

TINGKAT RUJUKAN EMISI HUTAN MANGROVE DELTA MAHAKAM (*Forest Reference Emission Level for Mangrove Forest in Mahakam Delta*)

Frida Sidik¹, Bambang Supriyanto² & Mega Lugina²

¹Balai Riset dan Observasi Laut, Badan Riset dan SDM Kelautan dan Perikanan, Kementerian Kelautan dan Perikanan, Jalan Baru Perancak-Negara, Bali 82251, Indonesia

²Pusat Penelitian dan Pengembangan Sosial, Ekonomi, Kebijakan dan Perubahan Iklim, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Jalan Gunung Batu No.5, Bogor 16118, Indonesia

Email: sidik.frida@gmail.com, bambang_halimun@yahoo.com, mega_lugina@yahoo.com

Diterima 26 Mei 2017, direvisi 8 November 2017, disetujui 9 November 2017.

ABSTRACT

Forest Reference Emission Level (FREL) is one of four required elements for developing countries in implementing REDD+ activities, and serves as a benchmark in assessing REDD+ performance. This study assessed the emission level from mangrove deforestation in Mahakam Delta - East Kalimantan, aiming to enhance the baseline for subnational FREL document. Over the observation period of 1980-2001, conversion of mangrove forest into aquaculture ponds has resulted in a massive mangrove loss, with an estimation of 3,183 hectare/year, or equivalent to the release of 0.46 Tg CO₂e/year. If soil pool was also included in the calculation, mangrove deforestation in Mahakam Delta between 1980 and 2001 emitted 2.9 TgCO₂e/year. The CO₂ emission from aquaculture ponds may couple with mangrove deforestation, which released 52 Gg CO₂/year from the pond floor. After 2001, the rate of mangrove deforestation decreased, allowing mangrove forests to recover with the expansion rate of 1,546 hectare/year during 2001-2011 or equivalent to the carbon sequestration or removal of 0.67-4.7 TgCO₂e/year. The results of the study suggest the way to improve the existing FREL by raising the importance of mangrove as “blue” carbon, with reference of the 2013 IPCC Guideline: Wetland Supplement.

Keyword: Mangrove forest; FREL; CO₂ emission; soil pool; Mahakam Delta.

ABSTRAK

Tingkat Rujukan Emisi Hutan (TREH) merupakan salah satu acuan bagi negara berkembang dalam melaksanakan aktivitas REDD+ sekaligus sebagai tolak ukur dalam menilai kinerja pelaksanaan REDD+. Studi ini mengkaji tingkat emisi CO₂ dari deforestasi hutan mangrove di Delta Mahakam Kalimantan Timur melalui pendekatan *retrospective*, dengan tujuan untuk melengkapi *baseline* TREH subnasional. Selama masa tahun pengamatan 1980-2001, konversi hutan mangrove menjadi tambak budidaya telah menyebabkan hilangnya hutan mangrove sekitar 3.183 hektar/tahun atau setara dengan terlepasnya 0,46 TgCO₂e/tahun. Apabila *soil pool* dimasukkan ke dalam perhitungan maka nilai tersebut akan bertambah menjadi 2,9 TgCO₂e/tahun. Diperkirakan lahan tambak turut memberikan kontribusi pada nilai emisi sekitar 52 GgCO₂/tahun yang dilepaskan dari permukaan tanah tambak. Setelah tahun 2001, laju deforestasi mangrove menurun ditandai dengan pertambahan luas hutan mangrove (*recovery*) dengan laju perluasan 1.546 hektar/tahun selama tahun 2001-2011, atau setara dengan penyerapan (C *sequestration*) atau perpindahan karbon (*removal*) sekitar 0,67–4,7 TgCO₂e/tahun. Hasil dari studi ini memberikan masukan untuk penyempurnaan TREH yang telah ada dengan mengangkat peran penting mangrove sebagai “*blue*” *carbon* di dalam dokumen TREH, mengikuti acuan dari 2013 IPCC Guideline: Wetland Supplement.

Kata Kunci: Hutan mangrove; TREH; emisi CO₂; *soil pool*; Delta Mahakam.

I. PENDAHULUAN

Sebagai negara yang berpartisipasi aktif dalam REDD+, Indonesia secara sukarela telah menyiapkan Dokumen Tingkat Rujukan Emisi Hutan (TREH) atau *National Forest Reference Emission Level* (FREL) untuk COP 21 Konvensi Perubahan Iklim yang secara resmi dikeluarkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) pada tahun 2015. Nilai TREH akan menjadi dasar penilaian keberhasilan Indonesia dalam menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK) dari sektor kehutanan, termasuk hutan mangrove. Saat ini periode referensi TREH nasional di Indonesia adalah 1990-2012.

Sejalan dengan perkembangan yang terjadi, perbaikan Dokumen TREH terus dilakukan. Berdasarkan ketersediaan data dan konsistensi penyediaannya, Dokumen TREH Indonesia mencakup tiga aktivitas yang diukur, yaitu deforestasi, degradasi hutan dan dekomposisi hutan gambut (MEF, 2016). Menurut Laporan TREH yang dikeluarkan oleh KLHK tahun 2016, emisi dari kebakaran hutan gambut tidak masuk dalam TREH karena masih tingginya nilai ketidaktentuan (*uncertainty*) dan data aktivitas (*activity data*) yang masih belum memadai. Perhitungan TREH Indonesia di sektor kehutanan masih mencakup *aboveground pool*. *Soil pool* (penyimpan karbon di tanah) hanya dihitung untuk hutan gambut yang terdegradasi terutama dekomposisi hutan gambut, tidak pada mangrove padahal penyimpan karbon terbesar di hutan mangrove terdapat di dalam tanah.

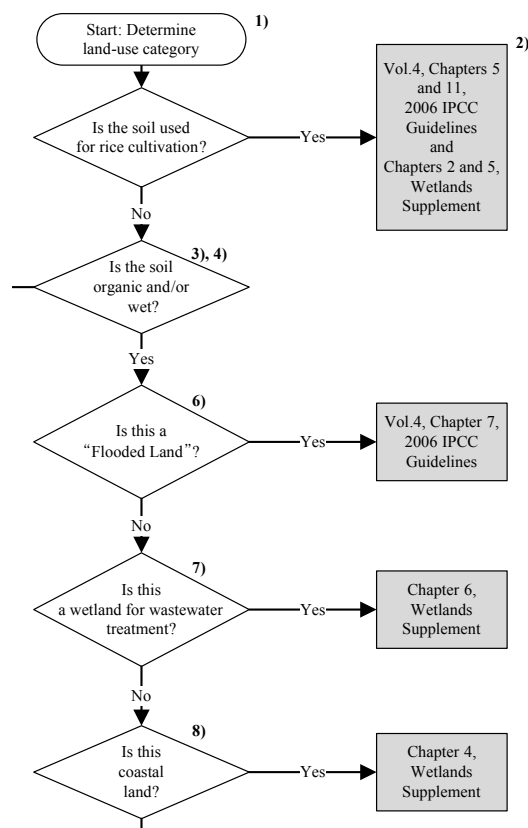
Saat ini, perhatian terhadap pentingnya hutan mangrove sebagai penyimpan karbon, yang disebut "*blue*" karbon (karbon biru), semakin meningkat. Indonesia memiliki potensi sebagai penyimpan karbon biru yang sangat besar dimana hutan mangrove Indonesia merupakan yang terluas di dunia, yaitu sekitar 22% dari total mangrove di dunia (Giri *et al.*, 2011). Di lain pihak, laju deforestasi hutan mangrove Indonesia yang

cukup tinggi, yaitu sekitar 1,72% per tahun pada periode 2000-2012 (Richards dan Friess, 2015), memberikan kontribusi pada peningkatan emisi CO₂ akibat terlepasnya CO₂ dengan kisaran 0,07–0,21 PgCO₂e/tahun dari hilangnya hutan mangrove (Murdiyarso *et al.*, 2015). (keterangan: 1 petagram (Pg) = 1.000 terragram (Tg) = 1 gigaton (Gt)).

Selama ini perhatian untuk mengurangi maupun mencegah emisi telah dilakukan Indonesia sesuai dengan dengan ketentuan REDD+ (*Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation*). Belum masuknya *soil pool* dalam perhitungan TREH hutan mangrove dapat memberikan penilaian rendah (*underestimate*) terhadap emisi CO₂ yang terlepas akibat deforestasi dan degradasi sekaligus kemampuan hutan mangrove dalam menyerap karbon, sehingga nilai TREH masih perlu disempurnakan. Selain itu, masuknya *soil pool* dapat memengaruhi tingkat rujukan hutan (TRH) dimana akresi tanah setelah kegiatan restorasi dapat memberikan implikasi pada tingkat serapan karbon di hutan mangrove (Alongi, 2012).

Kontribusi karbon tanah hutan mangrove dalam perhitungan emisi telah disampaikan dalam beberapa sumber, sebagai contoh dalam Laporan *Carbon Accounting* dari program *Forest Carbon Partnership Facility* (FCPF) – *Carbon Fund* yang dilaksanakan di Kalimantan Timur (*unpublished*), yang menyatakan bahwa sekitar 21% dari total emisi CO₂ dari *land-based activities* di Kalimantan Timur berasal dari karbon yang tersimpan di dalam tanah hutan mangrove (*mangrove soil*). Pernyataan ini sesuai dengan studi yang menunjukkan besarnya simpanan karbon di tanah, yaitu hingga 75-81% dari total karbon yang tersimpan di ekosistem mangrove (Alongi, 2014; Murdiyarso *et al.*, 2015).

Nilai-nilai stok karbon yang diperoleh dari inventarisasi hutan lokal dibutuhkan untuk memperbaiki nilai-nilai dari TREH Nasional.



Sumber (Source): IPCC 2013 *Wetland Supplement*

Gambar 1. Alur penentuan acuan yang digunakan dalam IPCC Guidelines.
 Figure 1. Decision tree for finding the appropriate guidance in IPCC Guidelines.

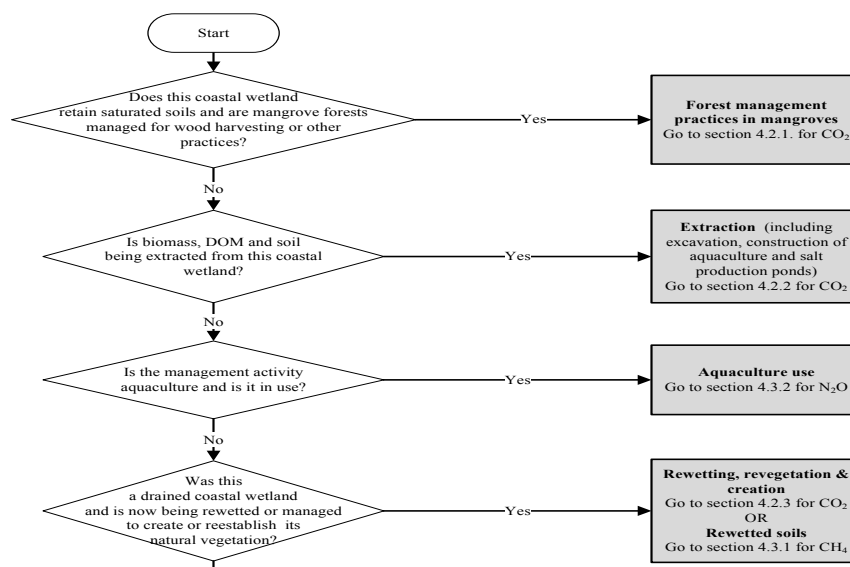
Perhitungan stok karbon meliputi tiga penyimpan karbon (*carbon pool*) yang terdiri dari biomasa tanaman hidup dan tanaman yang mati (nekromasa) dan tanah (IPCC, 2006). Berbagai sumber emisi dihitung dan dilaporkan karena akan digunakan sebagai dasar perhitungan *Reference Level* dari Program Pengurangan Emisi (PPE) yang menghitung tingkat rujukan semua sektor termasuk sektor kehutanan (TRH). Oleh karenanya, studi ini mengkaji peran penting mangrove, sebagai salah satu sumber emisi, yang mulai menjadi perhatian dalam upaya-upaya PPE. Dengan mengambil lokasi studi di Delta Mahakam, Kalimantan Timur, studi ini bertujuan (1) menghitung tingkat emisi CO₂ dan penyerapan karbon di hutan mangrove berdasarkan ketersediaan data, dan (2) menilai kontribusi *soil pool* dalam perhitungan TREH hutan mangrove, untuk menjadi masukan

bagi penyempurnaan TREH subnasional dan nasional yang telah ada.

II. METODE PENELITIAN

A. Kerangka Pikir

TREH disusun sesuai dengan ketentuan *Decision 1/ CP.16, Paragraph 70 (REDD+)* Under the UNFCCC untuk memenuhi persyaratan pelaksanaan REDD+ (MEF, 2016). Dalam Dokumen TREH dari KLHK tersebut, definisi yang dipergunakan dalam TREH digunakan berdasarkan ketersediaan data dan konsistensi penyediaan datanya, yaitu kehutanan, deforestasi, degradasi dan dekomposisi hutan gambut. Luas hutan yang tercakup dalam TREH Indonesia sekitar 113,52 juta hektar meliputi tujuh kriteria hutan yaitu hutan terestrial primer, hutan terestrial sekunder, hutan mangrove primer,



Sumber (Source): IPCC, 2013.

Gambar 2. Alur pemilihan bagian yang relevan untuk Tier 1 pendugaan emisi dan serapan GRK yang disebabkan oleh kegiatan pengelolaan khusus di kawasan lahan basah pesisir.

Figure 2. Decision tree to indicate relevant section for Tier 1 estimation of GHG emissions and removals due to specific management activities in coastal wetlands.

hutan mangrove sekunder, hutan rawa primer, hutan rawa sekunder dan hutan tanaman (*plantation*). Dua data aktivitas yang masuk TREH Indonesia adalah deforestasi dan degradasi hutan dimana perkiraan emisi yang dihasilkan dari aktivitas tersebut diperoleh dengan menghitung perubahan *aboveground biomass* melalui pendekatan *remote sensing*. *Soil pool* hanya digunakan pada hutan gambut karena simpanan *soil carbon* di gambut yang sangat besar dibandingkan dengan hutan tropis lainnya.

Dalam perhitungan TREH, dibutuhkan data aktivitas (*activity data*) dan faktor emisi (*emission factor*). Pada studi ini, kedua jenis data tersebut ditentukan dengan mengikuti alur yang telah ditetapkan oleh IPCC dalam dokumen *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands, Methodological Guidance on Lands with Wet and Drained Soils, and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment* (Gambar 1). Pemilihan Chapter 4 dari dokumen IPCC *Wetland* tersebut sebagai acuan studi berdasarkan definisi “*coastal*

land” yaitu daratan yang terletak di pesisir yang dipengaruhi oleh pasang surut dan/atau air payau/air laut. Vegetasi yang masuk dalam kelompok ini adalah mangrove, padang lamun dan tidal *freshwater/salt marshes* (IPCC, 2014).

Lebih lanjut, Chapter 4 membagi *Coastal Wetland* berdasarkan pemanfaatan lahan yang disebut *Specific Management Activities* (Gambar 2). Studi ini memilih “*extraction*” (untuk *aquaculture*) sebagai *Specific Management Activities* dominan yang memengaruhi emisi CO₂ dari perubahan lahan hutan mangrove di Delta Mahakam selama tahun 1980-2001. Dengan kondisi ini diasumsikan bahwa biomasa, serasah, nekromas dan tanah telah hilang dalam kondisi aerobik sehingga menyebabkan emisi CO₂ pada saat *extraction* berlangsung (IPCC, 2014).

B. Pengumpulan dan Analisa Data

Data yang dikumpulkan berupa data primer dan data sekunder. Data primer merupakan data hasil observasi untuk mengetahui kondisi



Sumber (Source): Website FCPF (FCPF website)

Gambar 3. Lokasi PSP (merah) dan pengambilan data lapang (kuning) di lokasi studi, Delta Mahakam
 Peta diperoleh dari Google Earth dengan modifikasi informasi lokasi PSP dari website FCPF.

Figure 3. PSP location (red) and sampling sites(yellow) in Mahakam Delta. Map is acquired from Google Earth, modified with PSP site information from FCPF website.

biofisik hutan mangrove di Delta Mahakam dan pengambilan sampel tanah di dua plot sampel permanen (PSP) hutan mangrove pada bulan April 2017 (Gambar 3, 0.775°S, 117.45°E). Data sekunder terdiri dari berbagai laporan dan referensi yang berkaitan dengan kondisi hutan mangrove dan pengelolaannya yang diperoleh dari studi literatur maupun data dari lembaga dan institusi terkait. Data sekunder termasuk data tutupan lahan Delta Mahakam dari hasil penelitian Dutrieux yang meliputi luas hutan mangrove pada tahun 1980, 1986, 1992, 1996, 1998, 1999 dan 2001 (Boisvilliers, 2014). Data tersebut digunakan sebagai *activity data*. Sedangkan nilai biomassa mangrove menggunakan data sekunder dari FCPF di Delta Mahakam Kalimantan Timur yang diperoleh dari *website* (<http://puspijak.org/karbon/>). Studi ini hanya menggunakan nilai rata-rata biomassa *aboveground* dari tujuh PSP hutan mangrove primer di Pulau Tunu dan sekitarnya di Delta Mahakam untuk memenuhi representasi kondisi lokasi pengambilan sample tanah di sekitar PSP hutan mangrove Pulau Tunu (Gambar 3). Pendugaan biomassa dilakukan

dengan menggunakan persamaan dari Ketterings *et al.* (2001); Chave *et al.* (2005); dan Dharmawan dan Siregar (2010).

Untuk pendugaan potensi emisi CO₂, total stok karbon untuk semua *pool* (*aboveground*, *belowground*, nekromas dan tanah) dihitung (Persamaan 1) dan kemudian dikonversikan menjadi CO₂ *equivalen* (Persamaan 3) berdasarkan panduan dari IPCC *Wetland*. Karena keterbatasan data, studi ini menghitung total stok dengan menggunakan data sekunder *aboveground pool* dari PSP FCPF yang berjumlah tujuh PSP sebagai asumsi biomassa hutan mangrove primer dan data primer *soil pool* dari pengambilan sampel lapangan (Persamaan 2). Sedangkan perubahan total stok karbon diperoleh dari persamaan linier dari nilai stok karbon antar waktu (*time series*). Total stok karbon dihitung dengan rumus:

Total stok karbon:

$$C_{total} = C_{ab} + C_{bb} + C_{nec} + C_{so} \dots\dots\dots(1)$$

$$C_{total} = C_{ab} + C_{so} \dots\dots\dots(2)$$

dimana:

- C_{total} : Stok karbon pada semua penyimpanan (*carbon stock for all pools*);
- C_{ab} : Stok karbon *aboveground* biomass (*aboveground biomass carbon stock*);
- C_{bb} : Stok karbon *belowground* biomass (*belowground biomass carbon stock*);
- C_{nec} : Stok karbon nekromas (*dead organic matter carbon stock*);
- C_{so} : Stok karbon tanah (*soil carbon stock*).

$$CO_{2e} = C_{total} \times 3,67 \dots\dots\dots(3)$$

Emisi CO_2 *equivalen* (Howard, Hoyt, Isensee, Pidgeon, & Telszewski, 2014):

Stok karbon tanah dihitung berdasarkan panduan dari *Blue Carbon Protocol* (Howard *et al.*, 2014) dengan menggunakan data *sampling* tanah dari empat interval kedalaman, yaitu 0-15cm, 15-30cm, 30-50cm, 50-100cm. Sampel tanah diambil dengan metode *coring* menggunakan *open-faced auger* di sekitar PSP hutan mangrove secara acak. Dari hasil *coring* tersebut, sampel tanah diambil 5cm pada setiap interval kedalaman dan disimpan dalam pembungkus plastik. Sampel dibawa ke Laboratorium Riset Kelautan, Balai Riset dan Observai Laut, dan dikeringkan sekitar 60°C untuk mendapatkan nilai *bulk density* (Persamaan 4). Kemudian dari sampel kering tersebut diambil sekitar 2mg untuk dianalisis kandungan organik dengan metode pembakaran hingga 450°C selama 4 jam (*Loss on Ignition*, Persamaan 5). Metode ini digunakan untuk mendapatkan nilai material organik yang terkandung di dalam sedimen yang kemudian dikonversikan dengan nilai karbon organik (Persamaan 6). Hasil dari perhitungan tersebut akan mendapatkan nilai stok karbon tanah (Persamaan 8). Sedangkan

$$BD = \frac{W_{dry1}}{V_{sam}} \dots\dots\dots(4)$$

$$\%LOI = \left[\frac{W_{dry2} - W_{dry3}}{W_{dry2}} \right] \times 100 \dots\dots\dots(5)$$

$$\%C_{org} = 0.415 \times \%LOI + 2.89 \dots\dots\dots(6)$$

$$C_{dens} = BD + \frac{\%C_{org}}{100} \dots\dots\dots(7)$$

$$C_{so} = (C_{dens} \times interval A) + (C_{dens} \times interval B) + \dots(8)$$

emission factor tanah di tambak menggunakan data literatur dari Sidik & Lovelock (2013).

dimana:

- BD : Berat isi (*bulk density*) (g/cm^3)
- V_{sam} : Volume sampel (*sample volume*) (cm^3)
- W_{dry1} : Berat kering (*dry weight*) (g)
- W_{dry2} : Berat kering sebelum pembakaran (*dry mass before combustion*)(mg)
- W_{dry3} : Berat kering setelah pembakaran (*dry mass after combustion*)(mg)
- $\%LOI$: Pengabuan kering (*Loss on Ignition*)
- $\%C_{org}$: Persentase karbon organik tanah (*percentage soil organic carbon*):
- C_{dens} : Densitas karbon (*carbon density*) (g/cm^3)
- C_{so} : Total stok karbon tanah (*total soil carbon stock*) (g/cm^3)

Analisis ketidakpastian (*uncertainty analysis*) tidak dilakukan dalam studi ini karena keterbatasan data sekunder yang memberikan nilai ketidakpastian (*uncertainty*) pada perhitungan luasan hutan mangrove dan stok karbon. *Uncertainty* dapat terjadi karena asumsi dan metode yang dipilih, dimana hal ini tidak tercantum dalam keterangan di data sekunder yang digunakan dalam studi ini (KLH, 2012).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kondisi Hutan Mangrove di Delta Mahakam antara tahun 1980-2011

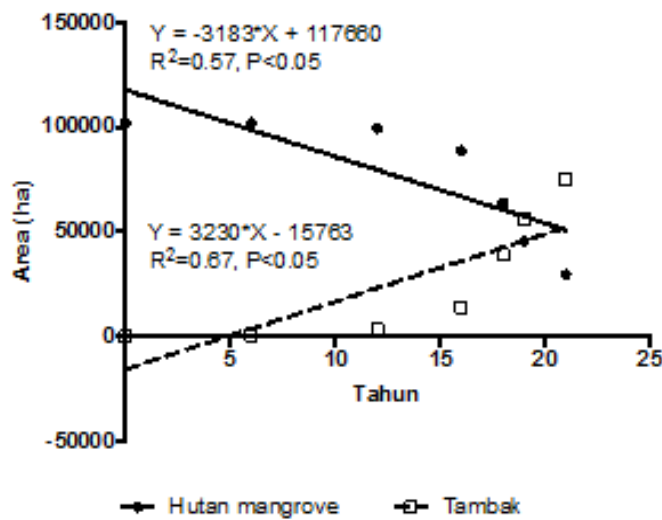
Delta Mahakam terletak di daerah aliran sungai (DAS) Mahakam yang memiliki luas area sekitar 7,5 juta hektar (Allen, Laurier, & Thouvenin, 1979) (Gambar 3). Total luas daratan Delta Mahakam diperkirakan 110.000 hektar dengan 42 pulau tersebar di mulut delta (Persoon dan Simarmata, 2014). Berdasarkan beberapa studi yang dirangkum

Tabel 1. Perubahan tutupan lahan di lokasi studi di Delta Mahakam antara tahun 1980-2011. Data dimodifikasi dari Dutrieux *et al.*, 2014

Table 1. Land cover change of study site in Mahakam Delta in periode of 1980-2011. Data is modified from Dutrieux *et al.*, 2014

	Tahun (Year)	Vegetasi/hektar (Vegetation/ hectare)	Tambak/hektar (Aquaculture ponds/hectare)	Total/hektar (Total/hectare)
Fase (Phase) 0 (pra 1980)	1980	102.200	0	102.200
Fase (Phase) 1 (1980 – 1991)	1986	101.916	292	102.208
Fase (Phase) 2 (1992 – 2001)	2001	29.540	74.843	104.383
Fase (Phase) 3 (2002 – 2011)	2011	45.000	63.000	108.000

Sumber (Source): Dutrieux *et al.*, 2014.



Sumber (Source): Dutrieux *et al.*, 2014

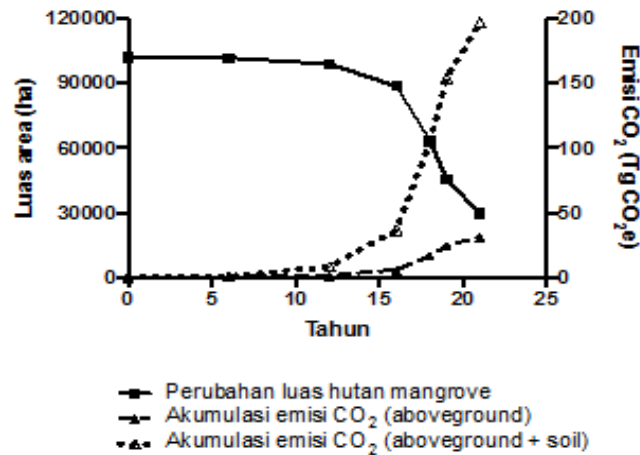
Gambar 4. Perubahan lahan hutan mangrove (garis hitam) dan tambak (garis putus) di Delta Mahakam selama 21 tahun yaitu mulai tahun 1980 (T-0) hingga tahun 2001 (T-21), dengan persamaan : $Y_{mangrove} = -3.183 * X - 117.660$, $Y_{tambak} = 3.230 * X - 15.763$.

Figure 4. Land cover change of mangrove forests (solid line) and ponds (dash) in Mahakam Delta between 1980 (T-0) and 2001 (T-21), with equations : $Y_{mangrove} = -3,183 * X - 117,660$, $Y_{tambak} = 3,230 * X - 15,763$.

dalam Dutrieux *et al.* (2014) dan Boisvilliers (2014), perubahan Delta Mahakam dapat terbagi empat fase. Pada awalnya Delta Mahakam adalah hamparan delta yang ditutupi oleh hutan mangrove yang rapat yang didominasi oleh jenis Nipah (Fase 0) dengan jenis mangrove lainnya seperti *Avicennia* spp, *Heritiera littoralis*, *Rhizophora* spp dan *Sonneratia* spp. Konversi hutan menjadi tambak belum terlihat, meskipun pembukaan

lahan hutan untuk kepentingan ekspolarasi gas dan minyak sudah berlangsung selama 40 tahun terakhir.

Perubahan tutupan lahan yang terjadi di Delta Mahakam terekam dalam studi yang dilakukan oleh Dutrieux *et al.* (2014) (Gambar 4). Deforestasi dan degradasi hutan mangrove Delta Mahakam mulai terjadi sejak awal tahun 1980, ditandai dengan maraknya alih fungsi lahan hutan mangrove menjadi



Sumber (Source): modifikasi Dutrieux *et al* (2014) dan data dari studi ini.

Gambar 5. Akumulasi emisi CO₂ yang dilepaskan dari aktivitas deforestasi hutan mangrove Delta Mahakam selama 21 tahun ($T_0 = 1980$, $T_{21} = 2001$), dengan skenario pelepasan CO₂ dari aboveground (garis putus) dan total pelepasan CO₂ dari aboveground dan tanah (garis titik).

Figure 5. Accumulation of CO₂ emission from mangrove deforestation in Mahakam Delta over 21 year ($T_0 = 1980$, $T_{21} = 2001$), with scenario of the emission from aboveground (dash) and total emission from aboveground and soil (dots).

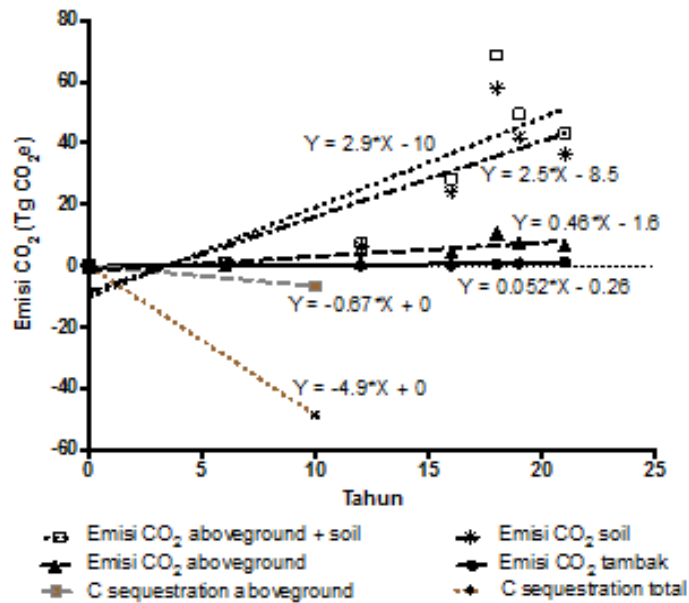
tambak budidaya udang (Fase 1). Deforestasi mencapai puncaknya pada Fase 2 dimana lebih dari 75% area Delta Mahakam menjadi tambak budidaya. Sebagai contoh, pada tahun 2001 sekitar 74.863 hektar hutan telah menjadi pertambakan. Kerusakan hutan mangrove di Delta Mahakam terus berlanjut hingga tahun 2011 dan meninggalkan 63.000 hektar hutan mangrove menjadi tambak (Tabel 1).

Laju pembangunan tambak di Delta Mahakam antara tahun 1980-2001 sangat signifikan, yaitu sekitar 3.230 hektar/tahun (Gambar 4). Nilai ini sebanding dengan laju deforestasi hutan mangrove, yaitu 3.183 hektar/tahun. Selisih nilai dimungkinkan oleh aktivitas pembukaan lahan tambak yang tidak hanya di hutan mangrove tetapi juga lahan non hutan mangrove atau di area tanah timbul. Sebagai wilayah delta, tingkat sedimentasi di Delta Mahakam cenderung tinggi sehingga penambahan daratan dapat terus terjadi dan menimbulkan perluasan lahan mangrove secara alami (Dutrieux *et al.*, 2014). Hal ini dapat terlihat dengan bertambahnya luas wilayah studi selama periode pengamatan (Tabel 1).

Pada tahun 2004 (Fase 3), mangrove kembali beregenerasi (*recovery*) baik secara alami maupun penanaman (*plantation*), ditandai dengan kenaikan luasan hutan mangrove sekitar 10.000 hektar, meliputi di area ex-tambak, jalur pipa dan tanah timbul, antara tahun 2001-2011 (Dutrieux *et al.*, 2014). Hal ini disebabkan oleh banyaknya tambak yang ditinggalkan (non produktif) karena produksi yang menurun (Bosma, Sidik, van Zwieten, Aditya, & Visser, 2012). Menurut kajian Boisvilliers (2014), mangrove yang beregenerasi secara alami memiliki tingkat pertumbuhan yang lebih baik daripada penanaman (*plantation*).

B. Kontribusi Soil Pool terhadap Pendugaan Emisi CO₂ dari Hutan

Deforestasi dan degradasi hutan memberikan implikasi bagi perubahan stok karbon hutan mangrove (Kauffman, Heider, Norfolk, & Payton, 2014; Lovelock, Ruess, & Feller, 2011; Pendleton *et al.*, 2012). Kerusakan hutan mangrove akibat alih lahan hutan menjadi tambak yang terjadi pada Fase 1 dan Fase 2 (1980-2001) diasumsikan



Sumber (Source): modifikasi Dutrieux *et al* (2014), Sidik dan Lovelock (2013), FCPF dan data dari studi ini.

Gambar 6. Emisi CO₂e yang dilepas pada saat deforestasi hutan mangrove di Delta Mahakam selama tahun 1980-2001 ($T_0 = 1980, T_{21} = 2001; Y_{total} = 2,9x-10, Y_{soil} = 2,5x-8,5, Y_{above} = 0,46x-1,6$). Selama konversi ini berlangsung nilai emisi CO₂ bertambah dengan adanya CO₂ yang dilepas dari permukaan tanah tambak ($Y_{tambak} = 0,052x-0,26$). Karbon terserap kembali setelah adanya gerakan restorasi hutan mangrove sejak tahun 2001 hingga 2011 ($T_0 = 2001, T_{10} = 2011; Y_{totseq} = -4,9x, Y_{aboveseq} = -0,67x$).

Figure 6. CO₂e released from mangrove deforestation in Mahakam Delta between 1980 and 2001 ($T_0 = 1980, T_{21} = 2001; Y_{total} = 2.9x-10, Y_{soil} = 2.5x-8.5, Y_{above} = 0.46x-1.6$). During the conversion, CO₂ released from ponds contributes to the total CO₂ emission. ($Y_{tambak} = 0.052x-0.26$). Carbon is sequestered after the restoration in 2001-2011 ($T_0 = 2001, T_{10} = 2011; Y_{totseq} = -4.9x, Y_{aboveseq} = -0.67x$).

sebagai aktivitas deforestasi. Laju deforestasi di Delta Mahakam pada tahun 1992–2001 cukup tinggi seiring dengan meningkatnya pasar produk budidaya udang (Bosma *et al.*, 2012). Kondisi tersebut juga mengikuti tren deforestasi di Indonesia yang mencapai puncaknya pada periode tahun 1996-2001 yaitu sekitar 2.255.196 hektar/tahun (MEF, 2016).

Dalam studi ini terdapat dua skenario perhitungan emisi CO₂ *equivalen* dengan nilai perubahan stok karbon pada saat konversi hutan menjadi tambak di tahun pengamatan, yaitu perhitungan *aboveground pool* dan gabungan *aboveground* dan *soil pool*. Dengan menggunakan data FCPF hutan mangrove di PSP Pulau Tunu, Delta Mahakam, rata-rata stok karbon *aboveground pool* hutan mangrove di Delta Mahakam diasumsikan

sekitar 117,2 MgC/hektar dari kisaran 53,2–230,4 MgC/hektar. Stok karbon tanah berkisar antara 574,13-675,3 MgC/hektar (rata-rata = 624,7 MgC/hektar) dari pengambilan sampel tanah yang dilakukan di Pulau Tunu dan sekitarnya. Nilai tersebut mendekati nilai rata-rata stok karbon mangrove di Indonesia, yaitu 774,7 MgC/hektar (82%) stok karbon tanah, 159,1MgC/hektar (17%) *aboveground* dan 16,7 MgC/hektar (2%) *belowground*, dengan total stok karbon sekitar 950,5 MgC/hektar (Alongi *et al.*, 2016). Dari perhitungan stok karbon *aboveground pool* dan *soil pool* pada studi ini, setidaknya hutan mangrove primer Delta Mahakam menyimpan sekitar 741,9 MgC/hektar atau setara dengan 2.722,7 MgCO₂/hektar, jauh lebih besar dari nilai faktor emisi hutan mangrove primer Kalimantan yang digunakan dalam TREH

Tabel 2. Luas penambahan area restorasi lahan basah dan vegetasi pesisir, termasuk kawasan restorasi mangrove selama tahun 2010-2015.=

Tabel 2. *The size of restoration areas in wetland and coastaline which include mangrove restoration site in 2010-2015*

Tahun (Year)	Nasional (National)		Kalimantan Timur (East Kalimantan)	
	KLHK	KKP	KLHK	KKP
2010	-	60,5	-	-
2011	10.410	29,7	600	-
2012	9.280	185,8	1.125	-
2013	12.403	280,9	800	3
2014	-	216,1	-	11,5
2015	491	493,9	-	-

Sumber (Source): Statistik KLHK 2015(KLHK, 2016), Statistik KKP 2016 (tidak dipublikasi).

Indonesia, yaitu 455,2 MgCO₂/hektar (MEF, 2016).

Pada perubahan lahan hutan mangrove pada Fase 1 (1980–1991) dan Fase 2 (1992–2001) memberikan implikasi terlepasnya CO_{2e} dengan rata-rata 0,4 Tg/tahun (Gambar 6). Nilai CO₂ tersebut setara dengan nilai karbon stok yang hilang karena biomasa pohon yang terangkat pada saat konversi lahan. Apabila stok karbon tanah (*soil pool*) masuk dalam perhitungan, maka nilai emisi CO_{2e} akan bertambah sekitar 2,5 TgCO_{2e}/tahun sehingga total CO_{2e} menjadi 2,9 TgCO_{2e}/tahun. Hal ini menguatkan hasil studi bahwa lebih dari 75% dari stok karbon hutan mangrove tersimpan di tanah (Alongi, 2014). Selama deforestasi berlangsung, tambak yang berasal dari konversi hutan mangrove turut memberikan kontribusi emisi CO₂. Dengan asumsi emisi CO₂ dari permukaan tanah dasar tambak 16 MgCO₂/hektar/tahun yang dihitung langsung dari pengukuran respirasi permukaan tanah (Sidik dan Lovelock, 2013), maka aktivitas budidaya di Delta Mahakam pada periode 1980-2001 memberikan kontribusi emisi CO₂ rata-rata 52 GgCO_{2e}/hektar/tahun.

C. Pengurangan Emisi melalui *Carbon Removal dan Enhancement*

Deforestasi dan degradasi hutan mangrove telah menarik perhatian sehingga

pemerintah dan masyarakat bersama-sama berupaya mengembalikan kondisi Delta Mahakam dengan menyelenggarakan program rehabilitasi hutan mangrove Delta Mahakam. Berbagai kegiatan restorasi yang telah dilakukan termasuk yang dilakukan oleh KLHK dan Kementerian Kelautan dan Perikanan (KKP) antara tahun 2010-2015 (Tabel 2). Selain itu, Total E&P Indonesia sebagai salah satu *stakeholder* utama di Delta Mahakam telah melakukan penanaman mangrove seluas 620 hektar sejak tahun 2000 (Dutrieux *et al.*, 2014).

Pasca puncak deforestasi, perubahan luas hutan mangrove Delta Mahakam cukup signifikan dimana pada tahun 2011 luas hutan mangrove 1,5 kali lipat daripada luas pada tahun 2001. Bertambahnya tutupan hutan mangrove menandakan kembalinya kondisi hutan mangrove (*recovery*) dimana karbon terserap dan disimpan di dalam ekosistem mangrove atau disebut *C sequestration*. Proses *C sequestration* merupakan salah satu bentuk perpindahan karbon (*carbon removal*) ke dalam sistem hutan, yang selama 10 tahun (2001-2011) diperkirakan berkisar 0,67–4,9 TgCO_{2e}/tahun di hutan mangrove Delta Mahakam. Masuknya nilai stok karbon tanah tidak hanya akan memengaruhi perhitungan TREH tetapi juga pada TRH dimana nilai pendugaan serapan karbon (*C sequestration*)

hutan mangrove menjadi lebih tinggi setelah masuknya perhitungan *soil pool*. Perhitungan ini memberikan masukan dalam upaya penyempurnaan PPE sekaligus dapat menjadi daya tarik pasar karbon sehingga memberikan opsi insentif ekonomi, khususnya yang berkaitan dengan kegiatan restorasi hutan pesisir.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Deforestasi mangrove di Delta Mahakam yang disebabkan oleh konversi hutan mangrove menjadi tambak budidaya udang sepanjang tahun 1980-2001 telah mengakibatkan hilangnya hutan mangrove dengan laju 3.183 hektar/tahun. Berdasarkan asumsi dari studi ini, nilai ini setara dengan terlepasnya 0,4 TgCO_{2e}/tahun karena hilangnya stok karbon dari tegakan pohon (*aboveground biomass*) yang berkemampuan menyimpan karbon sebesar 117,2 MgC/hektar. Estimasi emisi CO₂ *aboveground* hanya mencakup kurang dari 20% dari total “potensi” emisi dari deforestasi mangrove karena lebih dari 80% stok karbon tersimpan di tanah (*soil pool*), yaitu sekitar 624,7 MgC/hektar. Total stok karbon dengan penambahan perhitungan *soil pool* adalah sekitar 741,9 MgC/hektar, jauh lebih besar dari pada nilai faktor emisi yang setara stok karbon yang terdapat dalam TREH Indonesia. Selain dari aktivitas deforestasi, aktivitas budidaya selama alih lahan berlangsung turut memberikan kontribusi emisi CO₂, dimana CO₂ dilepaskan dari permukaan tanah tambak. Masuknya perhitungan *soil pool* juga berdampak pada pendugaan serapan karbon (*C sequestration*) hutan mangrove yang diperhitungkan dalam TRH.

B. Saran

Data yang dihasilkan dalam studi ini merupakan *preliminary evidence* untuk memperlihatkan bahwa pendekatan yang digunakan dalam perhitungan ini memberikan nilai rinci potensi hutan mangrove sebagai

sumber emisi dan peran penting stok karbon tanah hutan mangrove dalam TREH Nasional. Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik maka disarankan untuk menambahkan alometrik jenis mangrove nipah dalam perhitungan dimana hutan mangrove Delta Mahakam didominasi oleh nipah sebelum terjadi deforestasi masif. Selain itu, studi ini melakukan asumsi konservatif tanpa nilai ketidakpastian (*uncertainty*) karena keterbatasan data sehingga diperlukan penyempurnaan studi dengan menambahkan *input data* dan analisis ketidakpastian (*uncertainty analysis*).

UCAPAN TERIMA KASIH (ACKNOWLEDGEMENT)

Penulis berterima kasih kepada Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Ekosistem Hutan Dipterocarpa, Samarinda dan Program *Forest Carbon Partnership Facility (FCPF) – Carbon Fund* yang telah memfasilitasi kegiatan lapangan dan penyediaan data terkait dengan tulisan ini. Terima kasih kepada Fatmi Noor'an, Nurul Silva, Muhammad Luthfi Susanto Erwansa dan Weka Mahardi atas bantuan dalam pengumpulan data lapang di Delta Mahakam dan data sekunder lainnya. Studi ini merupakan hasil kegiatan penulis pertama yang didanai oleh 2016/2017 ASEAN-US *Science and Technology Fellowship Program*.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, G.P., Laurier, D., and Thouvenin, J., 1979. Etude sedimentologique du Delta de la Mahakam. Notes et Memoires, TOTAL. *Companie Francaise des Petroles no 15*, 156 pp.
- Alongi, D. M. (2012). Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management*, 3(3), 313–322. <http://doi.org/10.4155/cmt.12.20>
- Alongi, D. M. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, 6, 195–219. <http://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020>
- Alongi, D. M., Murdiyarso, D., Fourqurean, J. W., Kauffman, J. B., Hutahaean, A., Crooks, S.,

- ... Wagey, T. (2016). Indonesia's blue carbon: A globally significant and vulnerable sink for seagrass and mangrove carbon. *Wetlands Ecology and Management*, 24(1), 3–13. <http://doi.org/10.1007/s11273-015-9446-y>
- Boisvilliers, M. De. (2014). *Natural and anthropogenic processes of mangrove regeneration inside aquaculture ponds in the Mahakam Delta, Indonesia*. Montpellier [France]: AgroParisTech
- Bosma, R., Sidik, A. S., van Zwieten, P., Aditya, A., & Visser, L. (2012). Challenges of a transition to a sustainably managed shrimp culture agro-ecosystem in the Mahakam Delta, East Kalimantan, Indonesia. *Wetlands Ecology and Management*, 20(2), 89–99. <http://doi.org/10.1007/s11273-011-9244-0>
- Dutrieux, E., Proisy, C., Fromard, F., Walcker, R., Liman, M., Pawlowski, F., ... Ponthieux, O. (2014, March). *Mangrove restoration in the vicinity of oil and gas facilities: Lessons learned from a large scale project*. Paper presented in Society of Petroleum Engineers-SPE International Conference on Health, Safety and Environment. Long Beach, United States: SPE International (Vol. 2, pp. 1103–1120). <http://doi.org/10.1007/s11273-011-9244-0>
- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L. L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., ... Duke, N. (2011). Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 154–159. <http://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x>
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Pidgeon, E., & Telszewski, M. (Eds.). (2014). *Coastal blue carbon. Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows*. Arlington, Virginia: Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature.
- IPCC. (2006). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories; Prepared by the national greenhouse gas inventories programme*. (H. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe, Eds.). Hayama: Institute for Global Environmental Strategies Japan.
- IPCC. (2014). *2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands*. (T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, & T. G. Troxler, Eds.). Switzerland: IPCC.
- Kauffman, J. B., Heider, C., Norfolk, J., & Payton, F. (2014). Carbon stocks of intact mangroves and carbon emissions arising from their conversion in the Dominican Republic. *Ecological Applications*, 24(3), 518–527.
- KLH. (2012). *Pedoman penyelenggaraan inventarisasi gas rumah kaca nasional*. (R. Boer, R. G. Dewi, U. W. Siagian, M. Ardiansyah, E. Surmaini, D. M. Ridha, ... R. Parinderati., Eds.). Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup.
- KLHK. (2016). *Statistik Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan 2015*. Jakarta: KLHK
- Lovelock, C. E., Ruess, R. W., & Feller, I. C. (2011). CO₂ efflux from cleared mangrove peat. *PLoS One*, 6(6), e21279. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0021279>
- MEF. (2016). *National forest reference emission level for deforestation and forest degradation: In the context of decision 1/CP.16 para 70 UNFCCC (Encourages developing country parties to contribute to mitigation actions in the forest sector)*. Jakarta: MEF.
- Murdiyarto, D., Purbopuspito, J., Kauffman, J. B., Warren, M. W., Sasmito, S. D., Donato, D. C., ... Kurnianto, S. (2015). The potential of Indonesian mangrove forests for global climate change mitigation. *Nature Climate Change*, 5(12), 1089–1092. <http://doi.org/10.1038/nclimate2734>
- Pendleton, L., Donato, D. C., Murray, B. C., Crooks, S., Jenkins, W. A., Sifleet, S., ... Baldera, A. (2012). Estimating global “blue carbon” emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *PLoS One*, 7(9). <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0043542>
- Persoon, G. A., & Simarmata, R. (2014). Undoing “marginality”: The islands of the Mahakam Delta, East Kalimantan (Indonesia). *Journal of Marine and Island Cultures*, 3(2), 43–53. <http://doi.org/10.1016/j.imic.2014.11.002>
- Richards, D. R., & Friess, D. A. (2015). Rates and drivers of mangrove deforestation in Southeast Asia, 2000–2012. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201510272. <http://doi.org/10.1073/pnas.1510272113>
- Sidik, F., & Lovelock, C. E. (2013). CO₂ Efflux from Shrimp Ponds in Indonesia. *PLoS ONE*, 8(6).