

Emisi gas rumah kaca, cadangan karbon serta strategi adaptasi dan mitigasi pada perkebunan kopi rakyat di Nusa Tenggara Barat

Greenhouse gas emission, carbon stock, adaptation and mitigation strategies at smallholder coffee plantation in West Nusa Tenggara

Ali PRAMONO^{1*)} & SADMAKA²⁾

¹⁾Balai Penelitian Lingkungan Pertanian, Jalan Raya Jakenan-Jaken Km 5 Pati, 59182 Jawa Tengah, Indonesia

²⁾Balai Perlindungan Tanaman Perkebunan, Dinas Pertanian dan Perkebunan Provinsi Nusa Tenggara Barat, Jl. Pejanggik No.10 Kota Mataram, 83216 Nusa Tenggara Barat, Indonesia

Diterima tgl 23 Februari 2018/ disetujui tgl 21 September 2018

Abstract

Global warming and climate change are the world's major environmental, social and economic problems. The agricultural sector can act as an affected victim, greenhouse gas (GHG) contributor, and GHG absorber. Plantations have a very strategic role in the national action plan in GHG mitigation, because it has a great ability to absorb CO₂. Therefore, it is necessary to determine the carbon stocks and GHG emissions from plantation management. The objectives of the study were to measure GHG emissions, to determine carbon stocks, and to define adaptation and mitigation strategies on climate change in existing coffee plantation systems. Gas samples were taken from 5 sampling points as replications by closed chamber method. Carbon stock estimation was done by destructive technique, including biomass of understorey and non-wood necromass. The results showed that the coffee plantations less than 10 years-old at the study sites emitted 47 tons CO₂-e/ha/year and stored carbon of 91.4 tons C/ha. Climate change adaptation strategies can be done by the application of good agricultural practices (GAP) and the use of drought-tolerant clones, mulches, shade trees, multiple cropping systems, silt pits and biophore techniques. The GHG mitigation can be done by the utilization of plantation waste as a source of organic fertilizer, biochar, animal feed, and bioenergy sources through the development of models of integration crop and livestock systems, as well as rejuvenation of plantation crops to increase carbon sinks and stocks.

[Keywords: *climate change, carbon sequestration, coffee plantations*]

Abstrak

Pemanasan global dan perubahan iklim menjadi masalah utama lingkungan, sosial dan ekonomi dunia hingga saat ini. Sektor pertanian dapat berperan sebagai korban terdampak, penyumbang Gas Rumah Kaca (GRK), dan

penyerap GRK. Tanaman perkebunan mempunyai posisi sangat strategis dalam rencana aksi nasional di sektor pertanian, karena memiliki kemampuan besar dalam menyerap CO₂. Oleh karena itu, pengukuran cadangan karbon dan emisi GRK dari pengelolaan perkebunan perlu dilakukan. Tujuan penelitian adalah untuk mengukur emisi GRK, menentukan cadangan karbon dan menetapkan strategi adaptasi dan mitigasi terhadap perubahan iklim pada sistem perkebunan kopi rakyat eksisting di Propinsi Nusa Tenggara Barat. Pengambilan contoh gas dilakukan di lima titik sampling dengan metode sungkup tertutup. Penghitungan cadangan karbon di atas permukaan tanah dilakukan dengan cara destruktif yang mencakup juga penetapan cadangan karbon biomassa tanaman bawah dan biomassa serasah (ne-kromas non kayu). Hasil penelitian menunjukkan bahwa perkebunan kopi rakyat yang berumur kurang dari 10 tahun di lokasi penelitian meng-emisikan karbon sebesar 47 ton CO₂-e/ha/tahun dan menyimpan cadangan karbon sebesar 91,4 ton C/ha. Strategi adaptasi terhadap perubahan iklim dapat dilakukan dengan penerapan praktik Pertanian yang baik/ *Good Agricultural Practices* (GAP), penggunaan klon tahan kekeringan, penggunaan mulsa organik, pemanfaatan pohon penayang dan sistem tumpang sari, pembuatan rorak dan biopori. Mitigasi GRK dapat dilakukan dengan pemanfaatan limbah tanaman perkebunan sebagai sumber pupuk organik, arang (*biochar*), pakan ternak, dan sumber bioenergi melalui pengembangan model sistem integrasi tanaman dan ternak, serta peremajaan tanaman perkebunan yang sudah menurun produktivitasnya untuk meningkatkan serapan dan cadangan karbon.

[Kata kunci : perubahan iklim, sekuestrasi karbon, perkebunan kopi]

Pendahuluan

Perubahan iklim disebabkan oleh meningkatnya gas rumah kaca (GRK) akibat kegiatan

*) Penulis korespondensi: ali_pramono@yahoo.com

antropogenik dan non antropogenik. Suhu global telah meningkat sebesar 0,3-0,6 °C selama 100 tahun terakhir dan diperkirakan akan meningkat lebih lanjut 1-3,5 °C hingga tahun 2100, disertai dengan perubahan curah hujan, pola badai, dan frekuensi kekeringan yang semakin sering (Kattenberg *et al.*, 1996). Perubahan iklim dapat menyebabkan penurunan hasil tanaman dan mengancam keamanan pangan. Kenaikan suhu 1°C dapat menurunkan hasil panen kopi arabika sebesar 137 kg/ha (Craparo *et al.*, 2015; Ovalle-Rivera *et al.*, 2015). Meningkatnya kejadian iklim ekstrim seperti kekeringan akibat El Nino menurunkan produksi kopi sebesar 10%, sedangkan musim hujan panjang akibat La Nina menurunkan produksi hingga 80% (Syakir & Surmaini, 2017). Peningkatan suhu udara juga dapat menyebabkan ledakan hama dan penyakit tanaman (Magina *et al.*, 2011) sehingga sulit untuk menaikkan produksi kopi.

Konsentrasi GRK meningkat seiring dengan aktivitas manusia. Pertanian berkontribusi 10% - 12% terhadap emisi GRK secara global (Smith *et al.*, 2007). Kegiatan pertanian mengemisikan GRK berupa CO₂ melalui konversi lahan serta pengelolaan tanah dan penggunaan energi, N₂O yang bersumber dari kegiatan pemupukan, serta CH₄ dari pengelolaan limbah organik (Flessa *et al.*, 2002). Secara global, emisi CH₄ dan N₂O meningkat sebesar 17% dari tahun 1990 hingga 2005 (Smith *et al.*, 2007). Karbondioksida berkontribusi terbesar meningkatkan GRK dan pemanasan global. Saat ini konsentrasi CO₂ di atmosfer mencapai 407 ppm dan konsentrasinya terus meningkat (ESRL, 2018). Dinitrogen oksida (N₂O) merupakan GRK antropogenik yang berasal dari penggunaan pupuk dalam kegiatan pertanian dan kotoran ternak (Reay *et al.*, 2012). Nitrogen yang terkandung dalam pupuk dan kotoran hewan meningkatkan proses nitrifikasi dan denitrifikasi secara alami. Bakteri berperan dalam proses tersebut di dalam tanah yang mengubah nitrogen menjadi gas N₂O (Willey & Chameides, 2007).

Tanaman kopi di Indonesia umumnya diusahakan oleh petani dalam bentuk perkebunan rakyat (*smallholder*). Produksi nasional kopi pada tahun 2015 adalah sebesar 639.412 ton (Ditjenbun, 2016). Kementerian Pertanian menargetkan produksi kopi pada tahun 2019 sebesar 0,79 juta ton, namun peningkatan produksinya masih rendah (Kementan, 2015). Berbagai penyebab rendahnya produktivitas kopi rakyat antara lain ialah teknik budidaya masih tradisional, tanaman banyak yang sudah tua, dan sebagian besar belum menggunakan klon unggul. Peluang untuk meningkatkan produksi dan produktivitas tanaman masih terbuka dengan menerapkan inovasi teknologi yang sesuai dengan kondisi agroekologi setempat. Disamping itu, teknologi tersebut harus mudah dan murah

sehingga petani tidak sulit untuk mengadopsinya dengan cepat.

Pengelolaan lahan untuk pertanian menjadi salah satu sumber emisi N₂O. Emisi N₂O dari tanah karena penggunaan pupuk kimia nitrogen yang terdapat pada pupuk urea dan ammonium sulfat menjadi N₂O dan NO₂. Penggunaan bahan organik merupakan komponen dalam konservasi sumber daya lahan pertanian berkelanjutan. Penambahan bahan organik ke dalam tanah berfungsi untuk meningkatkan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah (Marinho *et al.*, 2014). Akan tetapi, pemberian bahan organik dapat juga menyebabkan emisi GRK oleh proses seperti metanogenesis, nitrifikasi, dan denitrifikasi (Thangarajan *et al.*, 2013).

Mitigasi GRK bertujuan untuk mengurangi emisi GRK terutama N₂O dan CH₄ dan meningkatkan penyerapan GRK atmosfer terutama CO₂ dalam berbagai bentuk cadangan karbon (*sink*) dalam bahan organik tanah dan biomassa tanaman serta arang (*biochar*) (Barthod *et al.*, 2016). Sektor pertanian berperan positif dalam membantu mengurangi CO₂ di atmosfer, dengan cara menyerap dan menyimpan karbon dalam biomassa tanaman, dan meningkatkan kandungan karbon dalam tanah. Budidaya konservasi dapat menambah lebih banyak karbon yang dikembalikan ke lahan dan memperlambat laju proses konversi karbon dalam bahan organik menjadi gas CO₂ (Smith & Olesen, 2010; Hergoualc'h *et al.*, 2012). Tujuan penelitian ini untuk mengukur emisi GRK, menentukan cadangan karbon dan menetapkan strategi adaptasi dan mitigasi terhadap perubahan iklim pada sistem perkebunan kopi rakyat eksisting di Propinsi Nusa Tenggara Barat.

Bahan dan Metode

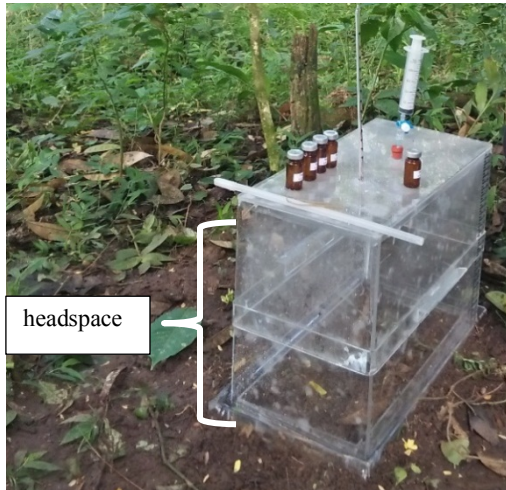
Lokasi penelitian

Penelitian dilakukan di lahan perkebunan kopi rakyat Dusun Rumbuk, Desa Batu Mekar, Kecamatan Lingsar Kabupaten Lombok Barat, Propinsi Nusa Tenggara Barat. Pengambilan sampel GRK dan biomassa dilakukan pada tanggal 4-6 Agustus 2017. Kondisi lahan berlereng dengan ketinggian tempat berkisar 300-325 m dpl. Tipe penggunaan lahan di lokasi penelitian adalah lahan kopi muda yang berumur kurang dari 10 tahun dengan jarak tanam 2,5 x 2,5 m, kebun campuran dengan tanaman pelindung sengon dan durian. Tanaman kopi sebagian besar sudah disambung pucuk dengan umur 2-3 tahun. Jenis kopi yang ditanam adalah robusta dan persentase jumlah tanaman kopi sekitar 70%. Kondisi lahan ditumbuhi gulma yang didominasi gulma berdaun lebar.

Pengukuran emisi GRK

Pengambilan contoh gas di lapang dilakukan pada waktu pagi dan siang. Pengambilan contoh

gas dilakukan di lima titik sampling pada jarak 25 meter dengan metode sungkup tertutup (*close chamber*) berukuran 20x20x40 cm³. Alat-alat yang digunakan antara lain adalah penampang dan sungkup. Sungkup mempunyai *headspace* yang merupakan ruang udara (Gambar 1).



Gambar 1. Sungkup untuk pengambilan sampel GRK
Figure 1. *Close chamber for taking GHG samples*

Pada bagian atas sungkup dilengkapi dengan lubang yang ditutup dengan septum untuk mengambil sampel gas serta lubang untuk tempat termometer. Waktu pengambilan sampel adalah pagi (pukul 07.00), dan siang hari (pukul 13.00). Pemasangan penampang sungkup dilakukan sehari sebelum pengambilan sampel. Pengambilan sampel gas di lapang dilakukan selama tiga hari berturut-turut. Penampang dipasang rata dengan permukaan tanah, kemudian diisi dengan air. Sungkup diletakkan di atas penampang dan dipastikan tidak ada kebocoran gas di bawah bagian sungkup. Termometer dipasang pada lubang yang ada pada bagian tutup/ atas sungkup. Penutup karet/ septum pada tempat pengambilan sampel udara dibuka ± 2-3 menit agar konsentrasi udara dalam sungkup menjadi stabil. Setelah 2-3 menit, sumbat karet ditutupkan pada lubang septum. Gas diambil dengan menggunakan injektor (*syringe*) yang dipasang pada posisi tegak lurus pada karet septum tempat mengambil contoh gas. Interval waktu pengambilan contoh adalah 10, 20, 30, 40, dan 50 menit dalam satu rangkaian pengambilan contoh gas. Injektor ditutup dengan septum secepat mungkin untuk menghindari kebocoran atau kran *syringe* segera ditutup. Ketinggian air dari permukaan tanah dan perubahan suhu dalam sungkup selalu dicatat saat pengambilan contoh gas. Contoh gas segera dibawa ke laboratorium gas rumah kaca untuk analisis konsentrasi gas N₂O dan CO₂-nya. Perhitungan fluks dengan menggunakan rumus (1) berdasarkan metode *International Atomic Energy Agency* (IAEA, 1992).

$$E = \frac{dc}{dt} \times \frac{V_{ch}}{A_{ch}} \times \frac{mW}{mV} \times 273,2 / (273,2 + T) \dots\dots(1)$$

Dimana

- E : Emisi gas CO₂ atau N₂O (mg/m²/hari)
- dc/dt : Perbedaan [CO₂ atau N₂O] per waktu (ppm/menit)
- V_{ch} : Volume boks (m³)
- A_{ch} : Luas boks (m²)
- mW : Berat molekul CO₂ atau N₂O (g)
- mV : Tetapan volume molekul (22,41 l)
- T : Suhu rata-rata selama pengambilan sampel (°C); Nilai 273,2: Tetapan suhu kelvin.

Pengukuran cadangan karbon (C-Stock)

Penghitungan cadangan karbon di atas permukaan tanah dilakukan dengan cara merusak biomassa (*destructive*), menimbang bobot kering biomassa, dan mengukur/ menganalisa kandungan karbon setiap bagian tanaman. Kemudian dilakukan juga penentuan cadangan karbon biomassa tanaman bawah (*understorey*) dan biomassa serasah (nekromas non kayu). Pengukuran parameter tanaman untuk keperluan perhitungan karbon stok tanaman terdapat pada Gambar 2. Perhitungan cadangan karbon yang terdapat dalam tanaman menggunakan rumus (2) (Hairiah *et al.*, 2011).

Cadangan karbon = Berat Kering biomassa x % C Organik tanaman..... (2)

Pengukuran cadangan karbon juga dilakukan dengan cara tanpa merusak biomassa tanaman (*non destructive*) (Hairiah *et al.*, 2011), yaitu dengan cara mengukur contoh tanaman, identifikasi jenis tanaman, kemudian dihitung dengan menggunakan persamaan alometrik (Tabel 1). Tahap pengukuran cadangan karbon meliputi pembuatan plot contoh pengukuran, pengukuran biomassa tanaman (*destructive* dan *non destructive*), pengukuran nekromas, persentasi kandungan karbon tanaman, dan berat kering tanaman yang diukur di laboratorium, serta kandungan karbon suatu penggunaan lahan dapat diestimasi.

Pengukuran biomassa tanaman

Pengukuran biomassa tanaman dilakukan dengan mencatat nama semua pohon yang ada dalam Sub Plot dalam blanko yang tersedia. Keliling pohon untuk semua pohon yang berada dalam Sub Plot diukur dengan menggunakan meteran. Jika terdapat pohon dengan diameter > 30 cm atau keliling > 94 cm, harus dibuat Plot Besar. Nama semua pohon yang berdiameter > 30 cm dicatat, dan *diameter of breast height* (dbh) untuk semua pohon dengan diameter > 30 cm diukur.

Pengukuran tanaman bawah (understorey)

Semua tanaman bawah dan pohon yang berdiameter < 5 cm, yang berada di dalam Sub Sub Plot (6 contoh) diambil contoh tanamannya dan dimasukkan ke dalam kantong kertas. Berat

basah dari tanaman (daun dan batang dipisahkan) ditimbang. Sub contoh tanaman dari masing-masing biomassa daun, batang sekitar 100-300 gram diambil dan dikeringkan untuk dianalisis persen kandungan C tanaman di laboratorium. Berat kering oven (105°C) dan persen karbon tanamannya dicatat.

Pengukuran nekromas/ serasah tanaman

Semua serasah di dalam Sub Sub Plot (6 contoh) diambil dan dimasukkan ke dalam kantong, kemudian berat serasah ditimbang. Sub contoh serasah dari masing-masing Sub Sub Plot diambil sekitar 100-300 gram dan dikeringkan dan dianalisis untuk penetapan persen kandungan C tanaman di laboratorium.

Hasil dan Pembahasan

Emisi GRK

Hasil pengukuran fluks (emisi gas harian) N₂O sebesar 0,99 mg/m²/hari dan CO₂ sebesar 12.586 mg/m²/hari (Tabel 2 dan 3). Perbedaan rata-rata hasil pengukuran antara pagi dan siang sangat kecil. Hal ini disebabkan karena perbedaan kondisi lingkungan (suhu dan kelembaban) antara pagi dan siang relatif kecil. Pada pagi hari rata-rata suhu berkisar 21,2-22,3 °C dan pada siang hari sekitar 23,3-24,2 °C. Hasil perhitungan total emisi gas N₂O dari lahan perkebunan tersebut sebesar 2,29 kg N₂O-N/ha/tahun atau sebesar 1.073 kg CO₂-e/ha/tahun. Besaran emisi tersebut lebih kecil bila dibandingkan dengan emisi pada perkebunan kopi di Sumber Jaya, Lampung (Verchot *et al.*, 2006). Dari lahan yang ditanami kopi berumur 1 tahun tersebut, emisi N₂O terukur sebesar 8,4 kg N₂O-N/ha/tahun. Tanah hutan hujan tropis yang ditanami karet dan dipupuk menghasilkan emisi N₂O sebesar 6,28 kg N₂O-N/ha/tahun, sedangkan dari tanah yang tidak dipupuk hanya mengemisikan N₂O sebesar 3,93 kg N₂O-N/ha/tahun (Zhou *et al.*, 2016). Berdasarkan Hergoualc’h *et al.* (2008) bahwa besaran emisi N₂O tergantung dari pemberian pupuk nitrogen (N), kandungan N, kelembaban tanah, suhu dan lain-lain. Kandungan N yang berasal dari serasah tanaman di tanah juga mempengaruhi besaran emisi N₂O. Hergoualc’h

et al. (2012) menyatakan bahwa tanaman kopi dengan sistem agroforestri (dengan tanaman leguminose: *Inga densiflora*) memiliki emisi N₂O lebih tinggi dibandingkan dengan emisi dari tanaman kopi dengan sistem monokultur karena pada sistem agroforestri mineralisasi N tanah dan N serasah lebih tinggi. Emisi N₂O lebih besar dari tanah yang terlindung tanaman yang lebih tinggi. Pemupukan anorganik merupakan faktor yang paling dominan dalam menghasilkan emisi N₂O (Munoz *et al.*, 2010).

Total emisi CO₂ pertahun dari lahan pertanaman kopi sebesar 45,9 ton CO₂/ha/tahun. Emisi CO₂ berasal dari proses biotik dan abiotik yang berkaitan dengan aktivitas perakaran tanaman dan respirasi organisme (Berisso *et al.*, 2013; Hanson *et al.*, 2000). Proses tersebut sangat dipengaruhi oleh suhu, kelembaban, tekstur, dan agregasi tanah (Blagodatsky & Smith, 2012; Wu *et al.*, 2010). Peningkatan suhu tanah berpengaruh terhadap perubahan respirasi akar dan laju dekomposisi bahan organik (Peng *et al.*, 2009).

Kelembaban tanah merupakan faktor utama dalam mempengaruhi aktivitas mikroorganisme (Brocket *et al.*, 2012). Pada penelitian ini, perbedaan besaran emisi yang kecil antara pagi dan siang hari karena suhu dipengaruhi oleh adanya tanaman naungan, terutama tanaman sengon. Tanaman naungan bermanfaat mengurangi penyinaran pada tanaman sehingga perbedaan suhu tanah antara pagi dan siang sangat kecil.

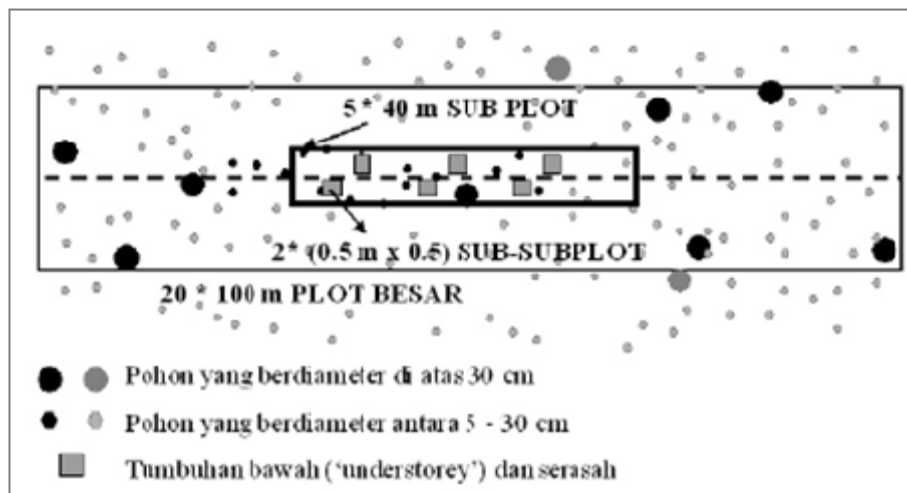
Emisi GRK dari lahan perkebunan ini didominasi oleh gas CO₂. Kontribusi N₂O terhadap keseluruhan emisi GRK pada lahan perkebunan ini adalah 2%. Bila dijumlahkan, potensi pemanasan global/ *Global Warming Potential (GWP)* dari gas N₂O dan CO₂ yang diemisikan tersebut sebesar 47 ton CO₂-e/ha/tahun. Nilai GWP tersebut cukup besar untuk tanah mineral. Hal ini mungkin karena tingginya bahan organik (kadar C-organik sebesar 3%) dalam tanah sehingga proses dekomposisi berlangsung cepat yang menghasilkan CO₂. Dalam pengelolaan perkebunan kopi rakyat tersebut, petani memberi pupuk organik saja dengan takaran 10 kg/pohon dan diberikan 2 kali dan tanpa pemberian pupuk anorganik.

Tabel 1. Estimasi biomassa pohon menggunakan persamaan alometrik (Hairiah *et al.*, 2011)

Table 1. Tree biomass estimation using allometric equation (Hairiah *et al.*, 2011)

Jenis Pohon <i>Plants</i>	Estimasi Biomassa pohon (kg/pohon) <i>Tree biomass estimation (kg/plant)</i>
Pohon bercabang/ <i>Branched structure</i>	BK = 0,11 ρ D ^{2.62}
Pohon tidak bercabang/ <i>Unbranched structure</i>	BK = π ρ H* D ² /40
Kopi pangkas/Coffee	BK = 0,281 D ^{2.06}
Pisang/Banana	BK = 0,030 D ^{2.13}
Bambu/ <i>Bamboo</i>	BK = 0,031 D ^{2.28}
Sengon / <i>Albizia</i>	BK = 0,0272 D ^{2.831}
Pinus/ <i>Pinus</i>	BK = 0,0417 D ^{2.6576}
Kelapa sawit/ <i>Elaeis</i>	BK = (0,0976 x H**) + 0.0706

Keterangan: BK=berat kering (g); D=diameter pohon (cm); H*=tinggi pohon (cm); H**=tinggi pohon (m); ρ=berat jenis kayu (g/cm³)
Notes: BK=dry weight (g); D=tree diameter (cm); H*=length (cm); H**=length (m); ρ=wood density (g/cm³)



Gambar 2. Skema plot contoh pengukuran (Hairiah & Rahayu, 2007)
 Figure 2. Sample measurement plots scheme (Hairiah & Rahayu, 2007)

Tabel 2. Fluks harian N_2O dan CO_2 pada lahan perkebunan kopi rakyat di Nusa Tenggara Barat
 Table 2. Daily N_2O and CO_2 fluxes in smallholder coffee plantation in West Nusa Tenggara

Titik/Points	Hari I/Day I		Hari II/Day II		Hari III/Day III	
	N_2O	CO_2	N_2O	CO_2	N_2O	CO_2
----- ($mg/m^2/hari$) -----						
A. Pagi/Morning						
1	0,56	14.286	0,76	12.248	0,77	15.022
2	1,13	13.489	1,21	11.233	0,67	10.380
3	0,86	13.448	1,20	11.814	1,08	11.500
4	0,63	14.158	1,68	14.276	1,04	13.229
5	0,59	9.878	1,66	13.562	1,16	14.265
Rata-rata/average	0,76	13.052	1,30	12.627	0,94	12.879
B. Siang/Afternoon						
1	0,94	10.132	0,62	12.951	1,04	7.278
2	0,50	12.306	0,89	13.947	1,24	14.169
3	1,31	12.200	1,22	12.342	0,62	13.662
4	1,93	10.654	0,89	8.234	0,54	13.688
5	1,11	13.413	0,91	15.439	0,81	14.361
Rata-rata/average	1,16	11.741	0,91	12.583	0,85	12.632

Pemberian bahan organik dilakukan dengan cara membumpukannya pada daerah perakaran secara melingkar dengan takaran 5 kg/pohon, dilakukan pada awal dan akhir musim penghujan.

Cadangan karbon dari lahan perkebunan kopi rakyat

Kegiatan mitigasi bertujuan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca melalui strategi penurunan emisi gas rumah kaca dan peningkatan penyerapan CO_2 dan cadangan karbon. Tanaman perkebunan mempunyai posisi sangat strategis dalam rencana aksi nasional mitigasi GRK di sektor pertanian, karena memiliki kemampuan besar dalam menyerap CO_2 . Disamping itu, pemberian bahan organik ke dalam tanah juga merupakan salah satu cara untuk menyimpan karbon (Abera & Meskel, 2013) dan meningkatkan cadangan karbon tanah (Li *et al.*, 2015). Asumsi yang digunakan dalam penelitian ini, dalam bahan organik tersebut terkandung 20% karbon, kadar air 80%, dan karbon yang tertinggal di dalam tanah 50%. Besarnya cadangan karbon

yang terhitung dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Biomassa pohon = $909 \text{ kg C } (5 \times 20 \text{ m}^2) = 90.900 \text{ kg C/ha}$ (Tabel 3)
- Berat kering tumbuhan bawah dan serasah = $13,1 \text{ gr/m}^2 = 131 \text{ kg/ha}$ (Tabel 4).

Jumlah cadangan karbon yang ditunjukkan oleh tumbuhan bawah dan serasah memang lebih kecil dibandingkan dengan jumlah cadangan karbon dari biomassa pohon. Hal ini disebabkan dari ukuran, tumbuhan bawah jauh lebih kecil dan intensitas cahaya matahari yang didapatkan juga kurang optimal.

Jenis pohon yang mendominasi sistem agroforestri di lokasi penelitian yaitu kopi. Tanaman ini dipilih karena mendukung mata pencaharian yang sebagian besarnya adalah sebagai petani kopi. Tanaman kopi termasuk tanaman yang tahan terhadap naungan, mudah dipelihara dan berbuah setiap saat. Di samping itu juga kayunya dapat dimanfaatkan untuk dijual sebagai kayu bakar, terutama jika produksi tanaman kopi mengalami penurunan. Meskipun

tanaman kopi mendominasi, namun jumlah biomasanya paling kecil dibandingkan dengan tanaman sengon dan durian, namun persentase biomassa tanaman kopi hanya 0,7% dari total biomassa. Tanaman sengon mendominasi jumlah biomassa karena dipertahankan sebagai penampung dan seharusnya memerlukan peremajaan tanaman. Jumlah cadangan karbon di lokasi penelitian dapat dihitung sebagai berikut:

- Biomassa pohon = $90.900 \times 44/12$ kg CO₂-e per ha = 333.415 kg CO₂-e/ha
- Tumbuhan bawah dan serasah = $131 \times 0,46 \times 44/12 = 220,9$ kg CO₂-e/ha
- Pemberian pupuk organik = 10 kg/pohon \times 2000 pohon/ha \times $20/100 \times 20/100 \times 50/100 \times 44/12 = 1.467$ kg CO₂-e/ha
- Total sekuestrasi karbon = 335.103 kg CO₂-e /ha = 335 ton CO₂-e/ha = $91,4$ ton C/ha

Dengan demikian, terdapat karbon netto yaitu emisi dikurangi cadangan karbonnya sebesar $47 - 335 = -288$ ton CO₂-e /ha. Hal ini berarti bahwa, kegiatan perkebunan kopi tersebut menyerap (sekuestrasi) karbon sebesar 288 ton CO₂-e /ha. Dengan penampung tanaman sengon dan durian ini, cadangan karbon di lokasi penelitian sebesar $91,4$ ton C/ha. Hasil penelitian Wibawa *et al.* (2010) menunjukkan bahwa pada kebun kopi monokultur dengan penampung lamtoro, cadangan karbon lebih rendah daripada sistem agroforestri. Cadangan karbon rata-rata kopi robusta pada umur 30 tahun adalah $29,4$ ton/ha. Pada per-

kebunan rakyat dan perkebunan besar, cadangan karbon berkisar antara $7,5$ hingga $76,4$ ton C/ha tergantung umur tanaman. Dengan sistem agroforestri, cadangan karbon pada tanaman kopi berumur 2-30 tahun dapat mencapai 92 ton C/ha (van Noor Wijk *et al.*, 2002).

Jejak karbon pada suatu cara budidaya berguna untuk mengetahui apakah cara tersebut menambah atau mengurangi emisi karbon. Hasil penelitian Noponen *et al.* (2012) menunjukkan bahwa jejak karbon dari 1 kg biji kopi basah berkisar antara $0,26 - 0,67$ kg CO₂-e untuk sistem konvensional dan $0,12 - 0,52$ kg CO₂-e untuk sistem pengelolaan organik. Hal ini berarti bahwa sistem pengelolaan kopi secara organik merupakan kegiatan yang ramah lingkungan karena mengemisikan GRK lebih rendah.

Adaptasi dan mitigasi terhadap perubahan iklim pada lahan perkebunan kopi

Strategi adaptasi dan mitigasi terhadap perubahan iklim perlu dilakukan untuk mengurangi emisi GRK dan atau meningkatkan cadangan karbon yang rendah. Strategi tersebut dapat dilakukan dengan cara menerapkan *Good Agriculture Practices* (GAP), yaitu dengan budidaya tanaman secara tepat dan benar, produksi tinggi, mutu produk baik, keuntungan optimal dan ramah lingkungan serta dengan memperhatikan aspek keamanan dan kesejahteraan petani. Beberapa teknologi adaptasi

Tabel 3. Cadangan karbon pada biomassa tanaman/pohon (dalam plot berukuran 5 m x 20 m)
Table 3. Carbon stock on tree biomass (in plot size 5 m x 20 m)

No	Nama Pohon/ Tree name	Keliling/ Circumference (cm)	Tinggi Pohon/ Length (cm)	ρ (g/cm ³)	Diameter/ Diameter (cm)	Berat kering (kg/pohon)/ Dry weight (kg/plant)	C-tanaman (kg C/pohon)/ C biomass (kg/plant)
1	Durian/Durian	75	1000	0,64	23,885	216,800	99,728
2	Durian/ Durian	75	1000	0,64	23,885	216,800	99,728
3	Sengon/Albizia	150	2000	0,55	47,771	1542,678	709,632
4	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
5	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
6	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
7	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
8	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
9	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
10	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
11	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
12	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
13	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
14	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
15	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
16	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
17	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
18	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
19	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
20	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
21	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
22	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
23	Kopi/Coffee	3	150	0,955	0,955	0,025	0,011
Total (kg)/Total							909,316

Keterangan: BK=berat kering (g); D=diameter pohon (cm); H*=tinggi pohon (cm); H**=tinggi pohon (m); ρ =berat jenis kayu (g/cm³)
Notes: BK=dry weight (g); D=tree diameter (cm); H*=length (cm); H**=length (m); ρ =wood density (g/cm³)

dan mitigasi terhadap dampak perubahan iklim yang telah diaplikasikan di lokasi penelitian adalah pola agroforestri (pola tanam dengan tanaman penayang), penggunaan klon adaptif seperti klon tahan kekeringan, dan teknologi konservasi tanah dengan pemberian pupuk organik. Pengelolaan hutan rakyat dengan pola agroforestri mempunyai potensi yang besar untuk menyerap dan menyimpan karbon dalam bentuk tegakan dalam jangka waktu yang lama. Penggunaan bibit kopi dengan batang bawah klon unggul dengan perakaran kuat mampu meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kekeringan dan penurunan kesuburan tanah. Kopi robusta merupakan jenis kopi yang tahan kekeringan, karena memiliki perakaran yang lebat.

Penggunaan lebih banyak pohon penayang, yang juga dapat meningkatkan daya tahan petani terhadap dampak perubahan iklim untuk memberikan substitusi produk yang bernilai secara ekonomi, seperti tanaman buah-buahan. Penggunaan tanaman leguminosa sebagai penayang juga disarankan karena dapat mengurangi penggunaan pupuk kimia dan meningkatkan ketersediaan nitrogen di tanah yang ditambat oleh tanaman tersebut, serta mampu beradaptasi pada zona agroekologi yang luas (Muelenberg & Dakora, 2007). Tanaman penayang juga dapat membantu meningkatkan kesuburan tanah. Selain memberikan perlindungan terhadap lingkungan, tanaman penayang dapat meningkatkan ekonomi rumah tangga serta sebagai alternatif dalam mengatasi anjloknya harga kopi. Efisiensi penggunaan pupuk juga menjadi hal yang penting dalam mengurangi emisi gas rumah kaca (Balafoutis *et al.*, 2017). Mayoritas petani menggunakan pupuk di bawah standar yang direkomendasikan yang tidak secara signifikan berdampak pada peningkatan produksi, namun meningkatkan emisi gas rumah kaca ke atmosfer. Pemangkasan dilakukan secara selektif dengan membuang bagian tanaman yang tidak produktif yang kemudian akan mengurangi tingkat transpirasi dan secara tidak langsung mempertahankan kandungan air tanah (Lin, 2010).

Untuk mengantisipasi dampak kekeringan, perlu upaya menyimpan dan mempertahankan lengas tanaman. Agar lengas tanah cukup tersedia, maka perlu dilakukan usaha penyimpanan lengas. Bahan penyimpanan lengas tanah yang sangat baik di dalam tanah adalah bahan organik. Daya simpan kelembaban tanah oleh bahan organik sangat besar, sehingga tanah yang kadar bahan organiknya tinggi memiliki daya simpan lengas yang tinggi pula. Bahan organik dapat berupa pupuk kandang dan pupuk kompos yang berasal dari limbah organik asal lahan. Pada musim kemarau yang panjang disarankan untuk memberikan mulsa baik berupa jerami, pangkas dedaunan pohon penayang,

serasah dedaunan maupun cacahan kayu. Mulsa ditebar sekitar 15-20 cm pada piringan tanaman. Secara bertahap bahan mulsa ini akan terdekomposisi sehingga menambah kadar bahan organik dalam tanah (Abdoellah, 2016). Bahan alami yang mudah terurai seperti daun dan kulit kopi, serasah pangkasan dan tanaman penayang juga dapat digunakan sebagai mulsa organik (Syakir & Surmaini, 2017). Selain itu mulsa dapat menahan erosi dan sekaligus mengkonservasi (Suryani & Dariah, 2012). Mulsa ini dapat bertahan lebih lama sebagai mulsa pada musim kemarau sebab tidak ada kelembaban yang memicunya untuk terdekomposisi. Penanaman varietas yang tahan kekeringan, tumpang sari tanaman kopi dan pisang, pemanenan air hujan juga merupakan langkah konservasi, adaptasi dan mitigasi terhadap perubahan iklim (Alemu & Dufera, 2017). Pembuatan rorak juga akan memperbesar resapan air ke tanah dan menampung tanah yang tererosi, unsur hara yang terbawa erosi meresap di sekitar perakaran tanaman, menampung bahan organik dan merangsang pembentukan akar serabut tanaman kopi sehingga penyerapan hara lebih optimal (Yuliasmara, 2016). Teknik biopori juga dapat diterapkan untuk meresapkan dan menyimpan air yang cukup efektif pada areal pertanaman kopi (Syakir & Surmaini, 2017).

Pemupukan merupakan suatu usaha untuk mencukupi kebutuhan hara bagi tanaman agar tumbuh dan memberikan hasil yang memadai. Pemberian pupuk organik sangat disarankan untuk mengantisipasi terhadap kekeringan, karena dengan adanya kandungan organik dalam tanah akan lebih banyak menyimpan air dan memperbaiki sifat biologi tanah (Ayalev, 2014; Velmourougane, 2016). Penggunaan pupuk organik dengan cara yang efisien memberikan dampak positif terhadap penurunan emisi gas (Graham *et al.*, 2017). Sistem pengelolaan organik menurunkan emisi per kg kopi yang dihasilkan (Noponen *et al.*, 2012). Hasil kegiatan ini tidak hanya relevan untuk perkebunan kopi namun juga komoditas perkebunan lainnya. Penggunaan pupuk kimia secara tidak tepat tanpa adanya kombinasi dengan pupuk organik menjadi salah satu sumber emisi N₂O. Selain itu, pemanfaatan tanaman penambat N dari udara adalah cara lain mengurangi ketergantungan penggunaan pupuk kimia pada perkebunan. Kegiatan mitigasi yang dapat diterapkan antara lain adalah pengelolaan tanah dan tanaman yang baik dengan memanfaatkan limbah tanaman perkebunan sebagai sumber pupuk organik, arang (*biochar*), pakan ternak, dan sumber bioenergi melalui pengembangan model sistem integrasi tanaman dan ternak (SITT), sehingga dapat meminimalkan emisi GRK dan meningkatkan serapan dan cadangan karbon.

Tabel 4. Berat kering tumbuhan bawah dan serasah dalam plot kecil (0,5 m x 0,5 m)
Table 4. Dry weight of understorey and necromass in small plot (0.5 m x 0.5 m)

No	Vegetasi/ Vegetation	Berat Basah / Fresh weight (g)		Sub contoh berat basah/ Fresh weight of sub plot (g)		Sub contoh berat kering/ Dry weight of sub plot (g)		Total berat kering / Dry weight total (g/m ²)
		Daun/ Leaf	Batang/ Stem	Daun/ Leaf	Batang/ Stem	Daun/ Leaf	Batang/ Stem	
1	Understorey 1/ Understorey 1	1,25	1,6	1,25	0,6	0,7	0,9	1,6
2	Understorey 2/ Understorey 2	1,7		1,7		1,1		1,1
3	Understorey 3/ Understorey 3	1,1	2,5	1,1	0,5	0,7		0,7
4	Understorey 4/ Understorey 4	1,7		1,7		0,8	1,6	2,4
5	Understorey 5/ Understorey 5	1,1		1,1		0,6		0,6
6	Understorey 6/ Understorey 6	1,2		1,2		0,7		0,7
7	Serasah 1/Necromass 1	1,1		1,1		0,6		0,6
8	Serasah 2/ Necromass 2	1,25		1,25		0,7		0,7
9	Serasah 3/ Necromass 3	1,9		1,9		01.02		0,0
10	Serasah 4/ Necromass 4	2,3		2,3		1,6		1,6
11	Serasah 5/ Necromass 5	2,1		2,1		1,5		1,5
12	Serasah 6/ Necromass 6	1,9		1,9		1,6		1,6
	Sub Total (g/m ²)							13,1

Kesimpulan

Perkebunan kopi rakyat dengan umur >10 tahun di lokasi penelitian mengemisikan karbon sebesar 47 ton CO₂-e/ha dan terdapat cadangan karbon sebesar 91,4 ton C/ha. Strategi adaptasi terhadap perubahan iklim dapat dilakukan dengan penerapan GAP, penggunaan varietas/klon tahan kekeringan, dan penggunaan mulsa organik, lebih banyak pohon penayang dan sistem tumpang sari, pembuatan rorak dan biopori.

Daftar Pustaka

- Abdoellah (2016). *Kopi dan lingkungan hidup: Sejarah botani, proses produksi, pengolahan produk hilir dan system kemitraan*. Yogyakarta, Gadjah Mada University Press. p. 890.
- Abera G & EW Meskel (2013). Soil properties and soil organic carbon stocks of tropical andosol under different land uses. *Soil Science* 3, 153-162. <http://dx.doi.org/10.4236/ojss.2013.33018>.
- Alemu A & E Dufera (2017). Climate smart coffee (*coffea arabica*) production. *American Journal of Data Mining and Knowledge Discovery* 2(2), 62-68. doi: 10.11648/j.ajdmkd.20170202.14.
- Ayalev T (2014). Characterization of organic coffee production, certification and marketing system: Ethiopia as a main indicator: a review. *Asian Journal of Agriculture Research* 8 (4), 170-180. Doi:10.3923/ajar.2014.170.180.
- Balafoutis A, B Beck, S Fountas, J Vangeyte, T van der Wal, I Soto, MG Barbero, A Barnes & V Eory (2017). Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics. *Sustainability* 9 (1339), 1-28. Doi:10.3390/su9081339.
- Barthod J, C Rumpel, R Paradelo & MF Dignac (2016). The effects of worms, clay and biochar on CO₂ emissions during production and soil application of co-composts. *SOIL* 2, 673-683. Doi:10.5194/soil-2-673-2016.
- Berisso FE, P Schjøning, T Keller, M Lamandé, A Simojoki, BV Iversen, L Alakukku & J Forkman (2013). Gas transport and subsoil pore characteristics: anisotropy and long-term effects of compaction. *Geoderma* 195-196, 184-191.
- Blagodatsky S & P Smith (2012). Soil physics meets soil biology: towards better mechanistic prediction of greenhouse gas emissions from soil. *Soil Biol Biochem* 47, 78-92.
- Brockett BFT, CE Prescott & SJ Grayston (2011). Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in western Canada. *Soil Biology and Biochemistry* 44 (1), 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.09.003>.

- Craparo ACW, Van Asten PJA, Läderach P, Jassogne LTP & Graba SW (2015). *Coffea arabica* yields decline in Tanzania due to climate change: Global implications. *Agricultural and Forest Meteorology* 207, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.005>.
- Ditjenbun (2016). *Statistik perkebunan Indonesia komoditas kopi 2015-2017*. Jakarta, Direktorat Jenderal Perkebunan. p. 83.
- ESRL (Earth System Research Laboratory) (2018). Trends in atmospheric carbon dioxide. Taken from <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>. [diakses 16 Maret 2018]
- Flessa H, M Potthoff & N Lofffield (2002). Integrated evaluation of greenhouse gas emissions (CO₂, CH₄, N₂O) from two farming system in southern Germany. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 91, 175-189.
- Graham RF, SE Wortman & CM Pittelkow (2017). Comparison of organic and integrated nutrient management strategies for reducing soil N₂O emissions. *Sustainability* 9, 510; doi:10.3390/su9040510www.mdpi.com/journal/sustainability.
- Hairiah K & S Rahayu (2007). *Pengukuran 'karbon tersimpan' di berbagai macam penggunaan lahan*. Bogor. World Agroforestry Centre - ICRAF, SEA Regional Office, University of Brawijaya, Unibraw, Indonesia. 77 p. 979-3198-35-4.
- Hairiah K, A Ekadinata, RR Sari & S Rahayu (2011). *Pengukuran cadangan karbon: dari tingkat lahan ke bentang lahan. Petunjuk praktis. Edisi kedua*. Bogor, World Agroforestry Centre, ICRAF SEA Regional Office, University of Brawijaya (UB), Malang, Indonesia.
- Hanson PJ, NT Edwards, CT Garten and JA Andrews (2000). Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry* 48 (1), 115–146.
- Hergoualc'h K, E Blanchart, U Skiba, C Henault & JM Harmand (2012). Changes in carbon stock and greenhouse gas balance in a coffee (*Coffea arabica*) monoculture versus an agroforestry system with *Inga densiflora*, in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 148,102– 110.
- Hergoualc'h K, U Skiba, JM Harmand JM & C Hénault (2008). Fluxes of greenhouse gases from Andosols under coffee in monoculture or shaded by *Inga densiflora* in Costa Rica. *Biogeochemistry* 89, 329–345.
- IAEA (International Atomic Energy Agency) (1992). *Manual on Measurement of Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agriculture*, Vienna, Austria.
- Kattenberg A, Giorgi F, Grassl H, Meehl G, Mitchell J, Stouffer R, Tokioka T, Weaver A & Wigley T (1996). Climate models projections of future climate. In: J.T. Houghton *et al.*, (ed) *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. NewYork (USA) .Cambridge University Press. p 285-357.
- Kementan (Kementerian Pertanian) (2015). *Rencana strategis Kementerian Pertanian 2015-2019*. Jakarta, Sekretariat Jenderal Kementerian Pertanian. p.339.
- Li S, J Su , W Liu, X Lang, X Huang, C Jia, Z Zhang & Q Tong (2015). Changes in biomass carbon and soil organic carbon stocks following the conversion from a secondary coniferous forest to a pine plantation. *PLoS ONE* 10(9): e0135946. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135946>.
- Lin BB (2010). The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology* 150(4), 510-518. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.11.010>.
- Magina F, R Makundi, A Maerere, G Maro & J Teri (2011). Temporal variations in the abundance of three important insect pests of coffee in Kilimanjaro region, Tanzania. In: *Proc 23rd International Scientific Colloquium on Coffee*. Association Scientifique Internationale du Caffe (ASIC), Bali Indonesia, October 3-8, 2010. p.1114-1118.
- Marinho EB, AL Oliveira, DB Zandonadi, LEC Benedito, RB Souza, CC Figueiredo & JG Busato (2014). Organic matter pools and nutrient cycling in different coffee production systems in the Brazilian Cerrado. *Agroforest Syst* 88, 767-778.
- Meuelenberg FP & FD Dakora (2007). Assessing the biological potential of N₂-fixing Leguminosae in Botswana for increased crop yields and commercial exploitation. *African Journal of Biotechnology* 6 (4), 325-334.
- Muñoz C, L Paulino, C Monreal & E Zagal (2010). Greenhouse gas (CO₂ and N₂O) emissions from soils: A review. *Chilean Journal of Agricultural Research* 70(3), 485-497.

- Noponen MRA, GE Jonesa, JP Haggarb, G Soto, N Attarzadeha & JR Healey (2012). Greenhouse gas emissions in coffee grown with differing input levels under conventional and organic management. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 151, 6– 15. Doi:10.1016/j.agee.2012.01.019.
- Ovalle-Rivera O, Läderach P, Bunn C, Obersteiner M & Schroth G (2015). Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. *PLoS ONE* 10(4): e0124155.
- Peng S, S Piao, T Wang, T Sun & Shen Z (2009). Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China. *Soil Biol Biochem* 41(5), 1008–1014.
- Reay D, EA Davidson, KA Smith, P Smith, JM Melillo, F Dentener & PJ Crutzen (2012). Global agriculture and nitrous oxide emissions. *Nature Climate Change Review* 2(6), 410-416.
- Smith P & JE Olesen (2010). Climate change and agriculture: synergies between the mitigation and adaptation to climate change in agriculture. *The Journal of Agricultural Science* 148 (5), 543-55.
- Smith P, D Martino, Z Cai, D Gwary, H Janzen, P Kumar, B McCarl, S Ogle, F O'Mara, C Rice, B Scholes & O Sirotenko (2007). Agriculture in climate change 2007: mitigation. In: B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds), *Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. p 498-540.
- Suryani E & A Dariah (2012). Peningkatan produktivitas tanah melalui sistem agroforestry. *Jurnal Sumberdaya Lahan* 6 (2), 101-109.
- Syakir M & E Surmaini (2017). Perubahan iklim dalam konteks sistem produksi dan pengembangan kopi di Indonesia. *Jurnal Litbang Pertanian* 36 (2), 77-90. Doi: 10.21082/jp3.v36n2.2017
- Thangarajan R, NS Bolan, G Tian G, R Naidu & A Kunhikrishnan (2013). Role of organic amendment application on greenhouse gas emission from soil. *Science of the Total Environment*. 465, 72-96. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.01.031.
- Van Noor Wijk M, S Rahayu, K Hairiah, Y C Wulan, A Farida & B Verbist (2002). Carbon stock assessment for a forest to coffee conversion landscape in Sumber Jaya (Lampung Indonesia): From allometric equations to land use change analysis. *Science in China* 45:75-86.
- Velmourougane K (2016). Impact of organic and conventional systems of coffee farming on soil properties and culturable microbial diversity. *Scientifica* 2016, p. 1-9. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3604026> .
- Verchot LV, L Hutabarat, K Hairiah & van Noordwijk M (2006). Nitrogen availability and soil N₂O emissions following conversion of forests to coffee in southern Sumatra. *Global Biogeochemical Cycles* 20, GB4008, doi:10.1029/2005GB002469
- Wibawa A, F Yuliasmara & R Erwiyono (2010). Estimasi cadangan karbon pada perkebunan kopi di Jawa Timur. *Pelita Perkebunan* 26(1), 1—11.
- Willey Z & B Chameides (2007). *Harnessing farms and forests in the low carbon economy: how to create, measure and verify greenhouse gas offsets*. Duke University Press. Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions. North Carolina, US. 231 p. ISBN: 978-0-8322-4168-0.
- Wu X, Z Yao, N Brüggemann, Z Shen, B Wolf, M Dannenmann, X Zheng & K Butterbach-Bahl (2010). Effects of soil moisture and temperature on CO₂ and CH₄ soil-atmosphere exchange of various land use/cover types in a semi-arid grassland in Inner Mongolia, China. *Soil Biol Biochem* 42 (5), 773–787.
- Yuliasmara F (2016). Strategi mitigasi perkebunan kopi menghadapi perubahan iklim. *Warta Pusat Penelitian Kopi dan Kakao* 28(3), 1-7.
- Zhou WJ, H Ji, J Zhu, YP Zhang, LQ Sha, YT Liu, X Zhang, W Zhao, Y Dong, XL Bai, YX Lin, JH Zhang & XH Zheng (2016). The effects of nitrogen fertilization on N₂O emissions from a rubber plantation. *Sci Rep* 6, 28230. Doi: 10.1038/srep28230.