

**PENYIMPANAN KARBON DALAM EKOSISTIM HUTAN
SEBAGAI DASAR PERHITUNGAN KARBON BUMI
(*Carbon Storage in Forest Ecosystem as a Basis for Terrestrial
Carbon Accounting*)**

Oleh/By:

Parlindungan Tambunan*

*Pusat Penelitian dan Pengembangan Hutan Tanaman.

Jl. Gunung Batu No. 5 Bogor 16610, Jawa Barat, Telp. 0251-631238 Fax. (0251) 7520005

E-mail: ptambunan_2009@yahoo.com

Diterima tgl : 6 Oktober 2009 Disahkan tgl : 2 November 2009

ABSTRACT

Carbon storage is one of the option that can be used to reduce atmospheric carbon, but its use in an offset markets is complicated by the temporary nature of stored carbon and risks associated with the price of carbon emission. Forestry sector has the ability to reduce concentration of greenhouse gases in the atmosphere by reducing activities, such as: afforestation, mine land reclamation, forest restoration, agroforestry, forest management including selected short-rotation species, forest protection, wood production, and urban forest. To be eligible for registration, the reported carbon reductions must to use methods and meet standards as a guideline. The present forestry has some unique challenges and opportunities because of the diversity of resources and activities, the variety of practices that can affect greenhouse gases, year to year variability in carbon emission and storage, the effect of activities on different forest carbon pools, and accounting for the effects of natural disturbance. Indicators to account and to control carbon balance that based on carbon storage in forest ecosystem are used as a basis for terrestrial carbon accounting, such as atmosphere (top-down) and land (bottom-up) that is comprehensive and interrelated.

Keywords: Carbon, storage, accounting, atmosphere, forest, and balance.

ABSTRAK

Penyimpanan karbon adalah salah satu pilihan yang dapat digunakan untuk mengurangi karbon di atmosfer, tetapi penggunaannya dalam mengimbangi sebuah pasar disulitkan oleh penyimpanan karbon alami yang sementara dan resiko digabung dengan harga emisi karbon. Sektor kehutanan mempunyai kemampuan untuk mengurangi konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer yaitu dengan mengurangi aktivitas-aktivitas, seperti: afforestasi, reklamasi lahan pertambangan, perbaikan hutan, agroforestri, manajemen hutan termasuk memilih jenis yang rotasi pendek, perlindungan hutan, produksi kayu, dan hutan kota. Untuk memenuhi syarat pendaftaran, laporan pengurangan karbon harus menggunakan cara dan menemukan standar sebagai sebuah pedoman. Sekarang kehutanan mempunyai tantangan dan peluang yang khas disebabkan oleh keanekaragaman sumber daya dan aktivitas, keanekaragaman praktek yang dapat mempengaruhi gas rumah kaca, tahun ke tahun berubah dalam emisi dan penyimpanan carbon, pengaruh aktivitas pada sekumpulan karbon hutan berbeda, dan perhitungan pengaruh-pengaruh gangguan alam. Untuk membuat data dasar kredibel dan perubahan-perubahan jalan dalam penyimpanan karbon perlu mengetahui indikator-indikator untuk menghitung dan mengontrol keseimbangan karbon. Indikator-indikator perhitungan karbon yang berdasarkan penyimpanan karbon dalam ekosistem

hutan digunakan sebagai dasar untuk perhitungan karbon bumi, yaitu atmosfer (*top-down*) dan lahan (*bottom-up*) yang menyeluruh dan terpadu.

Kata kunci: Karbon, penyimpanan, perhitungan, atmosfer, hutan, dan keseimbangan.

I. PENDAHULUAN

Pemanasan global (*global warming*) akhir-akhir ini sangat hangat dibicarakan dan menjadi fokus perhatian dunia, hingga timbul pasar karbon (*carbon market*) internasional. Keikutsertaan dalam pasar perdagangan karbon memberi dampak khususnya terhadap kehutanan, yakni perubahan penggunaan lahan hutan menjadi hutan (*afforestation*) dan konversi lahan hutan menjadi lahan bukan hutan (*deforestation*). Ini tantangan dan peranan sektor kehutanan dalam menjaga keseimbangan karbon di bumi. Oleh sebab itu, selama peranan hutan sebagai penyerap karbon dan sumber energi dapat stabil, potensi manajemen hutan memberi kontribusi sangat substansial terhadap penyimpanan carbon (*carbon storage*). Sebagai contoh kurangnya keahlian dalam perencanaan dan teknik penebangan atau dengan manajemen konvensional dapat menyebabkan 50% kerusakan hutan, namun dengan perkembangan kemajuan manajemen atau manajemen profesional selama 30 tahun emisi karbon hutan dapat turun atau produksi kayu naik sekitar 0.16 Gt karbon per tahun (Tambunan *et. al.*, 2008).

Selain itu, hutan menyimpan karbon 50% dari total karbon yang terdapat di permukaan bumi (Houghton, 2001). Dari data tersebut membuktikan bahwa hutan mempunyai peranan kunci dalam siklus karbon secara global. Dengan demikian, keseimbangan karbon permukaan bumi harus dijaga dengan mengontrol aktivitas semua sektor yang mengubah kondisi lingkungan global.

Salah satu cara untuk mengetahui perubahan keseimbangan karbon dipermukaan bumi adalah dengan menghitung jumlah karbon dalam ekosistem. Jumlah karbon yang tersimpan dalam ekosistem dikelompokkan dalam 3 (tiga) bagian, yakni atmosfer, makhluk hidup, dan tanah. Produktivitas karbon dari ketiga kelompok tersebut dipengaruhi oleh ekofisiologi dan kondisi lingkungan. Oleh sebab itu, setiap tipe ekosistem misalnya hutan, padang rumput, laut dan sebagainya mempunyai karakteristik pola penyimpanan karbon yang beragam dan berbeda-beda secara dramatis pada skala lokal dan regional. Kemudian dinamika perubahan jumlah karbon dalam setiap ekosistem dipengaruhi oleh jumlah dan jenis tumbuhan dan hewan yang pertumbuhan dan kelestariannya dikontrol oleh kondisi-kondisi lingkungan, misalnya sinar matahari, temperatur dan sebagainya (Ogle *et. al.*, 2003).

Dengan demikian, untuk membuktikan dan memperoleh nilai riil dasar keseimbangan karbon, maka program perdagangan karbon perlu indikator perhitungan objektif sistem laporan yang membangun kepercayaan dan keakuratan dokumen penyimpanan karbon (Lovet *et. al.*, 2007). Kemudian, perlu evaluasi kebijakan dan insentif pasar pengembangan produksi yang akan menunjukkan peningkatan reduksi karbon bersih atmosfer. Matriks indikator penyimpanan karbon dibangun melalui multi sektor dengan desain yang terpadu dari multi tipe dan multi efek ekosistem. Berdasarkan pertimbangan tersebut, maka dalam tulisan ini diuraikan gambaran ringkas indikator

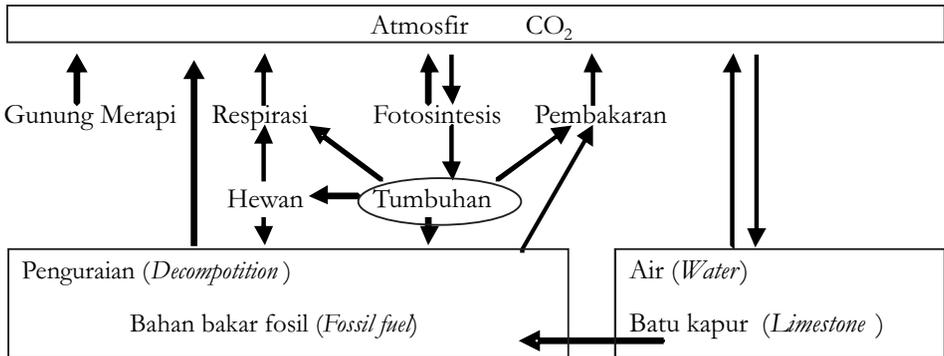
penyimpanan karbon yang digunakan sebagai dasar perhitungan karbon bumi (*terrestrial carbon accounting*).

II. DASAR PERTIMBANGAN PEMILIHAN EKOSISTEM HUTAN

Apabila kita melihat dari udara daerah pedalaman dengan pesawat udara, bentuk seperti pita-pita potongan warna biru adalah danau dan sungai, hijau tua adalah hutan, coklat adalah ladang atau pertanian, dan lain-lain ciri suatu kondisi lapangan. Ini merupakan manifestasi kasar yang menunjukkan sangat lengkap jaringan interaksi ekologi, bermacam-macam spesies berinteraksi antara satu dengan lainnya, dan dengan lingkungannya. Walaupun keadaannya sangat kompleks, namun semuanya tidak kacau balau. Ini adalah pola-pola yang nyata terlihat dari bumi. Berdasarkan pola-pola interaksi ini (disebut ekosistem) kapasitas keanekaragaman biologi (*biodiversity*) untuk berkembang harus diperelihara keseimbangannya.

Maka yang perlu harus diperhatikan misalnya apabila salah satu komponen ekosistem hilang dan yang lain baru, ini menandakan jaringan interaksi ekologi tidak benar-benar putus. Seperti hutan yang berbatasan dengan danau ekosistemnya berbeda dengan yang tidak berbatasan, karena kumpulan organisme berinteraksi secara langsung terhambat oleh danau. Namun kadang-kadang sangat sulit menentukan di mana satu ekosistem berakhir dan dimulai, karena perbedaan dan kesamaan antara ekosistem banyak. Walaupun sulit membedakannya, pengakuan dan pengklasifikasian ekosistem adalah pola interaksi ekologi. Menurut Clark *et. al.* (1999), ekosistem dapat didefinisikan secara sederhana adalah interaksi ekologi yang mempunyai nilai-nilai spesifik, dan nilai spesifik tersebut tidak mempunyai standar, namun dapat merupakan karakteristik tipe ekosistem. Misalnya hutan rawa mempunyai kunci peranan yang spesifik dalam produksi nutrisi dan organik. Maka dari perspektif karakteristik tipe ini tingkat keanekaragaman gen dan spesies merupakan nilai suatu ekosistem.

Mekanisme stabilitas bertambahnya tingkat keanekaragaman ekosistem adalah: (1) jika dalam ekosistem jumlah spesies banyak; (2) mengurangi spesies baru (*exotic species*) karena dapat mengganggu struktur dan fungsi ekosistem; (3) memperbanyak spesies dan memberi jarak antar spesies dan dengan spesies yang sama untuk mencegah transfer hama dan penyakit antara individu-individu. Salah satu studi yang membuktikan hubungan antara keanekaragaman dan pengujian stabilitas telah dilakukan oleh Tilman dan Downing (1994) yang membandingkan jumlah spesies tumbuhan dalam plot. Plot yang didalamnya jumlah spesies banyak tumbuh lebih baik dan lebih banyak yang toleran terhadap kekeringan dibandingkan dengan plot yang sedikit jumlah spesiesnya. Ini merupakan salah satu gambaran bahwa keanekaragaman spesies termasuk genetik di dalam ekosistem dapat menstabilkan kondisi perubahan karbon. Produksi karbon pada setiap individu spesies jumlahnya beragam, dan merupakan satu kesatuan dengan kemampuan adaptasi lingkungan. Dengan demikian keseimbangan karbon adalah keterpaduan kombinasi mekanisme regulasi endogenus (*contohnya* aktivitas enzim), pengaruh eksternal lingkungan (*contohnya* kondisi iklim), dan interaksi sekumpulan spesies (*contohnya* kompetisi), sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi siklus keseimbangan karbon pada ekosistem hutan.

Figure 1. Illustration of carbon balance cycle in forest ecosystem.

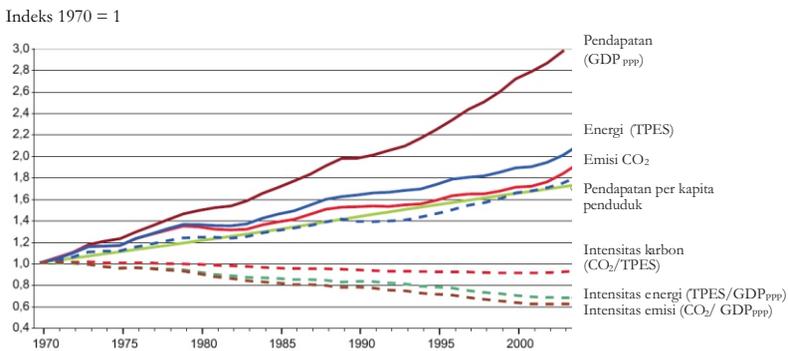
Dari Gambar 1, dapat dilihat perubahan-perubahan yang terjadi dalam lingkungan global seperti pemanasan regional (*regional warming*), endapan nutrisi (*nutrient deposition*), dan kenaikan konsentrasi CO₂ mengubah produksi bersih ekosistem (*net ecosystem production, NEP*), serta mempengaruhi fotosintesis dan respirasi. Fotosintesis memberi reaksi yang sangat kuat pada konsentrasi CO₂ atmosfer daripada respirasi. Fotosintesis bersih di biosfer bumi bisa bertambah dari respon penambahan CO₂ atmosfer yang disebabkan oleh pembakaran bahan bakar dan gabungan panas dari biomassa dengan perubahan penggunaan lahan. Dengan demikian, kapasitas tumbuhan sangat kuat memberi respon pada penambahan CO₂. Dari dasar pertimbangan tersebut maka penyimpanan karbon dalam ekosistem hutan digunakan sebagai dasar perhitungan karbon permukaan bumi.

III. INDIKATOR RANCANGAN PERHITUNGAN KARBON DALAM EKOSISTEM HUTAN

Penyimpanan karbon bumi (*terrestrial carbon storage*) adalah melalui proses penyerapan CO₂ dari atmosfer oleh tumbuh-tumbuhan melalui fotosintesis, dan disimpan sebagai karbon dalam biomassa (batang, cabang, daun, akar) dan tanah. Istilah penyerapan (*sink*) dipakai untuk hutan, lahan pertanian, lahan penggembalaan, padang rumput dan lahan semak/belukar sebagai penyimpan karbon. Kemudian karbon yang tersimpan tersebut diemisikan kembali melalui aktivitas manusia, misalnya pemanenan hasil hutan dan pertanian, pembakaran lahan, dan lain-lain. Menurut laporan IPCC (2000), setiap tahun sekitar 20% dari global emisi CO₂ berasal dari aktivitas di sektor kehutanan. Oleh sebab itu perubahan-perubahan karbon bumi sangat mempengaruhi perubahan keseimbangan di atmosfer, dan perlu dikontrol dan dihitung setiap saat. Ada dua rancangan tipe perhitungan karbon sebagai indikator umum, yaitu:

1. Atmosfir (*top-down*)

Metode ini melihat perubahan-perubahan konsentrasi CO₂ Pada waktu praindustri atau antara 1970 dan 2004, penambahan emisi gas rumah kaca (*greenhouse gas*, GHG) yang disebabkan oleh aktivitas manusia sebesar 70%, misalnya untuk CO₂ bertambah dari 28.7 sampai 49 Gigaton. Besarnya pertambahan emisi GHG berasal dari sektor penyuplai energi, yaitu transportasi, industri, penggunaan dan perubahan lahan (*land use and change*), pertanian dan kehutanan. Pengaruh global emisi tersebut mengurangi intensitas energi global (-33%) dari 1970 sampai 2004, dan pengaruh tersebut lebih kecil dari pengaruh kombinasi pertumbuhan perkapita global 77% dan pertumbuhan populasi global 69%, kedua dorongan berhubungan dengan penambahan emisi CO₂, sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 2 (IPCC, 2007).

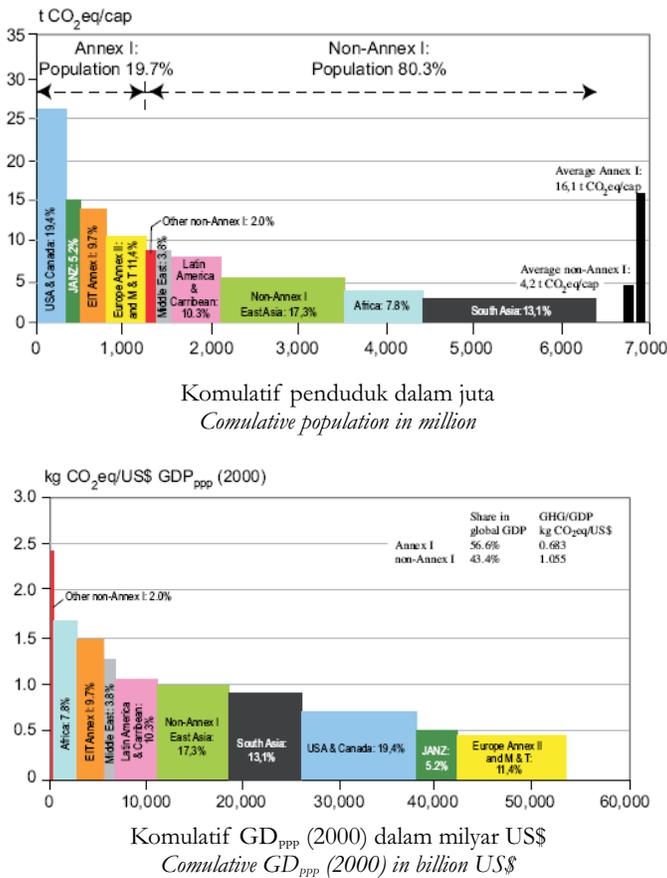


Gambar 2. Global perkembangan relatif hasil kotor domestik terukur dalam keseimbangan kekuatan pembelian, total suplai energi utama, emisi CO₂ (dari pembakaran bahan bakar fosil, gas dan pabrik semen) dan penduduk. Selain itu, garis putus-putus menunjukkan pendapatan perkapita yang terukur dalam keseimbangan kekuatan pembelian per penduduk (GD_{PPP}/Pop), intensitas energi ($TPES/GDP_{PPP}$), suplai energi intensitas karbon ($CO_2/TPES$), dan proses ekonomi produksi intensitas emisi (CO_2/GDP_{PPP}) untuk periode 1970 - 2004.

Figure 2. Relative global development of gross domestic product measured in PPP (GDP_{PPP}), total primary energy supply (TPES), CO₂ emissions (from fossil fuel burning, gas flaring and cement manufacturing) and population (Pop). In addition, in dotted lines, the figure shows income per percapita (GD_{PPP}/Pop), energy intensity ($TPES/GDP_{PPP}$), carbon intensity of energy supply ($CO_2/TPES$), and emission intensity of the economic production process (CO_2/GDP_{PPP}) for the period 1970 - 2004.

Kecenderungan lamanya penurunan cadangan suplai energi intensitas karbon setelah tahun 2000. Perbedaan-perbedaan signifikan yang terjadi berhubungan dengan penambahan pendapatan perkapita, emisi perkapita, dan intensitas energi antar negara. Pada 2004 UNFCCC dalam Annex 1 negara-negara menetapkan 20% dari populasi penduduk dunia berpenghasilan 57% berdasarkan Keseimbangan Kekuatan Pembelian Hasil Kotor Domestik (GDP_{PPP}) dan 46% dari global gas rumah kaca (*Green House Gas*, GHG) (Gamber 3).

Skala pengukuran-pengukuran masih belum cukup besar, walaupun demikian untuk menetralkan emisi pertumbuhan global, kebijakan perubahan iklim, keamanan energi, dan kelestarian pembangunan mempunyai peranan yang efektif dalam pengurangan emisi gas rumah kaca pada setiap sektor dan banyak negara. Maka dalam skenario pembangunan yang berkelanjutan khususnya dalam pemanfaatan dan penggunaan energi harus berasaskan keseimbangan lingkungan (*environmental balance*) dengan kebijakan-kebijakan yang terpadu (*integrated policies*) dalam pengurangan dampak perubahan iklim (*climate change mitigation*).



Gambar 3. Tahun 2004, distribusi regional per kapita emisi gas rumah kaca (termasuk dari penggunaan lahan) perbedaan akhir pengelompokkan penduduk negara (A), dan per US\$ of GDP_{PPP} perbedaan akhir pengelompokkan GDP_{PPP} negara (B). Persentasi dalam batang-batang mengindekasikan wilayah bagian dalam emisi global gas rumah kaca.

Figure 3. Year 2004, distribution of regional per capita GHG emissions (including from land-use) over the population of different country groupings (A), and per per US\$ of GDP_{PPP} over GDP_{PPP} of different country groupings. The percentages in the bars indicate a regions share in global GHG emissions.

Kemudian menurut Richard *et. al.* (2006) untuk menghitung karbon ada lima cara (*methods*), yaitu:

- Perubahan intensitas emisi; perubahan-perubahan terjadi pada jumlah emisi yang berhubungan dengan produk dan hasilnya relatif berkurang setiap tahun.
- Perubahan emisi aktual; perubahan-perubahan jumlah emisi aktual pada dasarnya adalah relatif berkurang setiap tahun dan jumlahnya sama dengan total output yang tidak berkurang.
- Perubahan penyimpanan karbon; setiap tahun jumlah karbon yang tersimpan berubah karena perubahan salah satu faktor biotik atau geologi.
- Perubahan penghindaran emisi; pengurangan-pengurangan yang berhubungan dengan listrik, uap air, panas atau air dingin dalam batas yang wajar.
- Tindakan pengurangan emisi khusus; pengurangan-pengurangan emisi dari tindakan-tindakan khusus adalah dengan keempat cara yang telah disebutkan tidak digunakan satupun.

Kelima metode perhitungan karbon tersebut, masing-masing disesuaikan dengan situasi khusus dengan pertimbangan yang sungguh hati-hati, cara yang mana terbaik untuk situasi pribadi kita sendiri. Jika lebih dari satu cara digunakan harus hati-hati, karena proyeksinya sangat potensial berpengaruh pada perubahan global. Sektor kehutanan meminimum konsentrasi emisi gas rumah kaca atau mengontrol keseimbangan karbon adalah dengan cara menyetop semua aktivitas pemanenan hutan yang menambah emisi karbon dan mengurangi penyimpanan karbon hutan. Dengan kata lain, strategi kerangka kerja manajemen hutan lestari harus berdasarkan pertimbangan dampak perubahan iklim pada semua proses penilaian yang menyeluruh dan terpadu.

2. Berdasarkan lahan (*bottom-up*)

Metode ini meliputi inventarisasi dan pengukuran plot lahan. Biomas dan produktivitas ekosistem diukur dan diinventarisasi per petak lahan dari skala tumbuhan ke ekosistem. Rate suplai cahaya, air dan nutrisi dipengaruhi oleh luas daerah permukaan dan volume tanah, dan berfungsi dalam proses ekosistem. Proses awal hubungan antara individu tumbuhan dengan ekosistem ditentukan dari ukuran dan kerapatan tumbuhan berhubungan dengan biomassa tegakan. Pada tegakan yang sedikit tumbuh-tumbuhan tidak mungkin berhubungan antara ukuran dan kerapatan, karena itu massa tumbuh-tumbuhan bertambah tanpa perubahan kerapatan. Tumbuh-tumbuhan mulai berkompetisi, ketika kematian berkurang. Keseimbangan komunitas ditunjukkan dari hubungan yang terbalik antara ln (biomassa) dan ln (kerapatan), dengan kemiringan sekitar 3/2, sebagaimana dirumuskan oleh Weller (1987), sebagai berikut:

$$\ln(b) = -3/2 \ln(d) \dots\dots\dots (1)$$

$$b = (d)^{-3/2} \text{ atau } d = (b)^{-2/3} \dots\dots\dots (2)$$

$$B = b \times d = d^{1/2} = b^{1/3} \dots\dots\dots (3)$$

dimana:

- b = biomas individu (g tumbuhan⁻¹);
- d = kerapatan (tumbuhan m⁻²); dan
- B = biomas tegakan (g m⁻²).

Kemudian untuk produktivitas dihitung dari produktivitas pokok bersih (*net primary productivity*, NPP) yang diperoleh dari biomas bersih dari tumbuhan per unit waktu atau dari hasil perkalian antara biomas dan nilai pertumbuhan relative (*relative growth rate*, RGR), sebagaimana yang dirumuskan oleh Chapin III (1993), sebagai berikut:

$$NPP = \text{Biomas} \times RGR \dots\dots\dots (4)$$

$$NPP = \text{Biomas} \times (LAR \times NAR) \dots\dots\dots (5)$$

dimana:

- NPP = produktivitas pokok bersih ($\text{g m}^{-2} \text{yr}^{-1}$);
- Biomas = berat kering per luas area (g m^{-2});
- LAR = perbandingan luas daun ($\text{m}^{-2} \text{kg}^{-1}$); dan
- NAR = rate asimilasi bersih ($\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$).

Namun, formula tersebut tidak berlaku pada tumbuhan herbal, karena tidak ada struktur kayu dan umumnya RGR lebih penting dibandingkan biomas per individu dalam penentuan NPP. Produktivitas dari beberapa ekosistem dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter-parameter pertumbuhan khas spesies di tipe ekosistem yang berbeda.
 Table 1. The growth parameters of species typical in different ecosystem type.

Parameter (Parameter)	Tipe ekosistem (Ecosystem type)			
	Padang rumput (Grassland)	Lahan semak belukar (Schrubland)	Hutan luruh daun (Deciduous forest)	Hutan selalu hijau (Evergreen forest)
Biomas di atas tanah (above ground biomass) (kg m^{-2})	0,3 ± 0,002	3,7 ± 0,05	15 ± 2	31 ± 8
NPP di atas tanah (above ground NPP) ($\text{kg m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)	0,3 ± 0,002	0,4 ± 0,007	1,0 ± 0,08	0,8 ± 0,08
Perubahan N (N flux) ($\text{g m}^{-2} \text{yr}^{-1}$)	2,6 ± 0,2	3,9 ± 1,6	7,5 ± 0,5	4,7 ± 0,5
Tinggi kanopi (canopy height) (m)	1	4	22	22
RGR lapangan (field RGR) (yr^{-1})	1,0	0,1	0,07	0,03
RGR Laboratorium (laboratory RGR) (minggu ⁻¹)	1,3	0,8	0,7	0,4

Sumber (Source): Caphin (1993).

Pada skala global, biomas dan produktivitas dipengaruhi mayoritas oleh iklim, karena pertumbuhan setiap individu dan tipe spesies sangat efektif berkompetisi. Seperti pada hutan hujan tropis (*tropical rain forest*) mempunyai biomas dan produktivitas tertinggi, karena kondisi panas basah mempengaruhi pertumbuhan dan pertambahan besar ukuran tumbuhan. Nilai biomas dan produktivitas terendah adalah tumbuhan di padang pasir dan tundra, karena curah hujan dan temperatur rendah. Beberapa contoh lain dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Perkiraan produksi pokok dan biomas bumi
Table 2. Estimation of primary production and biomass for terrestrial

Tipe Ekosistem (<i>Ecosystem type</i>)	Luas (<i>Area</i>) (10 ⁶ km ²)	Rata-rata Biomas (<i>Mean biomass</i>) (kg C m ⁻²)	Jumlah Biomas (<i>Total biomass</i>) (10 ⁹ ton C)	Rata-rata NPP (<i>Mean NPP</i>) (g C m ⁻² yr ⁻¹)	Jumlah NPP (<i>Total NPP</i>) (Gt C yr ⁻¹)	RGR (yr ⁻¹)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Hutan hujan tropis (<i>Tropical rainforest</i>)	17,0	20,0	340,0	900	15,3	0,045
Hutan tropis musim (<i>Tropical seasonal forest</i>)	7,5	16,0	120,0	675	5,1	0,042
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Hutan selalu hijau sedang (<i>Temperate evergreen forest</i>)	5,0	16,0	80,0	585	2,9	0,037
Hutan luruh daun sedang (<i>Temperate deciduous forest</i>)	7,0	13,5	95,0	540	3,8	0,040
Hutan Boreal (<i>Boreal forest</i>)	12,0	9,0	108,0	360	4,3	0,040
Lahan Kayu dan semak (<i>Woodland and shrubland</i>)	8,0	2,7	22,0	270	2,2	0,100
Savana (<i>Savanna</i>)	15,0	1,8	27,0	315	4,7	0,175
Padang rumput sedang (<i>Temperate grassland</i>)	9,0	0,7	6,3	225	2,0	0,321
Padang rumput tundra dan alpin (<i>Tundra and Alpine meadow</i>)	8,0	0,3	2,4	65	0,5	0,217
Daerah semak (<i>Desert scrub</i>)	18,0	0,3	5,4	32	0,6	0,107
Batu, es dan pasir (<i>Rock, ice, and sand</i>)	24,0	0,01	0,2	1,5	0,04	-

Tipe Ekosistem (<i>Ecosystem type</i>)	Luas (<i>Area</i>) (10 ⁶ km ²)	Rata-rata Biomass (<i>Mean biomass</i>) (kg C m ⁻²)	Jumlah Biomass (<i>Total biomass</i>) (10 ⁹ ton C)	Rata-rata NPP (<i>Mean NPP</i>) (g C m ⁻² yr ⁻¹)	Jumlah NPP (<i>Total NPP</i>) (Gt C yr ⁻¹)	RGR (yr ⁻¹)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Lahan yang sudah diolah (<i>Cultivated land</i>)	14,0	0,5	7,0	290	4,1	0,580
Lahan basah dan rawa (<i>Swamp and marsh</i>)	2,0	6,8	13,6	1125	2,2	0,165
Danau dan sungai (<i>Lake and stream</i>)	2,5	0,01	0,02	225	0,6	22,5
Jumlah Benua (<i>Total continental</i>)	149	5,5	827	324	48,3	0,058
Jumlah Laut (<i>Total marine</i>)	361	0,005	1,8	69	24,9	14,1
Jumlah keseluruhan (<i>Total global</i>)	510	1,63	829	144	73,2	0,088

Sumber (*Source*): Sclesinger (1991).

Tabel 2 membuktikan bahwa iklim sangat penting sekali dari skala lokal ke regional, dengan perbedaan ketinggian, curah hujan, temperatur di bagian Utara dan Selatan mempengaruhi perbedaan dalam produktivitas. Tetapi apabila diobservasi dari kedua skala regional dan lokal secara terpisah, pada skala lokal perbedaan terlihat dalam biomassa dan produktivitas, karena setiap spesies sifat-sifatnya berbeda sekalipun iklim dan tanahnya sama. Sedangkan pada skala regional, bagaimanapun variasi dalam kelembaban tanah dan nutrisi yang disebabkan oleh variasi topografi, drainase dan erosi tanah, produktivitas menjadi sangat tinggi dan perlu dikontrol. Dengan demikian, sekali padang rumput atau hutan dibangun, maka sangat sulit membedakan bentuk hidup spesies yang mendiami tempat yang baru. Perbedaan antara biomas dan produktivitas jelas di lingkungan yang sama dapat sebagai alternatif tipe komunitas yang stabil.

Pertimbangan skenario tersebut perlu pemahaman dan pertimbangan secara global, nasional, regional dan lokal akan potensi yang mempengaruhi perubahan lingkungan. Dinamika dan kecenderungan perubahan yang terjadi berhubungan dengan proses seleksi, struktur genetik suatu populasi yang mempengaruhi polusi udara, tanah dan air. Selain itu beragamnya aktivitas, seperti afforestation, reklamasi lahan, agroforestry dan lain-lain yang memberikan kontribusi dalam peningkatan penyimpanan karbon antara 100 - 200 Tg C per tahun, pengaruh berbagai aktivitas pada penyimpanan carbon dapat dilihat pada Tabel 3.

Dari pertimbangan data tersebut, maka untuk implementasi tindakan khususnya dalam sektor kehutanan membutuhkan pengembangan teknologi kehutanan yang meliputi pengukuran (*measuring*), pengamatan (*monitoring*), dan pembuktian (*verifying*) pertukaran CO₂ antara hutan dan atmosfer, termasuk transfer teknologi baru dengan pengelola lahan. Selain itu, sumberdaya manusia yang profesional dan manajemen strategi yang terpadu dan terkoordinasi antara pemerintah pusat dan daerah, produk hukum yang berkeadilan ditegakkan dan diterapkan secara konsisten. Karena perubahan-perubahan

komtemporer langsung atau tidak langsung jumlah karbon yang terdapat di biosfir dan samudera mayoritas dapat terpengaruh secara substansial (Lal, 2004). Untuk itu perlu input dukungan sektor lain untuk keseluruhan penerapan-penerapan kebijakan yang terpadu semua sektor dalam penurunan dan peningkatan mitigasi global iklim. Karena dengan penerapan kebijakan yang terpadu mempunyai dampak yang sangat luas pada kebijakan pembangunan terhadap tingkat emisi gas rumah kaca dan sebaliknya.

Tabel 3. Pengaruh berbagai aktivitas pada penyimpanan carbon

Table 3. Effects of various activities on carbon storage

No.	Aktivitas <i>Activities</i>	Karbon (Tg C / tahun) <i>Carbon (Tg C.yr¹)</i>
1.	Konversi lahan hutan menjadi lahan bukan hutan (<i>deforestation</i>)	> 1788
2.	Penanaman tumbuhan baru dan hutan yang tumbuh kembali	197 – 584
3.	Lahan Pertanian	125
4.	Lahan pengembalaan	240
5.	Hutan	170
6.	Agroforestri (<i>Agroforestry</i>)	390
7.	Padang rumput	38
8.	Lain-lain	42

Sumber (*Source*): Kaiser, 2000.

Hal ini terlihat sekarang, kesadaran mulai bertambah dengan perubahan komposisi atmosfer dan berkurangnya peranan hutan sebagai penyerap karbon. Sebagaimana Richard *et. al.* (2006) mengatakan bahwa saat ini konsentrasi CO₂ di atmosfer adalah sekitar 375 ppm, dan bisnis adalah sebagai hal yang biasa dalam skenario pertumbuhan ekonomi global berkelanjutan. Namun tanpa kontrol, emisi CO₂ ke atmosfer dapat naik menjadi 700 ppm atau lebih. Oleh sebab itu, studi kebijakan Internasional mengenai iklim menyarankan penstabilan CO₂ sekitar 500 ppm yang merupakan salah satu tujuan memerlukan penerapan yang sangat luas dari teknologi, khususnya di bidang kehutanan (Caldiera *et. al.*, 2004). Karena rate penyebaran teknologi baru bisa bertambah setiap waktu hingga konsentrasi CO₂ stabil.

Dengan demikian, prospektif peranan kehutanan dalam menstabilkan CO₂ di atmosfer adalah sebagai indikator, dan ini tergantung dari pemanenan dan tingkat gangguan (*disturbance rates*). Produktivitas hutan dengan kemampuan teknologi yang ramah lingkungan diharapkan dapat meningkatkan penyimpanan karbon dalam menjaga keseimbangan siklus karbon. Oleh sebab itu, bagaimanapun pentingnya hasil hutan seperti kayu, biofuel dan biomaterial lainnya, ekosistem hutan harus tetap dijaga dan dipertahankan. Kemudian matriks indikator penyimpanan karbon dibangun melalui multi sektor dengan rancangan yang terpadu dari multi tipe ekosistem.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Selisih penyimpanan karbon bersih (*net carbon storage*) dalam ekosistem bumi dengan seluruh karbon atmosfer (karbon dioksida, metan, dan lain-lain) adalah jumlah karbon yang memberi kontribusi pada efek rumah kaca.

Jumlah karbon dalam ekosistem berpengaruh pada kapasitas penyediaan pelayanan misalnya kesuburan tanah, penyimpanan air, produksi makanan dan serat, dan organisme.

Hubungan antara pasar karbon dan inisiatifnya dalam menaikkan produksi bahan bakar nabati (*biofuel*), informasi yang komprehensif dan konsisten tentang penaksiran penyimpanan karbon adalah sangat dibutuhkan baik regional maupun nasional. Metode dan indikator standar perhitungan karbon dalam ekosistem hutan adalah salah satu alat untuk instrumen kebijakan nasional, dan sebagai dasar perhitungan karbon bumi. Kemudian, sistem data karbon yang tersedia dengan standar perhitungan yang akurat dapat digunakan untuk penilaian kebijakan dan keputusan pengalokasian sumber daya pada skala regional, nasional dan internasional.

B. Saran

Monitoring dan perhitungan karbon pada ekosistem hutan yang komprehensif, terintegrasi dan konsisten dengan metode dan standar model yang akuntabel adalah sesuai untuk adaptasi perubahan pada skala yang luas.

Desain dan indikator multi sektor yang terpadu dalam mengestimasi perubahan karbon dimungkinkan untuk membangun mekanisme perhitungan karbon yang konsisten dan terukur.

V. DAFTAR PUSTAKA

- Caldaera, K., M.G. Morgan, D. Baldocchi, P.G. Brewer, C.T.A. Chen, G.J. Nabuurs, N. Nakicenovic, and G.P. Robertson. 2004. A Portfolio of Carbon Management Options. p. 103 - 129. In: C.B. Field and M.R. Raupach (ed.) *The global carbon cycle*. Island Press, Washington D.C.
- Clark, T.W., A.P. Curlee, S.C. Minta, and P.M. Kareiva. 1999. *Carnivores in Ecosystems: The Yellowstone experience*. Yale University Press, New Haven, Connecticut. 429 pp.
- Chapin III, F.S. 1993. Functional Role of Growth Forms in Ecosystem and Global Processes. In: *Scaling physiological processes Leaf to globe*. J.R. Ehleringer & C.B. Field (eds.) Academic Press, San Diego. p. 287 - 312.

- Houghton, J.T. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC on Climate Change. Cambridge University. UK.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2000. Land use, land-use change, and forestry. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2007. Working Group III. Climate change 2007 Mitigation. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Kaiser, J. 2000. Rift Over Biodiversity Divides Ecologist. *Science* 289 : 1282 - 1283.
- Lovett, G.M., D.A. Burns, C.T. Driscoll, J.C. Jenkins, M.J. Mitchell, L. Rustad, J.B. Sharley, G.E. Likens, and R. Haeuber. 2007. Who Needs Environmental Monitoring? *Front. Ecol. Environ.* 5 (5): 253 - 260.
- Lal, R. 2004. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science* 304 : 1623 - 1627.
- Ogle, S.M., M.D. Eve, F.J. Breidt, and K. Paustian. 2003. Uncertainty in Estimating Land Use and Management Impacts on Soil Organic Carbon Storage for U.S. Agroecosystem between 1982 and 1997. *Global Change Biology* 9 : 1521 - 1542.
- Richard, B. 2006. Carbon Accounting Rules and Guidelines for the United State Forest Sector. *Journal Environmental Quality* 35 : 1518 - 1524.
- Richard, A.B., K. Pregitzer, and A. Lucier. 2006. Forest Carbon Management in the United States : 1600 - 2100. *Journal Environmental Quality* 35 : 1461 - 1469.
- Schlesinger, W.H. 1991. Biogeochemistry: An analysis of Global Change. Academic Press, San Diego.
- Tilman, D., and J.A. Downing. 1994. Biodiversity and Stability in Grasslands. *Nature* 367 : 363 - 365.
- Tambunan, P., A. Wibowo, dan Y. Lisnawati. 2008. Kontrol Pembangunan dan Konservasi untuk Menyelamatkan Bumi. *Jurnal Analisis Kebijakan Kehutanan* 5 (2) : 77 - 87.
- Weller, D.E. 1987. A Reevaluation of the $-3/2$ Power Rule of Plant Self-thinning. *Ecol. Monogr.* 57 : 23 - 43.