

EMISI GAS RUMAH KACA DI PERKEBUNAN KARET

Greenhouse Gas Emissions in the Rubber Plantation

Priyo Adi Nugroho

Pusat Penelitian Karet- Balai Penelitian Sungei Putih, Sungei Putih, Galang Deli Serdang Po Box
1415, Medan 20001

Email: priyo.nugroho@puslitkaret.co.id

Diterima 14 Desember 2015 / Direvisi 18 November 2016 / Disetujui 2 Desember 2016

Abstrak

Karbon dioksida (CO₂), dinitrogen oksida (N₂O) dan metan (CH₄) adalah gas-gas penting di atmosfer yang berkaitan dengan pemanasan global. Sektor pertanian menyumbang 10-14% dari total gas rumah kaca (GRK) yang berasal dari aktivitas manusia (antropogenik). Dinamika penelitian GRK pada perkebunan karet di Indonesia memang tidak secepat komoditas perkebunan lainnya (seperti padi dan kelapa sawit) dan relatif tertinggal dengan beberapa negara produsen karet di dunia. CO₂ dalam kaitannya dengan cadangan karbon adalah topik yang menarik dan banyak diteliti. Metode *Biometric* dan *eddy covariance* sering digunakan dalam mengukur emisi karbon. Hasil penelitian menggunakan kedua metode tersebut menunjukkan bahwa ekosistem perkebunan karet cenderung melepaskan karbon yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan penyerapannya. Jumlah CO₂ yang diserap oleh perkebunan karet untuk setiap hektarnya berkisar antara 29-40 ton/hektare/tahun. Penelitian tersebut umumnya dilakukan pada lahan yang sudah *establish* artinya belum dikaitkan dengan berbagai perlakuan seperti dosis pemupukan, bahan organik, waktu pemupukan, dan pengolahan tanah. Penelitian lebih mendalam mengenai emisi karbon yang berkaitan dengan kultur teknis sangat diperlukan dengan tujuan untuk

mencari teknis budidaya yang paling tepat serta aman bagi lingkungan. Penelitian tentang gas N₂O di perkebunan karet juga masih perlu dilakukan karena jumlah nitrogen dan bahan organik setiap tahunnya cukup besar.

Kata kunci: *Hevea brasiliensis*, CO₂, N₂O, *sequestrasi karbon*, *eddy covariance*

Abstract

Carbon dioxide (CO₂) and nitrous oxide (N₂O) and methane (CH₄) were important gases in the atmosphere, which associated with global warming. The agricultural sector contributes 10-14% of the total greenhouse gases (GHG) from human activity (anthropogenic). The dynamics of GHG research on rubber plantations in Indonesia is not as fast as other commodities (such as palm oil and rice) and relatively underdeveloped with some rubber producing countries in the world. CO₂ in relation to the carbon stock is an interesting topic and any researched. Biometric and eddy covariance methods were often used in measuring carbon emissions. The results of research using both methods showed that ecosystems of rubber plantations tended smaller of carbon relevation than the absorption. The total of CO₂ absorbed by the rubber plantations between 29-40 tons/hectare/year. Generally, the study conducted on establish land, its mean has not been associated with a variety of treatments such as fertilizer doses, organic materials, time of fertilization and soil tillage. Complicated

research about carbon emissions in related to culture technique have necessary. The purpose to find out of technical cultivation of most appropriate and friendly to environment. Also, the similar research about N₂O gas needs to be done because the total of nitrogen and organic material in the rubber plantations is a lot per year.

Keywords: Hevea brasiliensis, CO₂, N₂O, carbon sequestration, eddy covariance

Pendahuluan

Gas rumah kaca (GRK) merupakan isu yang cukup mengemuka dalam beberapa dekade terakhir. Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) melaporkan bahwa telah terjadi kenaikan volume gas rumah kaca (GRK) secara signifikan di atmosfer sejak era industri akibat aktivitas manusia (antropogenik). Karbondioksida (CO₂), dinitrogen oksida (N₂O) dan metan (CH₄) adalah tiga gas utama yang menjadi perhatian banyak peneliti. Sektor pertanian menyumbangkan 10-14% dari total gas yang berasal dari antropogenik.

Salah satu komoditas komersial yang cukup penting di dunia adalah karet (*Hevea brasiliensis*). Food and Agriculture Organization (2006) menyebutkan bahwa sekitar 32% dari total luasan perkebunan karet di dunia berada di Indonesia. Sebagai negara dengan luasan tanaman karet terbesar di dunia maka Indonesia harus dapat mengikuti perkembangan isu dunia dalam kaitannya dengan emisi GRK. Wacana mengenai *carbon trading* yang dilontarkan oleh International Rubber Research Development Board (IRRDB) pada beberapa tahun lalu harus didukung dengan data-data penelitian yang akurat. Tetapi biaya yang relatif tinggi terkait penelitian GRK adalah suatu tantangan yang harus dihadapi.

Di dalam budidaya tanaman, pupuk dan bahan organik diaplikasikan di areal untuk menstimulasi pertumbuhan dan meningkatkan hasil. Aplikasi pupuk dan bahan organik akan mempengaruhi produksi bersih biomasa (NPP), jumlah bahan organik

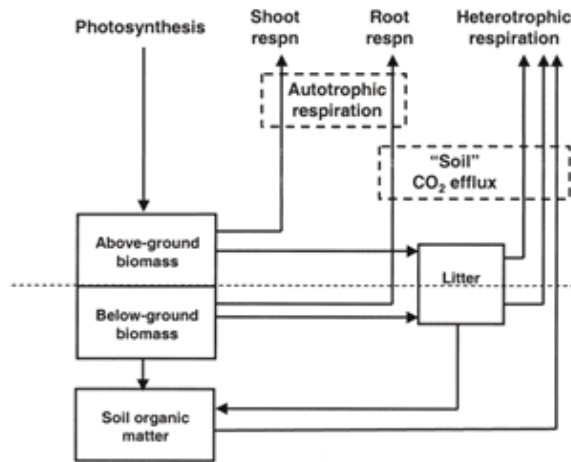
tanah, aktivitas mikroorganisme tanah yang pada gilirannya akan mempengaruhi produksi CO₂ dan N₂O dari dalam tanah (Shimizu *et al.*, 2009; Gong *et al.*, 2009; Nhu *et al.*, 2012; Shimizu *et al.*, 2013). Proses pembentukan CO₂ dan N₂O di dalam tanah sangat dipengaruhi oleh *soil climate* (suhu dan kandungan air tanah), sumber karbon (C), nutrisi, ketersediaan oksigen, dan faktor biologi (Risk *et al.*, 2013).

Walaupun penelitian mengenai emisi GRK asal perkebunan karet di Indonesia relatif kurang populer dan tertinggal dengan negara lain namun hasil-hasil penelitian emisi GRK yang sudah ada cukup penting untuk dipahami dan dijadikan dasar untuk penelitian selanjutnya. Tulisan ini membahas mengenai emisi gas rumah kaca di perkebunan karet berdasarkan hasil penelitian dan studi literatur.

Emisi CO₂ dan N₂O

Permasalahan emisi GRK terutama CO₂ terkadang masih menimbulkan perdebatan karena adanya ketidaksamaan persepsi. Banyak orang mendefinisikan emisi sebagai gas yang dilepaskan tanah ke atmosfer. Padahal sebelum dilepaskan ke atmosfer gas tersebut di serap dahulu oleh tanaman. Terkadang kondisi tersebut tidak dipertimbangkan sehingga menimbulkan perbedaan dalam perhitungan besarnya emisi. Dengan melibatkan faktor tanah dan tanaman, Kirschbaum *et al.* (2001) mendefinisikan emisi CO₂ dengan sangat baik dan komprehensif (Gambar 1).

Pada Gambar 1 terlihat bahwa fiksasi karbon oleh tanaman terjadi melalui fotosintesis dan hasil dari fiksasi ini disebut dengan *Gross Primary Production* (GPP). Diperkirakan setengah dari karbon yang difiksasi hilang dalam metabolisme tanaman lewat respirasi akar dan tajuk (*autotrophic respiration*). Kehilangan karbon di ekosistem juga terjadi melalui respirasi oleh organisme selain tanaman yang hidup di dalam tanah dan lapisan serasah (*heterotrophic respiration*). Organisme tersebut menguraikan bahan organik yang berasal dari guguran biomasa

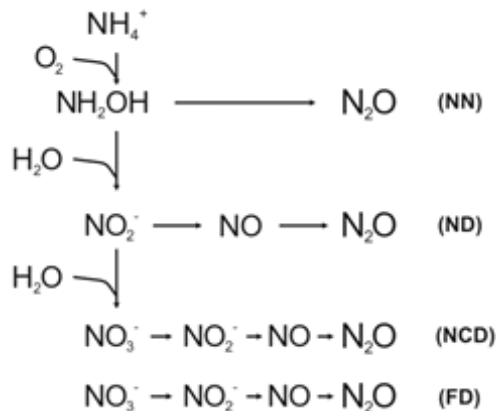


Gambar 1. Diagram aliran karbon di suatu ekosistem (Kirschbaum *et al.*, 2001)

tanaman, kotoran, organisme yang mati dan eksudat akar. *Heterotrophic respiration* juga meliputi karbon yang dilepaskan karena dekomposisi kayu dari tanaman yang masih tegak. Selisih karbon antara GPP dengan *autotrophic respiration* disebut dengan *Net Primary Production* (NPP) yang sangat penting dalam perhitungan emisi karbon.

Jumlah CO_2 hasil dari *autotrophic* dan *heterotrophic respiration* disebut sebagai flux CO_2 tanah atau respirasi tanah (*soil respiration*) yang sering disalahtafsirkan sebagai emisi CO_2 . Emisi CO_2 dalam arti yang sebenarnya adalah selisih antara NPP dengan kehilangan karbon melalui *heterotrophic respiration* yang selanjutnya disebut dengan *Net Ecosystem Exchange* (NEE) atau *Net Ecosystem Production* (NEP).

Proses pembentukan dan pelepasan N_2O sangat berbeda dengan CO_2 . Emisi N_2O lebih dipengaruhi oleh proses transformasi kimia di dalam tanah. Kool *et al.* (2011) mendeskripsikan empat proses utama dalam produksi N_2O yang melibatkan bakteri (*nitrifier* dan *denitrifier*) (Gambar 2) yaitu: N_2O yang diproduksi melalui proses oksidasi ammonia oleh *nitrifier-nitrification* (NN), melalui proses nitrit yang di ubah ke N_2O oleh *nitrifier-denitrification* (ND), melalui proses reduksi nitrat (yang berasal dari proses nitrifikasi) atau *nitrification-coupled denitrification* (NCD) oleh *denitrifier* dan melalui proses reduksi nitrat yang diaplikasikan ke dalam tanah atau *fertilizer-denitrification* (FD).



Gambar 2. Gambaran/alur proses utama produksi N_2O (Kool *et al.*, 2011)

Jumlah N_2O yang dilepaskan dari dalam tanah ke atmosfer dapat langsung dikatakan sebagai emisi N_2O karena tidak terdapat penyerapan gas N_2O oleh tanaman. Dengan kata lain emisi N_2O adalah sama dengan flux N_2O .

Metode Pengukuran Emisi

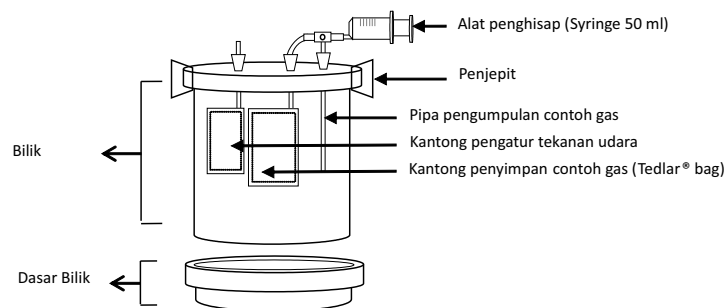
Pengukuran Emisi CO_2 dengan Metode Biometric dan Eddy Covariance

Terdapat beberapa metode yang sering digunakan oleh para peneliti dalam pengukuran emisi karbon diantaranya *biometric* dan *eddy covariance*. Metode *biometric* adalah mengukur tiap komponen dalam suatu ekosistem yang berfungsi melepaskan karbon maupun yang menyerap karbon (komponen biomassa). Komponen yang melepaskan karbon meliputi *autotrophic* dan *heterotrophic respiration* yang diukur menggunakan metode *closed chamber* (Toma and Hatano, 2007). Prinsip dari metode *closed chamber* (bilik tertutup) adalah gas yang dilepaskan oleh tanah untuk sementara waktu dikumpulkan di suatu ruang tertutup dengan ukuran tertentu (*chamber*) dan diukur konsentrasinya pada suatu interval waktu (Gambar 3). Gas yang sudah diambil selanjutnya diukur dengan *infra red gas analyzer* (IRGA) atau *gas chromatography* (GC).

Komponen penyerap karbon yang meliputi biomassa di atas permukaan tanah (*above-ground biomass*), biomassa di atas permukaan

tanah yang sudah mati seperti serasah dan cabang yang runtuh serta biomassa di dalam tanah (*below-ground biomass*) yang terdiri atas akar tanaman yang juga harus dihitung untuk menganalisis neraca karbonnya. *Above-ground biomass* dapat diestimasi dengan dua metode lapangan yaitu metode destruktif dan non-destruktif. Metode destruktif disebut juga dengan metode pemanenan biomassa dan sering digunakan dalam penelitian pada ekosistem hutan (Gibs *et al.*, 2007). Metode ini dilakukan dengan cara memanen seluruh bagian tanaman seperti batang, cabang dan daun (Chung-Wang and Ceulemans, 2004; Ravindranath and Oswald, 2008) dan mengukur berat keringnya (setelah dioven).

Walaupun *allometric* dinilai cukup akurat namun pengerjaannya cukup merepotkan. Kemajuan teknologi informasi terutama penginderaan jauh (*remote sensing*) sangatlah membantu dalam mengestimasi jumlah biomassa tanaman tanpa harus melakukan pengukuran dilapangan seperti pada metode *allometric*. Penginderaan jauh adalah suatu proses mendapatkan data suatu area atau sebuah fenomena dari kejauhan dengan menganalisisnya melalui suatu instrument tanpa kontak dengan objek. Keuntungan dari penggunaan metode ini adalah peneliti dapat memperoleh informasi dari lokasi yang sulit dijangkau/belum terdapat akses jalan. Penginderaan jauh sangat berguna dalam pemetaan dan monitoring vegetasi, tutupan lahan dan perubahan lahan.



Gambar 3. Skema sebuah *closed chamber*

Beberapa penelitian telah dilakukan terkait estimasi biomassa dengan menggunakan *remote sensing*. Nelson *et al.* (1988) memanfaatkan *laser profiling* untuk mengestimasi biomassa dan volume hutan. Steininger (2000); Lu (2005) menggunakan citra Landsat TM untuk mengestimasi *above ground biomass* dari hutan tropis di Bolivia dan Brazil. Lefsky *et al.* (2001) mengembangkan LiDAR *remote sensing*. Teknik ini dirancang untuk memancarkan sinyal yang dapat menembus kanopi tanaman. LiDAR systems mengirimkan gelombang dari cahaya laser dan mengukur waktu pengembalian sinyal lalu secara langsung dapat menghitung tinggi dan struktur vertikal hutan.

Net Ecosystem Production (NEP) atau *Net Ecosystem Exchange* (NEE) yaitu pertukaran net CO₂ antara ekosistem dengan atmosfer (Barr *et al.*, 2004). NEP dapat diukur secara langsung dengan menggunakan *Eddy Covariance* yang merupakan sebuah metode mikrometeorologi yang mana flux CO₂, uap air dan kecepatan angin tiga dimensi diukur secara *realtime* (Baldochi, 2003).

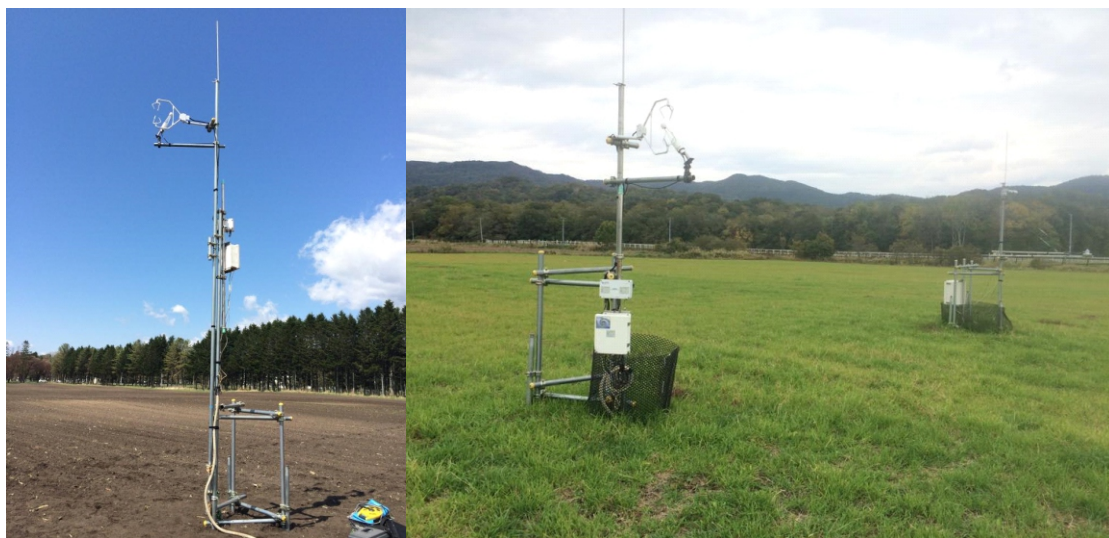
Sistem *eddy covariance* terdiri atas tiga dimensional *sonic anemometer* atau alat pengukur angin (CSAT Campbell USA) yang dipasang secara bersama-sama dengan *infra red gas analyzer* (Li 7500, Li-Cor, USA). Sistem ini

juga dilengkapi dengan sebuah jaringan radiometer dan sensor suhu dan kelembaban udara (HMP 45, Vaisala, Finland). Alat-alat tersebut dipasang pada sebuah tower yang diletakkan beberapa meter di atas tajuk tanaman (Gambar 4).

Data-data klimatologi lainnya seperti curah hujan, suhu maksimum-minimum, panjang penyinaran juga diperlukan tetapi dapat diperoleh dari stasiun klimatologi (Annamalainathan *et al.*, 2011). Data hasil pengukuran selanjutnya diolah dengan software tertentu misal *Eddy Re-software*. Terkadang kendala di lapangan membuat data tidak terekam utuh sehingga diperlukan suatu koreksi agar data yang diperoleh menjadi sempurna. Metode *Gaps filling* biasanya sering digunakan untuk melengkapi dan mengoreksi data yang hilang dengan menggunakan persamaan matematis.

Pengukuran emisi N₂O dengan *Closed Chamber*

Pengukuran emisi N₂O relatif lebih sederhana dibandingkan dengan CO₂. Metode *Closed chamber* (Gambar 3) adalah yang umum digunakan dan prinsipnya sama seperti pengukuran fluks CO₂, hanya saja interval waktu pengambilan sample yang relatif lebih



Gambar 4. *Eddy covariance tower* dipadang rumput

lama dibandingkan CO₂. Jika pengambilan sampel CO₂ dilakukan pada interval 0 dan 30 menit maka untuk N₂O pengambilan sample gas dilakukan pada interval 0, 15 dan 30 menit (Nugroho *et al.*, 2015). Gas yang diperoleh lalu dianalisis konsentrasinya menggunakan *Gas chromatography* (GC) yang dilengkapi dengan *Electron Capture Detector* (ECD).

Pengukuran gas rumah kaca di perkebunan karet

Penelitian mengenai emisi karbon di perkebunan karet lebih terfokus pada jumlah cadangan karbon (*carbon stock*), dalam kaitannya dengan penambatan karbon oleh vegetasi (*carbon sequestration*). Penelitian di Thailand oleh Chantuma *et al.* (2012) menunjukkan bahwa setiap bagian tanaman karet mengandung karbon yang berbeda-beda dengan rata-rata 44,52% dari total kering tanaman. Berat batang dan cabang pada tanaman karet yang berumur 1-20 tahun memiliki proporsi yang paling besar yaitu 71,1-87,5% dari total kering. Berat tajuk termasuk daun memiliki porsi yang lebih rendah yaitu 1,1-6,7%. Tanaman yang semakin tua akan mengalami peningkatan persentase berat tajuknya misalnya pada umur 15-20 tahun persentase kering daun adalah 2,0-2,3% dari berat totalnya. Bagian perakaran dan kaki gajah berada pada kisaran 10,3-20,8% dari total berat kering.

Penelitian ini selanjutnya lebih disempurnakan lagi oleh Saungreksawong *et*

al. (2012) yang menghitung simpanan karbon dalam ekosistem (*ecosystem carbon storages*). Dalam konteks ini selain karbon yang bersumber dari biomassa, karbon yang berasal dari dalam tanah juga diperhitungkan. *Ecosystem carbon storage* dari beberapa ekosistem tanaman karet berbagai umur dibandingkan dengan hutan alami disajikan pada Tabel 1.

Kedua penelitian tersebut belum merinci secara detail berapa karbon yang dilepaskan dan yang diserap oleh tanaman karet sehingga data tersebut menjadi kurang sempurna. International Rubber Research and Development Board (2009) menyebutkan bahwa *carbon sequestration* di beberapa negara produsen karet di dunia cukup besar yaitu 29-40 ton karbon/hektar/tahun dan sangat potensial untuk diajukan dalam skema *carbon trading* (Tabel 2).

Di Indonesia penelitian yang mulai terperinci mengenai neraca karbon telah dilakukan oleh Susilawati (2011) di perkebunan karet klon PR 300 berumur 20, 25 dan 31 tahun yang berlokasi di Cibungur Jawa Barat. Dalam penelitian tersebut besarnya respirasi tanah yang dilepaskan ke udara juga dihitung dengan menggunakan metode penangkapan karbon oleh kalium hidroksida (KOH) dan dititrasi dengan asam klorida (HCl) (Anderson, 1982). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa serapan karbon semakin besar seiring dengan pertambahan umur tanaman karet. Sebaliknya laju emisi semakin mengecil (Gambar 5).

Tabel 1. *Ecosystem carbon storage* dari beberapa ekosistem karet, *Eucalyptus* dan hutan alami

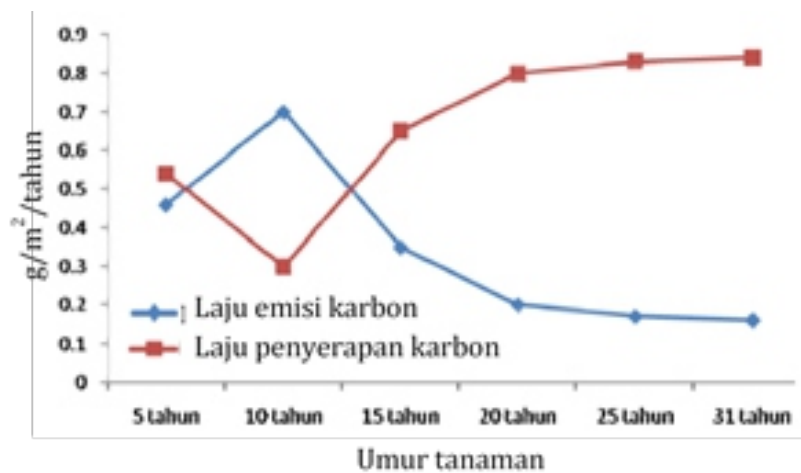
Ekosistem	Karbon biomassa		Karbon tanah		Total
	Ton/ha	%	Ton/ha	%	Ton/ha
Karet 1 tahun	0,87	3,0	21,7	97,0	22,5
Karet 5 tahun	10,9	22,0	37,4	73,0	48,3
Karet 10 tahun	26,7	48,0	28,6	52,0	55,3
Karet 15 tahun	80,2	70,0	31,2	30,0	111,5
Karet 20 tahun	80,6	87,0	12,0	13,0	92,6
Hutan alami	45,7	57,0	33,5	43,0	79,2
Hutan Tanaman Industri <i>Eucalyptus</i> 6-8 tahun	75,5	84,1	14,2	15,9	89,7

Sumber: Saungreksawong *et al.* (2012), Du *et al.* (2015) diolah

Tabel 2. Simpanan karbon dalam biomassa, tanah dan CO₂ sequestration di negara-negara produsen karet alam

Negara	Simpanan Karbon dalam Biomassa (ton/ha)	Simpanan Karbon dalam Tanah (ton/ha)	Total Simpanan Karbon (ton/ha)	Rata-rata CO ₂ Sequestration (ton CO ₂ ha/tahun)
Thailand	217,6	49,0	266,6	33,26
Malaysia	258,8	54,4	313,2	38,33
India	142,0	23,0	165,0	28,84
Indonesia	139,0	45,0-60,0	184,6-199,6	27,09-29,30
Ghana	82,3	52,6	135,0	35,30
Brazil	47,4	105,6	153,0	40,11
Kisaran	47-259	23-106	135-313	29-40

Sumber: International Rubber Research and Development Board (2009)



Gambar 5. Laju emisi dan laju penyerapan karbon perkebunan karet

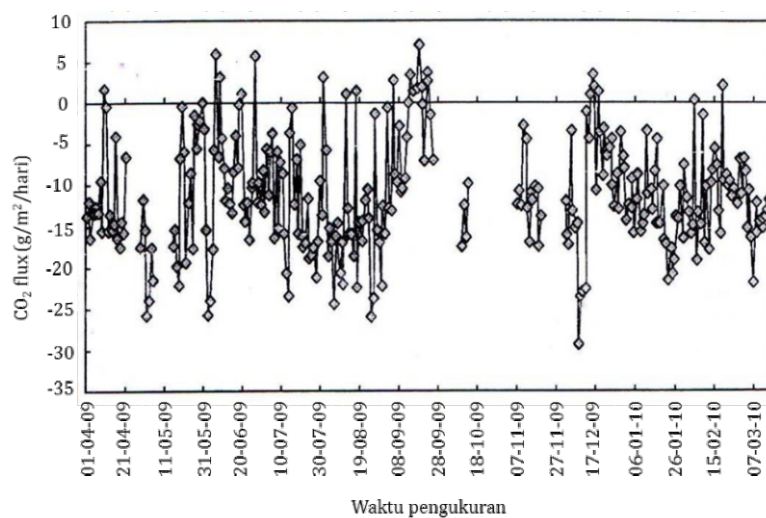
Walaupun pengukuran respirasi tanah tersebut hanya menggunakan metode yang sangat sederhana yaitu titrasi dan belum mewakili sepenuhnya jumlah karbon yang diemisikan di areal pertanaman, namun setidaknya data ini memperkuat bahwa tanaman karet adalah *carbon sequestration* yang bermanfaat secara ekonomi maupun lingkungan. Penelitian emisi karbon yang relatif lebih sempurna telah dilakukan di India oleh Annamalainathan *et al.* (2011)

menggunakan metode *eddy covariance* dengan sensor yang dipasang pada tower setinggi 18 meter. Data yang dihasilkan dari metode ini adalah *Net Ecosystem Exchange* (NEE) yang secara langsung menggambarkan apakah kebun karet melepaskan atau menyerap karbon. Apabila tanaman menyerap CO₂ maka flux akan menunjukkan nilai negatif (influx) dan menunjukkan nilai positif apabila melepaskan CO₂ (efflux).

Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa fluks CO_2 tahunan pada ekosistem perkebunan karet umur 4-5 tahun bernilai negatif, ini berarti bahwa jumlah karbon yang diserap oleh tanaman lebih besar dibanding karbon yang dilepaskan ke udara (Gambar 6). Rata-rata NEE dari penelitian tersebut adalah $11 \text{ g CO}_2 \text{ g/m}^2/\text{hari}$ atau $33,5 \text{ ton CO}_2/\text{ha}/\text{tahun}$. Angka ini juga mengindikasikan bahwa ekosistem perkebunan karet bukan merupakan sumber (*source*) melainkan sebagai *sink* bagi CO_2 atmosferik.

Penelitian mengenai CO_2 di perkebunan karet telah dilakukan di beberapa lokasi di dunia namun tidak demikian dengan N_2O . Penelitian mengenai N_2O sudah sangat berkembang pada komoditas lain terutama tanaman semusim yang menggunakan pupuk dengan jumlah yang cukup besar. Penggunaan pupuk nitrogen dan penambahan bahan organik di perkebunan karet yang cukup tinggi setiap tahunnya sangat potensial menghasilkan N_2O yang dapat dilepaskan ke udara. Walaupun konsentrasi N_2O di udara tidak setinggi CO_2 tetapi gas ini memiliki daya rusak yang lebih kuat (298 kali) dibandingkan dengan CO_2 sehingga mitigasi terhadap N_2O dianggap sangat penting oleh para peneliti.

Di Indonesia pengukuran N_2O di perkebunan karet pernah dilakukan di perkebunan rakyat di lahan gambut yang diaplikasikan pupuk kandang 4 ton/ha . Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa besarnya N_2O yang diemisikan sebesar $66\text{-}67 \text{ kg/ha}/\text{tahun}$ (Pradipta, 2012). Kondisi perkebunan karet rakyat di Indonesia yang pada umumnya kurang seragam dan pemeliharaan yang minim tentunya mempengaruhi data yang diperoleh. Data ini secara umum belum dapat mewakili emisi N_2O asal perkebunan karet karena sebagian besar tanaman karet di Indonesia ditanam di lahan kering yang tentunya akan mengemisikan N_2O yang berbeda dengan lahan gambut. Pengembangan penelitian yang lebih tajam masih sangat diperlukan terkait pengukuran emisi N_2O di perkebunan karet. Sebagai negara penghasil karet alam Indonesia seyogyanya memulai dan fokus dalam penelitian gas rumah kaca. Penelitian gas memang membutuhkan biaya yang tidak sedikit namun peluang kerjasama dengan lembaga riset lain dan universitas masih sangat terbuka.



Gambar 6. Flux CO_2 harian di perkebunan karet

Kesimpulan

Tanaman karet merupakan tanaman penyerap CO₂ yang cukup efektif yaitu sebesar 29-40 ton CO₂/ha/tahun. Penelitian gas rumah kaca yang cukup komprehensif di perkebunan karet sudah dilakukan di beberapa negara seperti di Thailand dengan metode *biometric* dan di India dengan metode *Eddy covariance*. Namun penelitian yang lebih mendalam terkait emisi karbon dalam hubungannya dengan kultur teknis budidaya yang paling tepat dan aman bagi lingkungan masih sangat diperlukan. Selain emisi CO₂, penelitian mengenai emisi gas lainnya seperti N₂O (dinitrogen oksida) dan CH₄ (metana) juga penting dilakukan mengingat rentang kondisi lingkungan penanaman karet yang cukup luas.

Daftar Pustaka

- Anderson, J.P.E. (1982). Soil Respiration. In: A.L Page, R.H. Miller ; D.R. Keeney (eds). *Method of Soil Analysis Part 2, Chemical and Microbiological Properties*. Madison : Soil Science Society of America, Inc Publisher.
- Anmalainathan, K., Satheesh, P.R., and Jacob, J. (2011). Ecosystem flux measurements in rubber plantations. *Natural Rubber Research*, 24(1), 28-37.
- Baldocchi, D.D. (2003). Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystem: past, present and future. *Global Change Biology*, 9, 1-14.
- Barr, A.G., Black, T.A., Hogg, E.H., Kljun, N., Morgenstern, K., and Nesic, Z. (2004). Inter-annual variability in the leaf area index of a boreal aspen-hazelnut forest in relation to net ecosystem production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 126, 237-255.
- Chantuma, A., Kunarasiri, A., and Chantuma, P. (2012). Rubber new planting in Thailand: towards the world affected on climate change. *Rubber Thailand Journal*, 1, 40-47.
- Chung-Wang, X., and Ceulemans, R. (2004). Allometric relationships for below and above ground biomass of young scots pines. *Forest Ecology and Management*, 203, 177-186.
- Food and Agriculture Organization. (2006). *FAO data 2006*. Diakses dari <http://faostat.fao.org>
- Gibs, H.K., Brown, S., and Niles, J.A. (2007). Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, 2, 1-13.
- Gong, W., Yan, X., Wang, J., Hu, T., and Gong, Y. (2009). Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northttern china. *Geoderma*, 149, 318-324.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007). Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge. In B.Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, & L.A.Meyer. *Climate Change 2007*. Cambridge: Cambridge University Press.
- International Rubber Research and Development Board. (2009). The effect of climate change on NR cultivation and productivity. *IRRDB conference 30th*, Kuala Lumpur, November 2009.
- Kirschbaum, M.U.F., Eamus, D., Gifford, R.M., Roxburgh, S.H., Sands, P.J. (2001). Definitions of some ecological terms commonly used in carbon accounting. In: M.U.F. Kirschbaum, and R. Mueller (eds). *Net Ecosystem Exchange Workshop* (pp.18-20). Canberra : Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting
- Kool, D.M., Dolfing, J., Wrage, N., and Van Groenigen, J.W. (2011). Nitrifier denitrification as a distinct and significant source of nitrous oxide from soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 43, 74-178.
- Lefsky, M.A., Cohen, W.B., Harding, D.J., Parker, G.G., and Acker, S.A. (2001). LiDAR remote sensing of above-ground biomass in three biomass. *Global Ecology and Biogeography*, 11, 393-399.

- Lu, D. (2005). Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 2509-2525.
- Nelson, R., Krabil, W., and Tonelli, J. (1988). Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*. 24, 247-267.
- Nhu, T.P., Ki, H.K., Parker, D., Eui, C.J., Jae, H.S., and Chang, S.C. (2012). Effect of beef cattle manure application rate on CH₄ and CO₂ emissions. *Atmospheric Environment*, 63, 327-336.
- Nugroho, P.A., Shimizu, M., Nakamoto, H., Nagatake, A., Suwardi, S., Sudadi, U., and Hatano, R. (2015). Nitrous oxide fluxes from soil under different crops and fertilizer management. *Plant Soil Environment*, 61(9), 385–392.
- Pradipta, A. (2012). *Kajian penggunaan amelioran pupuk kandang terhadap emisi gas rumah kaca pada tanah yang diambil dari beberapa agroekosistem kebun karet di lahan gambut*. Magister. Thesis, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Ravindranath, N.H., and Ostwald, M. (2008). Methods for estimating above ground biomass. In N.H. Ravindranath and M. Ostwald (eds). *Carbon inventory methods: Handbook for greenhouse gas inventory, carbon mitigation and roundwood production projects* (pp.113-114). Dordrecht : Springer Science + Business Media B.V.
- Risk, N., Snider, D., and Wagner-Riddle, C. (2013). Mechanisms leading to enhanced soil nitrous oxide fluxes induced by freeze-thaw cycles. *Canadian Journal of Soil Science*, 93, 401-414.
- Saungreksawong, C., Khamyong, S., Anongrat, N., and Pinthong, J. (2012). Growth and carbon stocks para rubber plantations on phonpisai soil series in Northeastern Thailand. *Rubber Thailand Journal*, 1, 1-18.
- Shimizu, M., Marutani, S., Desyatkin, A.R., Jin, T., Hata, H., and Hatano, R. (2009). The effect of manure application on carbon dynamics and budgets in a managed grassland of Southern Hokkaido, Japan. *Agriculture Ecosystem and Environment*, 130, 31-40.
- Shimizu, M., Hatano, R., Arita, T., Kouda, Y., Mori, A., Maatsura, S., Niimi, M., Jin, T., Desyatkin, A.R., Kawamura, O., Hojito, M., and Miyata, A. (2013). The effect of fertilizer manure application on CH₄ and N₂O emissions from managed grasslands in Japan. *Soil Science Plant Nutrition*, 5, 69-86.
- Steininger, M.K. (2000). Sateleite estimation of tropical secondary forest above ground biomass: data from Brazil and Bolivia. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 1139-1157.
- Susilawati, S. (2011). *Pendugaan cadangan karbon (carbon stock) dan neraca karbon pada perkebunan karet*. Skripsi, Institut Pertanian Bogor, Bogor.
- Toma, Y., and Hatano, R. (2007). Effect of crop residue C: N ratio on N₂O emissions from gray lowland soil in Mikasa Hokkaido Japan. *Soil Science Plant Nutrition*, 53, 198-205.
- Vashum, K.T., and Jayakumar, S. (2012). Methods to estimate above-ground biomass and carbon stock in natural forests- a review. *Journal of Ecosystem Ecography*, 2:116. doi: 10.4172/2157-7625.1000116