

KONSERVASI TANAH DAN KARBON UNTUK MITIGASI PERUBAHAN IKLIM Mendukung Keberlanjutan Pembangunan Pertanian¹⁾

Soil and Carbon Conservation for Climate Change Mitigation and Enhancing Sustainability of Agricultural Development

Fahmuddin Agus

Balai Penelitian Tanah

Jalan Tentara Pelajar No. 12, Bogor 16114

Telp. (0251) 8336757, Faks (0251) 8321608

e-mail: balittanah@litbang.deptan.go.id, fahmuddin_agus@yahoo.com

Diajukan 4 Desember 2012; Disetujui 29 Januari 2013

ABSTRAK

Sektor pertanian merupakan sektor yang rentan terhadap perubahan iklim dan merupakan salah satu sumber emisi gas rumah kaca (GRK). Untuk itu, selain mengupayakan untuk beradaptasi, sektor pertanian berpeluang memitigasi perubahan iklim. Makalah ini membahas adaptasi dan mitigasi sektor pertanian terhadap perubahan iklim melalui konservasi tanah dan karbon. Berbagai inovasi teknologi konservasi tanah mineral mampu meningkatkan cadangan karbon dan selanjutnya memperbaiki sifat fisik, kimia, dan aktivitas makhluk hidup di dalam tanah. Konservasi tanah gambut pada dasarnya adalah menurunkan laju dekomposisi bahan organik atau laju emisi GRK sehingga gambut tidak cepat habis dan lahan dapat digunakan untuk waktu yang lama. Konservasi tanah dan karbon dapat menjawab berbagai isu lokal berupa keberlanjutan usaha pertanian dan isu global berupa penurunan emisi GRK dari lahan pertanian. Rehabilitasi lahan terdegradasi yang ditumbuhi semak belukar dan padang alang-alang menjadi lahan pertanian berpotensi memberikan manfaat konservasi karbon secara signifikan dan sekaligus manfaat ekonomi. Diperlukan pengkajian tentang kejelasan status lahan, kesesuaian lahan, kesiapan teknologi, biaya, dan kelembagaan untuk merehabilitasi lahan terlantar menjadi lahan pertanian yang produktif dengan cadangan karbon lebih tinggi.

Kata kunci: Konservasi tanah, karbon, perubahan iklim, pembangunan pertanian

ABSTRACT

Agricultural sector is a sector which is vulnerable to climate change and a source of greenhouse gas (GHG) emissions. Therefore, besides the need for adaptation, agriculture has a potential to mitigate the climate change. This paper discusses the adaptation and mitigation of agriculture to the changing climate through

soil and carbon conservation. Various soil conservation technological innovations on mineral soils potentially increase carbon stocks and subsequently improve soil physical and chemical properties and activities of living soil organisms. Conservation of peat soil basically reduces the rate of decomposition of organic matter or GHG emissions and also prolongs the lifespan of the peat. Soil and carbon conservation aimed to answer a variety of local issues such as sustainable agriculture and global issues such as reduction of GHG emissions from agricultural land. Rehabilitation of degraded peat shrub and peat grassland to agricultural land potentially provides significant carbon conservation and economic benefits. Evaluation of land status, land suitability, technology readiness, financial and institutional supports are the prerequisites needed to rehabilitate the abandoned land into productive and higher carbon storage lands.

Keywords: *Soil conservation, carbon, climate change, agricultural development*

PENDAHULUAN

Konservasi tanah berperan penting dalam menentukan keberlanjutan pembangunan pertanian (Agus dan Widiyanto 2004). Menghangatnya isu pemanasan global dan perubahan iklim dewasa ini menyebabkan peran konservasi tanah menjadi makin penting karena dapat berkontribusi dalam mengatasi dampak perubahan iklim melalui upaya mitigasi dan adaptasi. Konservasi tanah tidak hanya dapat mempertahankan dan meningkatkan produktivitas tanah, tetapi juga cadangan karbon (*carbon stock*) (Agus et al. 1999a, 1999b; Agus 2000a), baik di dalam maupun di atas permukaan tanah (Agus 2000b).

¹⁾Naskah disarikan dari bahan Orasi Profesor Riset yang disampaikan pada tanggal 26 September 2012 di Bogor.

Pemanasan global ditandai oleh meningkatnya gas rumah kaca (GRK) di atmosfer. Konsentrasi CO₂ meningkat dari 280 ppm pada masa pra-industri menjadi hampir 400 ppm dewasa ini yang disebabkan oleh tingginya jumlah emisi GRK. Peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer meningkatkan suhu udara sekitar 0,8°C dibandingkan dengan tahun 1880. Menjelang tahun 2100, suhu udara dikhawatirkan akan meningkat 3-7°C jika tidak ada langkah-langkah mitigasi emisi GRK (Cline 2007; IPCC 2007b; Schlesinger dan Roberts 2009).

Usaha pertanian yang intensif dan perubahan penggunaan lahan menyumbang 15-20% dari total emisi global, sekitar 29,9 Gt CO₂-e/tahun (Cline 2007). Indonesia menyumbang sekitar 1,8 Gt CO₂-e pada tahun 2005 dan menjelang tahun 2020 emisi GRK tahunan diperkirakan mendekati 3 Gt CO₂-e. Lebih dari 60% emisi nasional tersebut bersumber dari perubahan penggunaan lahan dan lahan gambut (Kementerian Lingkungan Hidup 2009). Hal ini menunjukkan opsi mitigasi di bidang penggunaan lahan dan lahan gambut memegang peranan penting dalam mengatasi emisi GRK.

Pemerintah Indonesia berkomitmen menurunkan emisi GRK hingga 26% dengan usaha sendiri dan 41% bila ada dukungan internasional menjelang tahun 2020. Peraturan Presiden (Perpres) No. 61/2011 tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAN GRK) merupakan salah satu tindak lanjut dari komitmen tersebut. Selanjutnya Perpres No. 71/2011 mengatur tata cara penyelenggaraan inventarisasi GRK nasional.

Sektor pertanian berpeluang untuk berkontribusi dalam mitigasi emisi GRK. Penurunan emisi GRK dari sektor pertanian terutama dapat diupayakan melalui konservasi tanah dan karbon. Mengingat pentingnya isu emisi dan konservasi karbon, baik di tingkat lokal (petani) maupun global, dalam tulisan ini akan diuraikan hubungan antara konservasi tanah dan karbon, dan upaya konservasi karbon yang dapat disumbangkan oleh sektor pertanian dengan tetap mempertahankan peran utama sektor pertanian dalam ketahanan pangan dan sumber pendapatan.

HUBUNGAN ANTARA KONSERVASI TANAH DAN KARBON

Konservasi tanah adalah usaha meningkatkan dan memelihara kualitas tanah dari kemerosotan akibat erosi air dan angin serta pengurusan hara dan bahan organik yang berlebihan (Agus dan Widiyanto 2004). Bahan organik tanah berperan dalam pembentukan

struktur tanah dan memengaruhi sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Bahan organik tanah juga berperan penting dalam mengatur pergerakan air dan mengurangi erosi serta pencucian hara di dalam tanah (Agus dan Cassel 1992; Agus *et al.* 1998a). Tanah yang karbonnya terkonservasi akan lebih terjaga kelestarian hidrologinya dan mampu menyediakan lingkungan yang layak untuk tanaman dan makhluk hidup lainnya (Scott 2000; Hillel 2004; Agus *et al.* 2005).

Teknik Konservasi Tanah-Karbon-Tanaman

Konservasi tanah ditempuh secara langsung atau tidak langsung melalui peningkatan kandungan karbon organik tanah. Cara langsung peningkatan karbon tanah dilakukan melalui daur ulang bahan organik sisa tanaman, pemberian pupuk kandang dan kompos, dan pemberian pupuk hijau. Cara tidak langsung antara lain melalui penerapan berbagai teknik konservasi secara mekanis, misalnya pembuatan teras, atau secara vegetatif seperti sistem *hedgerow* (Agus 1997; Agus *et al.* 1998b; Agus 2001; Agus dan Widiyanto 2004).

Peran Konservasi Karbon pada Tanah Mineral

Karbon organik pada tanah mineral berperan penting dalam menurunkan kepadatan tanah, memperbaiki aerasi tanah, membentuk dan menstabilkan agregat tanah, meningkatkan permeabilitas dan kemampuan tanah memegang air, menjaga kelembapan dan suhu tanah, menurunkan energi kinetik air hujan, meningkatkan infiltrasi, dan mengurangi aliran permukaan dan erosi tanah (Oades 1989; Agus 2000a; Abdurachman dan Agus 2001a; Agus 2004a). Bahan organik memperbaiki sifat kimia tanah dengan menurunkan pH tanah alkalin, mengikat logam beracun dengan membentuk kompleks kelat, dan meningkatkan kapasitas tukar kation dan ketersediaan hara bagi tanaman (Stevenson 1994). Bahan organik juga merupakan sumber energi bagi aktivitas mikroba dan fauna tanah.

Peran konservasi karbon pada tanah mineral adalah untuk menjaga kandungan C organik tanah pada tingkat yang relatif tinggi, 2-8%. Kisaran ini penting untuk menjaga kesuburan tanah dan keberlanjutan (*sustainability*) usaha pertanian. Tanah yang miskin bahan organik umumnya telah mengalami degradasi, dan rehabilitasinya selalu dimulai dengan

pemulihan kandungan bahan organik atau C organik tanah.

Peran Konservasi Karbon pada Tanah Gambut

Konservasi karbon pada tanah gambut bertujuan untuk meminimalkan laju dekomposisi bahan organik agar karbon yang dikandungnya tetap tersimpan di dalam tanah dan tidak teremis menjadi CO₂. Hilangnya karbon dari tanah gambut umumnya disebabkan oleh perubahan penggunaan lahan dan drainase. Drainase menyebabkan lapisan gambut yang pada awalnya jenuh air (anaerob) berubah menjadi tidak jenuh (aerob) (Andriess 1988; Wosten *et al.* 1997; Couwenberg *et al.* 2010; Agus *et al.* 2012b; Hooijer *et al.* 2012). Dalam keadaan demikian, aktivitas mikroba perombak bahan organik meningkat. Apabila gambut terdekomposisi dengan laju yang tinggi, maka sebagian atau bahkan keseluruhan tanah gambut akan hilang dalam beberapa dekade (Page *et al.* 2011).

Lahan gambut yang didrainase secara berlebihan juga rentan terhadap kebakaran dan mengalami pematangan (konsolidasi) (Wosten *et al.* 2008). Gabungan dari proses dekomposisi, konsolidasi, dan kebakaran berdampak terhadap penurunan permukaan gambut (subsiden) (Suhardjo dan Widjaja Adhi 1976; Mutalib *et al.* 1991; Widjaja-Adhi 1997; Agus *et al.* 2010b). Subsiden yang terlalu cepat menyebabkan lahan gambut kehilangan perannya sebagai penyangga lingkungan dari banjir dan kekeringan, dan kehilangan kemampuannya dalam mendukung produksi tanaman.

CADANGAN KARBON DAN EMISI CO₂

Karbon organik yang berada di dalam tanah dan jaringan tanaman merupakan salah satu unsur yang sangat dinamis. Kecepatan perubahannya dari senyawa organik menjadi gas CH₄ dan CO₂ serta penyerapannya menentukan besaran emisi dan rosot GRK.

Siklus Karbon

Karbon di dalam tanah berada dalam bentuk senyawa organik dan sebagian kecil dalam bentuk karbonat (Agus *et al.* 2011a). Karbon organik mudah terdekomposisi oleh mikroba tanah menghasilkan

CH₄ dan CO₂. Di atmosfer, CO₂ yang berasal dari dekomposisi bahan organik tanah dan tanaman bergabung dengan CO₂ dari sumber lainnya (kendaraan, pabrik) dan dengan GRK lainnya seperti CH₄ dan N₂O (IPCC 2007a). Sebagian gas CO₂ diserap kembali oleh tanaman melalui proses fotosintesis membentuk karbohidrat dan jaringan tanaman. Tanaman menggugurkan daun, ranting, dan dahan membentuk nekromas (jaringan tanaman yang mati). Sebagian nekromas terkonservasi dalam bentuk karbon organik tanah, sedangkan sebagian lainnya terdekomposisi menghasilkan CO₂ (Abdurachman dan Agus 2001; Agus dan Widiyanto 2004).

Cadangan Karbon

Cadangan karbon merupakan jumlah karbon yang tersimpan di dalam berbagai tempat penyimpan (*pool*). *Pool* yang terpenting adalah tanah, biomassa tanaman, dan jaringan tanaman yang mati (nekromas) (Agus *et al.* 2011b; Hairiah *et al.* 2011).

Tanah dan tanaman mempunyai cadangan karbon yang bervariasi. Cadangan karbon di dalam tanah gambut berkisar antara 300-800 t C/ha untuk setiap meter ketebalan gambut. Pada gambut dengan ketebalan 0,5 m sampai lebih dari 8 m, cadangan karbon berkisar antara 200 t sampai lebih dari 6.400 t C/ha (Agus 2007; Agus dan Subiksa 2008; Agus *et al.* 2010a, 2011a, 2012b).

Pada tanah mineral, C organik umumnya terkonsentrasi pada lapisan 0-100 cm (IPCC 2006). Cadangan karbon tanah mineral berkisar antara 15-200 t C/ha, namun adakalanya dari 1 t sampai 900 t C/ha (Shofiyati *et al.* 2010).

Seperti halnya di dalam tanah, cadangan karbon di jaringan biomassa tanaman bervariasi, bergantung pada tingkat kesuburan tanah, iklim, elevasi, jenis dan tingkat pertumbuhan tanaman, tipe penggunaan lahan, dan sistem pengelolaan. Hutan mempunyai cadangan karbon 150-200 t C/ha. Perkebunan kelapa sawit mempunyai cadangan karbon rata-rata 40 t C/ha, mendekati nol sebelum ditanam dan sekitar 80 t C/ha setelah tanaman berumur 15-25 tahun (van Noordwijk *et al.* 2010). Tanaman karet memiliki cadangan karbon rata-rata 40-80 t C/ha. Lahan terdegradasi yang ditumbuhi semak dan belukar mempunyai cadangan karbon 15-30 t C/ha (Istomo *et al.* 2006). Lahan terdegradasi yang ditumbuhi paku resam, rumput, dan padang alang-alang memiliki cadangan karbon yang lebih rendah, berkisar 2-10 t C/ha, hampir sama dengan lahan yang diusahakan dengan tanaman semusim (Murdiyarso dan Wasrin 1996; Palm *et al.*

1999; Prasetyo *et al.* 2000; Brearly *et al.* 2004; Palm *et al.* 2004; Rahayu *et al.* 2005; Hairiah dan Rahayu 2007; Laumonier *et al.* 2010).

Cadangan karbon di dalam nekromas bervariasi antara 14-70% dari 80-220 t C/ha cadangan di dalam biomassa tanaman hutan bekas tebang pilih dan sekitar 50% dari 20-30 t C/ha biomassa semak belukar (Dewi *et al.* 2009). Studi kasus di hutan Amazon menunjukkan jumlah karbon nekromas sekitar 13% dari karbon yang ada pada biomassa hutan (Chao *et al.* 2009).

Emisi CO₂

Emisi CO₂ adalah proses teroksidasinya senyawa karbon membentuk CO₂ yang mengakibatkan menurunnya cadangan karbon di dalam tanah dan tanaman. Sebaliknya, penyerapan atau rosot (*sequestration, removal*) CO₂ oleh tanaman terjadi melalui proses fotosintesis. Sekuestrasi meningkatkan cadangan karbon di dalam tanaman, dan pelapukan tanaman yang mati meningkatkan cadangan karbon tanah. Prinsip dari pertanian berkelanjutan adalah mengonservasi karbon dengan menekan jumlah emisi karbon sampai serendah mungkin dan memaksimalkan sekuestrasi tanpa mengorbankan produktivitas tanaman yang diusahakan (Agus dan Widiyanto 2004; Agus *et al.* 2012a).

ISU LOKAL DAN ISU GLOBAL KONSERVASI TANAH DAN KARBON

Konservasi karbon bukan hanya menjadi isu global, tetapi juga menjadi isu yang sangat relevan dengan keseharian petani dan pembangunan nasional. Emisi GRK yang tinggi dari lahan pertanian tidak hanya memengaruhi konsentrasi GRK di atmosfer, tetapi juga mengancam keberlanjutan produksi pertanian di tingkat lokal, regional, dan nasional (Agus 2004b; Agus dan van Noordwijk 2007; Kementerian Lingkungan Hidup 2009).

Isu Lokal

Terkurangnya karbon di dalam dan di atas permukaan tanah merupakan indikasi terdegradasinya lahan. Penurunan cadangan karbon memengaruhi kesuburan tanah. Tingginya cadangan karbon (sampai tingkat tertentu) di dalam tanah dan tanaman merupakan cerminan kesuburan dan produktivitas tanah. Tanah

dengan kandungan karbon relatif tinggi, selain mampu menopang pertumbuhan dan produksi tanaman secara memuaskan, juga dapat menjaga kelestarian dan keasrian lingkungan serta keseimbangan tata air daerah aliran sungai dan ekosistem di sekitarnya. Apabila karbon yang tersimpan pada tanah dan tanaman diemisikan secara berlebihan, maka akan terjadi percepatan erosi, degradasi lahan, dan ketidakseimbangan ekosistem (Agus dan Widiyanto 2004; Agus *et al.* 2006).

Pada lahan gambut, pembukaan hutan dan drainase secara berlebihan menyebabkan lahan kehilangan (mengemisikan) banyak karbon dan mengalami penyusutan (subsidence) secara cepat. Dalam keadaan demikian, fungsinya sebagai penyangga tata air area di sekitarnya akan menurun dan lahan tersebut akan peka terhadap banjir pada musim hujan dan kekeringan pada musim kemarau (Agus 2008).

Pemanasan global dan perubahan iklim yang salah satu penyebabnya adalah tidak terkonservasinya karbon dapat meningkatkan serangan hama dan penyakit tanaman (WRI 1989) dan menenggelamkan pulau-pulau kecil dan dataran pantai akibat mencairnya gunung es di daerah kutub (IPCC 2007b). Kenaikan muka air laut akan mengurangi area pertanian dan menyebabkan intrusi air laut di daerah pantai. Perubahan pola hujan akan mengacaukan pola tanam dan meningkatkan risiko banjir dan/atau kekeringan.

Isu Global

Konsentrasi GRK di atmosfer meningkat tajam pada zaman industri dibandingkan dengan zaman pra-industri, sehingga suhu udara meningkat (Cline 2007; IPCC 2006, 2007b; Kementerian Lingkungan Hidup 2009). Deforestasi dan penggunaan lahan gambut yang semula menjadi urusan masyarakat dan pemerintah lokal dan nasional, dalam beberapa dekade terakhir berubah menjadi isu global (Agus 2011; Gunarso *et al.* 2012). Perluasan lahan pertanian yang sebagian menggunakan hutan dan lahan gambut kini menjadi pembicaraan hangat di tingkat global karena merupakan sumber emisi GRK. Konservasi hutan dan lahan gambut merupakan pendekatan utama dalam RAN GRK.

Isu Kelapa Sawit

Perluasan area perkebunan kelapa sawit di Sumatera, Kalimantan, dan Papua berlangsung sangat pesat, dari 1,34 juta ha pada tahun 1990 menjadi 7,72 juta ha

pada tahun 2010, atau rata-rata 13%/tahun, dan 20-22% di antaranya terdapat pada lahan gambut (Agus *et al.* 2012a). Emisi CO₂ yang ditimbulkan dari perubahan penggunaan lahan dan lahan gambut untuk kelapa sawit berfluktuasi dari 51 Mt/tahun (Mt = juta ton) dalam periode 2000-2005 sampai 129 Mt/tahun dalam periode 2005-2010. Angka ini setara dengan 9% dan 18% dari emisi seluruh perubahan penggunaan lahan dan lahan gambut pada masing-masing periode tersebut (Agus *et al.* 2012a). Selain berdampak pada emisi GRK, perluasan area perkebunan kelapa sawit juga dianggap menjadi ancaman bagi hutan dengan nilai konservasi tinggi (*high conservation value forests*).

Dengan perluasan sekitar 13%/tahun, produksi minyak sawit hanya meningkat 12%/tahun. Ini menunjukkan bahwa peningkatan produksi sangat ditentukan oleh perluasan area. Dengan kata lain, sumbangan teknologi, terutama untuk petani kecil, belum signifikan. Hal ini mengharuskan pemerintah dan perkebunan swasta bekerja keras agar pertumbuhan produksi ke depan lebih ditentukan oleh penerapan teknologi, bukan hanya karena perluasan area yang juga diperlukan untuk subsektor lain serta untuk generasi yang akan datang.

Di samping dampak negatif, kelapa sawit juga mempunyai dampak positif yang jarang dibahas dalam forum internasional, yakni:

1. Minyak sawit merupakan minyak makan termurah karena tingginya produktivitas dan efisiennya sistem produksi. Produktivitas kelapa sawit lebih tinggi lima kali dibanding tanaman penghasil minyak nabati lainnya seperti jagung, kedelai, kanola, *rapeseed*, kacang tanah, dan bunga matahari. Artinya, untuk menghasilkan minyak nabati dalam volume yang sama, tanaman kelapa sawit hanya memerlukan lahan kurang dari seperlima kebutuhan lahan untuk tanaman penghasil minyak nabati lainnya.
2. Minyak sawit memberikan solusi bagi peningkatan permintaan minyak makan dan bahan bakar nabati, baik di tingkat nasional maupun global. Ini dimungkinkan karena tingginya produksi dan produktivitas kelapa sawit. Sebagai salah satu upaya untuk meningkatkan kontribusi terhadap peningkatan permintaan pasar, pemerintah menargetkan peningkatan produksi melalui intensifikasi dan ekstensifikasi lahan perkebunan sawit dari sekitar 8 juta ha pada tahun 2010 menjadi 9 juta ha menjelang 2014 (Ditjen Perkebunan 2008).
3. Minyak sawit merupakan sumber pendapatan petani dan sumber devisa tertinggi dari sektor pertanian.

Untuk dapat digunakan sebagai biofuel, Uni Eropa (UE) menetapkan standar penurunan emisi minimal 35% dibanding emisi dari solar. Amerika Serikat (AS) menetapkan standar penurunan emisi 20% relatif terhadap solar. Berdasarkan analisis sementara, UE dan AS menetapkan minyak sawit tidak memenuhi standar sebagai biodiesel.

Pemilihan faktor emisi dan data aktivitas yang digunakan untuk menduga emisi dari minyak sawit masih kontroversial. Misalnya, emisi berdasarkan penelitian dengan metode subsidi (salah satu metode pendugaan tidak langsung) adalah 95 t CO₂/ha/tahun. Angka ini yang digunakan sementara oleh AS untuk menilai kelayakan minyak sawit sebagai bahan *biofuel*. Sebaliknya, bila digunakan metode langsung berdasarkan pengukuran fluks gas CO₂, emisi berkisar antara 20-57 t CO₂/ha/tahun atau rata-rata 38 t CO₂/ha/tahun. Metode pengukuran langsung lebih dipilih dibanding metode tidak langsung.

Badan Litbang Pertanian telah dan akan terus menyikapi isu global dan isu lokal industri kelapa sawit, antara lain dengan mencermati dan memverifikasi metode perhitungan emisi yang dilakukan oleh negara lain agar kebijakan yang akan diambil (misalnya standar *biofuel* di AS dan UE) tidak menyesatkan, meneliti dan mengembangkan teknologi perkebunan yang rendah emisi, mencari alternatif lahan dengan cadangan karbon rendah untuk pengembangan kelapa sawit, dan meningkatkan efisiensi produksi dan pengolahan minyak sawit. *Win-win solution* untuk mengatasi masalah ini adalah mengoptimalkan manfaat kelapa sawit, namun dampak negatifnya perlu diminimalkan. Pengembangan perkebunan kelapa sawit perlu didorong dan difasilitasi dengan tetap memerhatikan dampak perluasannya terhadap komoditas strategis lainnya, memerhatikan hak masyarakat lokal, dan meminimalkan dampak lingkungan dengan memilih lahan terlantar dengan cadangan karbon rendah dan menghindari hutan dengan nilai konservasi tinggi.

Produksi Minyak Sawit Berkelanjutan

Dalam upaya memenuhi permintaan pasar minyak sawit yang diproduksi secara berkelanjutan dan ramah lingkungan, sekitar 600 organisasi yang terdiri atas produsen, pengolah, manufaktur, pedagang, investor, dan LSM bergabung dalam *Roundtable on Sustainable Palm Oil* (RSPO). RSPO berupaya menghasilkan minyak sawit dengan mengutamakan kelestarian lingkungan dan kesejahteraan petani. Kriteria 5.6 RSPO mengimbau anggotanya merencanakan,

mengimplementasikan, dan memantau penurunan polusi dan emisi GRK.

RSPO sudah berhasil memberikan sertifikasi bagi 5,8 juta ton minyak sawit (CSPO dan *certified sustainable palm kernel*, CSPK) setiap tahun. Angka ini setara dengan 8% dari produksi minyak sawit dunia. Namun, sejauh ini baru 50% CSPO yang diserap pasar internasional, sisanya dijual dengan harga yang sama dengan minyak sawit tidak bersertifikat. Karena itu, selain bekerja keras untuk meningkatkan produksi CSPO, RSPO berusaha memperluas pasar CSPO di Eropa, India, dan China.

Sejalan dengan itu, Pemerintah Indonesia menerbitkan Permentan No. 19/2011 tentang *Indonesian Sustainable Palm Oil* (ISPO) dengan prinsip dan kriteria yang berlandaskan kelestarian lingkungan, kesejahteraan, dan meminimalkan konflik dengan penduduk lokal. Sebagai penghasil minyak sawit tertinggi di dunia (sekitar 22 juta t/tahun pada 2010), Indonesia berpotensi memproduksi minyak sawit yang bersertifikat *Indonesian Sustainable Palm Oil* (CISPO). India dan China, bahkan pasar Uni Eropa dan Amerika Serikat, berpotensi sebagai pasar CISPO, asal Indonesia mampu meyakinkan masyarakat dunia bahwa CISPO mempunyai kredibilitas yang setara dengan CSPO.

Perdagangan Karbon

Tingginya emisi atau hutang karbon negara-negara industri yang meratifikasi Protokol Kyoto mengharuskan mereka mengompensasi jumlah emisinya, antara lain melalui perdagangan karbon. Negara berkembang dijanjikan imbalan jasa bila mampu mengurangi emisi karbon dalam jumlah yang terukur, dilaporkan, dan terverifikasi (*measurable, reportable and verifiable*, MRV).

Sektor pertanian berpotensi menawarkan jasa karbon tanpa mengorbankan peran utamanya sebagai penopang ketahanan pangan, sumber lapangan kerja, dan sumber pendapatan. Oleh karena itu, perdagangan karbon di sektor pertanian harus dilaksanakan secara sukarela (*voluntary*) dan merupakan bagian integral dari pembangunan pertanian berkelanjutan.

INOVASI TEKNOLOGI KONSERVASI TANAH DAN KARBON PADA SEKTOR PERTANIAN

Teknologi konservasi tanah sebagian besar dicirikan oleh konservasi karbon. Inovasi teknologi konservasi

tanah yang sekaligus meningkatkan cadangan atau meminimalkan emisi karbon diuraikan sebagai berikut.

Inovasi Teknologi Konservasi pada Lahan Gambut

Apabila hutan gambut dibuka dan didrainase, maka lahan gambut tersebut akan menjadi sumber emisi GRK. Emisi CO₂ dari dekomposisi gambut umumnya tinggi dan melebihi kemampuan penyerapan CO₂ oleh tanaman. Inovasi teknologi konservasi yang berpotensi nyata menurunkan emisi pada lahan gambut antara lain (Mutalib *et al.* 1991; Agus *et al.* 2009):

1. Mempertahankan hutan gambut tetap sebagai hutan gambut (*avoided deforestation*). Dengan mempertahankan hutan gambut tetap sebagai hutan gambut, maka dua sumber emisi besar dapat diminimalkan, yaitu emisi dari kehilangan biomassa tanaman hutan dan emisi dari dekomposisi serta kebakaran gambut. Ini sejalan dengan Instruksi Presiden (Inpres) No. 10/2011 tentang penundaan pemberian izin baru dan penyempurnaan tata kelola hutan alam primer dan lahan gambut.
2. Restorasi atau rehabilitasi lahan gambut terdegradasi. Lahan gambut terlantar dan terdegradasi merupakan lahan gambut yang dipengaruhi oleh drainase dan untuk waktu yang relatif lama ditumbuhi paku resam, alang-alang, dan semak atau belukar dengan cadangan karbon pada biomassa relatif rendah. Lahan gambut terdegradasi merugikan dalam tiga hal: (a) menjadi sumber emisi, (b) rentan terhadap kebakaran, dan (c) tidak memberikan keuntungan ekonomi (Mutalib *et al.* 1991; Ditjen Perkebunan 2008; Herman *et al.* 2009, 2010; Husen dan Agus 2011). Apabila lahan terlantar ini direhabilitasi untuk pertanian, terutama untuk tanaman perkebunan yang toleran terhadap drainase dangkal seperti karet dan sagu, maka lahan akan menjelma menjadi sumber pendapatan dan sekaligus berpotensi mengurangi emisi GRK (Mutalib *et al.* 1991; Ditjen Perkebunan 2008; Agus *et al.* 2009). Terdapat sekitar 4,2 juta ha lahan gambut yang ditumbuhi semak dan belukar yang sebagian berupa lahan terlantar (Agus *et al.* 2012c). Rehabilitasi sekitar 0,25 juta ha dari lahan terlantar ini diperkirakan dapat memitigasi emisi 0,1 Gt CO₂ atau sekitar 13% dari 0,77 Gt CO₂ (26%) target penurunan emisi nasional menjelang tahun 2020 (Perpres No. 61/2011). Penggunaan semak belukar gambut untuk tanaman pangan dihadapkan pada masalah kesesuaian lahan. Namun dengan

- input* tinggi, terutama berupa abu dan pupuk kandang, tanah gambut terbukti mampu menghasilkan tanaman sayuran dan buah-buahan bernilai ekonomi tinggi. Tanah gambut dangkal juga dapat dijadikan sawah dengan hasil yang memuaskan. Perluasan tanaman pangan pada lahan gambut terdegradasi menurunkan emisi CO₂ dibandingkan perluasan pada hutan.
3. Pengelolaan lahan secara berkelanjutan. Mengelola lahan gambut yang sudah dijadikan area pertanian (*existing agricultural land*) dengan teknologi pengelolaan berkelanjutan antara lain dengan:
 - a. Menghindari penggunaan api dalam pembukaan lahan dan mengendalikannya untuk mencegah kebakaran gambut. Hutan dan lahan gambut yang dipengaruhi oleh drainase akan mudah terbakar, terutama pada tahun-tahun El-Niño dengan kemarau panjang. Lahan gambut dengan kedalaman drainase kurang dari 40 cm relatif aman dari kebakaran (Wosten *et al.* 1997, 2008).
 - b. Mengatur kedalaman muka air tanah gambut. Pada umumnya emisi CO₂ dari gambut meningkat dengan semakin dalamnya muka air tanah. Sistem pertanian tradisional yang memerlukan drainase dangkal seperti perkebunan karet rakyat, sagu, atau sawah cenderung lebih rendah mengemisikan CO₂. Oleh karena itu, kedalaman drainase perlu dipertahankan sedangkal mungkin selama tidak menurunkan hasil.
 - c. Menggunakan amelioran. Amelioran adalah bahan yang mengandung kation bervalensi tinggi, seperti Fe, Al, dan Cu, dan digunakan untuk memperbaiki berbagai sifat buruk tanah gambut, seperti kemasaman tinggi. Pemberian amelioran tanah liat 5-10 t/ha berpotensi mengurangi emisi CO₂ dari dekomposisi gambut sampai 28% (Mario 2002; BBSDLP 2011). Beberapa penelitian masih berlangsung untuk meyakinkan efektivitas berbagai bahan amelioran dalam menurunkan emisi.

Inovasi Teknologi Konservasi pada Lahan Mineral

Teknologi konservasi tanah banyak memengaruhi fluktuasi karbon. Tanah dengan kadar karbon rendah berpotensi menyerap karbon 0,2-0,3 t C/ha/tahun (Minasny *et al.* 2010). Lahan kritis yang direhabilitasi, cadangan karbonnya bisa meningkat 0,3-0,9 t C/ha/tahun (Lal 2011). Opsi mitigasi pada lahan mineral antara lain:

1. Rehabilitasi lahan mineral terlantar menjadi lahan perkebunan. Luas lahan semak belukar dan padang alang-alang diperkirakan 18,7 juta ha; lebih dari 10

- juta ha di antaranya tersebar di Kalimantan (Gunarso *et al.* 2012). Sebagian dari lahan ini berupa lahan terlantar dan sebagian lain adalah lahan transisi dari satu penggunaan ke penggunaan lainnya. Rehabilitasi 1 juta ha lahan ini menjadi lahan perkebunan diperkirakan akan mampu memitigasi 0,08 Gt CO₂ atau sekitar 10% dari target penurunan emisi 26% (Perpres No. 61/2011). Titik ungitnya adalah penyediaan modal dan teknologi bagi petani kecil untuk membersihkan lahan, pemberian sertifikat atau hak guna lahan, serta penyediaan bibit, pupuk, dan biaya hidup menjelang tanaman berproduksi.
2. Pengelolaan bahan organik tanah. Terdapat berbagai sumber bahan organik yang dapat dimanfaatkan untuk memperbaiki kesuburan tanah, antara lain pupuk kandang, kompos, pupuk hijau (dari tanaman penutup tanah/*cover crop*, tanaman lorong/*alley cropping*, dan *strip cropping*), dan sisa tanaman. Sebagian dari bahan organik ini akan tersimpan di tanah dalam bentuk bahan organik tanah dan meningkatkan cadangan karbon tanah.
 3. Penggunaan biochar. Biochar adalah sejenis arang yang dibuat dengan membakar bahan organik sisa tanaman melalui proses pembakaran dalam suasana oksigen terbatas (pirolisis). Karbon yang tersimpan di dalam biochar dapat bertahan sampai ribuan tahun. Bila digunakan sebagai bahan pembenah tanah (*soil conditioner*), selain mampu menyimpan karbon dalam waktu lama, biochar juga dapat memperbaiki sifat kimia, fisika, dan biologi tanah (Stevenson 1994; Agus dan Widiyanto 2004).

Dengan asumsi yang sangat konservatif, Agus *et al.* (2011c) memperkirakan penerapan berbagai teknologi konservasi tanah dan karbon pada sekitar 47 juta ha lahan pertanian dan lahan berstatus area penggunaan lain (APL, kawasan hutan yang dapat diubah menjadi lahan pertanian) akan dapat mengurangi emisi CO₂ minimal 43 juta t/tahun. Angka ini lima kali lebih besar dari perkiraan semula 8 juta t/tahun (Hillel 2004).

ARAH, SASARAN, DAN STRATEGI PENGEMBANGAN

Konservasi tanah dan karbon merupakan bagian integral dari pengelolaan lahan secara berkelanjutan dan sangat relevan dalam memecahkan masalah lokal dan global, terutama dalam konteks pertanian berkelanjutan, lingkungan, dan perubahan iklim. Arah, sasaran, dan strategi pengembangan konservasi tanah dan karbon diusulkan sebagai berikut.

Arah

Pengembangan konservasi tanah dan karbon diarahkan pada:

1. Rehabilitasi dan konservasi tanah di area pertanian saat ini agar lahan tetap atau lebih produktif serta berkontribusi dalam menurunkan emisi GRK dan atau meningkatkan rosot karbon.
2. Rehabilitasi lahan terlantar berupa padang alang-alang dan semak belukar (minimal 0,25 juta ha pada lahan gambut dan 1 juta ha pada tanah mineral) menjadi lahan pertanian, terutama perkebunan yang mempunyai kapasitas penyerapan dan penyimpanan karbon tinggi. Rehabilitasi ini diperkirakan mampu menurunkan emisi 23% dari target penurunan emisi 26% (0,77 Gt) menjelang tahun 2020.
3. Pengembangan teknologi konservasi tanah yang ramah lingkungan yang ditandai oleh produktivitas tinggi, emisi rendah, dan mampu meningkatkan cadangan karbon.

Sasaran

Sasaran utama konservasi tanah dan karbon di masa yang akan datang adalah meningkatkan dan mempertahankan produktivitas tanah dan sekaligus mempertahankan dan meningkatkan cadangan karbon di dalam tanah dan tanaman serta mengurangi emisi CO₂ dari berbagai *pool* karbon sampai tingkat optimum, sehingga dapat berkontribusi dalam mitigasi perubahan iklim dan menjamin keberlanjutan usaha pertanian.

Strategi

Strategi pengembangan teknologi konservasi tanah dan karbon diprioritaskan pada aspek yang memberikan manfaat ganda, yaitu keuntungan ekonomi yang nyata (*tangible benefits*) dan keuntungan lingkungan (*intangible benefits*). Untuk itu, strategi pengembangannya adalah sebagai berikut:

1. Pengembangan teknologi konservasi tanah yang sekaligus juga mengonservasi karbon.
2. Pengembangan sistem *climate smart agriculture* yang ditandai oleh tingkat emisi yang rendah tanpa mengorbankan produktivitas dan keuntungan usaha tani, termasuk di dalamnya *Indonesian carbon efficient farming* (ICEF), sistem intensifikasi tanaman ternak (SITT), pengelolaan tanaman (sumber daya) terpadu (PTT), dan *system of rice intensification* (SRI).

3. Pengembangan program bantuan sebagai modal awal dan insentif bagi petani.
4. Studi status lahan, potensi, kesesuaian, dan kelayakan sosial-ekonomi lahan terlantar untuk dijadikan lahan perkebunan.
5. Percepatan diseminasi dan adopsi teknologi konservasi tanah dan karbon.
6. Dukungan penelitian dan pengembangan dengan memadukan pengetahuan lokal (*indigenous knowledge*) dan teknologi hasil penelitian spesifik lokasi.

KESIMPULAN DAN IMPLIKASI KEBIJAKAN

Berdasarkan uraian terdahulu dapat diambil kesimpulan dan implikasi kebijakan sebagai berikut.

Kesimpulan

1. Konservasi tanah dan karbon saling berkaitan dan mempunyai arti strategis pada tingkat lokal dan global. Manfaat lokal harus diutamakan karena berhubungan langsung dengan pendapatan dan kesejahteraan petani serta keberlanjutan pembangunan pertanian. Manfaat global perlu dioptimalkan selama tidak mengorbankan kepentingan lokal dan nasional.
2. Peluang perdagangan karbon pada sektor pertanian, dalam bentuk *voluntary carbon market*, terbuka luas. Aspek yang berpotensi adalah yang mempunyai peluang mitigasi tinggi, antara lain rehabilitasi lahan terlantar dan pengelolaan lahan gambut secara berkelanjutan.
3. Rehabilitasi lahan terlantar/terdegradasi berupa semak belukar dan padang alang-alang menjadi lahan pertanian berpotensi memberikan manfaat konservasi karbon, penurunan emisi GRK, dan manfaat ekonomi. Diperlukan pengkajian tentang kejelasan status lahan, kesesuaian lahan, kesiapan teknologi, biaya, dan kesiapan kelembagaan untuk merehabilitasi lahan terlantar menjadi lahan pertanian yang produktif.

Implikasi Kebijakan

1. Konservasi tanah dan karbon perlu dirumuskan sebagai bagian integral dalam sistem pengelolaan lahan pertanian karena mempunyai arti penting

- bagi keberlanjutan pertanian. Biaya lingkungan dari penggunaan lahan seyogianya dimasukkan ke dalam biaya usaha tani.
2. Dalam perundingan internasional, mitigasi emisi GRK pada sektor pertanian perlu dipertahankan agar tetap bersifat sukarela (*voluntary*), bukan merupakan keharusan (*mandatory*) karena peran utama sektor pertanian adalah untuk menunjang ketahanan pangan, menyediakan lapangan kerja, dan sebagai sumber pendapatan.
 3. Kontroversi dan ketidakpastian (*uncertainty*) terhadap faktor emisi memerlukan lebih banyak dukungan pemerintah untuk penelitian yang memberikan jawaban tentang manfaat lingkungan (konservasi karbon) dan manfaat ekonomi penggunaan dan pengelolaan lahan, terutama lahan gambut.
 4. Dalam rangka mewujudkan visi *pro green, pro poor, dan pro growth*, pemerintah bersama perusahaan perkebunan swasta perlu membantu perkebunan rakyat untuk dapat meningkatkan produktivitas, terutama untuk perkebunan kelapa sawit rakyat yang produktivitasnya jauh lebih rendah dibandingkan perkebunan negara dan perkebunan swasta.
 5. Lahan pertanian saat ini, terutama lahan penghasil pangan berproduktivitas tinggi, perlu dilindungi dari konversi melalui peraturan perundang-undangan dan pemberian insentif kepada petani, seperti perbaikan prasarana dan sarana produksi pertanian. Konversi lahan penghasil pangan tidak saja dapat mengorbankan hutan dengan cadangan karbon tinggi, tetapi juga menimbulkan kerawanan pangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurachman, A. dan F. Agus. 2001. Konservasi tanah dan air melalui pengelolaan bahan organik. *Jurnal Air, Lahan, Lingkungan dan Mitigasi Bencana (Alami)* 6(1): 35-43.
- Agus, F. and D.K. Cassel. 1992. Field-scale bromide transport as affected by tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56(1): 254-260.
- Agus, F. 1997. Intensification of indigenous fallow rotation using *Leucaena leucocephala*. Paper #31. In M. Cairns (Ed.). Proceedings of Regional Workshop on Indigenous Strategies for Intensification of Shifting Cultivation in Asia-Pacific, Bogor, Indonesia, 23-27 June 1997.
- Agus, F., D.K. Cassel, and D.P. Garrity. 1998a. Bromide transport under contour hedgerow systems in sloping Oxisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62(4): 1042-1048.
- Agus, F., A. Ng. Ginting, U. Kurnia, A. Abdurachman, and P. van der Poel. 1998b. Soil erosion research in Indonesia: Past experience and future direction. pp. 255-267. In F.W.T. Penning de Vries, F. Agus, and J. Kerr (Eds.). *Soil Erosion at Multiple Scales: Principles and Methods for Assessing Causes and Impacts*. CAB International, Wallingford, UK.
- Agus, F., D.P. Garrity, D.K. Cassel, and A. Mercado. 1999a. Grain crop response to contour hedgerow systems on sloping Oxisols. *Agroforestry Systems* 42(2): 107-120.
- Agus, F., D.P. Garrity, and D.K. Cassel. 1999b. Soil fertility in contour hedgerow systems on sloping Oxisols in Mindanao, Philippines. *Soil Till. Res.* 50: 159-167.
- Agus, F. 2000a. Kontribusi bahan organik untuk meningkatkan produksi pangan pada lahan kering bereaksi masam. hlm. 87-104. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Sumberdaya Lahan, Bogor, 9-11 Februari 1999. Buku III. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Agus, F. 2000b. Smallholder acid upland soil management in Indonesia. *Soil Environ.* 3(1): 1-12.
- Agus, F. 2001. Selection of soil conservation measures in Indonesian greening program. pp. 198-202. In D.E. Stott, R.H. Mohtar, and G.C. Steinhardt (Eds.). *Sustaining the Global Farm: Selected Papers from the 10th International Soil Conservation Organization (ISCO) Meeting held on 24-29 May 2001 at Purdue University*. Purdue University Press, Purdue, the USA.
- Agus, F. 2004a. Environmental services of agriculture and farmers' practices worth rewarding. In F. Agus, Farida, and M. van Noordwijk (Eds.). *Hydrological Impacts of Forest, Agroforestry and Upland Cropping as a Basis for Rewarding Environmental Service Providers in Indonesia*. World Agroforestry Centre (ICRAF), SE Asia Regional Programme, Bogor, Indonesia.
- Agus, F. 2004b. Pengelolaan DTA danau dan dampak hidrologisnya. *Koran Tempo*, 21 Februari 2004.
- Agus, F. dan Widiyanto. 2004. *Petunjuk Praktis Konservasi Tanah Lahan Kering*. World Agroforestry Centre (ICRAF) SE Asia Regional Office, Bogor. 102 pp.
- Agus, F., R.L. Watung, Wahyuno, Irawan, A.R. Nurmanaf, Sutono, and S.H. Tala'ohu. 2005. Assessment of the multifunctionality of agriculture: Environmental aspects and community evaluation. pp. 93-154. Report of Phase I: Evaluation of Multifunctionality of Paddy Farming and Its Effects in ASEAN Countries Based on Country Case Studies. A Joint Project by ASEAN Member Countries and the Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries of Japan.
- Agus, F., M. van Noordwijk, K. Subagyono, K. Hairiah, D. Suprayogo, and A. Dariah. 2006. Soil structure and surface cover dominantly influence erosion and run off in Lampung, Indonesia. Paper presented at the 3rd Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources Conference, Bangkok, Thailand, 16-18 October 2006.
- Agus, F. 2007. Cadangan, emisi, dan konservasi karbon pada lahan gambut. hlm. 45-52. *Dalam* F. Agus dan N. Sinukaban (Ed.). *Bunga Rampai Konservasi Tanah dan Air*. Masyarakat Konservasi Tanah dan Air Indonesia.
- Agus, F. and M. van Noordwijk. 2007. CO₂ emissions depend on two letters. *The Jakarta Post*, 15 November 2007.
- Agus, F. 2008. Environmental risks of farming on peatland. pp. 65-74. In F. Agus and G. Tinning (Eds.). Proceedings of International Workshop on Post Tsunami Soil Management. Indonesian Soil Research Institute and NSW Department of Primary Industry, Bogor, Indonesia and Wallongbar, Australia.
- Agus, F. dan I.G.M. Subiksa. 2008. *Lahan Gambut: Potensi untuk Pertanian dan Aspek Lingkungan*. Booklet. Balai Penelitian Tanah and World Agroforestry Centre (ICRAF) SE Asia Regional Office, Bogor, Indonesia.

- Agus, F., Wahyunto, Herman, P. Setyanto, A. Dariah, E. Runtunuwu, I G.M. Subiksa, E. Susanti, E. Surmaini, dan W. Supriatna. 2009. Mitigasi Perubahan Iklim pada Berbagai Sistem Pertanian di Lahan Gambut di Kabupaten Kubu Raya dan Pontianak, Kalimantan Barat. Kementerian Riset dan Teknologi dan Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian, Bogor.
- Agus, F., Wahyunto, A. Dariah, P. Setyanto, I G.M. Subiksa, E. Runtunuwu, E. Susanti, and W. Supriatna. 2010a. Carbon budget and management strategies for conserving carbon in peatland: Case study in Kubu Raya and Pontianak Districts, West Kalimantan, Indonesia. pp. 217-233. *In* Z.S. Chen and F. Agus (Eds.). Proceedings of International Workshop on Evaluation and Sustainable Management of Soil Carbon Sequestration in Asian Countries, Bogor, Indonesia, 28-29 September 2010.
- Agus, F., E. Handayani, M. van Noordwijk, K. Idris, and S. Sabiham. 2010b. Root respiration interferes with peat CO₂ emission measurement. pp. 50-53. *In* Proceedings of 19th World Congress of Soil Science, Brisbane, Australia, 1-6 August 2010.
- Agus, F. 2011. Environmental and sustainability issues of Indonesian agriculture. *Indones. Agric. Res. Dev. J.* 30(4): 140-147.
- Agus, F., K. Hairiah, and A. Mulyani. 2011a. Measuring carbon stock in peat soil: Practical guidelines. World Agroforestry Centre-ICRAF SE Asia Regional Office and Indonesian Centre for Agricultural Land Resources Research and Development, Bogor, Indonesia. 60 pp.
- Agus, F., K. Hairiah, dan A. Mulyani. 2011b. Pengukuran Cadangan Karbon pada Tanah Gambut. Petunjuk Praktis. World Agroforestry Centre-ICRAF SE Asia Regional Office dan Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian, Bogor. 58 hlm.
- Agus, F., A. Mulyani, dan A. Dariah. 2011c. Peran sektor pertanian dalam mitigasi perubahan iklim. Prosiding Seminar Nasional Ilmu Tanah 2010. Jurusan Tanah, Fakultas Pertanian Universitas Negeri Jember, Jember, 16 Desember 2010.
- Agus, F., N. Harris, F. Parish, and M. van Noordwijk. 2012a. Approach in estimating CO₂ emissions from land use changes to oil palm plantation. RSPO, Kuala Lumpur.
- Agus, F., A. Mulyani, A. Dariah, Wahyunto, Maswar, and E. Susanti. 2012b. Peat maturity and thickness for carbon stock estimation. Proceedings of 14th International Peat Congress, Stockholm, Swedia, 3-8 June 2012.
- Agus, F., P. Gunarso, B.H. Sahardjo, K.T. Joseph, A. Rashid, K. Hamzah, N. Harris, and M. van Noordwijk. 2012c. Strategies for CO₂ emission reduction from land use changes to oil palm plantation in Indonesia, Malaysia and Papua New Guinea. RSPO, Kuala Lumpur.
- Andriessse, J.P. 1988. Nature and management of tropical peat soils. *FAO Soils Bull.* 59. FAO, Rome.
- BBSDLP (Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian). 2011. Laporan Akhir Indonesian Climate Change Trust Fund (ICCTF). BBSDLP, Bogor.
- Brearly, F.Q., S. Prajadinata, P.S. Kidd, J. Proctor, and Suriantata. 2004. Structure and Floristics of an old secondary rainforests in Central Kalimantan, Indonesia and a comparison with adjacent primary forest. *Forest Ecol. Mgmt.* 195(3): 385-397.
- Chao, K.J., O.L. Phillips, T.R. Baker, J. Peacock, G. Lopez-Gonzalez, R. Vasquez Martínez, A. Monteagudo, and A. Torres-Lezama. 2009. After trees die: quantities and determinants of necromass across Amazonia. *Biogeosciences* 6: 1615-1626.
- Cline, W.R. 2007. Global Warming and Agriculture. Center for Global Development, Peterson Institute for International Economics, Washington, DC. p. 186.
- Couwenberg, J., R. Dommain, and H. Joosten. 2010. Greenhouse gas fluxes from tropical peatlands in Southeast Asia. *Global Change Biol.* 16(6): 1715-1732.
- Dewi, S., N. Khasanah, S. Rahayu, A. Ekadinata, and M. van Noordwijk. 2009. Carbon Footprint of Indonesian Palm Oil Production: a Pilot Study. World Agroforestry Centre - ICRAF SE Asia Regional Office, Bogor, Indonesia.
- Ditjen Perkebunan. 2008. Road Map Kelapa Sawit. Ditjen Perkebunan, Jakarta.
- Gunarso, P., F. Agus, R.A. Malik, K.A. Hamzah, K.T. Joseph, and M.E. Hartoyo. 2012. Land use and land cover change in palm oil producing countries: With emphasis on Indonesia, Malaysia and Papua New Guinea.
- Hairiah, K. dan S. Rahayu. 2007. Pengukuran 'karbon tersimpan' di berbagai macam penggunaan lahan. World Agroforestry Centre - ICRAF SE Asia Regional Office, Bogor and University of Brawijaya, Malang, Indonesia. 77 pp.
- Hairiah, K., S. Dewi, F. Agus, S. Velarde, A. Ekadinata, S. Rahayu, and M. van Noordwijk. 2011. Measuring Carbon Stock Across Land Use Systems: A manual. World Agroforestry Centre, ICRAF SE Asia Regional Office, Bogor. 154 pp.
- Herman, F. Agus, dan I. Las. 2009. Analisis finansial dan keuntungan yang hilang dari pengurangan emisi karbon dioksida pada perkebunan kelapa sawit. *Jurnal Litbang Pertanian* 28(4): 127-133.
- Herman, F. Agus, dan I. Las. 2010. Kelayakan usaha dan *opportunity cost* penurunan emisi CO₂ dari perkebunan kelapa sawit di lahan gambut di Kabupaten Kubu Raya, Kalimantan Barat. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit* 18(1): 27-39.
- Hillel, D. 2004. Introduction to Environmental Soil Physics. Academic Press, San Diego, the USA.
- Hooijer, A., S.E. Page, J. Jauhiainen, W.A. Lee, X.X. Lu, A. Idris, and G. Anshari. 2012. Subsidence and carbon loss in drained tropical peatlands. *Biogeosciences* 9: 1053-1071.
- Husen, E. and F. Agus. 2011. Microbial activities as affected by peat dryness and ameliorant. *Am. J. Environ. Sci.* 7(4): 348-353.
- IPCC. 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. *In* H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, and K. Tanabe (Eds.). Prepared by The National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan.
- IPCC. 2007a. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- IPCC, 2007b. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the 4th Assessment Report. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- Istomo, Hardjanto, S. Rahaju, E. Permana, Suryawan, S.I. Hidayat, dan A. Waluyo. 2006. Monitoring dan evaluasi deliniasi potensi areal proyek karbon dan pendugaan cadangan karbon di wilayah kajian Taman Nasional Berbak dan *buffer-zone*, Provinsi Jambi dan areal eks-PLG, Provinsi Kalimantan Tengah. Laporan kerja sama penelitian Fakultas Kehutanan IPB dan Wetland International, Bogor.
- KLH (Kementerian Lingkungan Hidup). 2009. Indonesia Second National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Ministry of Environment, Jakarta.
- Lal, R. 2011. Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems. *Food Policy* 36(1): S33-S39.

- Laumonier, Y., A. Edin, M. Kanninen, and A.W. Munandar. 2010. Landscape-scale variation in the structure and biomass of the hill dipterocarp forest of Sumatra: Implications for carbon stock assessments. *Forest Ecol. Mgmt.* 259(3): 505-513.
- Mario, M.D. 2002. Peningkatan Produktivitas dan Stabilitas Tanah Gambut dengan Pemberian Tanah Mineral yang Diperkaya oleh Bahan Berkadar Besi Tinggi. Disertasi Program Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Minasny, B., Y. Sulaeman, and A.B. McBratney. 2010. Is soil carbon disappearing? The dynamics of soil organic carbon in Java. *Global Change Biol.* 17(5): 1917-1924.
- Murdiyarso, D. and U.R. Wasrin. 1996. Estimating land use change and carbon release from tropical forests conversion using remote sensing technique. *J. Biogeography* 22: 715-721.
- Mutalib, A.A., J.S. Lim, M.H. Wong, and L. Koonvai. 1991. Characterization, distribution and utilization of peat in Malaysia. *Proceedings of International Symposium on Tropical Peatland, Kuching, Serawak, Malaysia, 6-10 May 1991.*
- Oades, J.M. 1989. An introduction to organic matter in soils. pp. 89-159. *In* J.B. Dixon and S.B. Weed. *Minerals in Soils Environments.* SSSA, Madison, Wisconsin, the USA.
- Page, S.E., R. Morrison, C. Malins, A. Hooijer, J.O. Rieley, and J. Jauhiainen. 2011. Review of peat surface greenhouse gas emissions from oil palm plantations in Southeast Asia. *International Council on Clean Transportation.*
- Palm, C.A., P.L. Woome, J. Alegre, J.L. Arevalo, C. Castilla, D.G. Cordeiro, B. Feigl, K. Hairiah, J. Kotto-Same, A. Mendes, A. Moukam, D. Murdiyarso, R. Njomgang, W.J. Parton, A. Ricse, V. Rodrigues, S.M. Sitompul, and M. van Noordwijk. 1999. Carbon sequestration and trace gas emissions in slash and burn and alternative land uses in the humid tropics, ASB Climate Change Working Group Final Report, Phase II, ASB Coordination Office, ICRAF, Nairobi, Kenya.
- Palm, C., T. Tomich, M. van Noordwijk, S. Vosti, J. Gockowski, J. Alegre, and L. Verchot. 2004. Mitigating GHG emissions in the humid tropics: Case studies from the Alternatives to Slash-and-Burn Program (ASB). *Environ. Dev. Sust.* 6(1): 145-162.
- Prasetyo, L.B., G. Saito, and H. Tsuruta. 2000. Development of database for ecosystem changes and emissions changes of GHG using remote sensing and GIS in Sumatra Island, Indonesia. <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2000/ts11/glc00pf.htm> [10 November 2007].
- Rahayu, S., B. Lusiana, and M. van Noordwijk. 2005. Above ground carbon stock assessment for various land use systems in Nunukan, East Kalimantan. pp. 21-34. *In* B. Lusiana, M. van Noordwijk, and S. Rahayu (Eds.). *Carbon Stock Monitoring in Nunukan, East Kalimantan: A spatial and modeling approach.* World Agroforestry Centre, Southeast Asia Regional Office, Bogor, Indonesia.
- Schlesinger, W.H. and M.J. Roberts. 2009. Nonlinear temperature effects indicate severe damages to US crop yields under climate change. *PNAS* 106: 1594-1598.
- Scott, D.H. 2000. *Soil Physics: Agricultural and Environmental Applications.* Wiley Blackwell.
- Shofiyati, R., I. Las, and F. Agus. 2010. Indonesian soil database and predicted stock of soil carbon. *Proceedings of International Workshop on Evaluation and Sustainable Management of Soil Carbon Sequestration in Asian Countries, Bogor, Indonesia, 28-29 September 2010.*
- Stevenson, F.J. 1994. *Humus Chemistry. Genesis, Composition, and Reactions.* John Wiley and Sons, Inc., New York. 443 pp.
- Suhardjo, H. and I P.G. Widjaja-Adhi. 1976. Chemical characteristics of the upper 30 cm of peat soils from Riau. *ATA 106. Bull. Soil Res. Inst.* 3: 74-92.
- Van Noordwijk, M., S. Dewi, N. Khasanah, A. Ekadinata, S. Rahayu, J.P. Caliman, M. Sharma, and R. Suharto. 2010. Estimating the carbon foot print of biofuel production from oil palm: Methodology and results from two sites in Indonesia. *International Conference on Oil Palm and Environment, Bali, Indonesia, 23-25 February 2010.*
- Widjaja-Adhi, I P.G. 1997. Developing tropical peatlands for agriculture. pp. 45-54. *In* J.O. Rieley and S.E. Page (Eds.). *Biodiversity and Sustainability of Tropical Peat and Peatland. Proceedings of the International Symposium on Biodiversity, Environmental Importance and Sustainability of Tropical Peat and Peatlands, Palangkaraya, Central Kalimantan, 4-8 September 1999.* Samara Publishing Ltd., Cardigan, UK.
- Wösten, J.H.M., A.B. Ismail, and A.L.M. van Wijk. 1997. Peat subsidence and its practical implications: A case study in Malaysia. *Geoderma* 78: 25-36.
- Wösten, J.H.M., E. Clymans, S.E. Page, J.O. Rieley, and S.H. Limin. 2008. Peat-water interrelationships in a tropical peatland ecosystem in Southeast Asia. *Catena* 73(2): 212-224.