

# PERANAN PENTING PENGELOLAAN PENYERAPAN KARBON DALAM TANAH

*(The Important Roles of Managing Carbon Sequestration in Soils)*

**Harris Herman Siringoringo**

Pusat Penelitian dan Pengembangan Konservasi dan Rehabilitasi, Jl. Gunung Batu, Po Box 165,  
Bogor 16001; Telp (0251) 8633234; 7520067/Fax: (0251) 8638111, e-mail : ringobogor@gmail.com.

Diterima 15 Januari 2014, direvisi 25 Februari 2014, disetujui 29 Juni 2014

## ABSTRACT

*This paper represents a review of managing carbon sequestration in soils derived from various sources and aims to provide scientific information and policy inputs to decision makers in agriculture and forestry sectors. The study was focused on soil carbon sequestration and functions; factors which influence soil carbon levels; how much carbon can be stored; and land management options for carbon sequestration. Soil carbon sequestration will stimulate important changes in land management and has a significant effect on soil properties, and agriculture and forest land quality. Increasing soil organic carbon (SOC) stocks through the increase of inputs and/or decreasing C decomposition is the heart of SOC sequestration.*

*Keywords: Soil organic carbon, carbon sequestration, carbon stocks, agriculture and forest land management.*

## ABSTRAK

Naskah ini menyajikan kajian tentang pengelolaan penyerapan/sekuestrasi karbon organik di dalam tanah yang dirangkum dari berbagai sumber dan bertujuan untuk menyediakan informasi dan input kebijakan untuk pengambil keputusan pada sektor pertanian dan kehutanan. Kajian difokuskan pada sekuestrasi dan fungsi karbon organik tanah; faktor-faktor yang mempengaruhi sekuestrasi/simpanan karbon organik tanah; jumlah karbon yang dapat disimpan di dalam tanah; dan opsi pengelolaan lahan untuk meningkatkan simpanan/sekuestrasi karbon tanah. Sekuestrasi karbon ke dalam tanah akan mendorong perubahan penting dalam pengelolaan lahan dan mempunyai efek yang signifikan terhadap sifat-sifat tanah dan kualitas lahan pertanian dan kehutanan. Peningkatan simpanan karbon organik tanah melalui peningkatan pasokan dan atau penurunan dekomposisi karbon adalah jantung dari sekuestrasi karbon organik tanah.

Kata kunci: Karbon organik tanah, sekuestrasi karbon, simpanan karbon, pengelolaan lahan pertanian dan kehutanan.

## I. PENDAHULUAN

Peningkatan gas rumah kaca (*green house gas*/GHG), terutama karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), merupakan faktor utama yang berkontribusi dan berdampak besar terhadap perubahan iklim pada abad ke-21 (Robert, 2001). Dua

proses antropogenik yang paling penting dan bertanggung jawab atas pelepasan CO<sub>2</sub> ke atmosfer adalah oksidasi bahan bakar fosil (batubara, minyak, dan gas alam) dan perubahan tataguna lahan/deforestasi (The Word Bank, 2012). Lepasnya karbon (C) ke atmosfer mempunyai efek ganda pada

lingkungan. Pertama, penurunan kualitas atau produktivitas tanah yang mempengaruhi efisiensi penggunaan pasokan (*input*) bahan organik; mengurangi hasil pertanian; dan memperburuk kerawanan pangan. Kedua, peningkatan konsentrasi GHG di atmosfer mempercepat pemanasan global (Dahal & Bajracharya, 2010; Lal, 2009). Salah satu sinyal yang jelas dari pemanasan global adalah mencairnya gletser di beberapa bagian dunia. Pencairan dan penyusutan gletser yang cepat mempunyai dampak yang parah terhadap pasokan air dan energi, fluktuasi permukaan laut, pola vegetasi, aktivitas ekonomi, dan terjadinya bencana alam (Victoria *et al.*, 2012).

Protokol Kyoto mengakui bahwa laju emisi dapat dikurangi, baik dengan mengurangi laju di mana GHG diemisikan ke atmosfer maupun dengan meningkatkan laju di mana GHG akan dipindahkan dari atmosfer melalui penyerapan/sekuestrasi karbon dalam tanah atau biomassa daratan, terutama pada lahan yang digunakan untuk pertanian atau kehutanan (Robert, 2001; Walcott *et al.*, 2009). Sejak Protokol Kyoto, perubahan sekuestrasi karbon disebut sebagai akibat “*Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF)*” dan berkenaan dengan artikel 3.3 dan 3.4 dari Protokol Kyoto (IPCC, 2000).

Sekuestrasi karbon organik tanah (*soil organic carbon/SOC*) telah dianggap sebagai salah satu strategi untuk mitigasi perubahan iklim dan berkaitan dengan penyimpanan karbon ke dalam tanah (Chan *et al.*, 2008; Lal, 2009). Jika semakin banyak karbon disimpan dalam tanah sebagai karbon organik, akan mengurangi jumlah karbon yang ada di atmosfer sehingga membantu untuk mengurangi masalah pemanasan global dan perubahan iklim (Chan, 2008). Selain potensi untuk menyeimbangkan (*offset*) emisi antropogenik, peningkatan jumlah simpanan SOC juga dapat meningkatkan kualitas tanah karena mempengaruhi ketiga aspek kesuburan

tanah yaitu kesuburan kimia, fisik, dan biologi (Chan *et al.*, 2008). Sekuestrasi karbon ke dalam tanah akan mendorong perubahan penting dalam pengelolaan lahan melalui peningkatan kandungan bahan organik, dan akan memiliki efek langsung yang signifikan terhadap sifat-sifat tanah dan dampak positif pada kualitas lingkungan atau kualitas pertanian dan keanekaragaman hayati. Konsekuensinya akan mencakup peningkatan kesuburan tanah, produktivitas lahan untuk produksi pangan dan ketahanan pangan. Aspek ekonomi ini juga akan membuat praktik-praktik pertanian lebih lestari dan membantu untuk mencegah atau mengurangi degradasi sumber daya lahan (Robert, 2001).

Jumlah simpanan karbon organik global yang ditemukan dalam tanah, sekitar 1.400-1.600 Pg C (1 Pg = satu miliar ton) pada kedalaman satu meter pertama dan tambahan sekitar 500 -1.000 Pg C pada satu meter berikutnya (Govers *et al.*, 2013), adalah sekitar dua kali jumlah karbon pada atmosfer (770 Gt), dan tiga kali jumlah karbon pada vegetasi (560 Gt) (Chan, 2008; Liddicoat *et al.*, 2010). Sebagai gudang penyerapan/penyimpanan karbon (*carbon sinks*) terbesar ketiga setelah lautan dan penyerapan geologi (*geologic sinks*) - yang terdiri dari bahan bakar fosil - pada planet bumi, tanah memiliki potensi perluasan penyerapan karbon dan memungkinkan suatu cara yang prospektif dalam mitigasi peningkatan CO<sub>2</sub> atmosfer (Bell & Lawrence, 2009).

Secara teoritis, potensi sekuestrasi karbon tanah adalah setara dengan kehilangan karbon pada masa lalu yang bersifat kumulatif, walaupun hanya 50-60% (*new steady state*) dari kapasitasnya (*steady state*) dapat dicapai melalui seleksi praktik-praktik pengelolaan lahan yang lestari (The World Bank, 2012). Sekitar setengah dari semua SOC dalam pengelolaan ekosistem telah hilang ke atmosfer selama dua abad terakhir dan kondisi tersebut sekarang

merupakan kesempatan untuk penyimpanan karbon (McCarl *et al.*, 2007). Semakin parah kerusakan suatu wilayah lahan, semakin besar peluang sequestrasi karbon (McKenzie, 2010).

Oleh karena pentingnya gudang karbon/penyimpanan karbon di dalam tanah, pemahaman tentang faktor-faktor yang mempengaruhi dinamika sequestrasi karbon tanah adalah penting. Sequestrasi karbon tanah adalah suatu proses yang kompleks yang dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain kondisi tanah (tekstur dan mineralogi), iklim, dan praktik-praktik pengelolaan. Di Indonesia, informasi yang diperlukan untuk mencapai pemahaman seperti ini masih langka.

Naskah ini merupakan kajian yang dirangkum dari berbagai sumber dan bertujuan untuk memberikan informasi dan masukan kepada para pembuat kebijakan tentang peranan penting pengelolaan penyerapan karbon dalam tanah. Kajian difokuskan pada sequestrasi dan fungsi SOC, faktor-faktor yang mempengaruhi sequestrasi SOC, jumlah karbon yang dapat disimpan di dalam tanah, dan opsi pengelolaan lahan untuk meningkatkan sequestrasi karbon tanah.

## II. SEQUESTRASI DAN FUNGSI KARBON ORGANIK TANAH

Proses sequestrasi karbon tanah atau perpindahan CO<sub>2</sub> atmosfer ke dalam tanah merupakan bagian dari keseimbangan karbon global (FAO, 2004). Ada dua cara di mana SOC disimpan dalam tanah (Bardgett, 2005), yaitu biomassa dari mikroba tanah dan residu tanaman yang terurai dengan mudah. Karbon dipertukarkan antara tanah dan atmosfer melalui proses fotosintesis dan dekomposisi. Tanaman menyerap CO<sub>2</sub> dan menahan karbon pada saat yang bersamaan melepaskan oksigen melalui proses fotosintesis. Karbon yang ditahan oleh tanaman, kemudian dipindahkan

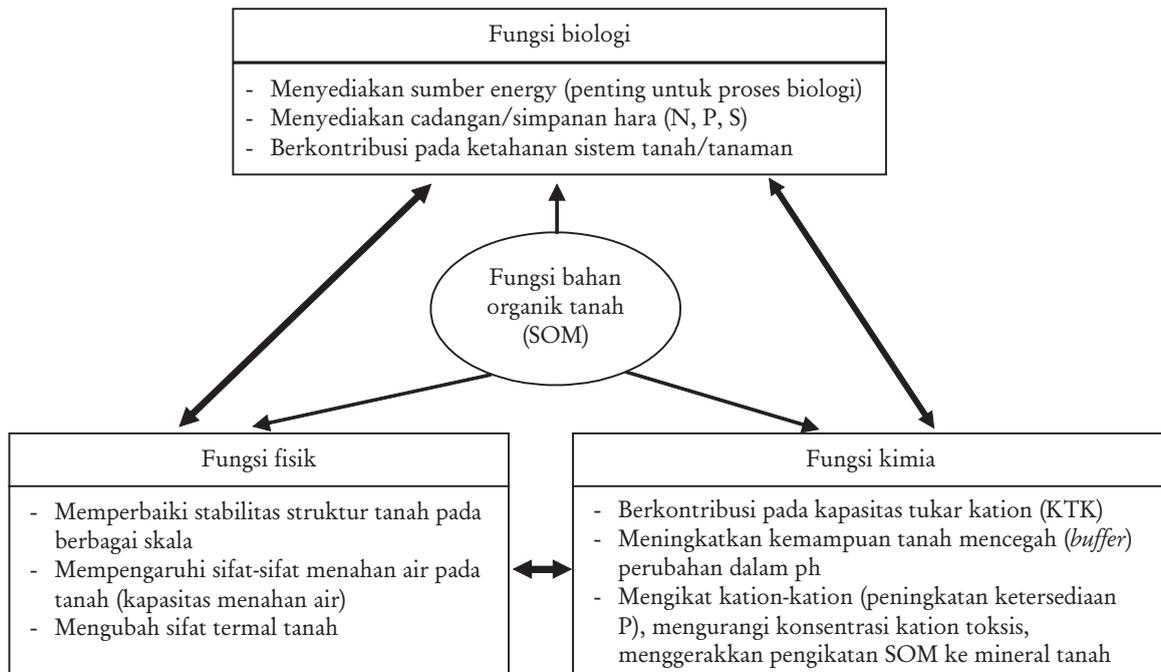
ke tanah via akar selama penguraian residu tanaman (Dahal & Bajracharya, 2010). Pada kebanyakan tanaman sebanyak 30-50% dari karbon yang terfiksasi dalam fotosintesis pada awalnya dipindahkan ke bawah permukaan tanah yang digunakan beberapa bagian untuk pertumbuhan struktur dari sistem akar, respirasi tanaman (*autotrophic*), dan beberapa bagian hilang ke dalam tanah sekitar dalam bentuk organik (*rhizodeposition*), baik dipisahkan dalam bentuk jaringan mati dari jaringan hidup selama ekspansi akar maupun diekskresikan dalam berbagai senyawa (Baker *et al.*, 2006). Selanjutnya, karbon ditahan di dalam tanah dalam bentuk residu tanaman yang secara perlahan menyatu ke dalam gudang SOC melalui proses humifikasi dan penyatuan ke dalam agregat tanah (McKenzie, 2010) yang tidak segera diemisikan kembali (Sundermeier *et al.*, 2005). Karbon yang disimpan pada biomassa permukaan tanah atau residu tanaman dilepaskan kembali ke atmosfer pada saat pembakaran atau dekomposisi dan terus-menerus. Dengan demikian, ada suatu siklus dinamis dalam penyerapan, pengendapan, dan transformasi karbon antara udara dan tanah melalui tanaman (Dahal & Bajracharya, 2010).

Pada iklim kering dan semi kering, sequestrasi karbon tanah dapat terjadi dari konversi CO<sub>2</sub> dari udara yang didapati di tanah menjadi asam karbonat, dan pengendapan kembali (*re-precipitation*) dalam bentuk karbon anorganik, seperti kalsium dan magnesium karbonat atau disebut sebagai karbonat sekunder (*translocated lime*), namun, laju pembentukan karbon anorganik relatif rendah (Lal, 2008; McKenzie, 2010).

Bahan organik tanah (*soil organic matter/SOM*) dan khususnya SOC berfungsi secara bersamaan, baik sebagai sumber maupun sebagai penyerap hara. SOC memainkan peranan penting dalam pemeliharaan kesuburan tanah (Bationo *et al.*, 2006) dan

pertanian yang berkelanjutan karena mempengaruhi ketiga aspek kesuburan tanah, yaitu kesuburan kimia, fisik, dan biologi (Gambar 1) (Chan *et al.*, 2008; Krull *et al.*, 2004; Onti & Schulte, 2012). Fungsi biologi memberikan nutrisi dan habitat bagi organisme yang hidup di tanah, menyediakan energi untuk proses biologi dan berkontribusi terhadap ketahanan tanah (kemampuan tanah untuk kembali ke keadaan awal setelah gangguan). Fungsi kimia mempengaruhi kapasitas retensi hara, memberikan ketahanan terhadap perubahan pH dan simpanan utama dari banyak nutrisi penting terutama nitrogen dan kalium. Fungsi

fisik mengikat partikel tanah ke dalam agregat untuk meningkatkan stabilitas struktur tanah, meningkatkan kapasitas menahan air dari perubahan tanah dan mengendalikan suhu tanah. Banyak sifat-sifat tanah yang mendasar tergantung pada keberadaan jumlah karbon atau bahan organik. SOM tanah membantu untuk mengatur kelembaban tanah, siklus hara, aktivitas mikroba, struktur dan agregasi tanah. Dengan demikian, SOC merupakan komponen penting dari tanah apapun, terutama yang digunakan untuk pertanian (Barnett, 2012).



Sumber (Source): Krull *et al.* (2004)

Gambar 1. Fungsi yang dilakukan oleh kehadiran bahan organik di dalam tanah.  
 Figure 1. Functions performed by organic matter present in soils.

Interaksi yang kuat sering terjadi di antara fungsi-fungsi yang berbeda (kimia, fisik, dan biologi). Sebagai contoh, SOC dalam fungsi biologi menyediakan energi yang mendorong kegiatan organisme tanah/biota tanah (jamur/fungi, bakteri, tungau, cacing tanah, semut,

dan kelabang) mengakibatkan perbaikan stabilitas struktur tanah dan kapasitas menahan air. SOC dan biota tanah terkait mendukung pengembangan pedologis (pembentukan, karakteristik, dan distribusi tanah) yang membantu menstabilkan tanah dari erosi

dan menciptakan jalur yang memungkinkan infiltrasi air yang lebih besar dan pemanfaatan (mengurangi limpasan dan pelindung dari penguapan) (fungsi fisik) (Liddicoat *et al.*, 2010), membentuk bahan organik yang dapat berkontribusi terhadap pertukaran kation dan penyangga pH, dan mempengaruhi jumlah nitrogen yang dapat tersedia bagi tanaman (fungsi kimia) (Baldock, 2012). SOC berfungsi untuk meningkatkan dinamika dan ketersediaan unsur-unsur hara hayati utama. Melalui dekomposisi, SOM melepaskan nitrogen, fosfor, dan berbagai nutrisi lainnya untuk pertumbuhan tanaman. SOM juga dapat mengurangi efek dari zat-zat berbahaya dengan bertindak sebagai penyangga, misalnya penyerapan racun dan logam berat, dan meningkatkan degradasi pestisida berbahaya (Chan, 2008). SOM merupakan penentu utama aktivitas biologis. Jumlah, keragaman, dan kegiatan fauna dan mikro-organisme tanah secara langsung berkaitan dengan bahan organik. Bahan organik dan kegiatan biologis yang dihasilkannya memiliki pengaruh besar pada sifat fisik dan kimia tanah. Agregasi dan kestabilan struktur/kekuatan kohesif tanah meningkat dengan kandungan bahan organik, yang pada gilirannya meningkatkan laju infiltrasi dan kapasitas air tersedia pada tanah, serta ketahanan terhadap erosi oleh air dan angin (Robert, 2001; Victoria *et al.*, 2012), pertukaran gas, pertumbuhan akar, dan kemudahan pengolahan lahan (Chan, 2008).

SOC mempengaruhi banyak karakteristik tanah termasuk warna, kapasitas menahan hara (kapasitas pertukaran kation dan anion), pergantian dan stabilitas hara, yang pada gilirannya mempengaruhi interaksi air, aerasi, dan kegunaannya. Pada tanah dengan kandungan liat tinggi, kontribusi dalam pertukaran kation pada fraksi organik umumnya kecil dibandingkan pada fraksi liat, sedangkan pada tanah berpasir, kontribusi relatif dari fraksi organik lebih tinggi karena fraksi liat sedikit, walaupun jumlah kehadiran

SOC dapat sama atau kurang pada tanah berliat. Dengan menyediakan sumber makanan bagi mikro-organisme, karbon organik dapat membantu untuk memperbaiki stabilitas tanah melalui mikro-organisme yang mengikat partikel tanah bersama-sama ke dalam agregat atau '*peds*'. Ekskresi bakteri, eksudat akar (*root exudates*) - proses pelepasan C labil dari akar halus yang hidup ke dalam tanah, hipa jamur, dan akar tanaman semuanya dapat berkontribusi pada struktur tanah yang lebih baik (Pluske *et al.*, 2014).

### III. FAKTOR YANG MEMPENGARUHI SIMPANAN KARBON TANAH

SOC terjadi di dalam suatu gudang (*reservoir/pool*) yang membentuk bagian dari siklus karbon global (Chan, 2008). Karbon secara terus-menerus memasuki dan meninggalkan tanah, yang mencerminkan keseimbangan antara dua proses yang berlawanan (*bidirectional*) dari akumulasi dan kehilangan (FAO, 2004; Liddicoat *et al.*, 2010). SOC terdistribusi secara beragam di antara sel-sel tanah (*soil compartment*) dan kualitas, ketersediaan, dan stabilitasnya juga sangat beragam. Sifat-sifat senyawa penyusun SOC sangat beragam, mulai dari senyawa SOC yang terdegradasi sangat mudah hingga senyawa yang secara fisik tahan terhadap dekomposisi atau struktur molekulnya sangat stabil (Breulmann, 2011) - karena siklus karbon tanah berinteraksi dengan air dan siklus hara serta biota tanah (Liddicoat *et al.*, 2010). Berdasarkan ukuran, kemudahan dekomposisi, sifat kimia dan fisik, tipe/fraksi (*pool*) karbon atau bahan organik tanah pada umumnya dibagi dalam tiga tipe (cepat, lambat, dan pasif) yang menggambarkan berapa cepat terurai dan diganti oleh yang baru (Corsi *et al.*, 2012; Walcott *et al.*, 2009).

Secara umum fotosintesis mengubah CO<sub>2</sub> atmosfer menjadi karbohidrat (*plant sugar*)

yang menyediakan dua rantai makanan: melalui pertumbuhan tunas di atas permukaan tanah dan pertumbuhan akar di bawah permukaan tanah. Ketika tanaman bertumbuh produktif, akar dan keterkaitan fungi/jamur yang menguntungkan dan mikro-organisme lainnya bertumbuh dan meningkatkan SOC. Karbon dalam eksudat akar menyediakan pasokan makanan berharga untuk unsur biota tanah. Pengurai (bakteri, jamur, dan biota yang lebih besar) juga tumbuh dan berkembang-biak, memakan SOC dan mengubahnya menjadi bentuk yang lebih stabil, akhirnya menjadi humus. Aktivitas biota tanah membentuk dan mendaur ulang unsur-unsur hara sementara sebagian karbon dimineralisasi menjadi CO<sub>2</sub> dan hilang ke atmosfer (Liddicoat *et al.*, 2010). Ketika pasokan dan kehilangan karbon berada dalam keseimbangan satu sama lainnya, tidak ada perubahan bersih pada jumlah SOC. Jika pasokan karbon dari fotosintesis melebihi karbon yang hilang, jumlah SOC bertambah terus-menerus (Onti & Schulte, 2012). Jika produksi tanaman

menurun atau berhenti, pasokan karbon juga menurun atau berhenti. Jika pasokan karbon dari fotosintesis menjadi benar-benar tidak ada, pengurai (bakteri, jamur, dan biota yang lebih besar) hadir untuk mendominasi dan, dengan demikian, kandungan SOC menurun (Liddicoat *et al.*, 2010). Tanpa pasokan karbon organik yang terus-menerus, jumlah yang tersimpan dalam tanah akan menurun dari waktu ke waktu karena karbon organik selalu terdekomposisi oleh mikro-organisme (Carson, 2014). SOC secara efektif dalam keadaan tetap dalam perubahan yang terus-menerus (*constant state of flux*), perlahan-lahan merespon perubahan lingkungan dan bergerak menuju tingkat keseimbangan baru ketika perubahan terjadi (Liddicoat *et al.*, 2010).

Broos & Baldock (2008) membuat analogi siklus dan simpanan SOC yang ditunjukkan dengan sebuah ember/*bucket* (potensi simpanan/*potential storage*) dengan suatu kran pasokan/*input tap* (residu tanaman) dan kran kehilangan (*losses tap*) - proses dekomposisi mikroba dan mineralisasi (Gambar 1).

Pasokan ( <i>Input</i> )	Simpanan karbon tanah ( <i>Soil carbon stock</i> )	Kehilangan ( <i>Output</i> )
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Net primary productivity</i>/NPP (fotosintesis)</li> <li>- Tambah bahan organik dari luar</li> </ul> Faktor: <ul style="list-style-type: none"> <li>- curah hujan/irigasi yang cukup</li> <li>- kesuburan tanah</li> <li>- komposisi tanaman</li> <li>- pertanian konservasi</li> <li>- tanaman hidup selama beberapa tahun (<i>perennials</i>)</li> <li>- menahan residu tanaman (misalnya hindari pembakaran, pemotongan jerami, dan penggembalaan berlebihan)</li> </ul>	 <p>Simpanan karbon tanah merespon perubahan terhadap pasokan dan kehilangan - sering bergerak secara lambat menuju keseimbangan baru</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Konversi karbon tanah ke CO<sub>2</sub> selama dekomposisi</li> <li>- Pemindahan bahan organik</li> </ul> Faktor: <ul style="list-style-type: none"> <li>- suhu tinggi</li> <li>- aktifitas mikroba</li> <li>- pengolahan lahan</li> <li>- masa bera</li> <li>- erosi</li> </ul>

Gambar 2. Kandungan karbon tanah dinyatakan dengan potensi simpanan, pasokan, dan kehilangan.  
 Figure 2. Soil carbon content is defined by potential storage, inputs and losses.

### A. “Ember” (Potensi Simpanan Karbon Tanah)

Jumlah SOC dianalogikan sebagai ember bocor (*leaking bucket*) yang terus-menerus mempunyai keperluan untuk mencapai bagian paling atas (*topping up*). Ukuran ember menggambarkan jumlah total karbon di mana tanah mungkin dapat menampung. Ukuran ember sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat tanah (kandungan liat, kedalaman tanah, kerapatan massa tanah/BD) dan praktik-praktik pengelolaan tidak dapat mempengaruhi ukuran ember. Misalnya, ember atau potensi simpanan karbon di dalam tanah akan selalu menjadi lebih kecil pada tanah pasir daripada tanah liat (CSIRO, 2011) kecuali, misalnya, pengaruh pengelolaan terhadap pemadatan/BD atau intervensi seperti penambahan liat pada tanah berpasir (*sandy soil*) (Liddicoat *et al.*, 2010). Semakin tinggi % tekstur liat (tekstur lebih berat), semakin besar kemampuan tanah untuk menahan karbon. Tipe terkecil dari liat (*clay platelets*) melapisi bahan organik membentuk agregat stabil, secara fisik melindungi bahan organik dari dekomposisi mikroba. Sebagai perbandingan, laju pergantian (*turnover rate*) yang cepat pada bahan organik terjadi pada tanah dengan kandungan liat yang kecil atau kandungan liat tidak ada. Hal ini menjelaskan mengapa peningkatan karbon organik pada tanah pasir yang bertekstur kasar adalah sulit (Hoyle & Murphy, 2008; Gupta *et al.*, 2008). Komposisi mineral dari liat juga dapat mempengaruhi simpanan karbon. Kehadiran kation multivalen seperti kalsium, aluminium, atau besi, menyebabkan akumulasi karbon organik dibandingkan dengan jenis tanah lainnya (Liddicoat *et al.*, 2010).

### B. “Keran Pasokan” (Membangun Karbon Tanah)

Sebagian besar karbon memasuki tanah sebagai residu tanaman (tunas dan akar) dan

dengan demikian pasokan karbon tanah terutama dipengaruhi oleh tipe tanaman yang tumbuh, jumlah bahan kering tanaman yang terakumulasi pada masa pertumbuhan, dan faktor lingkungan yang mengendalikan produksi tanaman (CSIRO, 2011). Setiap praktik yang meningkatkan produktivitas dan pengembalian residu tanaman ke dalam tanah membuka kran pasokan (*input tap*) - membangun SOC. Faktor-faktor pasokan (seperti curah hujan, irigasi, kebutuhan bahan organik dari luar, pupuk, tipe dan komposisi tanaman, jamur mikoriza) juga dapat menggambarkan keterbatasan, di mana tidak cukup pasokan tertentu akan membatasi produktivitas tanaman. Seleksi tanaman dengan massa akar yang lebih besar dan/atau dekomposisi akar yang lebih lambat akan membantu sekuestrasi SOC. Tanaman tahunan dengan akar yang dalam umumnya diperlukan untuk meningkatkan SOC pada lapisan tanah yang lebih dalam di bawah 10 cm. Juga ada aspek-aspek yang bersifat sementara karena faktor-faktor dapat berubah dengan waktu. Perbaikan produktivitas harus dipertahankan untuk mempertahankan peningkatan SOC (Liddicoat *et al.*, 2010).

Jumlah dan kualitas pasokan karbon ke dalam tanah merupakan fungsi kehadiran vegetasi. Tanah yang terbentuk di bawah vegetasi rumput (*prairie*) biasanya memiliki tingkat bahan organik setidaknya dua kali lipat di bawah tanah hutan karena bahan organik ditambahkan ke lapisan atas (*topsoil*) dari pertumbuhan di atas tanah dan akar yang mati kembali setiap tahun. Tanah yang terbentuk di bawah hutan biasanya memiliki tingkat bahan organik yang rendah pada tingkat yang sama karena dua faktor utama, yaitu: pohon menghasilkan massa akar yang jauh lebih rendah per luasan daripada tanaman rumput dan pohon tidak mati dan membusuk setiap tahun; sebaliknya, sebagian besar bahan organik di hutan terikat dalam kayu pohon daripada kembali ke tanah setiap tahun. Bahan

organik tanah umumnya meningkat di mana produksi biomassa lebih tinggi dan di mana penambahan bahan organik terjadi (USDA-NRCS, 2014). Peningkatan produksi biomassa tanaman kemungkinan akan meningkatkan SOC, sementara penambahan residu tanaman dengan rasio karbon (C) : nitrogen (N) yang lebih tinggi dan rasio N : lignin yang lebih rendah akan mengurangi laju dekomposisi residu dan kemungkinan dapat mempertahankan atau meningkatkan SOC. Kegiatan dan keragaman dekomposer dan fauna tanah juga penting bagi SOC. Cacing tanah, semut, dan rayap dapat meningkatkan jumlah karbon organik yang stabil pada beberapa jenis tanah dan pada tanah dengan populasi organisme tanah yang tinggi. Dekomposisi residu tanaman dan SOC dapat ditingkatkan (Baldock & Skjemstad, 1999).

### **C. “Keran Kehilangan” (Penyebab Penurunan Karbon Tanah)**

Kehilangan simpanan SOC disebabkan oleh faktor-faktor: penurunan jumlah biomassa (di atas dan di bawah permukaan tanah) yang dikembalikan ke dalam tanah; perubahan dalam distribusi kedalaman akar tanaman; perubahan rezim kelembaban tanah/air tanah dan suhu yang meningkatkan dekomposisi bahan organik; penurunan NPP; dekomposisi residu tanaman yang tinggi oleh karena perbedaan dalam rasio C : N dan kandungan lignin; gangguan yang dipengaruhi pengolahan lahan, penurunan agregasi tanah, dan penurunan perlindungan fisik bahan organik tanah; peningkatan erosi tanah (Lal, 2005a); pencucian karbon organik terlarut (*dissolved organic carbon*) (Liddicoat *et al.*, 2010); dan respirasi oleh akar tanaman. Oleh karena sifatnya yang sangat sementara, respirasi dari akar tanaman tidak dihitung dalam kehilangan SOC untuk penyerapan karbon meskipun menyumbang sekitar setengah emisi karbon dioksida dari tanah (Walcott *et al.*, 2009).

Faktor yang meningkatkan dekomposisi (seperti suhu, aktivitas mikroba, pengolahan tanah/gangguan pada tanah, erosi, masa bera) membuka “kran kehilangan” lebih lanjut (Liddicoat *et al.*, 2010). Dekomposisi terjadi ketika mikro-organisme menggunakan karbon organik dalam tanah untuk mendapatkan karbon, nutrisi, dan energi yang mereka butuhkan untuk hidup. Selama dekomposisi, karbon organik hilang dari tanah karena mikro-organisme merubah sekitar setengah karbon organik menjadi CO<sub>2</sub>. Tanpa pasokan karbon organik yang terus-menerus, jumlah yang tersimpan dalam tanah akan menurun dari waktu ke waktu karena karbon organik selalu terdekomposisi oleh mikroorganisme (Carson, 2014). Laju dekomposisi ditentukan oleh: tipe bahan tanaman dan hewan yang memasuki tanah; kondisi iklim (curah hujan, suhu, sinar matahari); kandungan liat tanah (CSIRO, 2011). Pada wilayah dengan suhu yang lebih tinggi, bahan organik akan mengurai lebih cepat (apabila kelembaban yang memadai juga tersedia). Hal ini tidak dapat dihindari dan akan lebih sulit untuk mampu menyimpan sejumlah besar SOC pada wilayah dengan suhu tinggi. Lingkungan yang panas dan lembab dapat mendorong tingkat aktivitas mikroba yang tinggi. Jika pasokan tanaman berhenti, bahan organik yang ada dapat terurai dengan cepat. Sebaliknya, pada tingkat aktivitas mikroba yang sangat rendah, bahan organik dapat perlahan-lahan mengakumulasi dan membangun ke tingkat yang relatif tinggi, meskipun berada pada lingkungan produktivitas tanah yang miskin. Kehilangan karbon organik dari erosi tanah permukaan juga dapat memiliki dampak besar pada jumlah karbon organik yang tersimpan dalam tanah karena karbon organik terkonsentrasi pada lapisan tanah permukaan sebagai partikel kecil yang mudah tergerus (Carson, 2014).

Beberapa praktik-praktik pengelolaan pada lahan pertanian, seperti budidaya/pengolahan

lahan, masa bera, pembakaran tunggul/rintisan batang yang tersisa (*stubble burning*) dan pemindahan di lapangan, serta pengembalaan juga dapat mengurangi SOC oleh karena penurunan pasokan ke tanah, peningkatan dekomposisi dari bahan organik tanah, atau keduanya (Chan, 2008; CSIRO, 2011). Praktik-praktik pengolahan lahan dapat meningkatkan laju dekomposisi bahan organik dan residu tanaman, meningkatkan laju mineralisasi. Hal ini terjadi utamanya dengan membuat lebih banyak bahan organik yang tersedia bagi mikroba tanah untuk diurai. Masa bera - lahan diberakan atau membiarkan lahan kosong - adalah praktik tanam yang umum di masa lalu. Lahan yang kosong dikelola berulang-ulang untuk pengendalian gulma. SOC menurun dengan cepat pada lahan yang diberakan oleh karena peningkatan dekomposisi bahan organik sehubungan dengan aktivitas pengolahan serta aktivitas mikroba yang tinggi sehubungan dengan kondisi kelembaban tanah yang lebih tinggi yang secara umum terjadi pada lahan yang diberakan. Masa bera yang lama dengan menggunakan herbisida untuk pengendalian gulma daripada pengolahan lahan juga menyebabkan penurunan SOC oleh karena ketidakhadiran produksi tanaman dan serangan mikroba terhadap simpanan SOC (Chan, 2008). SOC dapat menjadi hilang sebagai akibat erosi angin dan air oleh karena pemindahan lapisan atas tanah dan kerentanan lapisan bawah tanah terhadap suhu yang lebih tinggi (Liddicoat *et al.*, 2010). Oleh karena itu, tanah pertanian terutama yang mengalami erosi biasanya mengandung simpanan SOC yang lebih rendah daripada kapasitas potensinya (Lal, 2005b). Penurunan SOC berpengaruh negatif terhadap struktur dan kesuburan tanah, meningkatkan aliran permukaan, penurunan efisiensi penggunaan air, dan mengurangi hasil panen (Liddicoat *et al.*, 2010).

Pada tanah hutan, simpanan karbon dipengaruhi oleh, baik faktor alam maupun antropogenik (Larionova *et al.*, 2002). Gangguan alam dapat menjadi peristiwa yang destruktif dengan gangguan yang drastis pada ekosistem, seperti angin, api, kekeringan, hama dan penyakit. Gangguan alam yang parah diikuti oleh perubahan rezim kelembaban tanah dan suhu, dan suksesi spesies hutan dengan perbedaan kuantitas dan kualitas biomassa yang dikembalikan ke tanah. Kebakaran dan gangguan alam lainnya juga dapat mengubah tutupan kanopi, dan dengan demikian mempengaruhi erosi tanah (Elliot, 2003), yang juga mempengaruhi simpanan SOC pada lapisan permukaan (Lal, 2005a).

Faktor antropogenik, yang dapat mempengaruhi SOC pada hutan, termasuk kegiatan pengelolaan hutan, deforestasi, aforestasi tanah pertanian, dan hutan tanaman. Kegiatan pengelolaan hutan yang paling umum adalah pemanenan dan penyiapan lahan. Penurunan SOC setelah pemanenan umumnya disebabkan pencampuran dan perpindahan bahan organik atau lapisan serasah ke dalam tanah mineral (Yanai *et al.*, 2003). Tanah yang tidak terlindungi juga memperparah kehilangan akibat erosi (Elliot, 2003), dan pencucian karbon organik terlarut (Kalbitz *et al.*, 2000).

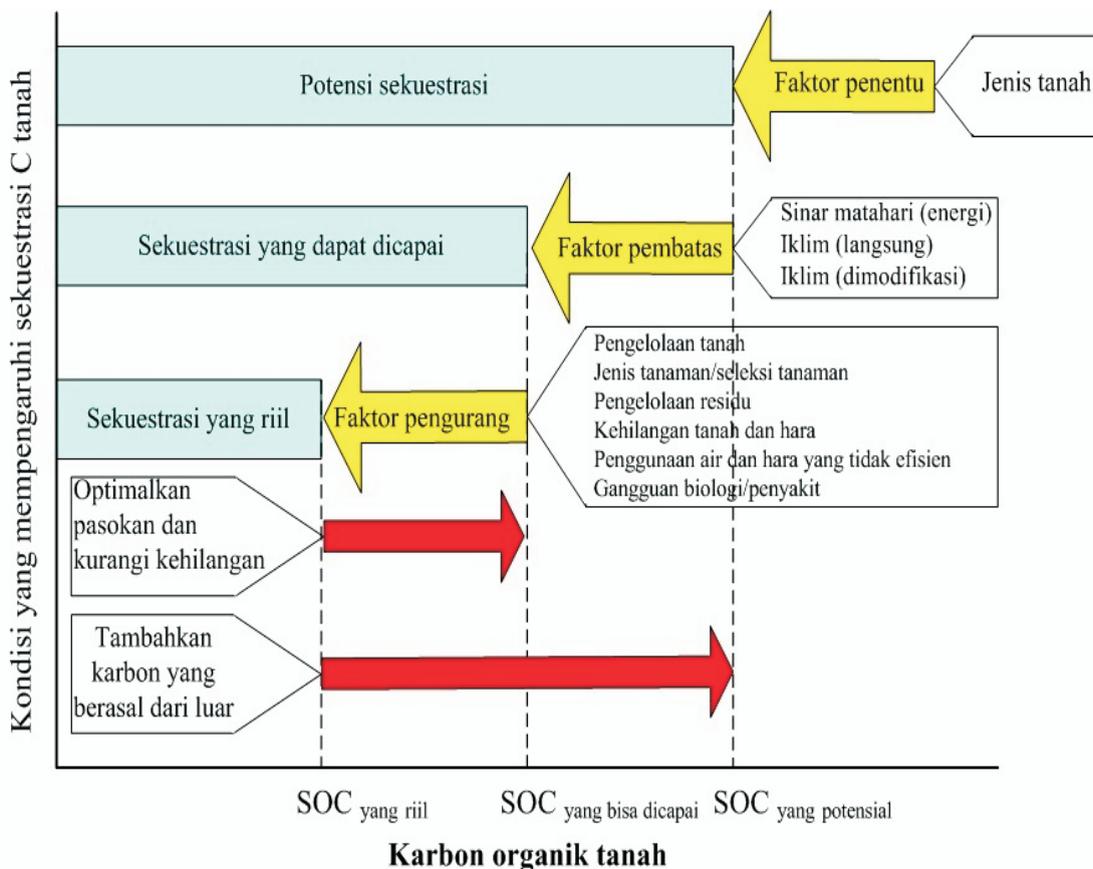
Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa tingkat dekomposisi serasah permukaan umumnya menurun setelah tebang habis oleh karena reduksi pada kegiatan biotik dan penurunan pada kandungan air tanah. Penyiapan lahan dengan sistem tebang habis dapat menyebabkan gangguan besar terhadap tanah lapisan atas. Kandungan bahan organik cenderung menurun ketika fraksi-fraksi organik tidak terlindungi dari pengurai/dekomposer terkait dengan pengolahan dan praktik-praktik pengelolaan tanah (Salimon *et al.*, 2009). Erosi merupakan faktor utama yang mempengaruhi simpanan SOC yang secara langsung berkaitan dengan pembukaan dan

penggunaan lahan (van Noordwijk *et al.*, 1997). Pengolahan lahan yang ekstensif dapat memecah agregat tanah yang mengurangi kekuatan tanah, yang dapat meningkatkan erosi (Lal, 2005b). SOC dapat menjadi hilang sebagai akibat erosi angin dan air oleh karena pemindahan lapisan atas tanah, yang terganggu oleh penyiapan lahan, dan kerentanan lapisan bawah tanah terhadap suhu yang lebih tinggi (Liddicoat *et al.*, 2010).

#### IV. JUMLAH KARBON YANG DAPAT DISIMPAN DI DALAM TANAH

Jumlah SOC yang dapat disimpan (*carbon stocks/storages*) di dalam tanah dipengaruhi

oleh sejumlah faktor terutama tipe tanah, iklim, dan praktik-praktik pengelolaan (Carson, 2014; Walcott *et al.*, 2009). Pada Gambar 3, tiga situasi sekuestrasi/simpanan karbon yang ditampilkan pada sumbu y membandingkan tiga perbedaan jumlah sekuestrasi karbon. Potensi sekuestrasi ditentukan oleh faktor-faktor yang menetapkan batas maksimum fisik-kimia untuk penyimpanan. Sekuestrasi yang dapat dicapai diatur oleh faktor-faktor yang membatasi pasokan karbon ke sistem tanah. Sekuestrasi yang riil/nyata diatur oleh faktor-faktor yang mengurangi simpanan karbon (Ingram & Fernandez, 2001).



Sumber (Source): Broos & Baldock (2008)

Gambar 3. Faktor yang mempengaruhi kandungan SOC untuk tanah tertentu.  
 Figure 3. Factors influencing the levels of SOC for a particular soil.

### A. Tipe Tanah Menentukan Potensi Sekuestrasi

Tanah mempunyai kapasitas tertentu dalam menyerap karbon (Paustian *et al.*, 2000). Potensi sekuestrasi/simpanan karbon organik di dalam tanah tergantung pada tipe/jenis tanah (komposisi mineral tanah, tekstur, kedalaman, BD) (Broos & Baldock, 2008; Carson, 2014) (Gambar 3). Komposisi mineral tanah dapat mempengaruhi mekanisme yang menstabilisasi SOC terhadap oksidasi yang bersifat biologi (Walcott *et al.*, 2009). Dekomposisi humus tipe (*pool*) lambat adalah lebih lambat pada tekstur fraksi halus (liat dan debu) dibandingkan dengan pada fraksi kasar (pasir) (Dalal & Chan, 2001). Kehadiran ion-ion besi, aluminium, dan kalsium pada liat dapat membantu untuk melindungi humus tanah dari pelapukan lebih lanjut (Krull *et al.*, 2001).

Tekstur tanah dapat mempengaruhi jumlah karbon pada tipe yang berbeda. Tanah dengan tekstur lebih halus mempunyai kapasitas kandungan SOC yang lebih tinggi daripada tanah dengan tekstur kasar ketika disuplai dengan pasokan organik dalam jumlah yang sama. Faktor kunci yang meningkatkan stabilitas SOC adalah jerapannya (*adsorption*) pada permukaan partikel liat dan debu (Ingram & Fernandes, 2001) atau terkubur di dalam pori atau agregat yang kecil (Carson, 2014). Semua proses ini mengakibatkan sulit untuk mikro-organisme menuju tempat interaksi dengan bahan organik sehingga jumlah karbon organik yang disimpan di dalam tanah cenderung bertambah dengan peningkatan kandungan liat. Pada umumnya, tanah mineral mempunyai simpanan SOC maksimum per unit volume yang ditentukan oleh kandungan liat dan debu ( $< 20 \mu\text{m}$ ) (Ingram & Fernandes, 2001). Oleh karena itu, jumlah karbon organik yang disimpan di dalam tanah cenderung meningkat dengan peningkatan kandungan liat, sedangkan pada tanah pasir, kehilangan

karbon organik lebih besar oleh dekomposisi mikro-organisme (Carson, 2014). Tanah liat mengakumulasi karbon relatif cepat, tanah pasir dapat mengakumulasi hanya sejumlah kecil karbon bahkan setelah satu abad dari pasokan karbon yang tinggi (Gobin *et al.*, 2011). Jika batas atas untuk adsorpsi pasokan organik pada permukaan liat dan debu dicapai, menambahkan lebih banyak bahan organik pada tanah tidak menyebabkan peningkatan sekuestrasi karbon (Hassink, 1997). Pada tanah dengan tingkat tekstur partikel halus (liat dan debu) yang tinggi, sekitar 30% jumlah SOC cenderung ditemukan pada karbon tipe lambat (dalam bentuk arang dan karbon yang terlindungi secara fisik), sedangkan pada tanah dengan tingkat tekstur partikel halus yang rendah, jumlah SOC sekitar 4% (Skjemstad *et al.*, 2001). Partikel liat dan agregat dapat mengurangi kehilangan karbon organik dengan melindungi bahan organik secara fisik dari dekomposisi.

Kandungan SOC secara umum lebih tinggi pada permukaan dan menurun secara eksponensial dengan kedalaman. Meskipun pada beberapa jenis tanah, konsentrasi SOC yang tinggi dapat ditemukan pada kedalaman lebih besar dari 50 cm, misalnya jenis tanah vertosol di mana sifat penyusutan (*shrinking*) dan pengelembungan (*swelling*) tanah mendorong perpindahan bahan organik dari lapisan tanah yang lebih tinggi ke lapisan tanah yang lebih rendah (Walcott *et al.*, 2009).

### B. Iklim Menentukan Sekuestrasi SOC yang Dapat Dicapai

Iklim (suhu, curah hujan, sinar matahari) dapat mempengaruhi jumlah sekuestrasi SOC yang dapat dicapai dengan mengatur produksi tanaman (Gambar 3). Setiap pengelolaan yang meningkatkan pasokan karbon, cenderung untuk meningkatkan tingkat yang akan dicapai lebih dekat pada tingkat potensinya. Faktor pembatas (seperti ketersediaan air)

akan mempengaruhi jumlah yang dapat dicapai pada karbon tanah. Proses biologis seperti jumlah pasokan bahan organik dan tingkat pembusukan residu dipengaruhi oleh tingkat suhu tanah, oksigen, dan kelembaban tanah (Baldock *et al.*, 2007).

Laju dekomposisi meningkat dengan suhu, tetapi menurun dengan kondisi yang semakin anaerob (The Word Bank, 2012). Bahan organik juga mengurai lebih cepat ketika kadar oksigen tanah lebih tinggi dan jauh lebih lambat pada tanah basah yang jenuh (USDA-NRCS, 2014). Bahan organik mengurai lebih cepat pada iklim yang panas dan lembab dan lebih lambat pada iklim yang dingin dan kering. Jika kondisi air tersedia, suhu yang lebih tinggi menyebabkan penguraian bahan organik lebih cepat, simpanan karbon pada tipe/fraksi karbon lambat dan pasif lebih rendah, dan kehilangan melalui respirasi lebih besar (Canadell *et al.*, 2007). Dengan demikian, pada iklim panas, tanah umumnya mengandung SOC lebih rendah daripada iklim dingin (Lal, 2007). Curah hujan merupakan faktor iklim yang mempunyai pengaruh terbesar pada produktivitas tanaman dan pasokan karbon organik ke dalam tanah. Pada wilayah curah hujan tinggi, tanah cenderung mempunyai simpanan karbon organik yang dapat dihasilkan lebih besar daripada tipe tanah yang sama pada wilayah curah hujan rendah (Carson, 2014) oleh karena pertumbuhan tanaman yang lebih tinggi (Walcott *et al.*, 2009).

### C. Praktik-Praktik Pengelolaan Menentukan Sekuestrasi SOC yang Sebenarnya

Praktik-praktik pengelolaan menentukan sekuestrasi/simpanan SOC yang sebenarnya/ril dengan peningkatan pasokan dan penurunan kehilangan (Gambar 3) (Carson, 2014). Sekuestrasi karbon yang sebenarnya ditentukan oleh lima faktor utama yang berkaitan dengan pengelolaan lahan (menurunkan

tingkat yang dapat dicapai). Pertama, kehilangan bahan organik tanah melalui erosi mengurangi karbon tanah, volume tanah, dan/atau kandungan liat. Kedua, peningkatan oksidasi oleh, misalnya, pengolahan lahan atau peningkatan suhu tanah oleh karena perpindahan tutupan vegetasi dapat dengan cepat mengurangi tingkat SOC. Ketiga, pemindahan residu organik mengurangi pasokan karbon. Keempat, gangguan pada proses biotik tanah yang bertanggungjawab pada kerusakan pasokan organik akan mengurangi ketersediaan fraksi SOC yang sesuai untuk membentuk kompleks organo-mineral stabil. Kelima, pengeringan/drainase menyuplai oksigen tanah yang meningkatkan oksidasi SOC (Ingram & Fernandes, 2001).

Meskipun tanah mungkin memiliki potensi untuk menyimpan sejumlah karbon, adalah tidak mungkin bahwa potensinya akan menjadi jumlah yang sebenarnya/ril yang pernah ditemukan di dalam tanah. Faktor pembatas (seperti ketersediaan air) akan mempengaruhi jumlah yang dapat dicapai pada karbon tanah. Sementara penurunan produktivitas oleh karena faktor pengurangan (seperti ketersediaan unsur hara yang rendah, pertumbuhan gulma, penyakit, atau kendala *subsoil*) akan menyebabkan kandungan karbon tanah lebih rendah. Setelah semua faktor tersebut diperhitungkan, tingkat karbon tanah yang sebenarnya yang mungkin bisa dicapai dengan pasokan karbon yang optimal dapat ditentukan (CSIRO, 2011).

### V. OPSI PENGELOLAAN LAHAN UNTUK SEKUESTRASI KARBON

Praktik-praktik pengelolaan yang direkomendasikan untuk membangun simpanan karbon di dalam tanah pada dasarnya adalah semua yang meningkatkan pasokan bahan organik ke dalam tanah atau menurunkan laju dekomposisi bahan organik tanah.

Banyak peneliti telah menganggap opsi pengelolaan lahan untuk peningkatan sekuestrasi karbon di dalam tanah (Tabel 1) (Batjes, 1999). Praktik-praktik ini umumnya termasuk kombinasi dari berikut: metode pengolahan dan pengelolaan residu (contoh: pengolahan konservasi, tanaman penutup, pertanian mulsa/*mulch farming*); kesuburan tanah dan pengelolaan hara (contoh: unsur hara makro, unsur hara mikro, penguatan mekanisme siklus hara untuk memperkecil kehilangan); pengendalian erosi (pengelolaan limpasan dengan sistem teras, rintangan

vegetatif, penambahan pupuk pada permukaan tanah, dan pertanian mulsa); pengelolaan air (contoh: irigasi tambahan, pengeringan permukaan dan subsoil, pengelolaan air tanah, pemanenan air; dan seleksi tanaman dan rotasi) (Batjes, 1999). Pengelolaan yang berkelanjutan pada hutan dan introduksi agroforestri dapat secara signifikan meningkatkan jumlah karbon yang ditahan dalam biomassa tegakan, baik di atas maupun di bawah permukaan tanah (Batjes, 2001).

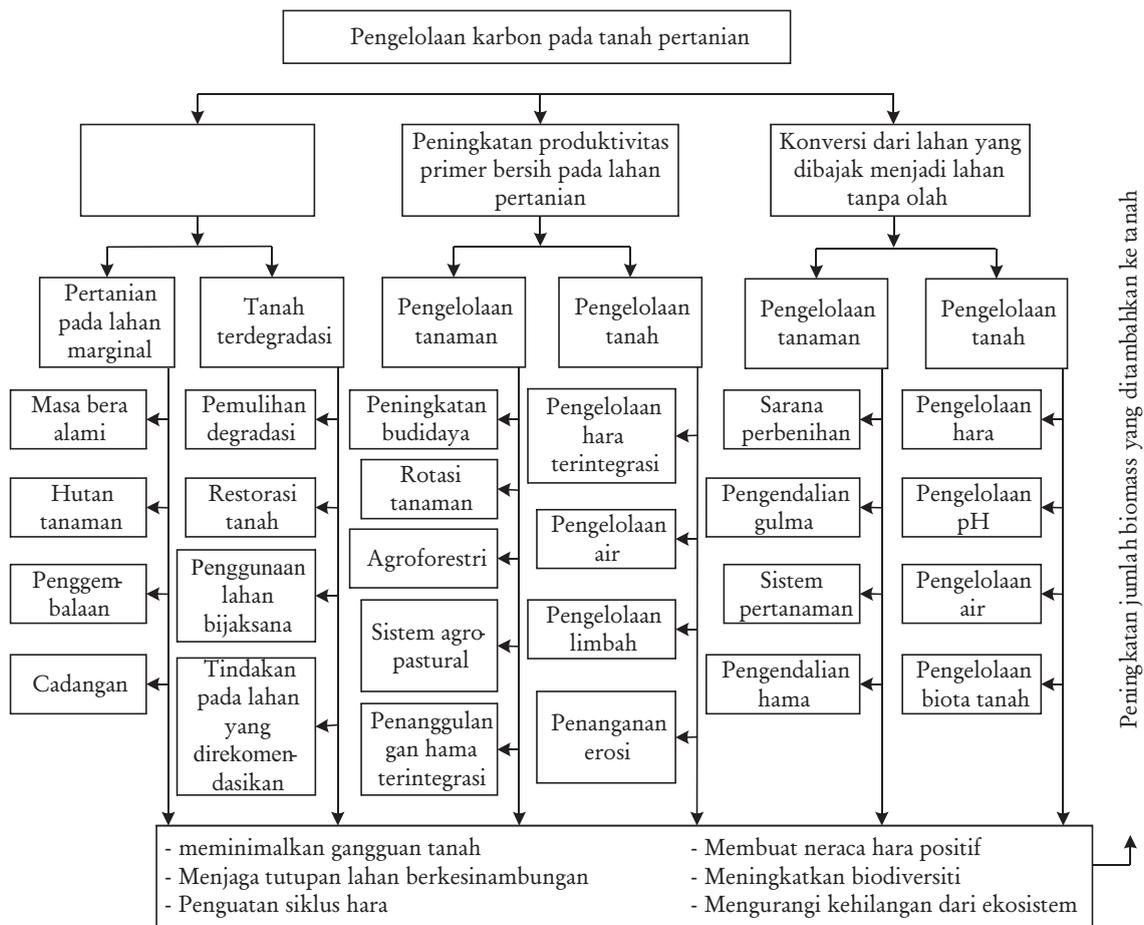
Tabel 1. Tataguna dan strategi pengelolaan tanah untuk sekuestrasi karbon organik di dalam tanah.  
*Table 1. Land use and soil management strategies to sequester organic carbon in the soil.*

No	Sistem ( <i>System</i> )	Praktik-praktik yang bersifat umum ( <i>Cultural practices</i> )
1	Tata guna	Aforestasi; pertanian permanen; perbaikan kondisi padang penggembalaan dengan laju penyimpanan karbon yang rendah; sistem tanaman pertanian campuran, tindakan restorasi lahan (contoh: penggunaan pupuk kimia; penanaman pada masa bera, pengendalian erosi); konversi lahan pertanian <i>marginal</i> ke padang rumput, hutan, atau lahan basah; mencegah kegiatan pertanian pada tanah organik; memperbaiki lahan basah; intensifikasi lahan pertanian penting (contoh: pengendalian erosi, penyediaan irigasi, pengelolaan kesuburan tanah, peningkatan keragaman tanaman pertanian, pengurangan masa bera).
2	Sistem pertanian	Sistem pertanian yang selaras dengan ekologi dengan keragaman jenis yang tinggi (contoh: pertanian campuran, agroforestri, sistem silvo-pastur, dan sistem agro-silvo-pastur).
3	Pengolahan	Pengolahan lahan secara konservatif, pertanian dengan mulsa, pengurangan intensitas pembajakan tanah.
4	Pengelolaan kesuburan	Penggunaan pupuk secara benar dan bahan organik, meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk; siklus hara melalui tanaman penutup dan masa bera yang ditanami; meningkatkan fiksasi N secara biologis.
5	Pengelolaan hama	Pengendalian hama secara terpadu, penggunaan bahan-bahan kimia secara selektif

### A. Pengelolaan Karbon pada Lahan Pertanian

Strategi pengelolaan karbon tanah adalah untuk meningkatkan residu tanaman dan *biosolid* - bahan organik padat yang didaur dari proses pengolahan limbah dan digunakan terutama sebagai pupuk pada permukaan tanah - melalui: meminimalkan gangguan pada tanah, menjaga tutupan lahan yang berkesinam-

bungan, penguatan siklus hara, membuat keseimbangan hara yang positif, meningkatkan keragaman hayati, dan mengurangi hilangnya air dan hara dari ekosistem. Ada tiga pilihan utama untuk mencapai hal tersebut: konversi lahan terdegradasi menjadi vegetasi tahunan, meningkatkan NPP, dan konversi lahan yang dibajak menjadi lahan pertanian tanpa olah (Gambar 4).



Gambar 4. Strategi untuk sekuestrasi karbon tanah.

Figure 4. Strategies for soil carbon sequestration.

Lahan terdegradasi, baik lahan *marginal* secara pertanian (misalnya: terlalu dangkal, terlalu curam, terlalu basah, terlalu kering, terlalu berbatu, atau tidak dapat diakses secara fisik) maupun tanah yang telah terdegradasi oleh banyak faktor yang menyebabkan penurunan kualitas fisik, kimia, dan biologi tanah. Proses degradasi yang utama termasuk erosi oleh air dan angin, penurunan struktur tanah yang menyebabkan pengerasan pada lapisan terluar tanah (*crusting*) dan pemadatan, salinisasi, ketidakseimbangan unsur hara, ketidakseimbangan air (banjir, kekeringan), atau invasi oleh spesies yang tidak diinginkan. Faktor-faktor lain yang mempengaruhi penyerapan SOC termasuk kualitas dan kuantitas biomassa yang dikembalikan ke permukaan tanah sebagai mulsa, dan gudang

SOC awal. Selain tekstur, tingkat penyerapan SOC terhadap konversi ke lahan pertanian tanpa olah juga tergantung pada posisi bentang lahan dan sudut lereng (Hao *et al.*, 2002). Sekuestrasi SOC lebih tinggi pada lereng lebih datar daripada lereng lebih curam dan lereng menengah dan lebih rendah daripada posisi puncak. Pada sistem tanpa olah di mana pasokan biomassa lebih rendah daripada kehilangan (oleh dekomposisi, pencucian, perpindahan residu), laju sekuestrasi SOC dapat menjadi negatif (Lal, 2007).

## B. Pengelolaan Hutan

Praktik-praktik pengelolaan untuk peningkatan sekuestrasi karbon pada hutan termasuk menghentikan deforestasi, perluasan areal

lahan hutan dan mengurangi erosi, peningkatan pada simpanan karbon (*C stock*) pada hutan yang ada (*existing forest*), lebih efisien dalam pemanenan dan penggunaan kayu dalam produk yang lebih tahan lama, substitusi bahan bakar kayu terhadap bahan bakar fosil, pemindahan lahan *marginal* dari produksi pertanian diikuti oleh reforestasi atau aforestasi, menahan serasah dan limbah hutan setelah aktivitas silvikultur dan penebangan, dan penambahan *soil conditioner* untuk memperbaiki kesuburan tanah (Batjes, 1999).

## VI. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

SOC merupakan komponen yang sangat penting dalam siklus karbon global dan keberadaannya akan memiliki dampak penting pada iklim global di masa depan. Peningkatan jumlah SOC tidak hanya mengendalikan gas rumah kaca tetapi juga bermanfaat bagi produktivitas pertanian dan kehutanan. Jumlah karbon yang mungkin dapat disimpan di dalam tanah mencerminkan keseimbangan antara pasokan dan kehilangan dan dipengaruhi oleh tipe tanah (komposisi mineral tanah dan tekstur), iklim (curah hujan, suhu), dan praktik-praktik pengelolaan lahan. Praktik-praktik pengelolaan yang direkomendasikan untuk membangun atau meningkatkan simpanan/sekuestrasi karbon di dalam tanah pada dasarnya adalah semua yang meningkatkan pasokan bahan organik ke dalam tanah atau menurunkan laju dekomposisi bahan organik tanah.

SOC tanah adalah salah satu sumberdaya nasional yang sangat penting, mengingat SOC merupakan pusat produktivitas pertanian dan kehutanan, dapat menstabilisasi iklim, dan produktivitas jasa ekosistem lainnya. Oleh karena itu, kebijakan pemerintah dalam hal ini Kementerian Kehutanan yang telah menetapkan pelestarian karbon dalam pengelolaan

hutan berkelanjutan perlu diimplementasikan secara optimal di lapangan dengan dukungan finansial yang cukup, baik melalui kerjasama nasional maupun internasional. Lebih mudah dan lebih murah untuk melestarikan (*reserve*) daripada memulihkan (*restore*).

## DAFTAR PUSTAKA

- Baker, J.M., Ochsner, T.E., Venterea, R.T., & Griffis, T.J. (2006). Tillage and soil carbon sequestration-What do we really know? *Agriculture, Ecosystems and Environment* xxx (2006) xxxxxxx.
- Baldock, J.A. (2012). *Building soil carbon for productivity and carbon accounting*. (GRDC Update Paper). Canberra: Australian Government.
- Baldock J.A. & Skjemstad, J.O. (1999). Organic soil carbon/soil organic matter. In Peverill, L.A., Sparrow, D.J. (Eds.), *Reuter Soil analysis: An interpretation manual*. (pp. 159-170). Collingwood, Victoria: CSIRO Publishing.
- Baldock, J.A., Skjemstad, J., & Bolger, T. (2007). Managing the carbon cycle. In Garden, D., Dove, H., & Bolger, T. (eds.), *Pasture systems: managing for a variable climate. Proceedings of the 22nd Annual Conference of the Grasslands Society of NSW* (pp. 5-9). Queanbeyan: Grassland Society of NSW.
- Bardgett, R.D. (2005). *The biology of soil: a community and ecosystem approach*. New York: Oxford University Press.
- Barnett, A.L. (2012). *Comparison of soil carbon and nitrogen stocks of adjacent dairy and drystock pastures*. (Thesis). Submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science in Earth Sciences at The University of Waikato.

- Bationo, A., Kihara, J., Vanlauwe, B., Waswa, B., & Kimetu, J. (2006). Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. *Agricultural Systems*.
- Batjes, N.H. (1999). *Management option for reducing CO<sub>2</sub> concentration atmosphere by increasing carbon sequestration in soil*. (Report 410-200-031). Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change and Technical Paper 30. Wageningen: International Soil Reference and Information Centre.
- Batjes, N.H. (2001). Options for increasing carbon sequestration in West African soils: an exploratory study with special focus on Senegal. *Land Degredation & Development* 12, 131-142.
- Bell, M. & Lawrence, D. (2009). *Soil carbon sequestration - myths and mysteries*. (Report No. PR09-4345). Brisbane: Queensland Department of Primary Industries and Fisheries.
- Breulmann, M. (2011). *Functional soil organic matter pools and soil organic carbon stocks in grasslands - An ecosystem perspective*. (PhD Dissertation). Helmholtz Centre for Environmental Research-UFZ.
- Broos, K. & Baldock, J. (2008). Building soil carbon for productivity and implications for carbon accounting. *South Australian GRDC Grains Research Update*.
- Canadell, J.G., Kirschbaum, M., Kurz, W.A., Sanz, M.J., Schlamadinger, B., & Yamagata, Y. (2007). Factoring out natural and indirect human effects on terrestrial carbon sources and sinks. *Environmental Science and Policy* 10, 370-384.
- Carson, J. (2014). *How much carbon can soil store*. Diunduh dari <http://soilquality.org.au/factsheets/how-much-carbon-can-soil-store>.
- Chan, K.Y. (2008). *Increasing soil organic carbon of agricultural land*. (PrimeFact 735). New South Wales: NSW Department of Primary Industries.
- Chan, K.Y., Cowie, A., Kelly, G., Singh, B., & Slavich, P. (2008). *Scoping paper-soil organic carbon sequestration potential for agriculture in NSW*. NSW: DPI Science & Research Technical Paper.
- Corsi, S., Friedrich, T., Kassam, A., Pisante, M., & Sà, JdM. (2012). Soil organic carbon accumulation and greenhouse gas emission reductions from conservation agriculture: A Review Literature. *Integrated Crop Management* 16.
- CSIRO. (2011). *Carbon basics*. Diunduh dari <http://www.csiro.au/en/Outcomes/Environment/Australian-Landscapes/soil-carbon.aspx>.
- Dahal, N. & Bajracharya, R.M. (2010). Prospects of soil organic carbon sequestration: Implications for Nepal's mountain agriculture. *Journal of Forest and Livelihood* 9 (1).
- Dalal, R.C. & Chan, K.Y. (2001). Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereal belt. *Australian Journal of Soil Research* 39, 435-64.
- Elliot, W.J. (2003). Soil erosion in forest ecosystems and carbon dynamics. In Kimble, J.M., Heath, L.S., Birdsey, R.A., Lal, R. (Eds.), *The Potential of US Forest Soils to Sequester Carbon and Mitigate the Greenhouse Effect* (pp. 175-190). Boca Raton, FL: CRC Press.
- FAO. (2004). *Carbon sequestration in dryland soils*. (World soil resources reports 102). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- Gobin, A., Campling, P., Lavelle, P., & Berman, S. (2011). *Soil organic matter management across the EU best practices, constraints and trade-offs Annex II Case Studies*. (Final Report). The European Commission's DG Environment.
- Govers, G., Merckx, R., Van Oost, K., & van Wesemael, B. (2013). *Managing soil organic carbon for global benefits*. (A STAP Technical Report). Washington, D.C.: Global Environment Facility.
- Gupta, V.V.S.R., Roget D., Davoren, C.W., Llewellyn, R., & Whitbread, A. (2008). Farming system impacts on microbial activity and soil organic matter dynamics in southern Australian Mallee soils "Global issues, paddock action". *Proceedings of the 14th ASA Conference, 21-25 September 2008, Adelaide, South Australia*. Australian: Society of Agronomy.
- Hao, Y., Lal, R., Owens, L.B., Izaurrealde, R.C., Post, W.M., & Hothem, D.L. (2002). Effect of cropland management and slope position on soil organic carbon pool at the North Appalachian Experimental Watersheds. *Soil & Tillage Res.* 68, 122-142.
- Hassink, J. (1997). The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil* 191, 77-87.
- Hoyle, F. & Murphy, D. (2008). *Crop management and its impact on soil health and carbon*. South Australian: GRDC Grains Research Update.
- Ingram, J.S.I. & Fernandes, E.C.M. (2001). Managing carbon sequestration in soils: Concepts and terminology. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 87, 111-117.
- IPCC. (2000). *Land use, land-use change, and forestry special report*. Cambridge University Press.
- Kalbitz, K.S., Solinger, S., Park, J.H., Michalzik, B., & Matzer, E. (2000). Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. *Soil Sci. Soc.* 165, 277-304.
- Krull, E., Baldock, J., & Skjemstad, J. (2001). *Soil texture effects on decomposition and soil carbon storage*. In Kirshbaum, M.U.F. & Mueller, R. (eds.), *Net Ecosystem Exchange: CRC Workshop Proceedings* (pp. 103-110). Canberra: CRC for Greenhouse Accounting.
- Krull, E.S., Skjemstad, J.O., & Baldock, J.A. (2004). *Functions of soil organic matter and the effect on soil properties*. GRDC Project No CSO 00029. Canberra, A.C.T.: CSIRO Land and Water and CRC for Greenhouse Accounting.
- Lal, R. (2005a). Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* 220, 242-258.
- Lal, R. (2005b). Soil carbon sequestration in natural and managed tropical forest ecosystems. *Journal of Sustainable Forestry* 21, 1-30.
- Lal, R. (2007). Carbon management in agricultural soils. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12, 303-22.
- Lal, R. (2008). Carbon sequestration. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 363, 815-830.
- Lal, R. (2009). *The potential for soil carbon sequestration*. In *Agriculture and climate change: An agenda for negotiation in Copenhagen*. (Brief 5). *Focus* 16.
- Larionova, A.A., Rozanova, L.N., Evdokimov, I.V., & Ermolaev, A.M. (2002). Carbon budget in natural and anthropogenic forest-steppe ecosystems. *Pochvovedenie* 2, 177-185.

- Liddicoat, C., Schapel, A., Davenport, D., & Dwyer, E. (2010). *Soil carbon and climate change. For the Sustainable Systems Group, Agriculture, Food and Wine, Primary Industries and Resources SA.* (PIRSA Discussion Paper).
- McCarl, B.A., Metting, F.B., & Rice, C. (2007). Soil carbon sequestration. *Climatic Change* 80, 1-3.
- McKenzie, R. (2010). *Soil carbon sequestration under pasture.* (Project MCK 13538). In Australian McKenzie Soil Management. Orange NSW: Dairy Regions. Dairy Australia.
- Onti, T. A. & Schulte, L. A. (2012). Soil carbon storage. *Nature Education Knowledge* 3 (10), 35.
- Paustian, K., Six, J., Elliott, E.T., & Hunt, H.W. (2000). Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils. *Biogeochemistry* 48 (1), 147-163.
- Pluske, W., Murphy, D., & Sheppard, J. (2014). *Total organic carbon.* Soil Quality Pty Ltd.
- Robert, R. (2001). *Soil carbon sequestration for improved land management.* (World Soil Resources Reports 96). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Salimon, C.I., Wadt, P.G.S., & Alves, S.S. (2009). Decrease in carbon stocks in an oxisol due to land use and cover change in southwestern Amazon. *Ambi-Agua, Taubate* 4 (2), 57-65.
- Sundermeier, A., Reeder, R., & Lal, R. (2005). *Soil carbon sequestration-Fundamentals. Extension FactSheet.* The Ohio State University, Columbus, Ohio: Food, Agricultural, and Biological Engineering.
- Skjemstad, J.O, Dalal, R.C, Janik, L.J., & McGown, J.A. (2001). Changes in chemical nature of organic soil carbon in Vertisols under wheat in south-eastern Queensland. *Australian Journal of Soil Research* 39, 343-59.
- The World Bank. (2012). *Carbon sequestration in agricultural soils.* (Report Number 67395-GLB). Washington: The World Bank, Agriculture and Rural Development.
- USDA-NRCS. (2014). Soil organic matter. *Soil Health - Guides for Educators.*
- Van Noordwijk, M., Cerri, C., Woomer, P.L., Nugroho, K., & Bernoux, M. (1997). Soil carbon dynamics in the humid tropical forest zone. *Geoderma* 79, 187-225.
- Victoria, R., Banwart, S., Black, H., Ingram, J., Joosten, H., Milne, E., & Noellemeyer, E. (2012). *The benefit of soil carbon.* In Managing soils for multiple economic, societal and environmental benefits. UNEP Year Book 2012.
- Walcott, J., Bruce, S. & Sims, J. (2009). *Soil carbon for carbon sequestration and trading: a review of issues for agriculture and forestry.* Canberra: Bureau of Rural Sciences, Department of Agriculture, Fisheries & Forestry.
- Yanai, R.D., Currie, W.S., & Goodale, C.L. (2003). Soil carbon dynamics after forest harvest: an ecosystem paradigm reconsidered. *Ecosystems* 56, 197-212.