analisis perubahan lahan Kabupaten Nunukan pada tahun 1996 sampai 2003 dengan membandingkan dua peta penutupan lahan yang dihasilkan oleh analisa data penginderaan jauh secara terpisah pada masing-masing tahun.
2. Membuat peta kerapatan vegetasi melalui analisis Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) yang dihasilkan melalui pengolahan data penginderaan jauh.
3. Membangun relasi antara data pengukuran cadangan karbon di lapangan dengan nilai NDVI pada tingkat piksel, yang kemudian akan digunakan sebagai basis ekstrapolasi cadangan karbon pada skala lanskap.
4. Membangun relasi antara rata-rata pendugaan cadangan karbon untuk tiap kelas penutupan lahan dan perubahan tutupan lahan sebagai salah satu alternatif dalam penaksiran cadangan karbon pada skala lanskap.
5. Menganalisa kelebihan dan kekurangan pendekatan-pendekatan yang digunakan berdasarkan tingkat ketidakpastian dalam relasi yang dibangun, untuk digunakan sebagai pertimbangan dalam penggunaan metode yang sama di masa yang akan datang.

Lokasi Studi

Kabupaten Nunukan terletak di bagian timur laut Propinsi Kalimantan Timur. Wilayah Kabupaten Nunukan mencakup enam

kecamatan yaitu Krayan, Lumbis, Sebuku, Sembakung, Nunukan, dan Sebatik. Lokasi dan batas administrasi Kabupaten Nunukan ditunjukkan oleh Gambar 1.1. Sebagian besar wilayah Kabupaten Nunukan, terbentuk oleh DAS (Daerah Aliran Sungai) Sembakung dan Sebuku dimana hubungan dataran tinggi-dataran rendah/pantai terdapat pada Kecamatan Lumbis-Kecamatan Sembakung dan Kecamatan Sebuku-Kecamatan Nunukan. Kecamatan Krayan yang terletak di bagian barat Kabupaten Nunukan, memiliki aliran sungai yang bermuara ke Kabupaten Malinau dan sama sekali terpisah dari jaringan sungai utama Kabupaten Nunukan (Gambar 4.1). Daerah ini juga memiliki dinamika perubahan tutupan hutan yang berbeda dengan daerah lain di Nunukan. Berdasarkan hal tersebut, pembahasan mengenai cadangan karbon dalam tulisan ini akan difokuskan pada area DAS Sembakung dan Sebuku.

Data

Citra Satelit

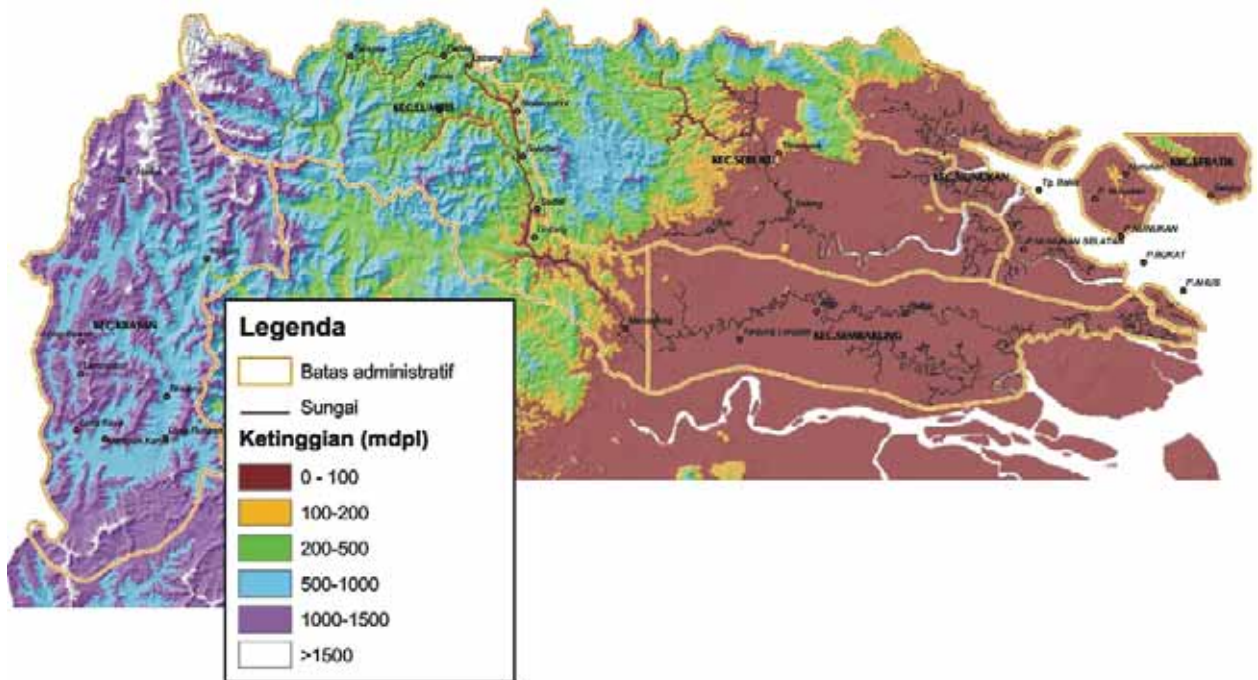
Sejumlah citra Landsat *multitemporal* digunakan untuk membuat peta penutupan lahan Kabupaten Nunukan. Waktu perekaman masing-masing citra satelit tercantum pada Tabel 4.1, sedangkan cakupan citra satelit di wilayah Kabupaten Nunukan diperlihatkan pada Gambar 4.2.

Karakter Spasial dan Spektral Citra Landsat

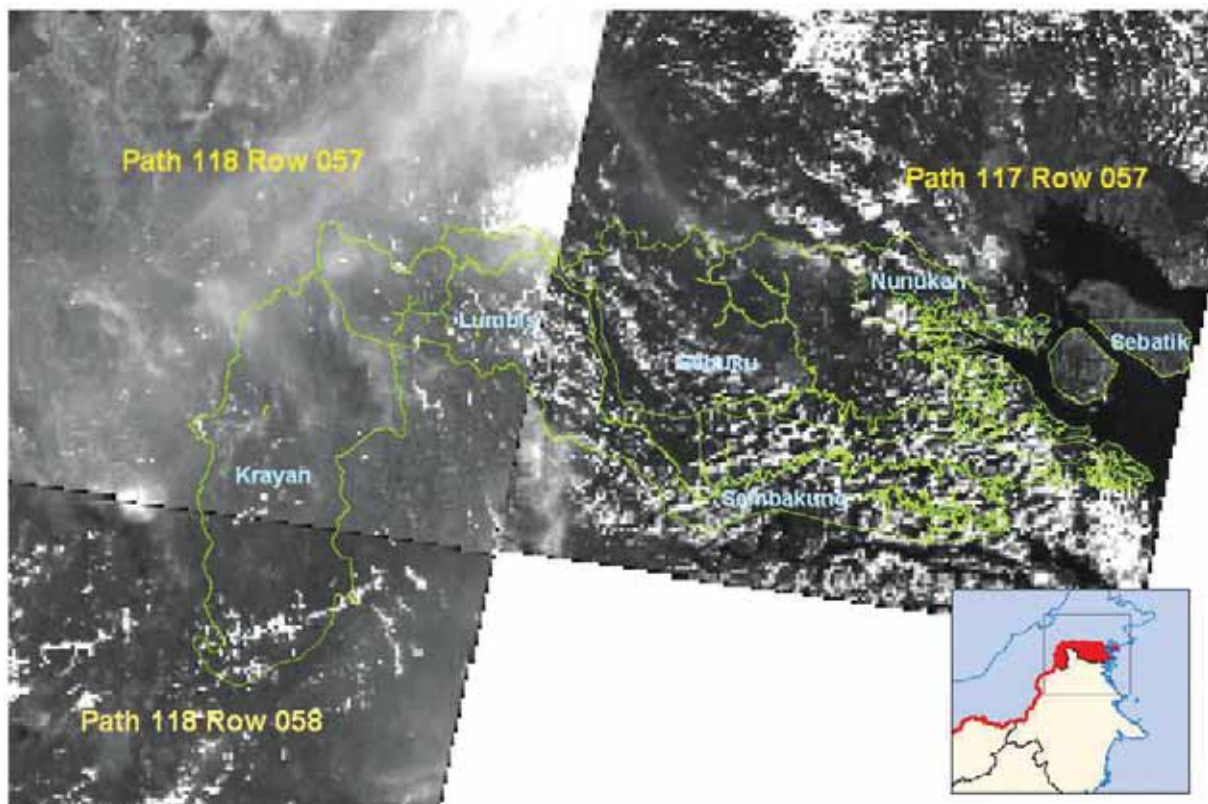
Citra Landsat memiliki 7 kanal spektral dengan resolusi spasial 30 m. Cakupan spektrum citra Landsat, berkisar antara 0,45-

Tabel 4.1. Waktu perekaman citra satelit Landsat

Path/row	Landsat 5/ETM	Landsat 7/ETM
117/057	29 Desember 1996	23 Januari 2003
118/057	13 Juli 1996	22 Mei 2003
118/058	17 Agustus 1997	22 Mei 2003



Gambar 4.1. Peta Elevasi Kabupaten Nunukan, Propinsi Kalimantan Timur



Gambar 4.2. Cakupan citra Landsat

0,69 m pada spektrum sinar tampak dan 0,76-2,35 m pada spektrum infra merah. Masing-masing kanal spektral Landsat mewakili berbagai karakteristik spektral yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi berbagai penampakan di permukaan bumi. Karakteristik spektral tersebut ditunjukkan oleh Tabel 4.2.

Data Spasial Pendukung

Data spasial pendukung dibutuhkan dalam beberapa analisa yang akan dilakukan di Kabupaten Nunukan. Berdasarkan tipe informasinya, data spasial pendukung yang dibutuhkan meliputi peta: topografi, pembagian administratif, geologi dan sistem lahan. Daftar peta yang digunakan dalam studi ini ditunjukkan oleh Tabel 4.3.

Metode

Klasifikasi Penutupan Lahan dan Perubahan Penutupan Lahan

Metode yang digunakan dalam analisa perubahan penutupan lahan adalah metode *Post Classification Comparison*. Data perubahan penutupan lahan yang digunakan dalam metode tersebut berupa data yang berasal dari peta penutupan lahan multiwaktu. Diagram alir klasifikasi penutupan lahan dan deteksi perubahannya ditunjukkan pada Gambar 4.3.

Koreksi Citra Satelit

Koreksi Radiometrik

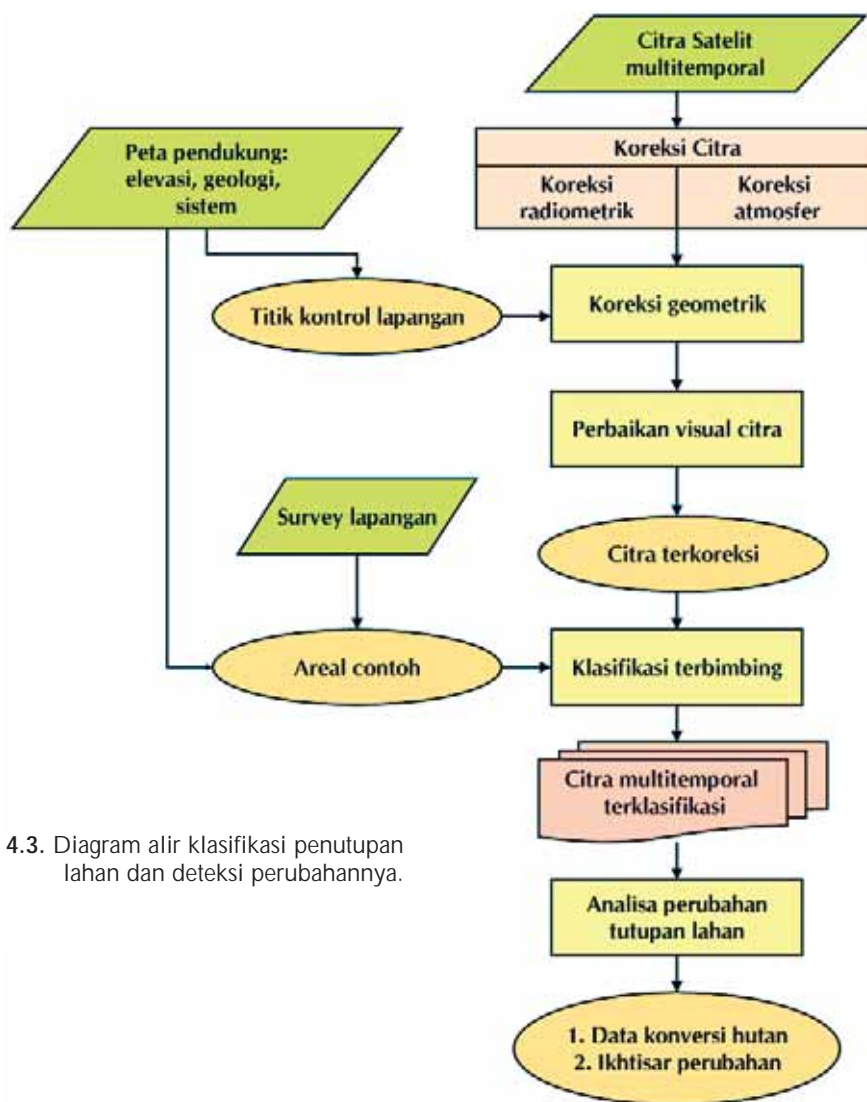
Data penginderaan jauh yang diperoleh dari wahana satelit memberikan informasi tentang

Tabel 4.2. Karakteristik spektral citra Landsat (Lillesand dan Kiefer, 1994)

Saluran (band)	Panjang Gelombang (μm)	Sifat dan Aplikasinya
1	0.45-0.52	<ul style="list-style-type: none"> • Tanggap peningkatan penetrasi tubuh air • Mendukung analisis sifat khas lahan, tanah, vegetasi
2	0.53-0.6	<ul style="list-style-type: none"> • Mengindera puncak pantulan cegetasi • Menekankan perbedaan vegetasi dan nilai kesuburan
3	0.63-0.69	<ul style="list-style-type: none"> • Untuk memisahkan vegetasi • Saluran pada serapan klorofil dan memperkuat kontras vegetasi dan bukan vegetasi
4	0.76-0.9	<ul style="list-style-type: none"> • Tanggap biomasa vegetasi • Identifikasi tipe vegetasi • Memperkuat kontras tanah - tanaman dan lahan - air
5	1.55-1.75	<ul style="list-style-type: none"> • Menentukan jenis tanaman dan kandungan air tanaman • Membantu menentukan kondisi kelembaban tanah
6	10.4-12.5	<ul style="list-style-type: none"> • Deteksi suhu obyek • Analisa gangguan vegetasi • Perbedaan kelembaban tanah
7	2.08-2.35	<ul style="list-style-type: none"> • Pemisahan formasi batuan • Analisis bentuk lahan

Table 4.3. Daftar peta-peta pendukung.

No	Judul	Skala	Sumber
1	Peta topografi	1:50.000	Dit Top Angkatan Darat
2	Peta perencanaan wilayah	-	BAPPEDA Nunukan
3	Peta geologi	1:250.000	Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi
4	Peta sistem lahan	1:250.000	Departemen Transmigrasi



Gambar 4.3. Diagram alir klasifikasi penutupan lahan dan deteksi perubahannya.

reflektansi obyek-obyek yang ada di permukaan bumi. Jumlah reflektansi yang ditangkap oleh sensor satelit diwujudkan dalam bentuk nilai digital (*Digital Number/DN*) atau disebut juga *Digital Counts* (DC) pada citra. Pada saat nilai reflektan diubah oleh sensor satelit menjadi nilai digital dalam suatu skala tertentu terdapat kesalahan-kesalahan yang diakibatkan oleh beberapa faktor, antara lain: kondisi atmosfer pada saat citra direkam, *scene illumination*, variasi pandangan secara geometri dan karakteristik respon sensor (Lillesand and Kiefer, 1994 and Chavez, 1996). Kesalahan-kesalahan tersebut dapat dihilangkan dalam proses koreksi radiometrik.

Koreksi Geometrik

Koreksi geometrik dilakukan untuk memperbaiki citra satelit akibat kesalahan geometrik. Kesalahan-kesalahan geometrik yang ada pada citra satelit dapat diakibatkan oleh beberapa faktor antara lain: variasi ketinggian tempat, variasi ketinggian satelit, variasi kecepatan sensor, kesalahan panoramik, kelengkungan bumi, refraksi atmosfer, variasi bentuk relief permukaan bumi dan ketidak-linieran cakupan sensor satelit (IFOV/ *Instantaneous Field of View*) (Lillesand and Kiefer, 1994). Pada penelitian ini, dengan asumsi bahwa kesalahan geometrik yang terjadi pada citra satelit berupa kesalahan non

sistematis maka proses koreksi geometrik yang dilakukan dengan menggunakan hubungan matematik antara koordinat piksel dalam citra satelit dengan koordinat piksel sebenarnya di lapangan. Hubungan matematik dihasilkan dari data *Ground Control Point* (GCP) yang diperoleh dari peta topografi.

Klasifikasi Penutupan Lahan

Klasifikasi penutupan lahan dilakukan dengan menggunakan metode klasifikasi terbimbing (*supervised classification*). Dalam metode klasifikasi terbimbing sejumlah area contoh (*training area*) digunakan untuk menentukan batasan nilai spektral tiap tipe penutupan lahan. Nilai tersebut akan digunakan oleh suatu algoritma klasifikasi untuk mengidentifikasi nilai-nilai spektral lain pada area tertentu dalam citra satelit. Hasil proses algoritma klasifikasi berupa citra yang telah dikategorisasikan menjadi beberapa tipe penutupan lahan.

Area Contoh

Dataset area contoh dikumpulkan pada saat kegiatan pengecekan lapangan. Letak area contoh di lapangan direkam dengan GPS (*Global Positioning System*). Kelas penutupan lahan yang dapat diidentifikasi di lapangan selama kegiatan pengecekan lapangan sebanyak 13 kelas, kelas-kelas tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Kelas-kelas Penutupan Lahan

No	Kelas Penutupan Lahan
1	Mangrove (Bakau)
2	Hutan Primer
3	Hutan Tanaman Industri
4	Hutan Bekas Tebangan
5	Hutan Sekunder
6	Kebun Campuran Tua (agroforestri)
7	Kebun Campuran Muda (agroforestri)
8	Kebun Kelapa Sawit muda
9	Semak
10	Lahan terbuka
11	Pemukiman
12	Kolam Ikan
13	Badan air

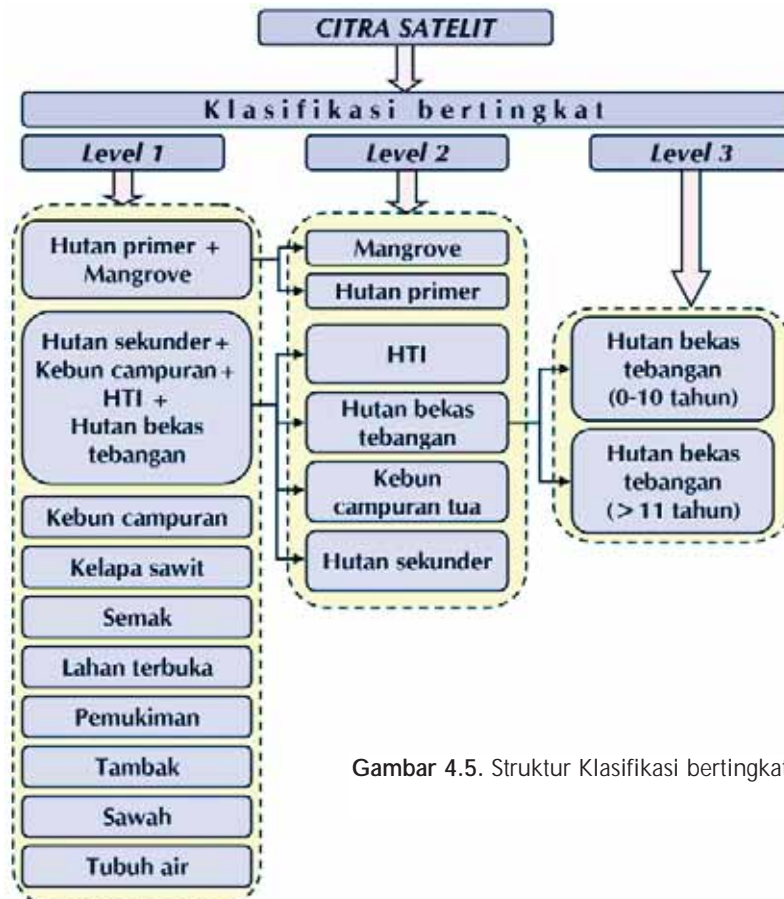


Gambar 4.4. Tipe penutupan lahan di Kabupaten Nunukan, agroforestri (kiri atas), kelapa sawit muda (kanan atas). Tambak (kiri bawah) dan hutan sekunder (kanan bawah)

Klasifikasi Citra Satelit

Proses klasifikasi untuk menghasilkan peta penutupan lahan Nunukan, dilakukan berdasarkan suatu struktur klasifikasi bertingkat yang ditunjukkan pada Gambar 4.5. Terdapat 3 tingkatan proses klasifikasi dalam klasifikasi bertingkat, dimana tiap tingkatan menggunakan sumber informasi yang berbeda dengan menggabungkan batasan nilai spektral contoh yang diperoleh dari citra satelit dan informasi tambahan yang berasal dari peta tematik. Ketiga tingkatan tersebut adalah:

- Tingkatan pertama digunakan untuk mengklasifikasikan tipe penutupan lahan dengan hanya menggunakan informasi dari dataset area contoh. Kelas-kelas hasil klasifikasi tingkat pertama umumnya berupa gabungan dari dua kelas penutupan lahan, oleh karena itu harus dipisahkan pada proses klasifikasi tingkat kedua dan ketiga.
- Pada proses klasifikasi tingkat kedua, dua komponen kelas "mangrove dan hutan primer" dapat dipisahkan dengan menggunakan informasi tematik dari peta sistem lahan, peta geologi dan peta topografi. Untuk kelas besar "hutan sekunder" dibedakan menjadi dua: hutan tanaman industri diidentifikasi menggunakan peta konsesi hutan tanaman industri Kabupaten Nunukan, sedangkan kebun campuran tua diidentifikasi menggunakan keterkaitan kebun tersebut dengan pemukiman, jalan dan sungai. Hutan bekas tebangan dapat diklasifikasikan menggunakan informasi tematik yang terdapat pada peta batas konsesi hutan Kabupaten Nunukan dan adanya jalan sarad yang dapat dilihat dengan jelas pada citra Landsat.
- Klasifikasi tingkat ketiga dilakukan untuk memisahkan kelas hutan bekas tebangan



Gambar 4.5. Struktur Klasifikasi bertingkat

menjadi dua kategori. Klasifikasi tingkat ketiga menggunakan informasi yang diperoleh dari plot-plot pengamatan di Kabupaten Nunukan.

Deteksi perubahan penutupan lahan

Deteksi perubahan penggunaan lahan dilakukan dengan metode *Post Classification Comparison* (Sunar, 1998). Citra terklasifikasi Kabupaten Nunukan tahun 1996 dan 2003 di-*overlay* dan dibandingkan satu dengan lainnya untuk menghitung perubahan penutupan lahan.

Pemetaan kerapatan vegetasi

Respon spektral citra satelit umumnya memiliki sensitivitas terhadap kerapatan vegetasi (indeks luas daun/*Leaf Area Index/LAI*), tajuk pohon dan kandungan air di daun tumbuhan. Kerapatan vegetasi akan bertambah dari lahan terbuka hingga beberapa tahap suksesi, namun pantulan dalam spektrum sinar tampak berkurang karena adanya penambahan luasan daun dan penyerapan, begitu juga pada bayangan yang diakibatkan oleh tajuk pohon. Indeks luas daun maksimal lebih cepat tercapai pada saat awal suksesi, berbeda dengan basal area maksimum pohon dan biomas pohon. Pada saat yang sama terjadi peningkatan pantulan spektrum infra merah yang diakibatkan adanya pantulan dari tajuk, transmisi gelombang yang melewati tajuk dan pantulan tanah (Coops *et al.*, 1997). Hubungan antara respon spektral pada spektrum sinar tampak dan infra merah dengan kerapatan vegetasi dapat dijelaskan dengan suatu indeks yang disebut 'indeks vegetasi' (Huete, 1998). Indeks vegetasi merupakan kombinasi matematis antara band merah dan band NIR yang telah lama digunakan sebagai indikator keberadaan dan kondisi vegetasi (Lillesand dan Kiefer, 1994). Penelitian ini menggunakan salah satu indeks vegetasi yaitu *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).

Perhitungan NDVI

NDVI pada dasarnya mengukur kemiringan (*slope*) antara nilai asli band merah dan band infra merah di angkasa dengan nilai band merah dan infra merah yang ada dalam tiap piksel citra. Berikut ini adalah rumus penghitungan NDVI:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

dimana NIR = nilai band infra merah; Red = nilai band merah

Nilai NDVI berkisar antara -1 sampai 1. Nilai -1 sampai 0 menunjukkan daerah yang tidak memiliki penutupan vegetasi.

Dalam penelitian ini, nilai NDVI ditunjukkan dalam persentase, dimana nilai terendah (-1) ditunjukkan dengan angka 0 dan nilai tertinggi (1) ditunjukkan dengan angka 100.

Pendugaan penutupan lahan yang berada di bawah awan

Akibat tingkat penutupan awan pada citra cukup tinggi (40%) akan menghasilkan peta penutupan lahan dengan jumlah area bernilai "No Data" cukup luas dan akan berpengaruh pada hasil perhitungan perubahan penutupan lahan. Data luas tiap tipe penutupan lahan yang akurat juga sulit diperoleh karena penutupan awan pada citra meliputi tipe penutupan lahan yang berbeda-beda. Data luas tersebut diperlukan pada saat pendugaan cadangan karbon pada skala lanskap. Untuk menduga tipe dan luas penutupan lahan yang ada di bawah penutupan awan digunakan metode pendekatan SIG. Metode ini menggunakan kombinasi informasi tipe penutupan lahan yang berasal dari areal yang bebas penutupan awan, sistem penggunaan lahan dan data elevasi. Diagram alir metode pendugaan tipe dan luas penutupan lahan di bawah penutupan awan ditunjukkan pada Gambar 4.6.

Pendugaan Cadangan Karbon

Pendugaan cadangan karbon berdasarkan data spasial dilakukan dengan dua metode yaitu:

- Metode pertama: menggunakan informasi luas penutupan lahan yang sudah merupakan gabungan dari hasil klasifikasi dan hasil pendugaan daerah di bawah tutupan awan yang dilakukan dengan menggunakan metode seperti Gambar 4.6. Kemudian luas tiap kelas penutupan lahan dikalikan dengan data hasil perhitungan cadangan karbon di atas tanah (*above ground Carbon stock*) dari kelas penutupan lahan yang bersangkutan. Data perhitungan cadangan karbon di atas tanah tiap kelas penutupan lahan di peroleh dari Bab 2 (Rahayu *et al.*, buku ini) dengan data tambahan dari pustaka lain untuk tipe penutupan lahan yang tidak diambil contohnya.
- Metode kedua: menggunakan hubungan matematis antara nilai NDVI piksel citra

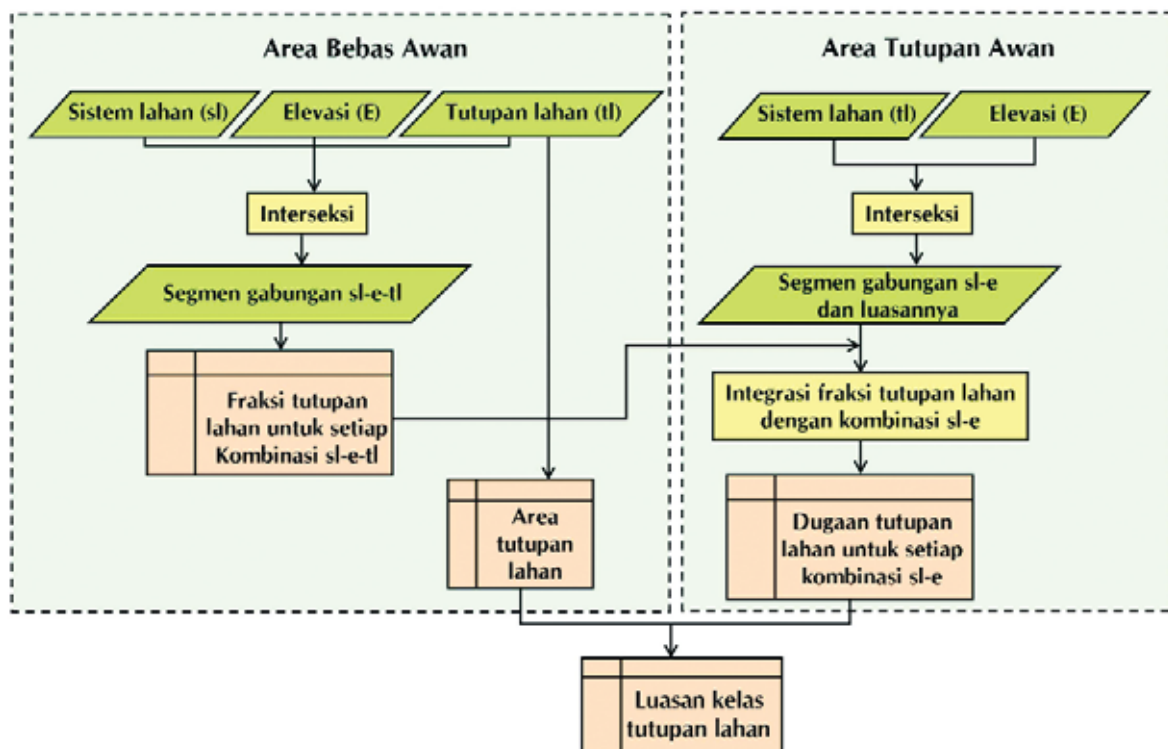
dengan nilai cadangan karbon piksel yang sama sebagai dasar untuk proses extrapolasi spasial.

Metode 1: Ekstrapolasi berdasarkan peta penutupan lahan

Pendugaan cadangan karbon pada dua citra dengan tahun yang berbeda pada dasarnya dilakukan sebagai proses pemberian atribut ulang pada peta penutupan lahan dengan data cadangan karbon pada skala plot tipe penutupan lahan yang sama. Hasil yang diharapkan adalah dugaan cadangan karbon berdasarkan tipe penutupan lahan.

Langkah kerja metode 1:

1. Interpretasi ulang tipe penutupan lahan yang ada pada peta berdasarkan tipe penutupan lahan dari hasil pengukuran plot di lapangan.
2. Pemberian atribut tiap tipe penutupan lahan dan data kerapatan cadangan karbon hasil pengukuran di lapangan (Table 4.5)



Gambar 4.6. Pendugaan tipe dan luas penutupan lahan di bawah penutupan awan

Tabel 4.5. Hasil klasifikasi ulang proses pendugaan cadangan karbon

No.	Tipe penutupan lahan dari klasifikasi citra satelit	Tipe penutupan lahan pada pengukuran plot	Kerapatan karbon (Mg ha ⁻¹)
1	Hutan primer	Hutan primer	230.1
2	Hutan bekas tebangan	Hutan bekas tebangan	201.3
3	Semak	Jakaw 0-10 tahun (bekas tebangan, padi, dan suksesi sekunder)	19.4
4	Hutan sekunder	Jakaw > 10 tahun (bekas tebangan, padi, suksesi sekunder)	58
5	Kebun campuran muda	Agroforestri 0-10 tahun	37.7
6	Kebun campuran tua	Agroforestri 11-30 tahun	72.6
7	-	Imperata	4.2
8	Hutan tanaman industri	Acacia (Lasco <i>et al.</i> , 1999)	88.1
9	Mangrove	Mangrove (Lasco <i>et al.</i> , 2000)	176.8
10	Perkebunan muda	Kelapa sawit (Tomich <i>et al.</i> , 1998)	91
11	Sawah	-	
12	Tambak	-	
13	Lahan terbuka	-	
14	No data	-	
15	Pemukiman	-	
16	Tubuh air	-	

3. Penghitungan luas tiap tipe penutupan lahan untuk memperoleh neraca karbon DAS Sembakung dan Sebuku pada tahun 1996 dan 2003.

Metode 2: Extrapolasi berdasarkan plot pengamatan cadangan karbon

Hingga saat ini belum ada metode yang dapat mengukur kandungan karbon yang ada di dalam tanah pada skala lanskap. Hubungan antara NDVI dan data hasil pengukuran lapangan mampu memberikan informasi tentang biomasa vegetasi dan merupakan salah satu metode pendekatan untuk menduga kandungan karbon (Brown, 1996). Penggunaan karakteristik spektral dan transformasi data penginderaan jauh lainnya untuk menduga biomasa serta karakteristik biofisik vegetasi telah dilakukan dalam penelitian-penelitian sebelumnya. Terdapat hubungan empiris yang cukup kuat antara transformasi spektral dengan luas bidang dasar (*basal area*) dan kerapatan pohon (Coops *et al.*, 1997). Gemmel & Goodenough, 1992 in

Coops *et al.*, 1997 menyatakan bahwa luas bidang dasar tegakan akan terus bertambah seiring dengan pertumbuhan tegakan, namun pertambahan tersebut tidak mempengaruhi sinyal penginderaan jauh. Sinyal tersebut dipengaruhi oleh tingkat penutupan tajuk yang akan mencapai 100% pada saat tumbuhan masih muda. Demikian juga untuk *LAI*, bentuk hubungan antara *NDVI* dan *LAI* adalah kurvilinear dan mencapai puncaknya pada nilai *LAI* = 6 untuk hutan konifer (Spanner, Pierce *et al.*, 1996 dalam Brown, 1996).

Pada dasarnya metode ini dilakukan untuk mencari hubungan antara cadangan karbon skala plot dengan data penginderaan jauh. Data cadangan karbon di atas tanah pada skala plot terdiri dari 4 komponen, yaitu: biomasa pohon, biomasa tumbuhan bawah, nekromasa dan biomasa serasah. Nilai *NDVI* menunjukkan tingkat kerapatan vegetasi berdasarkan tingkat kehijauan vegetasi. Tingkat kehijauan vegetasi dipengaruhi oleh daun sebagai komponen biomasa pohon dan biomasa tumbuhan bawah. Metode 2 ini

terbatas penggunaannya karena terdapat banyak penutupan awan pada citra satelit. Untuk daerah yang tertutup awan, nilai NDVI tidak dapat diperoleh.

Langkah kerja metode 2:

1. Ekstraksi nilai NDVI pada tiap lokasi plot pengukuran cadangan karbon.
2. Analisa regresi hubungan antara cadangan karbon skala plot dengan nilai NDVI.
3. Pendugaan cadangan karbon menggunakan persamaan regresi terpilih pada piksel citra yang bebas awan di DAS Sembakung dan Sebuku, Kabupaten Nunukan tahun 1996 dan 2003.

Hasil dan Pembahasan

Tutupan Lahan

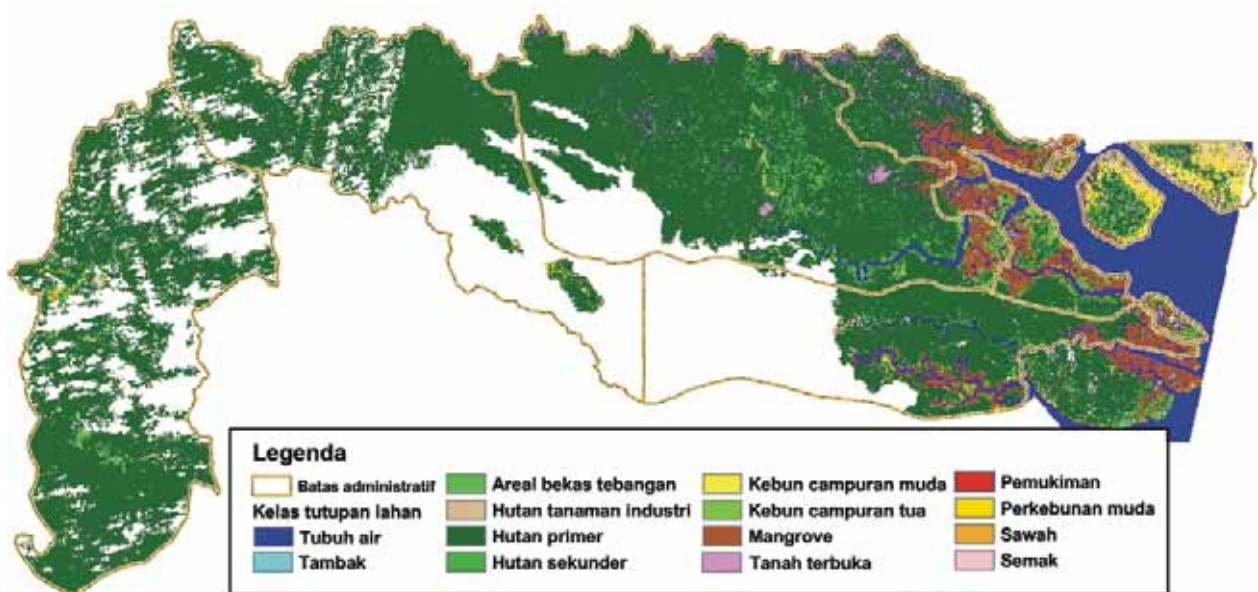
Tutupan Lahan Kabupaten Nunukan tahun 1996

Hasil klasifikasi citra Landsat *Thematic Mapper* (TM) tahun 1996/1997 (Gambar 4.7) menunjukkan bahwa tipe penutupan lahan yang paling dominan di Kabupaten Nunukan

pada saat itu adalah hutan. Kelas hutan primer dan sekunder mencakup areal seluas hampir 9000 km² atau lebih dari 55% total area Kabupaten Nunukan. Luasan areal hutan di atas selayaknya dianggap sebagai taksiran minimal, mengingat cukup luasnya tutupan awan pada citra satelit. Hutan mangrove yang berlokasi di dekat garis pantai Kecamatan Nunukan dan Sembakung, mencakup areal seluas lebih dari 5% dari total luasan areal studi. Areal yang dikategorikan sebagai *no data* akibat penutupan awan dan bayangan awan meliputi hampir 28% areal Nunukan di tahun 1997/1997 (Tabel 4.6).

Tutupan Lahan Kabupaten Nunukan tahun 2003

Hasil klasifikasi citra Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM) Kabupaten Nunukan tahun 2003 ditunjukkan dalam Gambar 4.8. Tutupan awan pada citra ini mencapai hampir 42% areal studi, lebih tinggi daripada tutupan awan di tahun 1996. Hutan primer dan sekunder masih merupakan tipe penutupan lahan yang dominan di Kabupaten Nunukan, walaupun luasannya mengalami penurunan dari tahun 1996 menjadi sekitar 44% dari total luasan Kabupaten Nunukan.

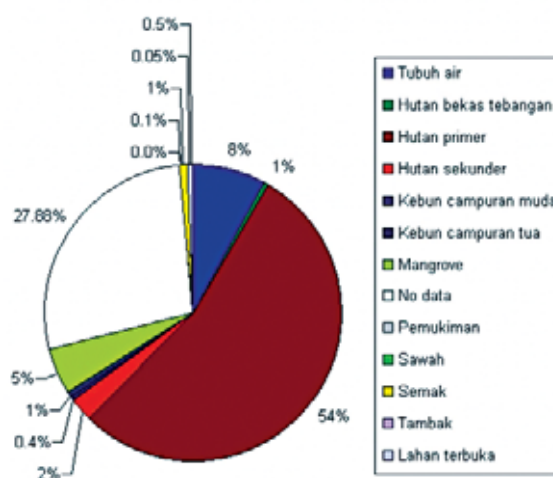


Gambar 4.7. Citra Landsat terklasifikasi Kabupaten Nunukan tahun 1996/1997

Tabel 4.6. Ikhtisar area penutupan lahan Kabupaten Nunukan tahun 1996/1997

Kelas Tutupan Lahan	Area (km ²)	%
Tubuh air	1263.68	7.9
Hutan bekas tebangan	107.35	0.7
Hutan primer	8566.97	53.7
Hutan sekunder	396.34	2.5
Kebun campuran muda	65.57	0.4
Kebun campuran tua	91.50	0.6
Mangrove	803.37	5.0
No data	4449.08	27.9
Pemukiman	1.20	0.01
Sawah	9.05	0.1
Semak	124.14	0.8
Tambak	7.58	0.0
Lahan terbuka	73.23	0.5
Total	15959.06	1

Tutupan Lahan Kab. Nunukan Thn. 1996

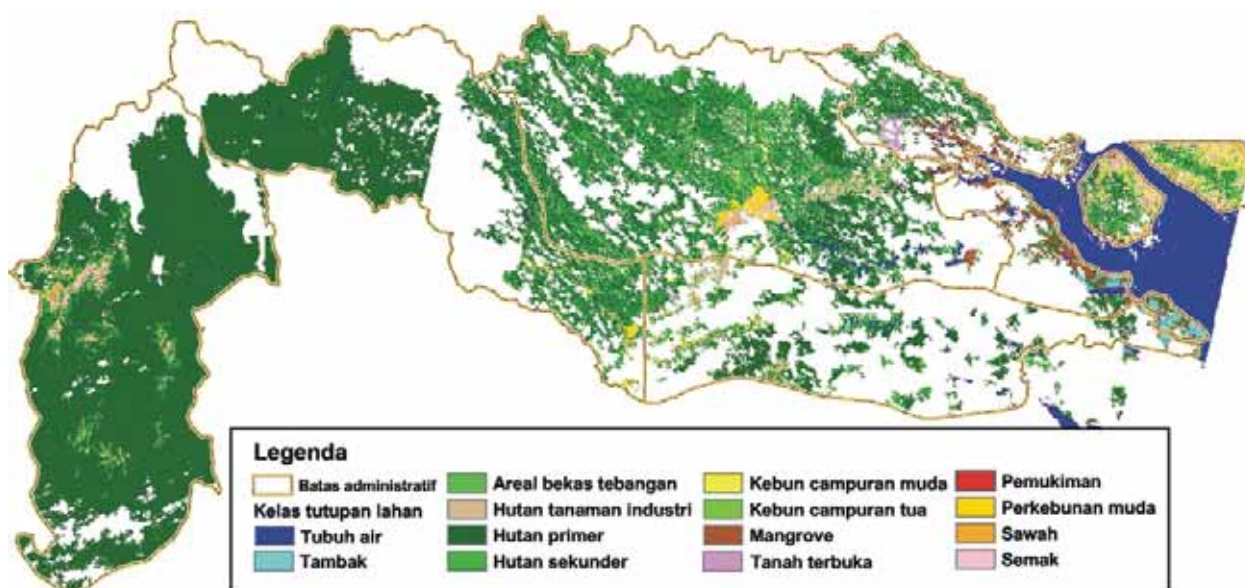


Tipe penutupan lahan semak meningkat menjadi 320 km² atau sekitar 2% dari total areal studi.

Pendugaan Tipe Penutupan Lahan Pada Areal Tertutup Awan

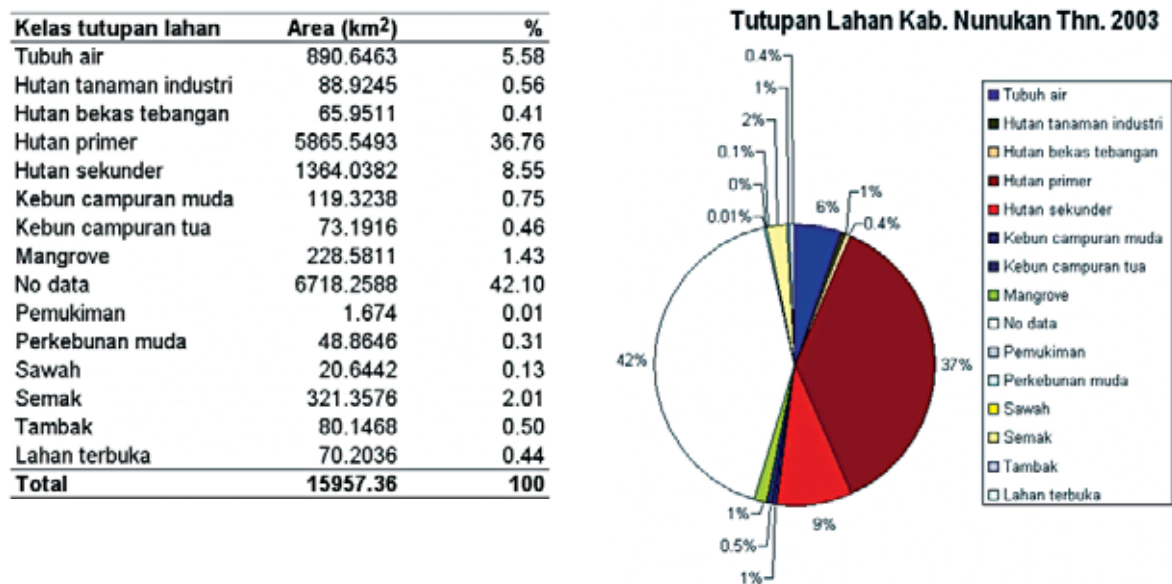
Pendugaan penutupan lahan pada areal tertutup awan dengan menggunakan informasi pendukung dari peta sistem lahan dan peta elevasi dilakukan pada wilayah DAS

Sembakung dan Sebuku yang mencakup areal seluas 1.1 juta hektar dari 1.6 juta hektar total area Kabupaten Nunukan. Hasil pendugaan penutupan lahan tahun 1996 dan 2003 ditunjukkan dalam Tabel 4.8. Areal hutan hasil pendugaan menunjukkan peningkatan yang signifikan dari 55,6% menjadi 84% untuk tutupan lahan di tahun 1996. Sedangkan untuk tutupan lahan di tahun 2003, areal hutan hasil pendugaan meningkat menjadi 64% dari luasan sebelumnya yang hanya 28.9%.



Gambar 4.8. Citra Landsat terklasifikasi Kabupaten Nunukan tahun 2003

Tabel 4.7. Ikhtisar area penutupan lahan Kabupaten Nunukan tahun 2003



Tabel 4.8A. Ikhtisar tutupan lahan Kabupaten Nunukan tahun 1996

Kelas tutupan lahan	Sebelum analisa tutupan awan		Setelah analisa tutupan awan	
	ha	%	ha	%
Tubuh air	25641.06	2.35	25886.41	2.38
Hutan bekas tebangar	8802.26	0.81	8904.11	0.82
Hutan primer	606337.99	55.65	915183.03	83.99
Hutan sekunder	29379.53	2.70	31521.27	2.89
Kebun campuran mud	6519.73	0.60	7085.34	0.65
Kebun campuran tua	8248.01	0.76	8978.87	0.82
Mangrove	70190.31	6.44	71532.09	6.56
Pemukiman	114.13	0.01	114.48	0.01
Semak	11202.54	1.03	12896.81	1.18
Tambak	184.97	0.02	185.49	0.02
Lahan terbuka	5977.22	0.55	6815.71	0.61
No data	317041.63	29.10	735.78	0.07
Total	1089639.40	100	1089639.40	100

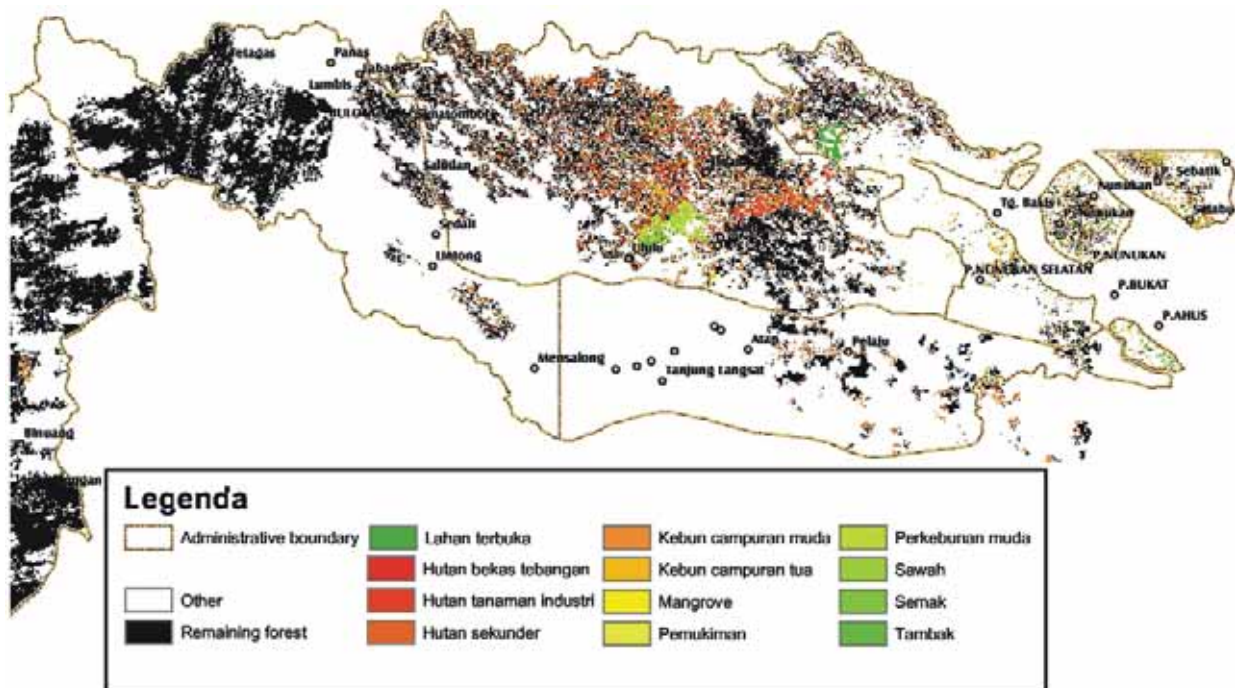
Table 4.8B. Penutupan lahan Kabupaten Nunukan tahun 2003 setelah penghilangan awan

Kelas tutupan lahan	Sebelum analisa tutupan		Setelah analisa tutupan	
	ha	%	ha	%
Tubuh air	9950.47	0.91	10322.32	0.95
Hutan bekas tebangan	8982.65	0.82	9244.66	0.85
Hutan tanaman industri	6323.42	0.58	21172.53	1.94
Hutan primer	314297.95	28.86	697695.81	64.07
Hutan sekunder	121823.99	11.19	184554.40	16.95
Kebun campuran muda	9936.01	0.91	13706.55	1.26
Kebun campuran tua	5239.42	0.48	5970.62	0.55
Mangrove	22339.35	2.05	67341.96	6.18
Pemukiman	155.10	0.01	323.71	0.03
Perkebunan muda	4954.62	0.46	9037.78	0.83
Sawah	942.36	0.09	2361.90	0.22
Semak	25999.39	2.39	34299.43	3.15
Tambak	7353.06	0.68	22115.31	2.03
Tanah terbuka	6410.43	0.59	8918.61	0.82
No data	544216.06	49.98	1858.68	0.17
Total	1088924.27	100.00	1088924.27	100

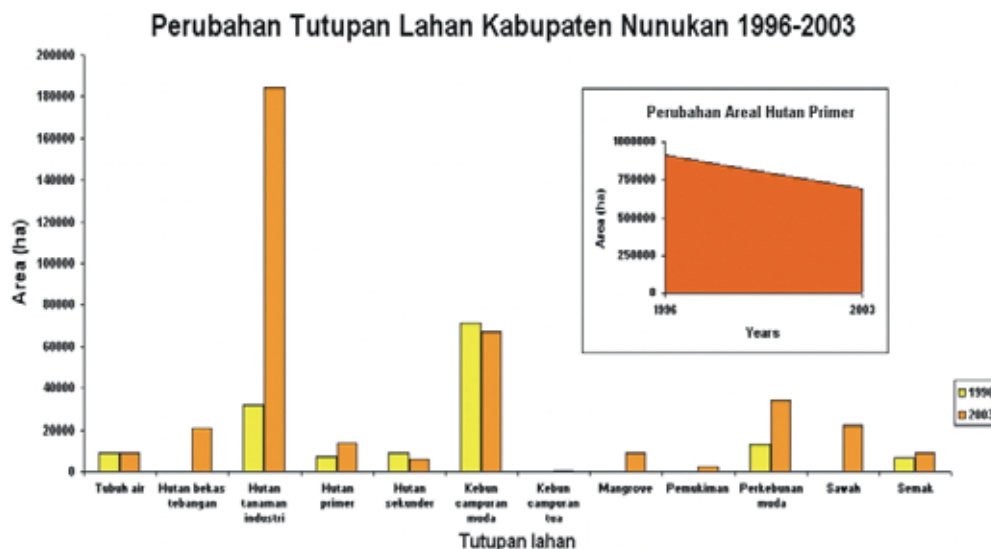
Perubahan Tutupan Lahan

Perubahan tutupan lahan pada DAS Sembakung dan Sebuku di Kabupaten Nunukan pada periode 1996-2003 mengindikasikan adanya aktivitas konversi hutan. Luasan hutan primer berkurang dari 915,18 ha di tahun 1996 menjadi 697,7 ha di tahun 2003. Dengan kata lain, areal hutan berkurang sekitar 24% dalam waktu 7 tahun, dengan tingkat konversi hutan sekitar 3,85%

per tahun. Peta perubahan tutupan hutan (Gambar 4.9) menunjukkan bahwa sebagian besar areal hutan yang hilang berlokasi dekat dengan aliran sungai utama. Luasan hutan mangrove lebih stabil dibandingkan luas kawasan hutan, dengan tutupan seluas 6% sepanjang garis pantai Sebuku dan Sembakung. Tipe penutupan lahan yang menggantikan hutan primer pada umumnya adalah kelas hutan sekunder, sejumlah kecil hutan tanaman industri dan tambak.



Gambar 4.9. Peta perubahan tutupan hutan Sembuku dan Sembakung, Kabupaten Nunukan



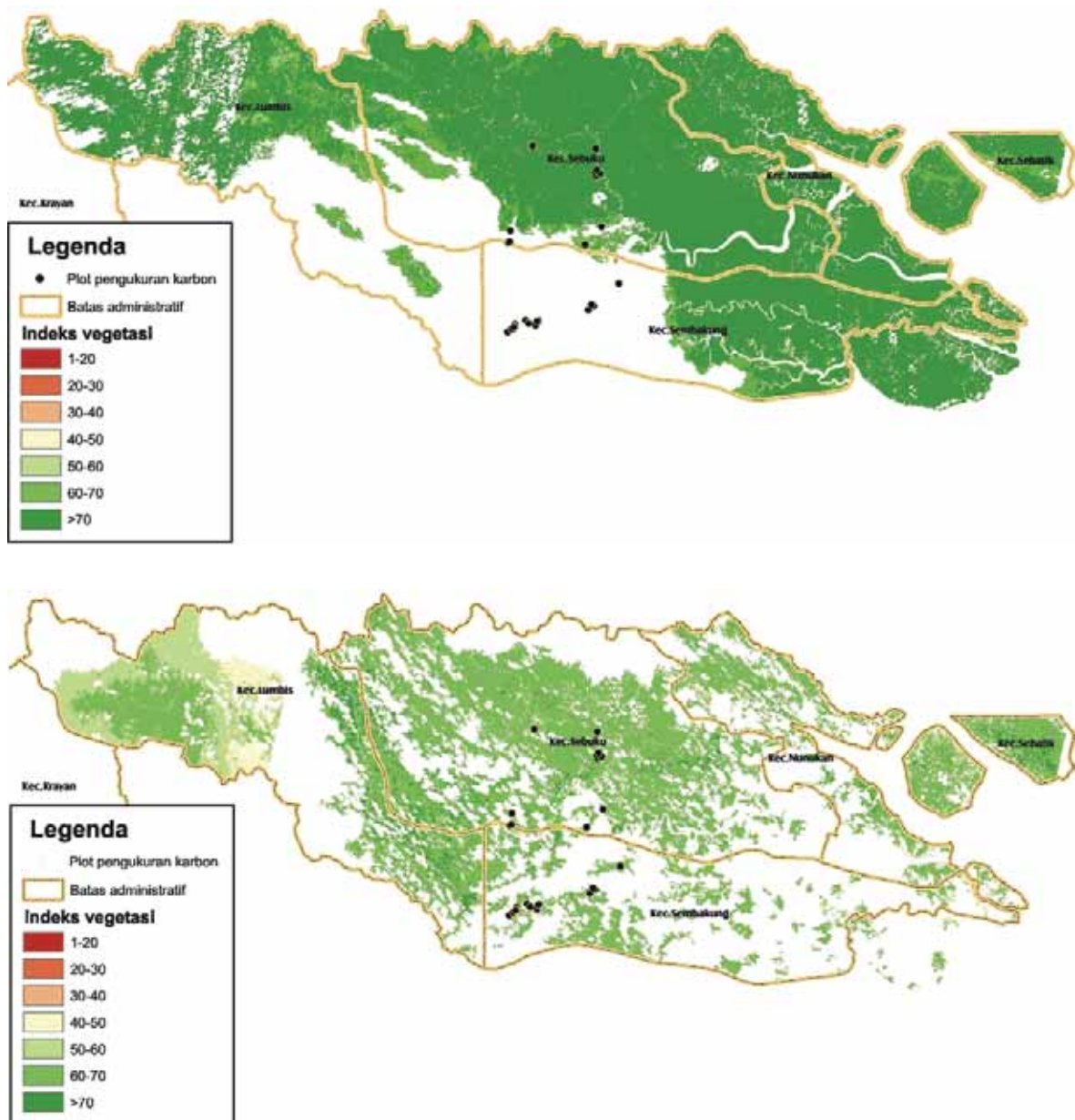
Gambar 4.10. Ikhtisar perubahan tutupan lahan Sembakung dan Sebuku, Kabupaten Nunukan

Kerapatan Vegetasi

Proses penghitungan *Normalized Difference Vegetation index (NDVI)* menghasilkan dua peta NDVI Kabupaten Nunukan (Gambar 4.11), masing-masing untuk tahun 1996 dan 2003. Nilai NDVI yang dihasilkan, bervariasi antara 50 sampai 99, hanya sejumlah kecil piksel yang bernilai dibawah 50 (non vegetasi).

Perbedaan area tutupan awan pada tahun 1996 dan 2003 menimbulkan kesulitan untuk dapat membandingkan distribusi kerapatan vegetasi secara tepat, walaupun dapat diketahui bahwa sebagian besar area Sebuk dengan kisaran NDVI 70-99 di tahun 1996 berubah menjadi kisaran 60-70 di tahun 2003.

Citra satelit yang digunakan dalam studi ini (citra bagian barat dan citra bagian timur)



Gambar 4.11. Kerapatan vegetasi (NDVI) di Sebuk dan Sembakung, Kabupaten Nunukan di tahun 1996 (atas) dan 2003 (bawah) dipadu dengan distribusi plot pengukuran cadangan karbon.

direkam dalam dua musim yang berbeda dan tidak dilakukan kalibrasi terhadap faktor-faktor atmosfer dan musim. Oleh karena itu, maka nilai NDVI yang dihasilkan ikut terpengaruh oleh faktor-faktor tersebut. Perbedaan musim pada waktu perekaman menimbulkan penyimpangan dalam penghitungan nilai NDVI. Penyimpangan ini terjadi bukan akibat adanya perubahan tutupan lahan, melainkan lebih diakibatkan oleh perbedaan kandungan air pada vegetasi. Faktor lain yang menyebabkan penyimpangan nilai NDVI adalah kabut, yang mengakibatkan nilai NDVI menjadi lebih rendah dari keadaan sebenarnya. Kasus semacam ini dapat dilihat dengan jelas pada bagian barat Lumbis dimana nilai NDVI yang dihasilkan berkisar antara 40-50, walaupun tipe penutupan lahan pada areal tersebut adalah hutan.

Pendugaan Cadangan Karbon Pada Skala Lanskap

Pendugaan Cadangan Karbon Berdasarkan Tutupan Lahan

Peta cadangan karbon (Gambar 4.12) dihasilkan dari perpaduan kelas penutupan lahan dan nilai kerapatan karbon pada kelas tutupan lahan terkait (Tabel 4.5). Peta ini mengindikasikan penurunan cadangan karbon yang cukup substansial pada periode 1996-2003 di Kabupaten Nunukan, terutama pada daerah aliran sungai di bagian tengah Kecamatan Sebuku.

Neraca karbon total diperkirakan berdasarkan tutupan lahan dari total areal pada masing-masing tipe penutupan lahan, termasuk luasan lahan yang diduga dari areal tutupan awan. Pada DAS Sebuku dan Sembakung, Kabupaten Nunukan, total cadangan karbon mendekati 228 Tg¹ di tahun 1996 dan 189 Tg di tahun 2003, hal ini berarti telah terjadi penurunan cadangan karbon sebesar 17% dalam waktu 7 tahun. Rata-rata cadangan karbon menurun dari 211 Mg ha⁻¹

menjadi 175 Mg ha⁻¹, hal ini sebagian besar terjadi akibat adanya 217.000 ha hutan primer yang dikonversi menjadi tipe penggunaan lahan lain. Dalam hal ini, penurunan cadangan karbon (17%) lebih rendah daripada penurunan luasan hutan primer (24%).

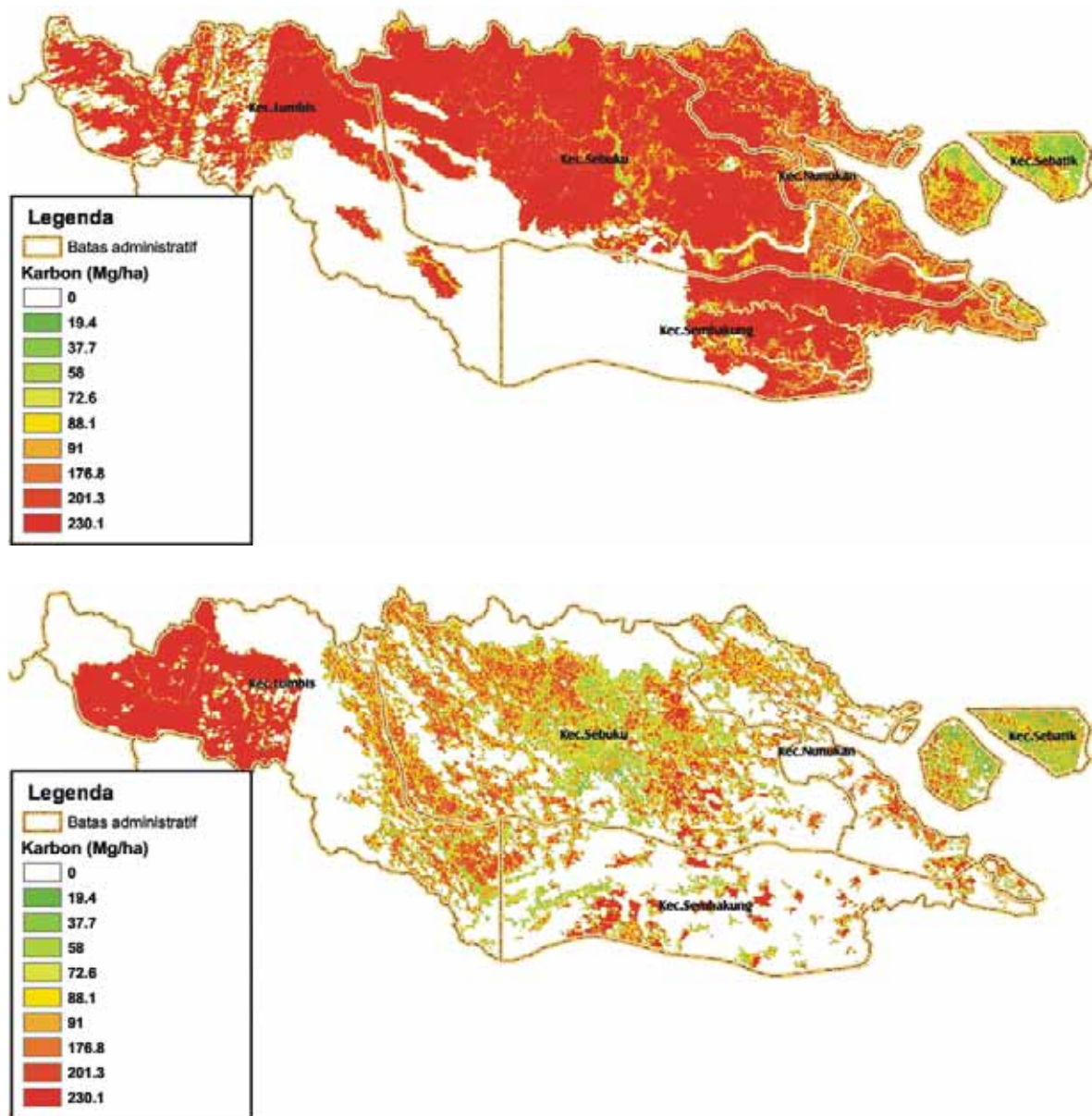
Distribusi geografis konversi hutan dan akibatnya terhadap penurunan cadangan karbon sangat sulit diungkapkan secara akurat akibat luasnya tutupan awan pada citra satelit. Secara umum, dapat dikatakan bahwa Kecamatan Sebuku telah mengalami penurunan luasan hutan secara substansial menjadi jakaw, areal bekas tebangan, dan perkebunan muda. Sebaliknya, areal pantai Kecamatan Nunukan dapat dikatakan stabil dengan keberadaan hutan mangrove, walaupun di bagian utara terjadi degradasi dan alih guna hutan. Perubahan ini memberikan kontribusi besar terhadap penurunan cadangan karbon di Kecamatan Nunukan.

Pendugaan Cadangan Karbon Berdasarkan Kerapatan Vegetasi

Kerapatan karbon dari plot pengukuran

Hanya informasi dari 26 plot pengukuran cadangan karbon (apendiks 1) yang dapat digunakan dalam membangun hubungan regresi antara NDVI dengan nilai cadangan karbon di atas tanah (*aboveground Carbon stock*). Plot-plot pengukuran tersebut berlokasi di daerah bebas awan citra Landsat Kabupaten Nunukan. Tipe guna lahan dengan nilai NDVI tertinggi adalah plot yang diukur pada area *agroforestri* dan *jakaw* yang diberakan selama lebih dari 6 tahun (NDVI ≥ 69). Nilai tersebut sesuai dengan harapan, mengingat rapatnya tutupan kanopi dari tegakan muda di plot tersebut. Areal bekas tebangan juga memiliki nilai NDVI yang cukup tinggi (67-69). Sedangkan, plot di tipe guna lahan *jakaw* dengan periode bera yang singkat menunjukkan rentang NDVI yang cukup lebar (45-67). Sayangnya, seluruh plot yang berlokasi di hutan ternyata berada pada daerah

¹ Tg = 10¹² g

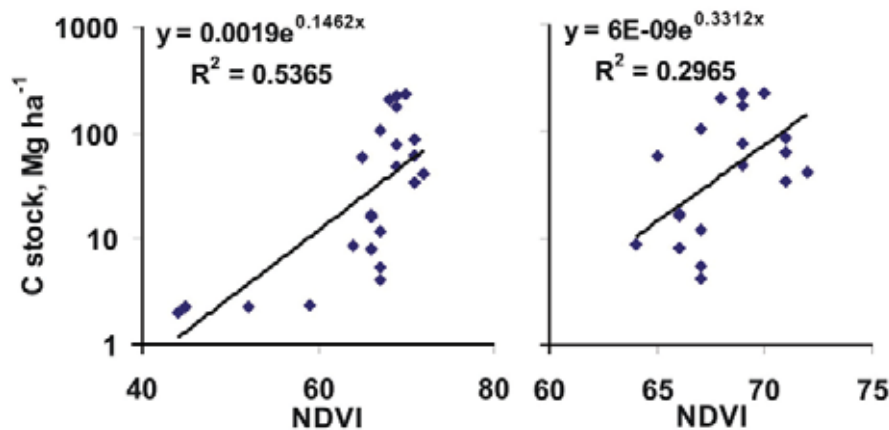


Gambar 4.12. Distribusi kerapatan karbon berdasarkan tipe penutupan lahan di cekungan Sembakung dan Sebuku, Kabupaten Nunukan, pada tahun 1996/7 (atas) dan 2003 (bawah)

tutupan awan citra satelit, sehingga nilai NDVI dari plot tersebut tidak dapat dihasilkan. Relasi antara nilai kerapatan karbon dari pengukuran plot dengan nilai NDVI ditunjukkan oleh Gambar 4.13.

Relasi antara nilai NDVI dan cadangan karbon, secara khusus dapat dikatakan berbentuk kurva lengkung (*curvilinear*). Dengan memperhatikan hal tersebut, diperlukan proses transformasi logaritmik terhadap nilai

cadangan karbon, sehingga didapatkan kesesuaian dengan asumsi analisa regresi standar untuk keragaman mutlak (*uniform variability*). Walaupun kerapatan karbon terus meningkat seiring dengan pertumbuhan biomasa kayu dan riap tegakan, nilai NDVI menunjukkan saturasi pada nilai 70 dimana index area daun (*leaf area index*) mencapai optimum. Secara keseluruhan, hanya 54% variasi nilai logaritmik kerapatan karbon yang dapat diwakili oleh nilai NDVI. Perlunya relasi



Gambar 4.13. Relasi antara NDVI dan cadangan karbon di atas tanah (pada skala logaritmik); relasi untuk seluruh data (kiri) dan relasi pada rentang NDVI yang lebih besar dari 60

yang dibangun secara bertahap, sebagaimana diindikasikan oleh data, dilakukan dengan memisahkan nilai NDVI yang >60 . Pemisahan ini memperbaiki keseragaman terhadap keragaman data, walau pun disisi lain, mengurangi kemungkinan terwakilinya seluruh tingkat keragaman. Berdasarkan hal-hal tersebut di atas, persamaan regresi yang akan digunakan untuk perhitungan selanjutnya adalah:

$$\text{Densitas karbon [Mg ha}^{-1}\text{]} = 0.0019 * e^{0.1462 * \text{NDVI}}$$

Penggunaan persamaan eksponensial dan transformasi logaritmik dalam membangun relasi terhadap cadangan karbon terukur, memunculkan prediksi bahwa untuk pendugaan cadangan karbon akan menghasilkan rata-rata nilai taksiran yang terlalu rendah (*underestimation*). Pada kenyataannya, perbandingan rata-rata nilai dugaan terhadap nilai sebenarnya pada plot pengukuran menghasilkan 52,8% nilai kesesuaian (59,7% jika digunakan pemisahan terhadap nilai NDVI >60). Penggunaan persamaan tersebut dalam menduga cadangan karbon pada skala lanskap akan menghasilkan nilai taksiran yang terlalu rendah. Meskipun, regresi yang diperoleh berasal dari nilai NDVI tahun 2003, namun digunakan juga dalam menduga cadangan karbon tahun 1996, dengan mengabaikan perbedaan nilai NDVI yang mungkin terjadi akibat perbedaan musim

dan keberadaan kabut pada citra satelit (Gambar 4.14)

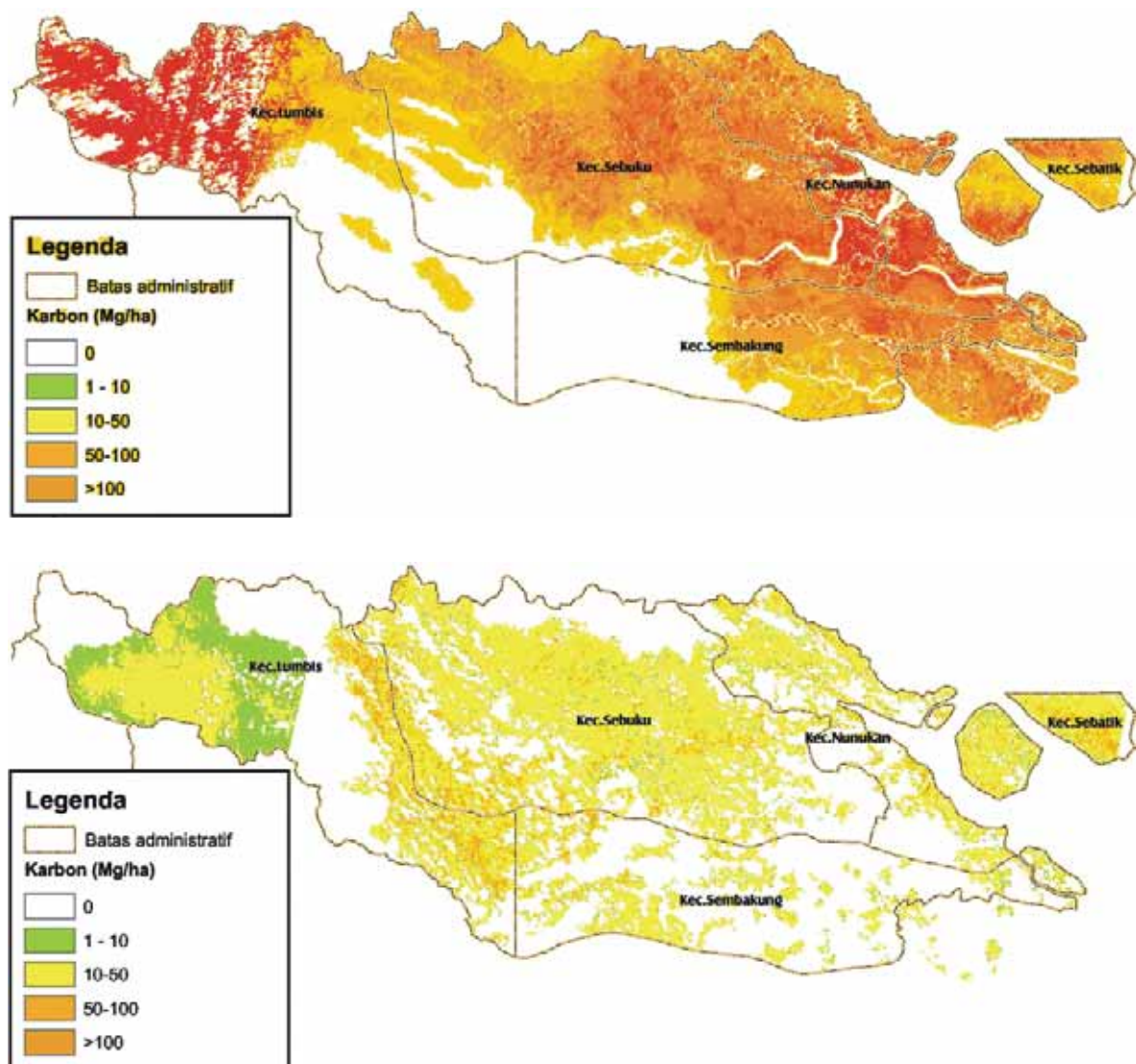
Perbandingan secara langsung dengan pendekatan pertama hanya mungkin dilakukan pada area bebas awan, seluas 738.000 ha pada tahun 1996 dan 512.000 ha di tahun 2003. Pada area tersebut, pendugaan cadangan karbon berdasarkan nilai NDVI menunjukkan penurunan yang dramatis dari tahun 1996 ke tahun 2003. Pada tahun 1996, rata-rata nilai dugaan kerapatan karbon adalah 221 Mg ha⁻¹, sedangkan pada tahun 2003 nilai cadangan karbon berkurang menjadi hanya 27 Mg ha⁻¹ (Tabel 4.9).

Tabel 4.9. Perbandingan cadangan karbon Kabupaten Nunukan tahun 1996 dan 2003 berdasarkan dua pendekatan yang berbeda

Tahun	Rata-rata kerapatan karbon berdasarkan tutupan lahan [Mg ha ⁻¹]	Rata-rata kerapatan karbon berdasarkan NDVI [Mg ha ⁻¹]
1996	210	222
2003	166	27

Perbandingan nilai dugaan cadangan karbon berdasarkan peta tutupan lahan dan peta kerapatan vegetasi

Untuk tahun 1996, rata-rata nilai kerapatan karbon pada area bebas awan menunjukkan



Gambar 4.14. Peta dugaan kerapatan karbon berdasarkan nilai NDVI untuk DAS Sembakung dan Sebuku, Kabupaten Nunukan pada tahun 1996 (atas) dan 2003 (bawah).

perbedaan yang kecil antara dua pendekatan yang digunakan. Sedangkan untuk tahun 2003, ditemukan perbedaan yang cukup besar antara nilai dugaan karbon dari dua pendekatan tersebut. Beberapa faktor yang menimbulkan perbedaan ini adalah:

- Pendugaan cadangan karbon berdasarkan nilai NDVI menunjukkan hasil yang secara umum merupakan taksiran yang terlalu rendah. Hal ini terjadi akibat lemahnya korelasi antara NDVI dan nilai kerapatan karbon terukur. Selain itu, juga diakibatkan oleh tingginya keragaman nilai cadangan

karbon pada nilai NDVI >70, dimana pada rentang tersebut, cadangan karbon bervariasi antara 50 to 250 Mg ha⁻¹. Tidak linearnya hubungan regresi antara NDVI dan cadangan karbon akhirnya menimbulkan bias dalam nilai dugaan karbon sebagaimana dijelaskan di atas.

- Pendugaan karbon berdasarkan tipe tutupan lahan membutuhkan proses analisa akurasi peta tutupan lahan dengan menggunakan data hasil pengecekan lapangan (dengan titik contoh yang belum dipergunakan dalam membangun kunci

interpretasi). Verifikasi hasil pendugaan cadangan karbon, dapat dilakukan dengan menggunakan pengukuran lapangan yang independen.

Nilai NDVI dari citra satelit tahun 1996 secara keseluruhan lebih tinggi daripada nilai NDVI tahun 2003 akibat adanya perbedaan musim (kandungan air pada tumbuhan) dan kualitas citra secara keseluruhan (keberadaan kabut), hal ini dapat dilihat secara jelas pada areal hutan yang tidak berubah baik di tahun 1996 ataupun 2003. Disamping itu, analisa regresi dihasilkan hanya dengan menggunakan nilai NDVI di tahun 2003 dan pada kenyataannya sejumlah besar piksel di tahun 1996 memiliki nilai NDVI di luar rentang nilai NDVI tahun 2003. Hal ini mengakibatkan proses ekstrapolasi nilai cadangan karbon di tahun 1996 dilakukan dengan dasar hubungan regresi yang lemah. Kesamaan hasil di tahun 1996, mungkin terjadi hanya karena kebetulan akibat dua tipe kesalahan yang saling bertentangan dan bukan karena hubungan yang kuat antara dua pendekatan yang digunakan.

Kesimpulan

Kesimpulan dari studi ini adalah sebagai berikut:

1. Telah terjadi perubahan tutupan lahan yang substansial di Kabupaten Nunukan antara tahun 1996-2003, dimana diperkirakan 3,85% areal hutan primer dikonversi menjadi tipe penggunaan lahan lain setiap tahunnya.
2. Peta kerapatan vegetasi berdasarkan Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) menunjukkan perubahan lahan yang bahkan lebih dramatis. Akan tetapi berbagai kesulitan teknis menyangkut metode yang digunakan (perbedaan musim dan adanya kabut pada citra satelit) kemungkinan merupakan faktor penting yang menyebabkan terjadinya perbedaan ini.
3. Pendugaan cadangan karbon berdasarkan nilai NDVI pada tingkat piksel dan hubungan regresi terhadap cadangan karbon, secara esensial berbeda dengan hasil yang didapatkan melalui ekstrapolasi cadangan karbon secara spasial berdasarkan tipe penutupan lahan.
4. Dengan menggunakan koreksi terhadap areal tutupan awan, rata-rata kerapatan cadangan karbon di DAS Sembakung dan Sebuku (Kabupaten Nunukan tanpa Kecamatan Krayan) menurun antara tahun 1996-2003 dari 211 menjadi 175 Mg ha⁻¹. Hal ini terjadi akibat konversi 217.000 (24%) ha hutan primer menjadi tipe penggunaan lahan lainnya. Hilangnya cadangan karbon (17%) lebih kecil daripada penurunan areal hutan primer (24%), hal ini dikarenakan tipe penggunaan lahan pengganti masih menyimpan sebagian cadangan karbon dari hutan primer.
5. Sumber kesalahan dari pendugaan cadangan karbon berdasarkan tipe tutupan lahan adalah lemahnya definisi (termasuk di dalamnya keragaman internal) 'hutan sekunder' dalam tahapan klasifikasi tutupan lahan, ditambah lagi adanya kemungkinan terjadinya perubahan cadangan karbon di dalam tipe penutupan lahan tertentu (terutama dalam kategori areal bekas tebangan dan agroforestri) yang berhubungan dengan intensitas penggunaan lahan pada masing-masing kategori.
6. Walaupun pendugaan cadangan karbon secara langsung melalui data penginderaan jauh memiliki keunggulan teoritis dibandingkan pendugaan berbasis tipe tutupan lahan, namun perbedaan sifat dasar antara nilai indeks berbasis area tutupan daun seperti NDVI dan nilai cadangan karbon yang lebih berbasis pada kayu, membuat metode ini sangat rentan untuk diaplikasikan secara praktis dan menjadi sumber bias yang membutuhkan analisa statistik lebih jauh untuk dapat diperbaiki.