

POTENSI SEKUESTRASI KARBON ORGANIK TANAH PADA PEMBANGUNAN HUTAN TANAMAN *Acacia mangium* Willd (*Potential of Soil Organic Carbon Sequestration on Establishment of *Acacia mangium* Willd Plantation*)*

Harris Herman Siringoringo

Pusat Litbang Konservasi dan Rehabilitasi

Jl.Gunung Batu No.5 Po Box 165;Telp.0251-8633234;Fax 0251-8638111 Bogor

e-mail: p3hka_pp@yahoo.co.id; ringobogor@gmail.com

Diterima : 23 Januari 2013; Disetujui : 10 Juli 2013

ABSTRACT

*The establishment of plantation forest could increase the potency of soil organic carbon sequestration. The cumulative soil organic carbon (C) stock in plantation forest of *Acacia mangium* Willd on Acrisols soil were quantified twice i.e. at the beginning after land preparation and four years after planting by adopting equivalent soil mass approach. Research was carried out in Forestry Resort of Maribaya, Bogor District. The results showed that soil bulk density in the depth of 0-10 cm declined significantly four years after planting, but it was not significantly differ in deeper soil (10-100 cm) between both time series. Soil organic carbon content in the depth of 0-30 cm increased significantly, but it was not significantly differ in deeper soil (30-100 cm). The cumulative soil organic carbon stock at 0-30 cm depth was significantly increased by 8.8 ton C/ha from 66.1 ton C/ha to 74.9 ton C/ha with carbon sequestration rate into the soil as much as 2.30 ton C/ha/year (2.3% per year) for a four-year time period after planting. Meanwhile, the cumulative soil organic carbon stock in 0 to 100 cm depth was not statistically different between both time series within the same periode. This research concluded that the establishment of *Acacia mangium* forest plantation on Acrisols soil in Maribaya could increase the rate of soil organic carbon sequestration.*

Keywords: Carbon sequestration, carbon stock, equivalent soil mass, carbon content, bulk density, Acrisols

ABSTRAK

Pembangunan hutan tanaman dapat meningkatkan potensi sekuestrasi karbon organik tanah. Simpanan C organik tanah kumulatif pada hutan tanaman *Acacia mangium* Willd pada tipe tanah Acrisols dikuantifikasi dua kali, yaitu: pada awal setelah penyiapan lahan dan empat tahun setelah penanaman dengan menggunakan pendekatan massa tanah setara. Penelitian dilaksanakan di Resort Polisi Hutan (RPH) Maribaya, Kabupaten Bogor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kerapatan massa (BD) tanah pada kedalaman 0-10 cm menurun sangat nyata ($p < 0,001$) setelah empat tahun penanaman, namun tidak berbeda nyata pada kedalaman tanah yang lebih bawah (10-100 cm). Kandungan karbon organik tanah meningkat sangat nyata ($p < 0,001$), namun tidak berbeda pada kedalaman yang lebih bawah (30-100 cm). Simpanan karbon organik tanah kumulatif pada kedalaman 0-30 cm meningkat 8,8 ton C/ha dari 66,1 ton C/ha ke 74,9 ton C/ha, dengan potensi laju sekuestrasi karbon ke dalam tanah sebesar 2,30 ton C/ha/tahun (2,3% per tahun). Simpanan karbon organik tanah kumulatif pada kedalaman 0-100 cm tidak berbeda secara statistik di antara kedua seri waktu dalam periode yang sama. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa pembangunan hutan tanaman *A. mangium* pada tipe tanah Acrisols di Maribaya dapat meningkatkan laju sekuestrasi karbon organik tanah.

Kata kunci: Sekuestrasi karbon, simpanan karbon, massa tanah setara, kandungan karbon, kerapatan massa (BD), Acrisols

I. PENDAHULUAN

Peningkatan CO₂ atmosfer yang berkontribusi terhadap pemanasan global sangat mungkin dapat dikurangi melalui proses pemindahan/sekuestrasi karbon ke dalam tanah (*soil carbon sequestration*) (Markewich & Buell, 2001). Tanah merupakan representasi gudang karbon or-

ganik (*organic carbon pool/organic carbon reservoir*) yang sangat penting dalam periode jangka panjang pada ekosistem daratan, karena tanah mengakumulasi karbon (C) lebih besar daripada jumlah C pada biomassa tanaman dan atmosfer (Tarnocai *et al.*, 2009; Schimel, 1995). Tetapi, *carbon pool* - suatu sistem atau

gudang yang mempunyai kapasitas untuk mengakumulasi dan melepaskan karbon (C) yang besar di dalam tanah tidak bersifat statis melainkan merupakan hasil dari suatu perbedaan 'keseimbangan dinamis' antara bahan organik dan anorganik yang masuk (*C-input*) dan yang keluar (*C-output*) dari waktu ke waktu. Karbon yang terakumulasi di dalam tanah (*soil carbon stock*) dipengaruhi oleh perubahan pada vegetasi dan pertumbuhannya, sisa biomassa melalui pemanenan, dan gangguan mekanis pada tanah (Schrumpf *et al.*, 2011; IPCC, 2006). Jumlah karbon organik tanah (SOC-*soil organic carbon*) yang disimpan di dalam tanah berkaitan erat dengan hasil dari saldo bersih (*net balance*) antara tingkat masukan karbon organik tanah dan tingkat mineralisasi pada masing-masing gudang karbon organik (*organic carbon pools*) (Post & Kwon, 2000). Sekuestrasi karbon pada tanah hutan bervariasi tergantung pada jenis tanaman, tipe tanah, iklim, praktek pengelolaan lahan, dan status tanah awal (Nasibimana *et al.*, 2008). Selanjutnya menurut Swift (2001), potensi sekuestrasi karbon pada jenis tanah apapun tergantung pada kapasitasnya untuk menyimpan komponen tanaman dalam jangka menengah (*medium term*) dan untuk melindungi dan mengakumulasi zat-zat humus yang terbentuk dari transformasi atau bahan organik pada lingkungan tanah.

Simpanan SOC di daerah tropis lebih rentan terhadap gangguan seperti perubahan tataguna lahan (*land use changes*) dengan dua kali waktu yang dibutuhkan untuk memperbaharui simpanan SOC yang hilang ke keadaan semula (*steady state*) daripada daerah iklim sedang (*temperate*) (Trumbore, 1993; Six *et al.*, 2002). Kelembaban dan temperatur yang tinggi meningkatkan laju dekomposisi sehingga mempercepat hilangnya SOC. Jenis tanah sangat terlapuk Acrisols/Ultisols dan ferralsols/oxisols menempati 60-70% luas lahan tropis (Don *et al.*, 2010). Tipe tanah tersebut didominasi oleh liat aktivitas rendah (*low activity clays*) dan

menyediakan permukaan mineral yang kurang untuk perlindungan fisik dan stabilisasi terhadap SOC (Feller & Beare, 1997). Partikel-partikel liat dipercaya dapat menjaga beberapa senyawa organik yang lebih mudah terurai dari kerusakan yang cepat oleh mikroba melalui pelapisan (*encrustation*) dan pemerangkapan (*entrapment*) (Paul & van Veen, 1978; Anderson, 1979; Tisdall & Oades, 1982).

Daerah tropika basah Asia merupakan areal yang sangat penting dalam pengembangan hutan tanaman (FAO, 2001). Di Indonesia, sekitar 80% areal hutan tanaman didominasi oleh jenis eksotis *Acacia mangium* Willd (Rimbawanto, 2002) atau setara dengan 67% dari total luas areal hutan tanaman *A. mangium* di dunia (FAO, 2002). Meskipun demikian, dampak pembangunan jenis *A. mangium* terhadap simpanan karbon organik tanah beserta perubahannya (laju sekuestrasinya) belum banyak diketahui.

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh informasi secara kuantitatif tentang besaran simpanan karbon organik tanah dan laju sekuestrasinya pada hutan tanaman jenis cepat tumbuh *A. mangium* dalam dua seri waktu yang berbeda dalam rentang waktu 46 bulan (empat tahun) setelah penanaman pada tipe tanah Acrisols. Dalam tulisan ini, untuk menghindari perhitungan yang bias terhadap perubahan simpanan karbon organik tanah dalam dua seri waktu yang berbeda, perhitungan jumlah simpanan karbon organik tanah dikoreksi dengan pendekatan massa tanah setara (*equivalent soil mass*) yang disajikan oleh Ellert & Bettanym (1995) dan berdasarkan massa tanah mineral (Toriyama *et al.*, 2011).

II. BAHAN DAN METODE

A. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada demplot hutan tanaman *A. mangium* yang baru dibangun (*newly establishment*) pada kawasan seluas lima hektar pada petak 15 A

(37 ha) di Resort Polisi Hutan (RPH) Maribaya ($6^{\circ} 22' - 6^{\circ} 25' \text{ LS}$, $106^{\circ} 27' - 106^{\circ} 29' \text{ BT}$), Bagian Kesatuan Pemangkuan Hutan (BKPH) Parung Panjang, wilayah kerja Kesatuan Pemangkuan Hutan (KPH) Bogor, Perum Perhutani Unit III Jawa Barat dan Banten. Luas kawasan hutan RPH Maribaya relatif kecil, yaitu sekitar 163 ha. Topografi lokasi penelitian termasuk kategori datar (*undulating*) dengan kemiringan lereng $\pm 0^{\circ}$ dan ketinggian tempat 60 m di atas permukaan laut (Siringoringo *et al.*, 2003). Kondisi iklim adalah tipe B dengan rata-rata curah hujan tahunan 2.754 mm dalam lima tahun (dari tahun 1995 hingga tahun 1999), yang tercatat di Stasiun Klimatologi Cikapomayan, Nanggung, Kecamatan Leuwiliang, Bogor.

Vegetasi asli (*baseline vegetation*) lokasi penelitian diidentifikasi sebagai hutan sekunder muda yang didominasi oleh *Schima walichii* (puspa) dengan tinggi rata-rata 3,8 m pada awal penelitian. Hutan sekunder ini sebelumnya telah digunakan untuk perladangan berpindah dan sudah tidak digunakan pada saat penelitian berlangsung. Tipe tanah lokasi penelitian adalah haplic Acrisols (Siringoringo *et al.*, 2003), berdasarkan pada *Word Reference Base* (FAO/ISRIC/ISSS, 1998) atau *Soil Survey Staff* (1999). Karakteristik profil tanah adalah: tekstur liat (64-82%); kandungan Al-dd tinggi (3,0-15 meq/100g); lapisan atas tanah (*top soil*) warna coklat gelap (7.5YR 3/4) dan lapisan bawah tanah (*sub soil*) warna coklat kemerahan gelap (5 YR 3/4) hingga coklat kemerahan kusam (5 YR 4/3) dalam sistem warna Munsell; struktur tanah kasar (*coarse*), kuat (*strong*), dan gumpal bersudut (*subangular blocky structure*).

Pembangunan demplot *A. mangium* menerapkan praktek-praktek pengelolaan hutan tanaman sebagaimana pada umumnya. Penyiapan lahan dilakukan dengan cara penebangan vegetasi berupa pohon dan belukar. Setelah penebangan, bibit *A. mangium* ditanam dengan jarak tanam

2 m x 3 m dan lobang tanam 30 cm x 30 cm x 30 cm. Penyiangan (*weeding*) dilakukan dua kali dalam setahun. *Prunning* dan *singling* dilakukan satu kali dalam setahun. Pada umur 46 bulan pada tahun 2005, *A. mangium* mencapai tinggi rata-rata 10 m.

Penelitian ini dilaksanakan dalam dua seri waktu pengambilan contoh tanah dalam periode 46 bulan (empat tahun) di dalam demplot yang sama. Pengambilan contoh tanah pada penelitian awal (T_1) dilaksanakan pada bulan Oktober 2001, yaitu setelah penyiapan lahan/satu bulan sebelum penanaman *A. mangium*. Sementara pengambilan contoh tanah pada penelitian terakhir (T_5) dilaksanakan pada akhir Agustus 2005 (T_5).

B. Bahan dan Alat Penelitian

Demplot hutan tanaman *A. mangium* untuk pengambilan contoh-contoh tanah dalam dua seri waktu digunakan sebagai objek penelitian. Alat-alat penelitian yang digunakan di lapangan adalah: GPS, *chainsaw*, *munsell*, meteran, golok, cangkul, *ring sample*, gunting, buku tulis, kantong plastik, tali plastik. Peralatan yang digunakan di laboratorium antara lain adalah: NC Analyzer, oven, *willey mill*, *vibration mill*, timbangan analitik, desikator, dan gelas ukur.

C. Metode Penelitian

1. Disain Plot dan Metode Pengambilan Contoh Tanah

Plot pengambilan contoh tanah terdiri dari empat blok (20 m x 30 m) yang ditentukan secara acak di dalam demplot hutan tanaman *A. mangium* (lima ha). Pada setiap blok ditentukan sebanyak 10 titik pengambilan contoh tanah (*sampling sub unit*) secara sistematis. Pengambilan contoh dalam dua seri waktu yang berbeda dilakukan pada dua bagian/titik yang berbeda di dalam setiap blok yang sama. Pada umumnya, dalam penelitian tanah pada lahan bervegetasi terutama untuk keperluan analisis sifat fisik dan kimia

tanah, titik awal pengambilan contoh tanah ditentukan pada bagian permukaan tanah yang tidak terganggu. Titik-titik pengambilan contoh tanah pada setiap

blok dan seri waktu diilustrasikan pada Gambar 1 dan dinarasikan secara ringkas pada Tabel 1.

Blok (<i>Sub plot</i>)		Plot hutan tanaman (<i>Plantation plot</i>) Ukuran sub plot: masing-masing 20 m x 30 m (<i>Sub plot size 20 m x 30 m each</i>)										Titik pengambilan contoh (<i>Sampling points</i>)		
A		a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	Seri waktu (<i>Time series</i>)	0-30 cm	0-100 cm
	1	xx		x		x		x		x		← 2001 (T ₁)	A1c, A1e, A1g, A1i	A1a
	2													
	3													
	4													
	5	xx		x		x		x		x		← 2005 (T ₅)	A5c, A5e, A5g, A5i	A5a
	6	x		x		x		xx		x		← 2001 (T ₁)	A6a, A6c, A6e, A6i	A6g
	7													
	8													
	9													
	10	x		x		x		xx		x		← 2005 (T ₅)	A10a, A10c, A10e, A10i	A10g
B	1	x		x		xx		x		x		← 20 01 (T ₁)	B1a, B1c, B1g, B1i	B1e
	2													
	3													
	4													
	5	x		x		xx		x		x		← 2005 (T ₅)	B5a, B5c, B5g, B5i	B5e
	6	x		x		x		x		x		← 2001 (T ₁)	B6a, B6c, B6e, B6g, B6i	
	7													
	8													
	9													
	10	x		x		x		x		x		← 2005 (T ₅)	B10a, B10c, B10e, B10g, B10i	
C	1	x		x		x		x		x		← 2001 (T ₁)	C1a, C1c, C1e, C1g, C1i	
	2													
	3													
	4													
	5	x		x		x		x		x		← 2005 (T ₅)	C5a, C5c, C5e, C5g, C5i	
	6	x		x		x		x		xx		← 2001 (T ₁)	C6a, C6c, C6e, C6g	C6i
	7													
	8													
	9													
	10	x		x		x		x		xx		← 2005 (T ₅)	C10a, C10c, C10e	C10i
D	1	x		x		x		x		x		← 2001 (T ₁)	D1a, D1c, C1e, C1g, C1i	
	2													
	3													
	4													
	5	x		x		x		x		x		← 2005 (T ₅)	D5a, D5c, D5e, D5g, D5i	
	6	x		xx		x		x		x		← 2001 (T ₁)	D6a, D6e, D6g, D6i	D6c
	7													
	8													
	9													
	10	x		xx		x		x		x		← 2005 (T ₅)	D10a, D10e, D10g, D10i	D10c

Keterangan (Note):

x: Titik pengambilan contoh pada kedalaman 0-30 cm ditempatkan secara sistematis (total sebanyak 35 titik) (*Sampling points of 0-30 cm deep sampling are located systematically (35 points in total)*)

xx: titik pengambilan contoh pada kedalaman 0-100 cm (total sebanyak 5 titik) (*Sampling point of 0-100 cm deep sampling in a random way (5 points in total)*)

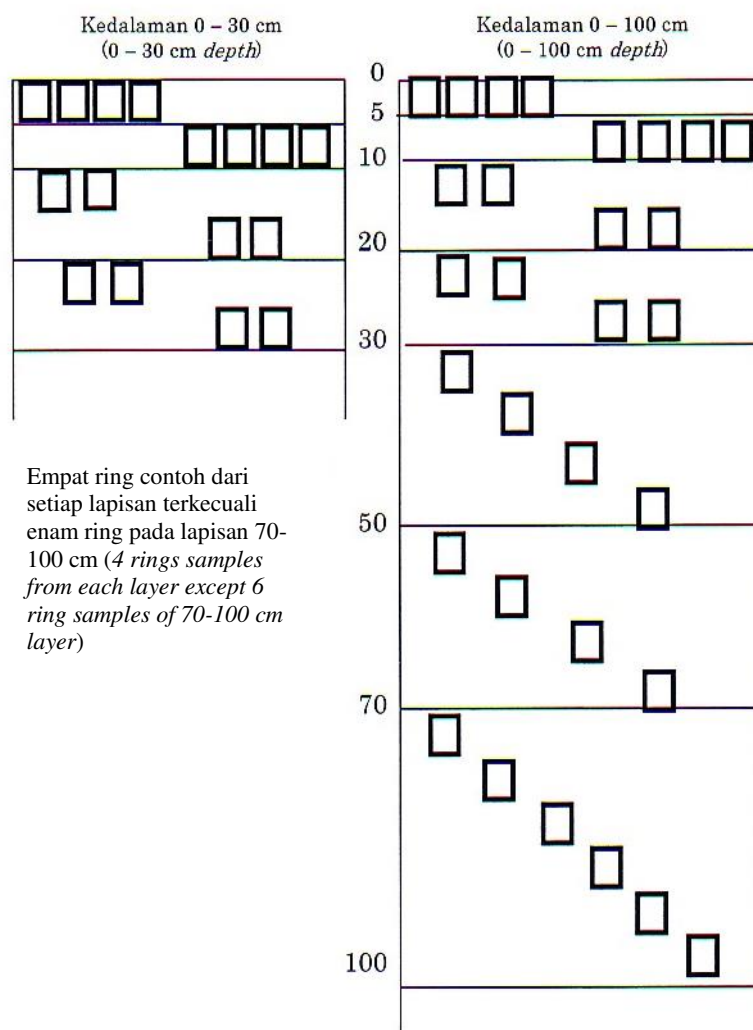
Gambar (Figure) 1. Disain titik-titik pengambilan contoh tanah dalam dua seri waktu pada demplot hutan tanaman *A. mangium* (*Design of soil sampling points in two time series for A. mangium plantation experimental plots*)

Tabel (Table) 1. Jumlah titik pengambilan contoh tanah pada setiap subplot, kedalaman, dan seri waktu (*The number of sampling points in each subplots, soil depth and time series*)

Sub plot	2001 (T ₁)		2005 (T ₅)		Jumlah titik pengambilan contoh dalam dua seri waktu (<i>Number of sampling points in two time series</i>)	
	x	xx	x	xx	x	xx
A	8	2	8	2	16	4
B	9	1	9	1	18	2
C	9	1	9	1	18	2
D	9	1	9	1	18	2
Jumlah titik pengambilan contoh (<i>Number of sampling points</i>)	35	5	35	5	70	10

Keterangan (Note): x: Kedalaman 0-30 cm (0-30 cm *soil depths*); xx: Kedalaman 0-100 cm (0-100 cm *soil depths*)

Pengambilan contoh tanah (*Soil sampling*)

Gambar (Figure) 2. Metode pengambilan contoh tanah untuk memperkirakan simpanan karbon tanah (*Soil sampling method for estimating soil carbon storage*)

Contoh-contoh tanah diambil pada 40 titik pengambilan contoh (35 titik pada kedalaman 0-30 cm dan lima titik pada kedalaman 0-100 cm). Pada kedalaman 0-

30 cm, contoh-contoh tanah diambil dari empat lapisan kedalaman tanah ($n = 4$), yaitu: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, dan 20-30 cm. Pada kedalaman 0-100 cm,

contoh-contoh tanah diambil dari tujuh lapisan kedalaman tanah ($n = 7$), yaitu: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-50 cm, 50-70 cm, dan 70-100 cm.

Pengambilan contoh tanah yang dibagi dalam beberapa lapisan kedalaman tertentu (*fixed depth layers*) dimaksudkan untuk memperhitungkan perbedaan keragaman kandungan SOC pada kedalaman tanah (Don *et al.*, 2007). Perbedaan keragaman kandungan SOC pada kedalaman tanah terjadi karena setiap jenis vegetasi berbeda dalam distribusi akar vertikalnya dan meninggalkan jejak yang berbeda dalam distribusi kedalaman SOC (Lorenz & Lal, 2005). Penelitian karbon tanah biasanya mempertimbangkan kedalaman tanah tetap, umumnya satu meter (Jobbagy *et al.*, 2000). Penelitian Global berdasarkan unit vegetasi (Post *et al.*, 1982) dan unit taksonomi tanah (Eswaran *et al.*, 1993; Batjes, 1996) menunjukkan bahwa simpanan karbon tanah 1.500-1.600 Pg C pada kedalaman satu meter pertama. Contoh-contoh tanah diambil dengan menggunakan sebanyak empat buah ring sampel (*sampling rings*) pada setiap interval kedalaman dari 0-70 cm dan sebanyak enam buah ring pada setiap interval kedalaman 70-100 cm. Contoh-contoh tanah secara berurutan mulai dari lapisan teratas hingga lapisan terbawah diambil dengan menggunakan ring sampel tanah dengan volume 100 cc (20 cm x 5 cm). Ring sampel ditempatkan secara konsisten pada setiap lapisan tanah untuk mendapatkan contoh yang representatif pada setiap kedalaman (Gambar 2).

Contoh-contoh tanah dari setiap lapisan yang sama dari setiap titik pengambilan contoh dikompositkan (*bulked*) dan dimasukkan ke dalam kantong plastik untuk keperluan analisis di laboratorium. Jumlah total contoh tanah yang dikumpulkan dalam dua seri waktu dalam rentang waktu empat tahun adalah sebanyak 350 contoh dari 80 titik pengambilan contoh (*sampling point*) (70 titik pada kedalaman 0-30 cm dari empat lapisan/hori-

zon tanah ditambah 10 titik pada kedalaman 0-100 cm dari tujuh lapisan tanah).

2. Metode Penyiapan dan Analisis Contoh

Contoh tanah dikering-udarkan kurang lebih selama 7-14 hari hingga beratnya stabil, dan potongan-potongan akar yang terikut dibuang. Selanjutnya berat massa masing-masing contoh tanah yang telah dikering-udarkan (W_t) ditimbang. Kemudian contoh-contoh tanah dihaluskan dengan menggunakan *Willey Mill* dan disaring dengan ayakan berukuran 2 mm untuk memisahkan tanah halus (< 2 mm) dari bebatuan (> 2 mm). Berat bebatuan (W_g) ditimbang. Kerapatan massa tanah/*bulk density* (BD) dihitung berdasarkan volume contoh per lapisan tanah (empat atau enam ring), berat contoh tanah kering udara, dan faktor kadar air tanah halus kering udara (*MFf, moisture factor fine soil*).

Pengukuran MFf dilakukan dengan cara menimbang sekitar 10 g contoh tanah halus kering udara (W_f) ke dalam wadah (*beaker glass* ukuran 30-50 ml) yang diketahui bobotnya (W_{v1}), dan dimasukkan ke dalam oven pada suhu 105^0 selama satu malam, didinginkan ke dalam desikator, dan ditimbang bobot tanah kering oven dan wadah (W_{o1}). Untuk keperluan analisis karbon tanah dan penentuan faktor kadar air tanahnya (*MFp, moisture factor powder soil*), sekitar 20 g contoh tanah halus yang telah kering udara dihaluskan kembali hingga menjadi bubuk halus (*powder*) dengan menggunakan *Vibration Mill*. Analisis kandungan karbon tanah menggunakan metode pembakaran (*Combustion method*) dengan perangkat instrumen *NC Analyzer* (Sumigraph NC-900, Sumitomo Chemicals LTD).

3. Perhitungan

a. Kerapatan Massa Tanah

Kerapatan massa/tingkat kepadatan (BD) tanah dinyatakan sebagai massa per satuan volume tanah (g/cm^3 atau ton/m^3).

$$BD(g/cm^3) = \frac{(W_t - W_g)(1 - MF_f)}{4 \text{ atau } 6 \times V_r(ml)} \dots(1)$$

(Ohta, 2001)

$$MF_f = \frac{(W_{v1} - W_{o1})}{W_f} \dots\dots\dots(2)$$

Di mana:

W_t = Berat total tanah kering udara (*Total weight of air-dried soil*), (g)

W_g = Berat bebatuan (*Weight of gravel*), (g)

MF_f = Faktor kadar air tanah halus (*Moisture factor of fine soil*)

V_r = Volume ring contoh

W_f = Berat tanah halus kering udara (*Air dried fine soil weight*)

b. Kandungan Karbon (C%)

$$C\% = \frac{C_{\text{hasil pengukuran}}}{(1 - MF_p)} \dots\dots\dots(3)$$

(Ohta, 2001)

$$MF_p = \frac{(W_{v1} - W_{o1})}{W_p} \dots\dots\dots(4)$$

Di mana:

MF_p = Faktor kadar air tanah bubuk halus (*Moisture factor of powder soil*)

W_p = Berat tanah bubuk kering udara (*Air dried powder soil weight*)

W_{v1} = Berat wadah dan berat contoh tanah (*Weight of vessel and soil sample*)

W_{o1} = Berat tanah kering oven 105°C dan berat wadah (*Weight of 105°C oven-dried soil and vessel*)

c. Simpanan Karbon Tanah

Perhitungan jumlah simpanan karbon tanah pada seri waktu pengambilan contoh awal pada tahun 2001 (T_1) (tahun referensi) dihitung sama seperti perhitungan simpanan karbon organik tanah pada umumnya, yaitu berdasarkan metode pendekatan kedalaman tetap (*fixed depth approach*) sebagaimana yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$\text{Simpanan C tanah}_{\text{kedalaman}}(n) = \sum_{i=1}^n \frac{TH(i) \times BD(i) \times Cs(i)}{(1 - MF_p)} \dots\dots\dots(5)$$

Di mana:

$\text{Simpanan C tanah}_{\text{kedalaman}}$ (*Soil C stock_{depth}*), ton/ha

TH = Ketebalan lapisan tanah (*Thickness of each soil layer*), (cm)

Cs = Kandungan karbon tanah (*Soil carbon content*), (%)

MF_p = Faktor kadar air tanah bubuk halus (*Moisture factor of fine powder soil*)

BD = Kerapatan massa (*Bulk density*), (g/cm³)

Perhitungan jumlah simpanan karbon tanah pada seri waktu pengambilan contoh terakhir tahun 2005 (T_5) dikoreksi dengan metode pendekatan massa tanah setara (*equivalent soil mass approach*) yang disajikan oleh Ellert & Bettanym (1995).

Jika contoh tanah diambil berdasarkan kedalaman tertentu (*fixed layer*) tanpa memperhitungkan kemungkinan terjadinya perubahan di antara dua seri pengambilan contoh tanah pada waktu yang berbeda, antara lain pemadatan tanah (*compaction*), penggemburan tanah (*inflation*), erosi permukaan (*leaching*) dan lereng, yang kesemuanya mempengaruhi nilai kerapatan tanah (BD tanah), maka perhitungan simpanan karbon organik tanah menjadi bias (Don *et al.*, 2010). Alasan pemilihan *equivalent soil mass approach* adalah semua hal menjadi setara, apabila tanah semakin padat (BD semakin besar), maka tanah akan mengandung massa yang lebih besar pada suatu kedalaman tertentu, sehingga kandungan karbonnya lebih tinggi. Jika kedalaman yang sama digunakan sebagai dasar perhitungan, pengelolaan yang cenderung memadatkan tanah kemungkinan akan menunjukkan peningkatan hasil yang bias terhadap jumlah simpanan karbon organik tanah. Pengelolaan yang cenderung menggemburkan tanah (BD semakin kecil) kemungkinan akan menghasilkan penurunan yang bias terhadap jumlah simpanan karbon organik tanah (Sanderman *et al.*, 2010). Jika jumlah simpanan karbon tanah dinyatakan dalam satuan kedalaman tertentu atau dibandingkan pada kedalaman tertentu dalam seri waktu yang berbeda, maka penyesuaian untuk memperhitungkan massa tanah setara akan diperlukan jika BD tanah bervariasi berdasarkan waktu (Don *et al.*, 2007; Ellert & Bettanym, 1995; Ellert *et al.*, 2002; McKenzie *et al.*, 2008; VandenBygaart, 2006; dan Don *et al.*, 2010). Fluktuasi BD tanah pada umumnya terjadi pada perubahan tagana lahan, menyebabkan fluktuasi terhadap ketinggian permukaan dan titik pengambilan contoh tanah. BD tanah

berpengaruh pada kedalaman titik pengambilan contoh dan mempengaruhi jumlah simpanan karbon tanah kumulatif (Wuest, 2009).

Mengingat variabilitas sifat-sifat tanah, massa tanah setara dihitung pada setiap titik pengambilan contoh tanah (Gifford & Roderick, 2003). Selain itu, untuk menghindari efek perubahan bahan organik tanah, massa tanah setara dihitung berdasarkan massa tanah mineral (Toriyama *et al.*, 2011) daripada berdasarkan massa tanah keseluruhan (*bulk soil mass*) sebagaimana yang disajikan Ellert & Bettany (1995). Pada seri waktu pengukuran T_5 , penghitungan simpanan karbon tanah disesuaikan berdasarkan perbedaan pada rerata massa kumulatif fraksi mineral tanah antara seri waktu pengukuran T_1 dan T_5 . Rangkaian perhitungan dilakukan berikut ini.

Massa kumulatif fraksi mineral tanah dihitung dengan menggunakan data tanah pada survei pertama untuk menentukan massa tanah setara.

$$BD_{mf} = BD - BD_{som} \dots\dots\dots(6)$$

$$BD_{som} \text{ (g/cm}^3\text{)} = \text{Massa bahan organik tanah per volume (Mass of soil organic matter per volume)} \\ = BD \times C_s \times 1,724 \times 10^{-2}$$

$$MF_{mass} (n) = \sum_{i=1}^n BD_{mf} (i) \times TH (i) \dots\dots(7)$$

Di mana:

$$BD_{mf} \text{ (g/cm}^3\text{)} = \text{Massa fraksi mineral tanah per volume (Mass of soil mineral fraction per volume)} \\ 1,724 = \text{Faktor konversi rasio massa dari C organik tanah ke bahan organik tanah (The mass ratio of soil organic C to soil organic matter) (Pribyl, 2010)}$$

$$MF_{mass} \text{ (ton/ha)} = \text{Massa kumulatif fraksi mineral tanah hingga lapisan terbawah (The cumulative mass of soil mineral fraction to the bottom of layer)}$$

$$TH (i) \text{ (cm)} = \text{Ketebalan lapisan tanah (Thickness of each soil layer)}$$

Massa tanah setara ($MF_{mass\ equiv}$) pada persamaan (8) dihitung berdasarkan rasio nilai rerata massa tanah kumulatif pada survei awal (T_1) dan survei

terakhir (T_5) untuk mengontrol nilai koefisien keragaman massa tanah kumulatif pada lokasi penelitian.

$$MF_{mass\ equiv} = MF_{mass2nd} \times M_{1st} \times M_{2nd}^{-1} \dots\dots(8)$$

Di mana:

$$MF_{mass\ equiv} \text{ (ton/ha)} = \text{Massa setara fraksi mineral tanah pada setiap titik pengambilan contoh (Equivalent mass of soil mineral fraction in each sampling subunit)}$$

$$MF_{mass2nd} \text{ (ton/ha)} = \text{Massa kumulatif fraksi mineral tanah pada pengukuran kedua (T}_5\text{) pada setiap titik pengambilan contoh (Cumulative mass of soil mineral fraction in the second survey in each sampling subunit)}$$

$$M_{1st} \text{ and } M_{2nd} = \text{Massa fraksi mineral (MF) pada setiap titik pengambilan contoh (n = 40) pada survei pertama dan kedua/terakhir secara berurutan (Mean MF mass for the subunit (n = 40) in the first and second/last survey, respectively)}$$

Perhitungan simpanan karbon tanah berdasarkan massa tanah setara pada persamaan (9) dihitung berdasarkan perbedaan antara $MF_{mass\ equiv}$ dan $MF_{mass2nd}$.

$$C_{stock\ mass} (n) = C_{stock\ depth} (n) + C_{stock\ mf} (i) \times [MF_{mass\ equiv} (n) - MF_{mass2nd} (n)] \dots\dots(9)$$

Di mana:

$$C_{stock\ mass} (n) = \text{Simpanan C tanah kumulatif yang disesuaikan ke massa tanah setara hingga lapisan ke-n (Cumulative soil C stock adjusted to the equivalent soil mass up to the n-th layer (ton/ha))}$$

$$C_{stock\ mf} (i) = \text{Simpanan C tanah pada lapisan ke-i per massa fraksi mineral tanah pada lapisan ke-i (C Stocks in the i-th layers per mass of soil mineral fraction in the i-th layers), } C_{stock\ depth} (i) \times MF_{mass} (i)^{-1} \text{ (ton/ha/lapisan (layer))}$$

d. Laju Sekuestrasi Karbon Organik Tanah

Laju sekuestrasi/perubahan karbon organik tanah dihitung berdasarkan selisih antara simpanan karbon organik tanah kumulatif di antara dua seri waktu pengambilan contoh (*sampling time series*) dalam rentang waktu tertentu dan

dinyatakan dalam satuan ton/ha/tahun. Simpanan karbon organik tanah kumulatif pada kedalaman 0-30 cm dan 0-100 cm adalah jumlah simpanan karbon dari setiap lapisan, misalnya pada kedalaman 0-30 cm adalah jumlah simpanan karbon organik tanah dari lapisan 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, dan 20-30 cm.

4. Analisis Data

Analisis keragaman (ANOVA) digunakan untuk menguji perbedaan nilai rata-rata parameter kerapatan tanah (BD), kandungan karbon (C), dan simpanan karbon tanah kumulatif pada setiap kedalaman tanah di antara dua seri waktu pengambilan contoh tanah (T_1 dan T_5). Faktor blok (ulangan) atau titik-titik pengambilan contoh (*sampling units*) digabungkan (*incorporated*) sebagai efek acak (*random effect*). Untuk parameter yang berbeda secara statistik ($p < 0,05$), nilai rata-rata dipisahkan dengan menggunakan uji perbandingan perbedaan nyata terkecil (*Least Significant Difference/ LSD*). Semua uji statistik dilakukan dengan perangkat lunak *JMP Start Statistics* (Sall *et al.*, 2005).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kandungan Karbon dan Kerapatan Massa Tanah

1. Kandungan Karbon Tanah

Pada Tabel 2, kandungan karbon (C) tanah menurun dengan meningkatnya ke-

dalaman tanah pada kedua seri waktu pengukuran (T_1 dan T_5). Kandungan karbon tanah pada T_5 meningkat secara nyata pada lapisan 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, dan 20-30 cm ($p < 0,001$). Namun demikian, pada kedalaman lebih besar dari 30 cm, kandungan karbon organik tanah tidak berbeda nyata di antara kedua seri waktu pengukuran.

Peningkatan kandungan karbon organik tanah (SOC) pada lapisan atas tanah (0-30 cm) pada T_5 terjadi karena sebagian besar pasokan/*input* C organik tanah adalah dari serasah (*litter*) yang berada pada bagian atas tanah, sehingga bahan organik tanah cenderung terkonsentrasi pada lapisan atas tanah. Sementara kandungan karbon pada kedalaman 30-100 cm yang tidak berbeda secara statistik di antara kedua seri waktu disebabkan oleh penurunan pasokan dari serasah permukaan dan penurunan kepadatan akar dengan meningkatnya kedalaman.

Penurunan pasokan dari serasah permukaan dan penurunan kepadatan akar dengan meningkatnya kedalaman berkontribusi terhadap kandungan karbon organik tanah yang lebih kecil di horizon B (*sub soil*) daripada di horizon A (*top soil*) (Jobaggy & Jackson, 2000; Schoning & Kogel-Knabner, 2006; Schenk, 2008). Sumber utama SOC pada *sub soil* adalah pasokan C dari akar tanaman (contohnya lignin, suberin, dan *rhizodeposition* - akar yang masih hidup melepaskan senyawa organik ke lingkungan sekitarnya); jamur

Tabel (Table) 2. Perbandingan kandungan karbon tanah (C%) pada hutan tanaman *A. mangium* berdasarkan waktu pengambilan contoh pada tujuh lapisan tanah (*Comparison of mean values of soil carbon content (C%) of A. mangium plantation based on the sampling time at seven soil layers*)

Kedalaman (Depths), cm	N	Kandungan karbon tanah (Soil carbon content), C (%) , rerata (mean) $\pm$ SD		T5/T1	Anova Nilai F (F- Value)
		Tahun ke-1 (1 st Year)	Tahun ke-5 (5 th Year)		
0-5	40	4,03 $\pm$ 0,84	4,79 $\pm$ 0,88	1,19	15,58**
5-10	40	3,15 $\pm$ 0,60	3,67 $\pm$ 0,67	1,16	13,72**
10-20	40	2,45 $\pm$ 0,54	2,86 $\pm$ 0,60	1,17	10,08**
20-30	40	2,04 $\pm$ 0,43	2,30 $\pm$ 0,49	1,13	6,66**
30-50	5	1,82 $\pm$ 0,38	1,89 $\pm$ 0,32	1,04	0,09
50-70	5	1,51 $\pm$ 0,42	1,48 $\pm$ 0,29	0,98	0,03
70-100	5	1,43 $\pm$ 0,52	1,07 $\pm$ 0,29	0,75	1,85

Keterangan (Remarks): * = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$

mikoriza (*mycorrhizal fungi*); pengendapan (*illuvation*) melalui pencampuran sedimen atau tanah oleh organisme (*bioturbation*); dan pencucian (*leaching*) (Nguyen, 2003; Wallander *et al.*, 2004; Rasse *et al.*, 2005). Kandungan lignin dan tanin yang tinggi pada akar tanaman kemungkinan berkontribusi terhadap rendahnya laju dekomposisi pada akar tanaman, sehingga pasokan C pada *sub soil* menjadi rendah (Beuch *et al.*, 2000; Kraus *et al.*, 2003). Pada jenis pohon tertentu, kandungan rata-rata lignin akar lebih besar dua kali lipat daripada di tunas (*shoot*), dan suberin poliester alifatik dari jaringan akar merupakan penyumbang utama gudang karbon organik tanah (Rasse *et al.*, 2005; Nierop *et al.*, 2006). Secara fisik dan kimiawi, kandungan karbon organik tanah pada bagian profil tanah yang lebih rendah (*sub soil*) adalah stabil (Anikwe, 2010; Lorenz *et al.*, 2011).

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa karbon di horizon bawah tanah distabilisasi oleh interaksi mineral (Eusterhues *et al.*, 2005); komposisi kimianya sangat dipengaruhi oleh proses yang bersifat pedologi; stabilitasnya mungkin karena kelangkaan pasokan serasah tanaman segar, yang mengarah pada keterbatasan energi dari biomassa mikroba tanah (Fontaine *et al.*, 2007), dan ketidakmampuan mikroba secara fisik mengakses bahan organik pada lapisan tanah yang lebih dalam (Xiang *et al.*, 2008). Biomassa mikroba (bakteri dan jamur) - komponen yang hidup pada bahan organik tanah - umumnya berkurang pada lapisan bawah tanah (*sub soil*) dibandingkan dengan yang ada pada lapisan atas tanah (*top soil*), kemungkinan besar sebagai akibat penurunan kandungan karbon organik tanah (Taylor *et al.*, 2002). Namun demikian, horizon *sub soil* tanah hutan menjadi penting untuk sekuestrasi karbon dan penyimpanan SOC dalam jangka panjang karena kestabilannya. Oleh karena kestabilannya, beberapa strategi yang mungkin dapat dilakukan untuk mempercepat sekuestrasi SOC pada lapisan *sub soil*, antara lain: meningkatkan

pertumbuhan biomassa akar dan mengelola distribusi akar vertikal; memilih tanaman dan jenis tanaman dengan biomassa di bawah tanah (akar) yang mempunyai kadar yang lebih tinggi dalam senyawa tahan terhadap proses biokimiawi (*biochemical recalcitrant compounds*), yaitu senyawa lignin, tannin, cutan, dan suberan (Lorenz *et al.*, 2005); ketersediaan kadar air yang memadai dan pasokan nutrisi untuk pertumbuhan akar untuk meningkatkan akumulasi karbon organik yang dapat berkelanjutan di dalam tanah dengan produksi residu akar yang tinggi (Swift, 2001).

Konsentrasi SOC tergantung pada produktivitas biomassa dan intensitas mineralisasi bahan organik, yang secara kuat dikontrol oleh kondisi hidrotermal dan tekstur tanah (Paul, 1984; Lal *et al.*, 2001). Krull *et al.* (2001) menyatakan bahwa hampir semua karbon organik dalam tanah terletak di dalam pori-pori antara partikel mineral, baik sebagai partikel diskrit/individual ataupun sebagai molekul teradsorpsi ke permukaan partikel-partikel mineral liat tanah. Bangunan tanah dapat mempengaruhi stabilitas biologis bahan organik melalui efeknya pada ketersediaan air dan oksigen, jebakan (*entrapment*) dan isolasi dari dekomposer, dan melalui dinamika agregasi tanah.

2. Kerapatan Massa (BD) Tanah

Rata-rata keseluruhan kerapatan massa tanah pada kedalaman 0-100 cm berkisar antara 0,73-0,90 g/cm³ pada T₁ dan 0,62-0,90 g/cm³ pada T₅. BD tanah menurun secara sangat nyata ($p < 0,001$) dari 0,73 ke 0,62 g/cm³ pada lapisan 0-5 cm dan dari 0,83 ke 0,75 g/cm³ pada lapisan 5-10 cm setelah empat tahun penanaman *A. mangium* (T₅). Sementara pada kedalaman lebih besar dari 10 cm, BD tanah tidak berbeda nyata di antara kedua seri waktu pengukuran (Tabel 3, Lampiran 3).

Menurunnya BD tanah pada lapisan atas tanah berkaitan erat dengan meningkatnya jumlah serasah, akar, dan kandungan karbon tanah (Carvalho *et al.*,

2009). Sementara pasokan bahan organik dari lapisan atas dan laju dekomposisi bahan organik dari bahan akar yang rendah diduga sebagai penyebab BD tanah pada lapisan tanah yang lebih bawah tidak berbeda secara statistik di antara kedua seri waktu pengukuran. Selain itu, perbedaan BD tanah di antara fungsi lahan dapat disebabkan oleh pemadatan akibat penggembalaan ternak dan alat berat, perbedaan volume dan pergantian bahan akar, pengolahan lahan, dan aktivitas biologis (Mendham *et al.*, 2003).

B. Kerapatan dan Massa Kumulatif pada Fraksi Mineral Tanah

Kerapatan fraksi mineral tanah (BD_{mf}) pada T₅ lebih rendah daripada BD_{mf} T₁ pada setiap lapisan tanah, kecuali pada lapisan 50-70 cm. Sementara massa kumulatif fraksi mineral tanah kumulatif (*MF mass*) pada T₅ adalah lebih rendah daripada di T₁ pada setiap kedalaman (Tabel 4). Rasio T₅/T₁ untuk massa kumulatif fraksi mineral tanah berkisar dari 0,84 ke 0,99 dan terendah pada kedalaman 0-5 cm. Berdasarkan data pada Tabel 3, massa kumulatif fraksi mineral tanah pada kedalaman 0-5 cm, 0-10 cm, 0-20 cm, 0-30 cm, 0-50 cm, 0-70 cm, dan 0-100 cm pada T₅ adalah setara dengan kedalaman/ketebalan 4,20 cm; 8,69 cm; 18,27 cm; 27,79 cm; 48,07 cm; 69,13

cm; dan 93,79 cm pada T₁ secara berurutan.

Perubahan massa fraksi mineral tanah mengindikasikan bahwa telah terjadi penggemburan tanah (*soil expansion*) setelah empat tahun penanaman *A. mangium* pada tipe tanah Acrisols di Maribaya. Penggemburan tanah dapat disebabkan oleh perubahan kelembaban di dalam tanah. Perubahan kadar air pada tanah dapat menyebabkan mineral liat mengembang seperti spons atau kehilangan koheksi. Penggemburan maupun pemadatan tanah biasanya terjadi karena perubahan tataguna lahan, terutama pada permukaan tanah. Penggemburan tanah menyebabkan perubahan ketinggian permukaan tanah. Kaitannya dalam konteks penelitian ini, penggunaan perhitungan jumlah simpanan karbon organik tanah yang dikoreksi dengan pendekatan massa tanah setara (*equivalent soil mass*) dimaksudkan untuk menghindari perhitungan yang bias terhadap perubahan simpanan karbon organik tanah akibat terjadinya *soil expansion* (Ellert & Bettanym, 1995; Gifford & Roderick, 2003) dalam dua seri waktu yang berbeda, meskipun pendekatan massa tanah setara kurang umum daripada pendekatan berbasis kedalaman tanah tetap (*soil fix depth*). Tanpa koreksi massa tanah, pengaruh perubahan tataguna lahan terhadap simpanan karbon organik tanah akan lebih rendah 28% (Don *et al.*, 2010).

Tabel (Table) 3. Perbandingan kerapatan massa (BD) tanah pada hutan tanaman *A. mangium* berdasarkan waktu pengambilan contoh pada tujuh lapisan tanah (*Comparison of mean values of soil bulk density (BD) of A. mangium plantation based on the sampling times at seven soil layers*)

Kedalaman (Depths), cm	N	Kerapatan tanah (<i>Bulk density</i>), BD (g/cm ³), Rerata (<i>Mean</i>) ± SD		T ₅ /T ₁	Anova Nilai F (<i>F-value</i>)
		T ₁	T ₅		
0-5	40	0,73 ± 0,09	0,62 ± 0,11	0,85	23,20***
5-10	40	0,83 ± 0,08	0,75 ± 0,11	0,90	15,37***
10-20	40	0,86 ± 0,10	0,83 ± 0,11	0,96	2,29
20-30	40	0,89 ± 0,10	0,85 ± 0,10	0,96	3,22
30-50	5	0,86 ± 0,08	0,82 ± 0,11	0,95	0,44
50-70	5	0,86 ± 0,09	0,90 ± 0,21	1,05	0,17
70-100	5	0,90 ± 0,09	0,74 ± 0,20	0,82	2,64

Keterangan (*Remarks*): *** = p < 0,001

Tabel (Table) 4. Kerapatan dan massa kumulatif fraksi mineral tanah berdasarkan waktu pengambilan contoh pada tujuh lapisan tanah (*Density and cumulative mass of soil mineral fraction based on the sampling times at seven soil layers*)

Kerapatan massa fraksi mineral tanah (<i>Density of soil mineral fraction/ BDmf,</i> rerata (<i>mean</i>))			Massa kumulatif fraksi mineral tanah (<i>Cumulative mass of soil mineral fraction/ MF mass,</i> rerata (<i>mean</i>))				Ketebalan setara T ₅ ke T ₁ (<i>Equivalent thickness of T₅ to T₁</i>), (cm)
Kedalaman (<i>Depth</i>), (cm)	T ₁ (ton/ha/cm)	T ₅ (ton/ha/cm)	Kedalaman (<i>Depth</i>), (cm)	T ₁ (ton/ha)	T ₅ (ton/ha)	T ₅ /T ₁	
0-5	68	57	0-5	339	285	0,84	4,20
5-10	79	70	0-10	732	636	0,87	8,69
10-20	82	79	0-20	1556	1421	0,91	18,27
20-30	86	81	0-30	2413	2235	0,93	27,79
30-50	84	80	0-50	3997	3843	0,96	48,07
50-70	83	88	0-70	5666	5596	0,99	69,13
70-100	88	73	0-100	8304	7788	0,94	93,79

C. Simpanan Karbon Tanah dan Laju Sekuestrasinya

Tinggi-rendahnya simpanan karbon tanah (ton/ha) ditentukan dari tiga variabel utama yang saling terkait (*not independent*), yaitu konsentrasi karbon organik tanah (SOC) (C%), kerapatan tanah (BD) (g/cm³) SOC, dan BD telah dibahas sebelumnya serta kedalaman tanah (cm). Hasil studi menunjukkan bahwa simpanan karbon organik tanah kumulatif pada kedalaman 0-5 cm, 0-10 cm, 0-20 cm, dan 0-30 cm meningkat secara sangat nyata ($p < 0,001$) empat tahun setelah penanaman (T₅), yaitu sebesar 2,2 ton/ha; 3,5 ton/ha; 6,4 ton/ha; 8,8 ton/ha secara berurutan dengan laju sekuestrasi sebesar 0,58 ton/ha/tahun; 0,91 ton/ha/tahun; 1,67 ton/ha/tahun; dan 2,30 ton/ha/tahun (3,3% per tahun). Sementara simpanan karbon tanah kumulatif pada kedalaman lebih besar dari 30 cm tidak berbeda secara statistik di antara kedua seri waktu pengukuran (Tabel 5). Simpanan karbon organik tanah kumulatif pada kedalaman 0-30 cm berturut-turut sebesar 66,1 ton/ha dan 74,9 ton/ha pada T₁ dan T₅ atau hampir setengah dari jumlah simpanan karbon organik tanah kumulatif pada kedalaman 0-100 cm, yaitu sebesar 164,6 ton/ha (T₁) dan 155,6 ton/ha (T₅) (Tabel 5). Hasil ini sesuai dengan penjelasan dari IPCC (2006) dan Batjes (1996) bahwa sekitar setengah bagian (50%) karbon organik ta-

nah berada di lapisan 0-30 cm pada kedalaman tanah 0-100 cm.

Besaran dan tingkat perubahan kandungan C tanah seiring perubahan pada tata guna lahan sangat bervariasi karena pengaruh dari faktor-faktor yang berbeda, antara lain energi tetap yang tersisa (*net primary production/NPP*), transformasi sisa (*net flux*) karbon atmosfer menjadi tanaman hijau per satuan waktu, dan pola akar (Jobbagy & Jackson, 2000); kualitas pasokan bahan organik (Berg, 2000); sifat-sifat tanah tertentu (ketersediaan hara, tekstur) (Golchin *et al.*, 1994; Mendham *et al.*, 2003), dan intensitas pengelolaan pada masa lalu dan sekarang (Balesdent *et al.*, 2000). Pasokan (*input*) karbon organik ke dalam tanah sangat ditentukan oleh produktivitas hutan, dekomposisi serasah dan menyatu ke dalam tanah mineral, dan selanjutnya hilang/keluar melalui mineralisasi/respirasi (Pregitzer, 2003). Kehilangan karbon organik tanah lainnya terjadi melalui erosi atau tercuci (*leached*) ke air tanah (*groundwater*) atau hilang akibat banjir pada permukaan tanah (IPCC, 2006).

Keseimbangan C setelah aforestasi sangat dipengaruhi oleh jenis pohon (Perez-Cruzado *et al.*, 2011), sebagai hasil perbedaan pada laju pertumbuhan pohon. Produksi dan kualitas serasah yang dipengaruhi oleh jenis pohon mempunyai pengaruh yang kuat terhadap dinamika SOC

Tabel (Table) 5. Perbandingan simpanan karbon organik tanah pada hutan tanaman *A. mangium* berdasarkan waktu pengambilan contoh pada tujuh kedalaman tanah (*Comparison of mean values of soil organic carbon stocks of A. mangium plantation based on sampling times at seven soil depths*)

Kedalaman (Depths), cm	N	Simpanan karbon organik tanah (Soil organic carbon stock), Rerata (Mean) $\pm$ SD, (ton/ha)		ANOVA, Nilai F (F-Value)	Laju sekuestrasi karbon tanah (Soil carbon sequestration rates), [ton/ha/tahun (yr)]
		T ₁	T ₅		$\Delta (T_5-T_1)/4$
0-5	40	14,4 $\pm$ 2,3	16,6 $\pm$ 2,6	16,65***	0,57
0-10	40	27,4 $\pm$ 3,7	30,9 $\pm$ 3,7	18,65***	0,91
0-20	40	48,2 $\pm$ 6,9	54,6 $\pm$ 6,3	18,75***	1,67
0-30	40	66,1 $\pm$ 9,4	74,9 $\pm$ 8,5	19,52***	2,30
0-50	5	99,6 $\pm$ 14,1	101,7 $\pm$ 13,5	< 0,1	ns
0-70	5	125,2 $\pm$ 18,9	125,8 $\pm$ 15,6	< 0,1	ns
0-100	5	164,6 $\pm$ 25,2	155,6 $\pm$ 28,8	0,27	ns

Keterangan (Remarks): * = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$; ns = Tidak nyata (Not significant)

(Berg *et al.*, 2009; Vesterdal *et al.*, 2008). Perbedaan dalam dinamika SOC dipengaruhi oleh perbedaan laju pergantian akar (Vesterdal *et al.*, 2008), penutupan dan tipe vegetasi tumbuhan bawah (Lemma *et al.*, 2006), atau keduanya (Huang *et al.*, 2011; Kasel *et al.*, 2011; Paul *et al.*, 2002). Pengaruh jenis-jenis pohon pengikat nitrogen (*N-fixing*) juga telah diketahui (Kasel *et al.*, 2011; Nilsson & Schopfhauser, 1995), misalnya hasil yang lebih tinggi pada tanah-tanah miskin mengarah ke pasokan bahan organik yang lebih tinggi ke dalam tanah, dan juga memperbaiki kualitas serasah dan kecepatan dekomposisi dari bahan organik (Conteh *et al.*, 1997). Hutan dengan jenis pohon pengikat nitrogen biasanya mengakumulasi C lebih banyak di dalam tanah dibandingkan dengan hutan dengan jenis pohon yang bukan pengikat nitrogen. Perbedaan ini dapat berkembang dari proses yang berbeda secara fundamental, dengan lebih besarnya akumulasi karbon organik yang baru atau pengurangan mineralisasi karbon yang sudah ada di dalam tanah. Ketika jenis pohon pengikat nitrogen menghasilkan kandungan nitrogen lebih banyak di dalam tanah, jenis pohon pengikat nitrogen menahan lebih banyak karbon organik di dalam tanah (Resh *et al.*, 2002). Pada umumnya, jumlah karbon organik tanah pada tanaman pengikat nitrogen adalah lebih besar 20-100% atau se-

tara dengan 0,5-1,2 ton C/ha/tahun dari-pada tanaman yang bukan pengikat nitrogen (Lal, 2005).

Selain itu, sumber pasokan serasah yang berbeda dapat bahkan menghasilkan perubahan komposisi bahan organik tanah (Huang *et al.*, 2011). Kapasitas tanah berfungsi sebagai penyimpanan karbon (*carbon sink*) juga dipengaruhi oleh berapa cepat serasah merubah C menjadi humus (Kanerva & Smolander, 2007; Prescott, 2010). Penguraian serasah tidak hanya tergantung pada komposisi kimianya, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi iklim mikro yang ditentukan dengan perkembangan tajuk dan struktur tegakan yang berbeda. Kondisi iklim mikro yang sama mempunyai pengaruh langsung pada tutupan dan tipe tumbuhan bawah, yang selanjutnya mempengaruhi jumlah, komposisi, dan tipe serasah (Berg *et al.*, 2009). Akar menggabungkan lebih banyak C ke dalam tanah daripada bahan organik yang berada pada lantai hutan (Jones *et al.*, 2009). Tumbuhan bawah yang didominasi oleh jenis rerumputan akan menggabungkan C lebih cepat ke dalam bahan organik tanah karena sistem perakarannya berkembang lebih cepat (Andrade *et al.*, 2008; Laungani & Knops, 2009).

Peningkatan jumlah simpanan karbon organik tanah yang signifikan pada kedalaman 0-30 cm dalam periode waktu yang singkat (empat tahun) berkaitan erat

dengan produktivitas *A. mangium* yang tinggi sebagai jenis pohon cepat tumbuh dan termasuk jenis pohon pengikat nitrogen. Produktivitasnya yang tinggi akan menghasilkan pasokan bahan organik yang lebih tinggi ke dalam tanah. Sementara sebagai jenis pohon pengikat nitrogen, jenis tanaman *A. mangium* juga akan menghasilkan kandungan nitrogen yang lebih banyak di dalam tanah (Resh *et al.*, 2002), sehingga berpengaruh terhadap meningkatnya laju dekomposisi awal pasokan bahan organik segar (serasah) untuk selanjutnya menyatu di dalam tanah mineral sebagai humus (Pregitzer, 2003; Berg, 2000). Kandungan nitrogen yang lebih tinggi di dalam tanah juga berfungsi untuk menahan laju dekomposisi karbon tanah (*humified soil C*) (Resh *et al.*, 2002).

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pembangunan hutan tanaman *A. mangium* Willd pada tipe tanah acrisols di Maribaya, melalui penyiapan lahan dan penerapan praktek-praktek pengelolaan hutan tanaman, dapat meningkatkan laju sekuestrasi karbon organik tanah dan oleh karena itu, berfungsi sebagai *soil carbon sink*.
2. Simpanan karbon organik tanah pada hutan tanaman *A. mangium* Willd dalam periode waktu empat tahun setelah penanaman meningkat sebesar 8,8 ton C/ha dari 66,1 ton C/ha ke 74,9 ton C/ha, dengan potensi laju sekuestrasi karbon ke dalam tanah sebesar 2,30 ton C/ha/tahun (3,3% per tahun) pada kedalaman 0-30 cm.

B. Saran

Penelitian tentang potensi sekuestrasi karbon organik tanah pada berbagai jenis hutan tanaman dan ekosistem hutan lainnya di Indonesia sangat diperlukan dalam

kaitannya dengan peningkatan mitigasi CO₂.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, D.W. (1979). Processes of humus formation and transformation in the soils of the Canadian Great Plains. *J. Soil Sci.* 30, 77-84.
- Andrade, H.J., Brook, R., & Ibrahim, M. (2008). Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. *Plant Soil* 308, 11-22.
- Anikwe, M.A.N. (2010). Carbon storage in soils of Southeastern Nigeria under different management practices. *Anikwe Carbon Balance and Manag.* 5, 5.
- Balesdent, J., Chenu, C., & Balabane, M. (2000). Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Tillage Res.* 53, 215-230.
- Batjes, N.H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Sci.* 47(2), 151-163.
- Berg, B. (2000). Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *For. Ecol. Manag.* 133, 13-22.
- Berg, B., Johansson, M.B., Nilsson, A., Gundersen, P., & Norell, L. (2009). Sequestration of carbon in the humus layer of Swedish forests-direct measurements. *Can. J. For. Res.* 39, 962-975.
- Beuch, S., Boelcke, B., & Belau, L. (2000). Effects of the organic residues of *Miscanthus x giganteus* on soil organic matter level of arable soils. *J. Agron. Crop Sci.* 183, 111-119.
- Carvalho, J.L.N., Cerri, C.E.P., Feigl, B.J., Piccolo, M. de C., Godinho, V.de P., Herpin, U., & Cerri, C.C. (2009). Conversion of cerrado into

- agricultural land in the south-western Amazon: Carbon stocks and soil fertility. *Sci. Agric.* (Piracicaba, Braz.), 66(2), 233-241.
- Conteh, A., Lefroy, R.D.B., & Blair, G.J. (1997). Dynamics of organic matter in soil as determined by variations in $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotopic ratios and fractionation by ease of oxidation. *Aust. J. Soil Res.* 35, 881-890.
- Don, A., Schumacher, J., & Freibauer, A. (2010). Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. *Global Change Biology* 17(4), 1658- 1670.
- Don, A., Schumacher, J., Scherer-Lorenzen, M., Scholten, T., & Schulze, E.D. (2007). Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites-implications for measuring soil carbon stocks. *Geoderma*. 141, 272-282.
- Ellert, B.H. & Bettanym, J.R. (1995). Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. *Can. J. Soil. Sci.* 75, 529-538.
- Ellert, B.H., Janzen, H.H., & Entz, T. (2002). Assessment of a method to measure temporal change in soil carbon storage, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, 1687-1695.
- Eswaran, H., van den Berg, E., & Reich, P. (1993). Organic carbon in soils of the world. *Soil Sci. Society of America Jour.* 57, 192-194.
- Eusterhues, K., Rumpel, C., & Kogel-Knabner, I. (2005). Stabilization of soil organic matter isolated by oxidative degradation. *Organic Geochemistry*, 36, 1567-1575.
- FAO. (2001). *Global forest resources assessment 2000* (Main Report). Forestry Paper 140, pp. 479. Rome: FAO.
- FAO. (2002). Tropical forest plantation areas 1995. Dalam H. Krisnawati, M. Kallio, M. Kanninen. 2011. *Acacia mangium Willd. Ekologi, silvikultur dan produktivitas*. Bogor: CIFOR.
- FAO/ISRIC/ISSS. (1998). *World reference base for soil resources*. World Soil Resources Report No. 84. Rome: FAO.
- Feller, C. & Beare, M.H. (1997). Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79, 69-116.
- Fontaine, S., Barot, S., Barre, P., Bdioui, N., Mary, B., & Rumpel, C. (2007). Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature* 450, 277-281.
- Gifford, R.M. & Roderick, M.L. (2003). Soil carbon stocks and bulk density: spatial or cumulative mass coordinates as a basis of expression? *Global Change Biol.* 9, 1507-1514.
- Golchin, A., Oades, J.M., Skjemstad, J.O., & Clarke, P. (1994). Soil structure and carbon cycling. *Aust. J. Soil Res.* 32: 1043-1068.
- Huang, Z., Davis, M.R., Condron, L.M., & Clinton, P.W. (2011). Soil carbon pools, plant biomarkers and mean carbon residence time after afforestation of grassland with three tree species. *Soil Biol. Biochem.* 43, 1341-1349.
- IPCC. (2006). Agriculture, forestry and other land use. In S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe (Eds.) *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (Vol. 4). IGES, Japan.
- Jobbágy, E.G. & Jackson, R.B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Appl.* 10, 423-436.
- Jones, D.L., Nguyen, C., & Finlay, R.D. (2009). Carbon flow in the rhizosphere: carbon trading at the soil-root interface. *Plant Soil* 321, 5-33.
- Kanerva, S. & Smolander, A. (2007). Microbial activities in forest floor layers under silver birch, Norway

- spruce and Scots pine. *Soil Biol. Biochem.* 39, 1459-1467.
- Kasel, S., Singh, S., Sanders, G.J., & Bennett, L.T. (2011). Species specific effects of native trees on soil organic carbon in biodiverse plantings across north-central Victoria, Australia. *Geoderma* 161, 95-106.
- Kraus, T.E.C., Dahlgren, R.A., & Zasoski, R.J. (2003). Tannins in nutrient dynamics of forest ecosystems – A review. *Plant Soil* 256, 41-66.
- Krull, E., Baldock, J., & Skjemstad, J. (2001). Soil texture effects on decomposition and soil carbon storage. *NEE Workshop Proceedings, 18-20 April 2001 CRC for Greenhouse Accounting, CSIRO Land and Water Australia*.
- Lal, R. (2005). Soil carbon sequestration in natural and managed tropical forest ecosystems. *Jour. of Sustainable For. (Food Products Press, an imprint of The Haworth Press, Inc.)* 21(1), 1-30.
- Lal, R., J., Kimble, M., & Follett, R.F. (2001). Methodological challenges toward balancing soil C pools and fluxes. In R. Lal, R. F. Follett, & B. A. Stewart (Ed.): *Assessment methods for soil carbon* (pp. 659-668). CRC, Boca Raton, Fla.
- Laungani, R. & Knops, J.M.H. (2009). The impact of co-occurring tree and grassland species on carbon sequestration and potential biofuel production. *GCB Bioenergy* 1, 392-403.
- Lemma, B., Kleja, D.B, Nilsson, I., & Olsson, M. (2006). Soil carbon sequestration under different exotic tree species in the southwestern highlands of Ethiopia. *Geoderma* 136, 886-898.
- Lorenz, K. & Lal, R. (2005). The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons. *Advance in Agronomy* 88, 35-66.
- Lorenz, K., Lal, R., & Shipitalo, M.J. (2011). Stabilized soil organic carbon pools in subsoils under forest are potential sinks for atmospheric CO₂. *For. Sci.* 57(1), 19-25.
- Markewich, H.W. & Buell, G.R. (2001). *A guide to potential soil carbon sequestration. Land-use management for mitigation of greenhouse gas emissions*. U.S. Geological Survey Open-File Report 01-374.
- McKenzie, N.J., Grundy, M.J., Webster, R., & Ringrose-Voase, A.J. (2008). *Guidelines for surveying soil and land resources* (pp. 576). Canberra: CSIRO Publishing.
- Mendham, D.S., O'Connell, A.M., & Grove, T.S. (2003). Change in soil carbon after land clearing or afforestation in highly weathered lateritic and sandy soils of southwestern Australia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 95(1), 143-156.
- Nguyen, C. (2003). Rhizodeposition of organic C by plants: mechanisms and controls. *Agronomie* 23, 375-396.
- Nierop, G.J.K., Jansen, B., Hageman, J.A., & Verstraten, J.M. (2006). The complementary of extractable and ester-bound lipids in a soil profile under pine. *Plant Soil* 286, 269-285.
- Nilsson, S. & Schopfhauser, W. (1995). The carbon-sequestration potential of a global afforestation program. *Clim. Change* 30, 267-293.
- Nsabimana, D., Klemedtson, L., Kaplin, B.A., & Wallin, G. (2008). Soil carbon and nutrient accumulation under forest plantations in southern Rwanda. *African Jour. of Environmental Sci. and Techn.* 2 (6), 142-149.
- Ohta, S. (2001). *Outlined procedure of soil survey and soil sampling (Draft)*. Carbon Fixing Forest Management Project. Japan Interna-

- tional Cooperation Agency and Forestry Research and Development Agency. Indonesia: Ministry of Forestry. (Tidak dipublikasikan).
- Paul, E. A. (1984). Dynamics of soil organic matter. *Plant Soil* 76, 275-285.
- Paul, E.A. & van Veen, J.A. (1978). The use of tracers to determine the dynamic nature of organic matter. *International Congress of Soil Science, Transactions of the 11th Symposium Papers 3: 61-102, Edmonton*.
- Paul, K.I., Polglase, P.J., Nyakuengama, J.G., & Khanna, P.K. (2002). Change in soil carbon following afforestation. *For. Ecol. Manag.* 168, 241-257.
- Perez-Cruzado, C., Mansilla-Salinerio, P., Rodriguez-Soalleiro, R., & Merino, A. (2011). Influence of tree species on carbon sequestration in afforested pastures in a humid temperate region. *Plant Soil. Regular Article. Springer Science+Business Media*, B.V., pp. 21.
- Post, W.M., Emanuel, W.R., Zinke, P.J., & Stangenberger, A.G. (1982). Soil carbon pools and world life zones. *Nature* 298, 156-159.
- Post, W.M. & Kwon, K.C. (2000). Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biol.* 6, 317-327.
- Pregitzer, K.S. (2003). Woody plants, carbon allocation and fine roots. *New Phytologist* 158(3), 421-424.
- Prescott, C.E. (2010). Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? *Biogeochemistry* 101, 1-17.
- Pribyl, D.W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma* 156, 75-83.
- Rasse, D.P., Rumpel, C., & Dignac, M.F. (2005). Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization. *Plant Soil* 269, 341-356.
- Resh, S.C., Binkley, D., & Parrotta, J.A. (2002). Greater soil carbon sequestration under nitrogen-fixing trees compared with *Eucalyptus* species. *Ecosystems* 5, 217-231.
- Rimbawanto, A. (2002). Plantation and tree improvement trends in Indonesia. In K. Barry (Ed): *Heartrots in Plantation Hardwoods in Indonesia and Australia*. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research.
- Sall, J., Creighton, L., & Lehman, A. (2005). *JMP start statistics. A guide to statistics and data analysis using JMP and JMP in Software* (3th ed.). Thomson Learning Academic Resource Center.
- Sanderman, J., Farquharson, R. & Baldock, J. (2010). *Soil carbon sequestration potential: A review for Australian Agriculture* (pp.76). CSIRO Land and Water.
- Schenk, H.J. (2008). The shallowest possible water extraction profile: A null model for global root distributions. *Vadose Zone J.* 7, 1119-1124.
- Schimel, D.S. (1995). Terrestrial ecosystems and the carbon-cycle. *Glob. Change Biol.* 1, 77-91.
- Schoning, I., & Kogel-Knabner, I. (2006). Chemical composition of young and old carbon pools throughout cambisol and luvisol profiles under forests. *Soil Biol. Biochem.* 38, 2411-2424.
- Schrumpf, M., Schulze, E.D., Kaiser, K., & Schumacher, J. (2011). How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? *Biogeosci. Discuss.* 8, 723-769.
- Siringoringo, H.H, Siregar, C.A., & Hatori, H. (2003). Analysis of soil carbon accumulation of *Acacia mangium* plantation in Maribaya, West Java. *Bul. Pen. Hut.* 634, 59-78.

- Six, J., Feller, C., Denef, K., Sa, J.C.D., Ogle, S.M., & Albrecht, A. (2002). Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - effects of no-tillage. *Agronomie* 22, 755- 775.
- Soil Survey Staff. (1999). *Keys to soil taxonomy*. Washington DC: USDA Natural Resources Conservation Service.
- Swift, R.S. (2001). Sequestration of carbon by soil. *Soil Science*, 166(11), 858-871.
- Tarnocai, C., Canadell, J.G., Schuur, E.A.G., Kuhry, P., Mazhitova, G., & Zimov, S. (2009). Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles* 23, 11.
- Taylor, J.P., Wilson, M.S., Mills, M.S., & Burns, R.G. (2002). Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques. *Soil Biol. & Biochemistry* 34, 387-401.
- Tisdall, J.M. & Oades, J.M. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33, 141-163.
- Toriyama, J., Kato, T., Siregar, C.A., Siringoringo, H.H., Ohta, S., & Kiyono, Y. (2011). Comparison of depth and mass-based approaches for estimating changes in forest soil carbon stocks: A case study in young plantations and secondary forests in West Java, Indonesia. *Forest Ecol. and Manag.* 262, 1659-1667.
- Trumbore, S.E. (1993). Comparison of carbon dynamics in tropical and temperate soils using radiocarbon measurements. *Global Biogeochemical Cycles* 7, 275-290.
- Van den Bygaart, A.J. (2006). Monitoring soil organic carbon stock changes in agricultural landscapes: Issues and a proposed approach. *Can. J. Soil Sci.* 86, 451-463.
- Vesterdal, L., Schmidt, I.K., Callesen, I., Nilsson, L.O., & Gundersen, P. (2008). Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. *For. Ecol. Manag.* 255, 35-48.
- Wallander, H., Oransson, H.G., & Rosengren, U. (2004). Production, standing biomass and natural abundance of ¹⁵N and ¹³C in ectomycorrhizal mycelia collected at different soil depths in two forest types. *Oecologia* 139, 89-97.
- Wuest, S.B. (2009). Correction of bulk density and sampling method biases using soil mass per unit area. *SSSAJ* 73(1).
- Xiang, S.R., Doyle, A., Holden, P.A., & Schimel, J.P. (2008). Drying and rewetting effects on C and N mineralization and microbial activity in surface and subsurface California grassland soils. *Soil Biology & Biochemistry* 40, 2281-2289.

Lampiran (Appendix) 1. Analisis keragaman kandungan karbon tanah (C%) pada hutan tanaman *A. mangium* berdasarkan waktu pengambilan contoh pada tujuh lapisan tanah di Maribaya
(Analysis of variance of soil carbon content (C%) of A. mangium plantation based on the sampling times at seven soil layers in Maribaya)

Kedalaman (Depth), cm	Sumber keragaman (Source of variation)	Db (df)	Jumlah kuadrat (Sum of square)	Rataan kuadrat (Mean of square)	F-rasio (F-ratio)	Peluang > F (Prob > F)
0-5	Waktu pengambilan contoh (<i>Sampling times</i>)	1	11,509	11,509	15,578	0,0002*
	Galat (<i>Error</i>)	78	57,626	0,739		
	Total terkoreksi (<i>Corrected total</i>)	79	69,135			
5-10	Waktu pengambilan contoh (<i>Sampling times</i>)	1	5,514	5,514	13,719	0,0004*
	Galat (<i>Error</i>)	78	31,349	0,402		
	Total terkoreksi (<i>Corrected total</i>)	79	36,863			
10-20	Waktu pengambilan contoh (<i>Sampling times</i>)	1	3,251	3,251	10,075	0,0022*
	Galat (<i>Error</i>)	78	25,171	0,323		
	Total terkoreksi (<i>Corrected total</i>)	79	28,422			
20-30	Waktu pengambilan contoh (<i>Sampling times</i>)	1	1,408	1,408	6,664	0,0117*
	Galat (<i>Error</i>)	78	16,480	0,211		
	Total terkoreksi (<i>Corrected total</i>)	79	17,888			
30-50	Waktu pengambilan contoh (<i>Sampling times</i>)	1	0,011	0,011	0,088	0,7740
	Galat (<i>Error</i>)	8	1,000	0,125		
	Total terkoreksi (<i>Corrected total</i>)	9	1,0112			
50-70	Waktu pengambilan contoh (<i>Sampling times</i>)	1	0,0034	0,0034	0,0267	0,8744
	Galat (<i>Error</i>)	8	1,0350	0,1294		
	Total terkoreksi (<i>Corrected total</i>)	9	1,0384			
70-100	Waktu pengambilan contoh (<i>Sampling times</i>)	1	0,326	0,326	1,847	0,2112
	Galat (<i>Error</i>)	8	1,411	0,176		
	Total terkoreksi (<i>Corrected total</i>)	9	1,737			

Lampiran (Appendix) 2. Analisis keragaman kerapatan tanah (BD) pada hutan tanaman *A. mangium* berdasarkan waktu pengambilan contoh pada tujuh lapisan tanah di Maribaya
(*Analysis of variance of bulk density (BD) of A. mangium plantation based on the sampling times at seven soil layers in Maribaya*)

Kedalaman (Depth), cm	Sumber keragaman (Source of variations)	Db (df)	Jumlah kuadrat (Sum of square)	Rataan kuadrat (Mean of square)	F-rasio (F-ratio)	Peluang > F (Prob > F)
0-5	Waktu pengambilan contoh (<i>Sampling times</i>)	1	0,230	0,230	23,20	<,0001*
	Galat (<i>Error</i>)	78	0,776	0,010		
	Total terkoreksi (<i>Corrected total</i>)	79	1,006			
5-10	Waktu pengambilan contoh (<i>Sampling times</i>)	1	0,133	0,133	15,37	0,0002*
	Galat (<i>Error</i>)	78	0,673	0,009		
	Total terkoreksi (<i>Corrected total</i>)	79	0,806			
10-20	Waktu pengambilan contoh (<i>Sampling times</i>)	1	0,024	0,024	2,286	0,135
	Galat (<i>Error</i>)	78	0,814	0,010		
	Total terkoreksi (<i>Corrected total</i>)	79	0,838			
20-30	Waktu pengambilan contoh (<i>Sampling times</i>)	1	0,033	0,033	3,222	0,077
	Galat (<i>Error</i>)	78	0,796	0,010		
	Total terkoreksi (<i>Corrected total</i>)	79	0,829			
30-50	Waktu pengambilan contoh (<i>Sampling times</i>)	1	0,004	0,004	0,440	0,526
	Galat (<i>Error</i>)	8	0,073	0,009		
	Total terkoreksi (<i>Corrected total</i>)	9	0,077			
50-70	Waktu pengambilan contoh (<i>Sampling times</i>)	1	0,004	0,004	0,171	0,691
	Galat (<i>Error</i>)	8	0,205	0,026		
	Total terkoreksi (<i>Corrected total</i>)	9	0,209			
70-100	Waktu pengambilan contoh (<i>Sampling times</i>)	1	0,062	0,062	2,635	0,143
	Galat (<i>Error</i>)	8	0,187	0,023		
	Total terkoreksi (<i>Corrected total</i>)	9	0,248			

Lampiran (Appendix) 3. Analisis keragaman simpanan karbon tanah kumulatif pada hutan tanaman *A. mangium* berdasarkan waktu pengambilan contoh pada 7 kedalaman tanah di Maribaya (*Analysis of variance of soil carbon stock of A. mangium plantation based on the sampling times at seven soil depths in Maribaya*)

Kedalaman (Depth), cm	Sumber keragaman (Source of variations)	Db (df)	Jumlah kuadrat (Sum of square)	Rataan kuadrat (Mean of square)	F-rasio (F-ratio)	Peluang > F (Prob > F)
0-5	Waktu pengambilan contoh (Sampling times)	1	99,822	99,822	16,651	<,0001*
	Galat (Error)	78	467,595	5,995		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	567,417			
0-10	Waktu pengambilan contoh (Sampling times)	1	255,895	255,935	18,651	<,0001*
	Galat (Error)	78	1070,155	13,720		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	1326,050			
0-20	Waktu pengambilan contoh (Sampling times)	1	820,861	820,861	18,747	<,0001*
	Galat (Error)	78	3415,262	43,785		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	4236,122			
0-30	Waktu pengambilan contoh (Sampling times)	1	1562,573	1562,57	19,520	<,0001*
	Galat (Error)	78	6243,903	80,05		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	7806,475			
0-50	Waktu pengambilan contoh (Sampling times)	1	11,554	11,554	0,061	0,8118
	Galat (Error)	8	1526,170	190,771		
	Total terkoreksi (Corrected total)	9	1537,724			
0-70	Waktu pengambilan contoh (Sampling times)	1	1,026	1,026	0,003	0,9549
	Galat (Error)	8	2409,529	301,191		
	Total terkoreksi (Corrected total)	9	2410,555			
0-100	Waktu pengambilan contoh (Sampling times)	1	199,859	199,859	0,272	0,6158
	Galat (Error)	8	5868,627	733,578		
	Total terkoreksi (Corrected total)	9	6068,486			