

This file has been cleaned of potential threats.

If you confirm that the file is coming from a trusted source, you can send the following SHA-256 hash value to your admin for the original file.

627e3bad3b35a11fc58be910ccb0c9349fe83a891aec0ec08864b604a296efa0

To view the reconstructed contents, please SCROLL DOWN to next page.

**PERBEDAAN SIMPANAN KARBON ORGANIK PADA HUTAN TANAMAN  
*Acacia mangium* Willd DAN HUTAN SEKUNDER MUDA (*The Different of Soil  
Carbon Stock at Acacia mangium Willd Plantation and Young Secondary Forest*)\***

Harris Herman Siringoringo

Pusat Litbang Konservasi dan Rehabilitasi  
Jl. Gunung Batu No. 5 Po Box 165 Bogor; Telp.0251-8633234; Fax 0251-8638111  
e-mail: p3hka\_pp@yahoo.co.id; ringobogor@gmail.com

\*Diterima : 17 September 2013; Disetujui : 1 April 2014

**ABSTRACT**

*This study presents a case study examining soil organic carbon stock at two land use types, i.e. between plots under Acacia mangium Willd plantations (M-P) and under young secondary forest (M-SF) as baseline vegetation after four years within an Acrisols soil type in Forestry Resort of Maribaya, Bogor District. The result showed that, at depths of 0-30 cm, soil organic contents (SOC) were generally higher at the M-P plot (2.30-4.79%) than at the M-SF plot (1.79-3.81%). While bulk densities (BD) were generally lower at the M-P plot (0.62-0.85 g/cm<sup>3</sup>) than at the M-SF plot (0.76-0.89 g/cm<sup>3</sup>). Meanwhile, with equivalent soil mass approach, change in cumulative SOC stocks of 0-30 cm depths were generally higher at the M-P plot (8.8 ton C/ha equating to 8.4 ton/ha/year of CO<sub>2</sub> sequestered) than at the M-SF plot (2.2 ton C/ha equating to 1.5 ton/ha/year of CO<sub>2</sub> sequestered). As implication, the change of young secondary forest to A. mangium Willd plantation in Acrisols soil in Maribaya could act as a soil carbon sink.*

*Keywords: Land use change, plantation, carbon stock, carbon sink, equivalent soil mass approach*

**ABSTRAK**

Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari simpanan karbon organik tanah pada dua tipe lahan, yaitu antara plot pada hutan tanaman *A. mangium* Willd (M-P) dan plot pada vegetasi hutan sekunder muda (M-SF) setelah empat tahun pada tipe tanah Acrisols di Resort Polisi Hutan (RPH) Maribaya, Kabupaten Bogor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan karbon organik tanah (SOC) pada kedalaman 0-30 cm secara umum lebih tinggi pada plot M-P (2,30-4,79%) daripada SOC pada plot M-SF (1,79-3,81%). Sementara, kerapatan massa (BD) tanah pada kedalaman 0-30 cm, lebih rendah pada plot M-P (0,62-0,85 g/cm<sup>3</sup>) daripada BD tanah pada plot M-SF (0,76-0,89 g/cm<sup>3</sup>). Pendekatan melalui massa tanah setara, perubahan simpanan SOC kumulatif pada kedalaman 0-30 cm adalah lebih tinggi pada plot M-P (8,8 ton/ha atau setara dengan sekuestrasi CO<sub>2</sub> atmosfer ke dalam tanah sebesar 8,4 ton/ha/tahun) daripada pada plot M-SF (2,2 ton C/ha atau setara dengan sekuestrasi CO<sub>2</sub> atmosfer ke dalam tanah sebesar 1,5 ton/ha/tahun). Implikasinya adalah bahwa perambahan hutan sekunder muda ke hutan tanaman *A. mangium* Willd pada tipe tanah Acrisols di Maribaya dapat berfungsi sebagai penyerap karbon ke dalam tanah.

Kata kunci: Perubahan tataguna lahan, hutan tanaman, simpanan karbon, penyerap karbon, pendekatan massa tanah setara

**I. PENDAHULUAN**

Salah satu tipe perubahan tataguna lahan yang dominan secara global adalah konversi hutan menjadi lahan pertanian dengan laju deforestasi yang tinggi secara kontiniu, yaitu sekitar 13 juta ha per tahun pada periode 1990-2005 (FAO, 2006). Sebagai sumber terbesar kedua emisi gas rumah kaca CO<sub>2</sub> setelah

oksida-si bahan bakar fosil (Dixon *et al.*, 1994), perubahan sistem tataguna lahan me-nyumbangkan emisi gas rumah kaca se-kitar 1,5 miliar ton (Gt) C per tahun (The World Bank, 2012). Deforestasi di daerah tropis berkontribusi terhadap 12-20% emisi gas rumah kaca dan diperkirakan akan tetap menjadi sumber terbesar kedua emisi gas rumah kaca pada

masa men-datang (IPCC, 2007; Van der Werf *et al.*, 2009).

Tingkat akumulasi atau kehilangan karbon organik tanah/*soil organic carbon* (SOC) setelah perubahan tataguna lahan diatur oleh keseimbangan antara *input* C dari serasah tanaman (di atas dan di bawah permukaan tanah) dan yang hilang dari dekomposisi, pencucian, dan erosi (Schlesinger, 1977). Keseimbangan ini menjadi negatif jika intensitas pengelolaan lahan meningkat dari hutan ke padang rumput dan ke pertanian (Pérez-Cruzado *et al.*, 2011). Afforestasi pada padang rumput yang biasanya SOC-nya sangat tinggi menyebabkan penurunan SOC dalam jangka pendek atau menengah (Laganiere *et al.*, 2010; Poepflau *et al.*, 2011), dan kadang tidak ada perbedaan dalam jangka panjang (Pérez-Cruzado *et al.*, 2011). Sebaliknya, perubahan tataguna lahan juga dapat menyebabkan peningkatan simpanan SOC, contohnya, jika lahan pertanian dikonversi menjadi padang rumput atau dihutankan kembali (Paul *et al.*, 2002; Guo & Gifford, 2002).

Tipe perubahan tataguna lahan lainnya seperti pembangunan hutan tanaman telah menjadi pemandangan umum di berbagai belahan dunia terutama di daerah tropika basah Asia. Berdasarkan data FAO (2001), pada tahun 2000, daerah tropika basah Asia merupakan wilayah terpenting dalam pengembangan hutan tanaman, yakni mencakup 116 juta ha, sedangkan di Eropa, Amerika, dan Afrika masing-masing adalah 32 juta ha, 28 juta ha, dan 8 juta ha secara berurutan. Pada umumnya pembangunan hutan tanaman dilakukan pada hutan terdegradasi, baik karena faktor alami maupun antropogenik dan atau pada hutan bekas tebangan yang kemudian berkembang menjadi hutan sekunder. Di Indonesia, 48,1% tutupan hutan asli telah digantikan oleh hutan sekunder (Badan Planologi Kehutanan, 2005), namun, pengaruh konversi hutan sekunder menjadi hutan tanaman terhadap besarnya simpanan SOC terutama di daerah tropis masih sedikit diketahui.

Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh informasi tentang perbedaan jumlah simpanan karbon organik tanah pada dua tipe lahan setelah periode waktu empat tahun, yaitu antara plot hutan tanaman yang baru *Acacia mangium* Willd (*new land use*) dan plot vegetasi awalnya (*baseline vegetation*) yang berupa hutan sekunder muda pada situasi pengelolaan yang tidak berubah (*control plot/unchanged management*) pada tipe tanah Acrisols. Selisih jumlah (*net effect*) simpanan karbon organik tanah di antara dua tipe tataguna lahan digunakan sebagai dasar untuk menghitung perubahan tataguna lahan setelah periode waktu tertentu (Don *et al.*, 2009; West *et al.*, 2004) yang dapat dihitung sebagai *carbon sink* dalam pasal 3.4 Protokol Kyoto (West *et al.*, 2004). Dalam tulisan ini, perhitungan jumlah simpanan karbon organik tanah dalam dua seri waktu yang berbeda dikoreksi dengan pendekatan massa tanah setara (*equivalent soil mass approach*) yang disajikan oleh Ellert & Bettanym (1995) dan berdasarkan massa tanah mineral (Toriyama *et al.*, 2011).

## II. BAHAN DAN METODE

### A. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada dua plot permanen, yaitu: plot hutan tanaman *A. mangium* yang baru dibangun (*newly establishment*) (M-P) dan plot vegetasi aslinya (*baseline vegetation/control plot*) yang berupa hutan sekunder muda (M-SF) pada situasi pengelolaan yang tidak berubah (*control plot/unchanged management*). Plot M-P dan M-SF terletak pada suatu kawasan yang saling berdekatan dengan luas masing-masing lima hektar dan ada di dalam satu lokasi percobaan (*experimental site*) dengan luas total 15 ha pada petak 15 A (37 ha) di Resort Polisi Hutan (RPH) Maribaya (6°22'-6°25' LS, 106°27'-106°29' BT), Bagian Kesatuan Pemangkuan Hutan (BKPH) Parung

Panjang, wilayah kerja Kesatuan Pemangkuan Hutan (KPH) Bogor, Perum Perhutani Unit III Jawa Barat dan Banten. Luas total kawasan RPH Maribaya relatif kecil, yaitu sekitar 163 ha. Sketsa lokasi penelitian ditampilkan pada Lampiran 1.

Topografi lokasi penelitian termasuk kategori bergelombang (*undulating*) dengan kemiringan lereng  $0^0$  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 (1995-1999), yang tercatat di Stasiun Klimatologi Cikopomayan, Nanggung, Kecamatan Leuwiliang, Bogor. 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 tanah bagian atas (*topsoil*) warna coklat gelap (7.5YR  $\frac{3}{4}$ ) dan lapisan tanah bagian bawah (*subsoil*) warna coklat kemerahan gelap (5 YR  $\frac{3}{4}$ ) hingga coklat kemerahan kusam (5 YR  $\frac{4}{3}$ ) dalam sistem warna Munsell; struktur tanah kasar (*coarse*), kuat (*strong*), dan gumpal bersudut (*subangular blocky structure*).

Pembangunan plot hutan tanaman *A. mangium* menerapkan praktik-praktik pengelolaan hutan tanaman sebagaimana biasanya. 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 dengan lobang tanam 30 cm x 30 cm x 30 cm. Penyiangan (*weeding*) dilakukan dua kali dalam setahun. Pemangkasan (*prunning*) dan batang tunggal (*singling*) dilakukan satu kali dalam setahun. Pada umur 46 bulan pada tahun 2005, *A. mangium* mencapai tinggi rata-rata 10 m. Sementara, plot hutan sekunder (M-SF) didominasi oleh *Schima walichii* (puspa) dengan tinggi rata-rata 3,8 m pada awal penelitian tahun 2001 dan sekitar 5 m pada akhir penelitian ta-

hun 2005. Hutan sekunder ini sebelumnya telah digunakan untuk perladangan berpindah dan sudah tidak digunakan pada saat penelitian berlangsung.

## B. Bahan dan Alat Penelitian

Demplot hutan tanaman *A. mangium* (M-P) dan demplot hutan sekunder (M-SF) untuk pengambilan contoh-contoh tanah dalam dua seri waktu digunakan sebagai objek penelitian. Alat penelitian yang digunakan di lapangan adalah: GPS, *chainsaw*, munsell, meteran, golok, cangkul, silinder logam/ring sampel (100 cm<sup>3</sup>), gunting, buku tulis, kantong plastik, tali plastik, dan label. Peralatan yang digunakan di laboratorium adalah: NC Analyzer, oven, *willey mill*, *vibration mill*, timbangan analitik, desikator, dan gelas ukur.

## C. Metode Penelitian

Pengambilan contoh tanah dilakukan dua kali dalam periode waktu 46 bulan (4 tahun) di dalam plot yang sama. Pengambilan contoh awal dilaksanakan pada bulan Oktober 2001 (T<sub>1</sub>), yaitu setelah penyiapan lahan/satu bulan sebelum penanaman *A. mangium*, dan pengambilan contoh terakhir dilaksanakan pada akhir Agustus 2005 (T<sub>2</sub>).

### 1. Disain Plot dan Titik Pengambilan Contoh Tanah

Pengambilan contoh tanah pada plot M-P terdiri dari empat blok (20 m x 30 m) yang ditentukan secara acak di dalam plot hutan tanaman *A. mangium* (5 ha). Pada setiap subplot ditentukan sebanyak 10 titik pengambilan contoh tanah (*sampling subunit*) secara sistematis (Gambar 1) berdasarkan seri waktu. Pengambilan contoh tanah pada plot vegetasi awal/hutan sekunder (M-SF) (5 ha) terdiri dari 10 subplot (10 m x 10 m) yang ditentukan secara acak di dalam plot hutan sekunder (5 ha). Pada masing-masing subplot M-SF ditentukan sebanyak empat titik pengambilan contoh tanah

yang terletak pada ke empat sisi bagian luar petak bujur sangkar (Gambar 2) pada setiap seri waktu.

Pengambilan contoh dalam dua seri waktu yang berbeda ( $T_1$  dan  $T_2$ ), baik pa-

da M-P maupun M-SF dilakukan pada dua bagian/titik yang berbeda di masing-masing subplot/blok yang sama. Pada umumnya, dalam riset tanah pada lahan

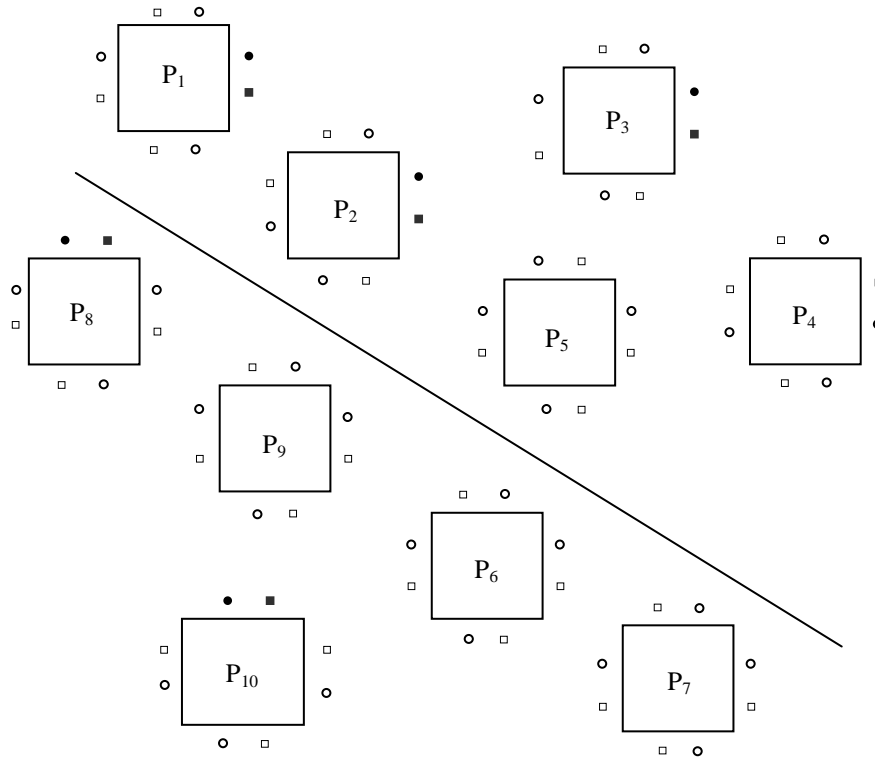
Blok (Subplot)	Plot hutan tanaman ( <i>Plantation plot</i> ) Ukuran subplot masing-masing 20 m x 30 m ( <i>Subplot size, 20 m x 30 m each</i> )										Titik pengambilan contoh ( <i>Sampling points</i> )		
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	Seri waktu ( <i>Time series</i> )	0-30 cm	0-100 cm
A	1	xx	x		x		x		x		<-- 2001 ( $T_1$ )	A1c, A1e, A1g, A1i	A1a
	2												
	3												
	4												
	5	xx	x		x		x		x		<-- 2005 ( $T_2$ )	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 ( $T_2$ )	A10a, A10c, A10e, A10i	A10g
B	1	x	x		xx		x		x		<-- 2001 ( $T_1$ )	B1a, B1c, B1g, B1i	B1e
	2												
	3												
	4												
	5	x	x		xx		x		x		<-- 2005 ( $T_2$ )	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 ( $T_2$ )	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 ( $T_2$ )	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 ( $T_2$ )	C10a, C10c, C10e	C10i
D	1	x	x		x		x		x		<-- 2001 ( $T_1$ )	D1a, D1c, D1e, D1g, D1i	
	2												
	3												
	4												
	5	x	x		x		x		x		<-- 2005 ( $T_2$ )	D5a, D5c, D5e, D5g, D5i	
	6	x	xx		x		x		x		<-- 2001 ( $T_1$ )	D6a, D6c, D6e, D6g, D6i	D6c
	7												
	8												
	9												
	10	x	xx		x		x		x		<-- 2005 ( $T_2$ )	D10a, D10c, D10e, D10g, D10i	D10c

**Keterangan (Remarks):**

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

xx: titik pengambilan contoh pada kedalaman 0-100 cm (total sebanyak 5 titik) (*sampling points of 0-100 cm deep were laid randomly 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*)



Keterangan (Remarks):

Ukuran subplot masing-masing 10 m x 10 m; bentuk lingkaran (T<sub>1</sub>), bentuk persegi (T<sub>2</sub>); lingkaran dan persegi terbuka, masing-masing 35 titik *sampling* (kedalaman 0-30 cm) ditentukan secara random di sekitar subplot; Bentuk lingkaran dan persegi padat, 5 titik *sampling* (0-100 cm) ditentukan secara random dari plot (Subplot size 20 m x 30 m each; circle forms (T<sub>1</sub>), square forms (T<sub>2</sub>); open circle and square forms, 35 *sampling point* each (0-30 cm deep) were randomly laid around sub-plots; solid circle and square, 5 *sampling point* each (0-100 cm deep) are set randomly from the plot)

Gambar (Figure) 2. Disain pengambilan contoh tanah pada hutan sekunder dalam dua seri waktu (*Design of soil sampling points for secondary forest in two time series*)

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

Plot	Subplot	2001 (T <sub>1</sub> )		2005 (T <sub>2</sub> )		Jumlah titik pengambilan contoh dalam dua seri waktu ( <i>Number of sampling points in two time series</i> )	
		x	xx	x	xx	x	xx
M-P	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
M-SF	P <sub>1</sub>	3	1	3	1	6	2
	P <sub>2</sub>	3	1	3	1	6	2
	P <sub>3</sub>	3	1	3	1	6	2
	P <sub>4</sub>	4	-	4	-	8	-
	P <sub>5</sub>	4	-	4	-	8	-
	P <sub>6</sub>	4	-	4	-	8	-
	P <sub>7</sub>	4	-	4	-	8	-
	P <sub>8</sub>	3	1	3	1	6	2
	P <sub>9</sub>	4	-	4	-	8	-
	P <sub>10</sub>	3	1	3	1	6	2
Jumlah titik pengambilan contoh ( <i>Number of sampling points</i> )		35	5	35	5	70	10

Keterangan (Remarks): x, kedalaman 0-30 cm (0-30 cm soil depths); xx, kedalaman 0-100 cm (0-100 cm soil depths)

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 plot M-P dan M-SF pada setiap sub-plot dan seri waktu diilustrasikan pada Gambar 2 dan Gambar 3 secara berurutan dan keduanya dinarasikan secara ringkas pada Tabel 1.

## 2. Metode Pengambilan Contoh Tanah

Pengambilan contoh tanah, baik pada plot M-P maupun plot M-SF masing-masing dilakukan pada 40 titik pengambilan contoh (35 titik pada kedalaman 0-30 cm dan 5 titik pada kedalaman 0-100 cm) dalam setiap seri waktu ( $T_1$  dan  $T_2$ ). Pada kedalaman 0-30 cm, contoh diambil dari empat lapisan kedalaman tanah ( $n = 4$ ), yaitu 0-5; 5-10; 10-20; dan 20-30 cm. Pada kedalaman 0-100 cm, contoh diambil dari tujuh lapisan kedalaman tanah ( $n = 7$ ), yaitu 0-5; 5-10; 10-20; 20-30; 30-50; 50-70; 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 distribusi akar vertikal setiap jenis vegetasi berbeda dan meninggalkan jejak yang berbeda pada distribusi kedalaman SOC (Lorenz & Lal, 2005). Penelitian karbon tanah biasanya mempertimbangkan kedalaman tanah tetap, umumnya satu m (Jobbagy & Jackson, 2000).

Contoh tanah dikumpulkan dengan menggunakan empat buah silinder logam/ring sampel (ukuran  $100 \text{ cm}^3$ ) pada setiap interval kedalaman/lapisan 0-5; 5-10; 10-20; 20-30; 30-50; dan 50-70 cm, dan enam buah ring pada interval kedalaman 70-100 cm. Contoh tanah secara berurutan dari lapisan teratas hingga lapisan terbawah dikumpulkan dengan silinder logam/ring sampel. Silinder logam ditem-

patkan secara konsisten dalam setiap lapisan tanah untuk mendapatkan contoh yang representatif pada setiap kedalaman. Contoh tanah dari setiap lapisan yang sama (empat ring atau enam ring) pada masing-masing titik pengambilan contoh dikompositkan (*bulked*) dan dimasukkan ke dalam kantong plastik untuk keperluan analisis di laboratorium. Jumlah total contoh tanah yang dikumpulkan dari kedua tipe lahan (plot M-P dan plot M-SF) dalam dua seri waktu adalah sebanyak 700 contoh dari 160 titik pengambilan contoh [140 titik pada kedalaman 0-30 cm masing-masing dari empat lapisan tanah ( $n = 4$ ) ditambah 20 titik pada kedalaman 0-100 cm masing-masing dari tujuh lapisan tanah ( $n = 7$ )].

## 3. 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 dua mm untuk memisahkan tanah halus ( $< 2 \text{ mm}$ ) dari bebatuan ( $> 2 \text{ mm}$ ). Berat bebatuan ( $W_g$ ) ditimbang. Kerapatan massa tanah/*bulk density* (BD) dihitung berdasarkan volume contoh per lapisan tanah (4 atau 6 ring), berat contoh tanah kering-udara, dan faktor kadar air tanah halus kering udara ( $MF_f$ , *moisture factor fine soil*).

Pengukuran faktor kadar air dari contoh tanah halus kering udara ( $MF_f$ ) dilakukan dengan cara menimbang sekitar 10 g contoh tanah halus kering udara ( $W_f$ ) ke dalam wadah (gelas ukur 30-50 ml) yang diketahui bobotnya ( $W_{v1}$ ), dan dimasukkan ke dalam oven pada suhu  $105^{\circ}$  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).

**4. Perhitungan**

**a. Kerapatan Massa Tanah**

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

$$BD(g/cm^3) = \frac{(Wt - Wg) \times (1 - MFf)}{4 \text{ atau } 6 \times Vr(ml)} \text{ (Ohta, 2001)....(1)}$$

$$MFf = \frac{(Wv1 - Wo1)}{Wf} \text{ .....(2)}$$

Di mana (*where*):

- Wt = berat total tanah kering-udara (*total weight of air-dried soil*), (g)
- Wg = berat bebatuan (*weight of gravel*), (g)
- MFf = faktor kadar air tanah halus (*fine soil moisture factor*)
- Vr = volume ring contoh (*sample ring volume*)
- Wf = berat tanah halus kering-udara (*air dried fine soil weight*)

**b. Kandungan Karbon (C%)**

$$C\% = \frac{C \text{ hasil pengukuran}}{(1 - MFp)} \text{ (Ohta, 2001) .....(3)}$$

$$MFp = \frac{(Wv1 - Wo1)}{Wp} \text{ .....(4)}$$

Di mana (*where*):

- MFp = faktor kadar air tanah bubuk halus (*moisture factor of powder soil*)
- Wp = berat tanah bubuk kering-udara (*air dried powder soil weight*)
- Wv1 = berat wadah dan berat contoh tanah (*vessel and soil sample weight*)
- Wo1 = berat tanah kering oven 105°C dan berat wadah (*105°C oven-dried soil and vessel weight*)

**c. Simpanan Karbon Tanah**

Perhitungan jumlah simpanan karbon tanah pada seri waktu pengambilan contoh awal pada tahun 2001 (T<sub>1</sub>) (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 (Ohta, 2001):

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

Di mana (*where*):

- TH = ketebalan lapisan tanah (*soil layer thickness*), (cm)
- Cs = kandungan karbon tanah (*soil carbon content*), (%)
- MFp = faktor kadar air tanah bubuk halus (*fine powder soil moisture factor*)
- BD = kerapatan massa (*bulk density*), ( $g/cm^3$ )

Sementara perhitungan jumlah simpanan karbon tanah pada seri waktu pengambilan contoh terakhir tahun 2005 (T<sub>2</sub>) 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 lebih tinggi), 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, sedangkan pengelolaan yang cenderung menggemburkan tanah (BD lebih



rendah) 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; Van den Bygaart, 2006; dan Don *et al.*, 2010). Fluktuasi BD tanah, pada umumnya terjadi pada perubahan tataguna lahan, menyebabkan fluktuasi terhadap ketinggian permukaan tanah dan titik pengambilan contoh tanah. Tingkat kepadatan (BD) tanah berpengaruh pada kedalaman titik pengambilan contoh tanah 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 & Bettanym (1995). Pada seri waktu pengukuran T<sub>2</sub>, penghitungan simpanan karbon tanah disesuaikan berdasarkan perbedaan pada rerata massa kumulatif fraksi mineral tanah antara seri waktu pengukuran T<sub>1</sub> dan T<sub>2</sub>. Rangkaian perhitungan dilakukan sebagai berikut:

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 (g/cm<sup>3</sup>) = massa bahan organik tanah per volume (*mass of soil organic matter per volume*)  
 = BD x Cs x 1,724 x 10<sup>-2</sup>

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

Di mana (*where*):

- BD<sub>mf</sub> (g/cm<sup>3</sup>) = massa fraksi mineral tanah per volume (*mass of soil mineral fraction per volume*)
- 1,724 = 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 (ton/ha) = massa kumulatif fraksi mineral tanah hingga lapisan terbawah (*the cumulative mass of soil mineral fraction to the bottom of the layer*)
- TH (i) (cm) = ketebalan lapisan tanah (*soil layer thickness*)

Massa tanah setara (*MFmass equivalent*) pada persamaan (8) dihitung berdasarkan rasio nilai rerata massa tanah kumulatif pada survei awal (T<sub>1</sub>) dan survei terakhir (T<sub>2</sub>) untuk mengontrol nilai koefisien keragaman massa tanah kumulatif pada lokasi penelitian.

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

di mana (*where*):

- MF<sub>mass equiv</sub> (ton/ha) = massa setara fraksi mineral tanah pada setiap titik pengambilan contoh (*equivalent mass of soil mineral fraction in each sampling subunit*)
- MF<sub>mass 2nd</sub> (ton/ha) = massa kumulatif fraksi mineral tanah pada pengukuran kedua (T<sub>2</sub>) pada setiap titik pengambilan contoh (*cumulative mass of soil mineral fraction in the second survey (T<sub>2</sub>) in each sampling subunit*)
- M<sub>1st</sub> and M<sub>2nd</sub> = massa fraksi mineral (MF) pada setiap titik pengambilan contoh (n=40) pada survei pertama dan kedua/terakhir secara berurutan (*mean MFmass 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  $MF_{mass_{2nd}}$ .

$$C_{stock_{mass}(n)} = \frac{C_{stock_{depth}(n)} + C_{stock_{mf}(i)}}{\times [MF_{mass_{equiv}(n)} - MF_{mass_{2nd}(n)}]} \dots (9)$$

Di mana (*where*):

$C_{stock_{mass}(n)}$  = 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<sup>th</sup> layer*) (ton/ha)

$C_{stock_{mf}(i)}$  = simpanan C tanah pada lapisan ke- i per massa fraksi mineral tanah pada lapisan ke-i (*C stocks in the i<sup>th</sup> layers per mass of soil mineral fraction in the i<sup>th</sup> layers*),  $C_{stock_{depth}(i)} \times MF_{mass}(i)^{-1}$  (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 m adalah jumlah simpanan karbon organik tanah dari lapisan 0-5, 5-10, 10-20, dan 20-30 cm.

#### 5. 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  $T_2$ ). 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 menggu-

nakan uji perbandingan perbedaan nyata terkecil (*Least Significant Difference/ LSD*). Analisis 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

Berdasarkan Tabel 2, karbon organik tanah (SOC) pada kedua tipe tataguna lahan, yaitu pada plot hutan tanaman *A. mangium* (M-P) dan plot hutan sekunder muda (M-SF), secara umum menunjukkan laju gradiasi vertikal pada kedalaman satu meter pertama, dengan nilai tertinggi pada lapisan paling atas (0-5 cm) dan terendah pada lapisan paling bawah (70-100 cm). Kandungan SOC umumnya menurun sebagai fungsi dari kedalaman tanah dan distribusi vertikalnya dipengaruhi oleh faktor seperti iklim, tekstur tanah, dan tipe vegetasi - pada umumnya distribusi SOC lebih dalam pada rerumputan daripada hutan (Jobbagy & Jackson, 2000). Berdasarkan seri waktu, kandungan SOC pada kedalaman 0-30 cm adalah lebih tinggi pada plot M-P (2,30-4,79%) daripada plot M-SF (1,79-3,81%) setelah periode waktu empat tahun ( $T_2$ ). Kandungan SOC pada M-P meningkat secara nyata pada lapisan 0-5; 5-10; 10-20 cm ( $p < 0,001$ ); dan 20-30 cm ( $p < 0,05$ ). Pada kedalaman yang lebih dalam (30-100 cm), kandungan SOC tidak berbeda secara statistik di antara kedua seri waktu pengambilan contoh ( $T_1$  dan  $T_2$ ) (Tabel 2 dan Lampiran 2). Pada plot M-SF, kandungan SOC pada  $T_2$  meningkat secara nyata hanya pada lapisan teratas 0-5 cm ( $p < 0,01$ ), sementara pada kedalaman 5-100 cm, kandungan SOC-nya tidak berbeda secara statistik di antara kedua seri pengambilan contoh (Tabel 2 dan Lampiran 3).

Perbedaan peningkatan distribusi kandungan SOC antara plot M-P (0-30 cm) dan plot M-SF (0-10 cm) pada T<sub>2</sub> disebabkan oleh perbedaan dalam jumlah produksi serasah dan kualitas serasah. Hasil penelitian Toriyama *et al.* (2011) menunjukkan bahwa jumlah akumulasi/simpanan serasah (*litter stocks*) pada bagian atas permukaan tanah selama periode waktu tiga tahun pertama meningkat dari 3,6 ke 8,4 ton/ha pada plot M-P dan dari 3,5 ke 6,7 ton/ha pada plot M-SF. Rasio C/N bahan serasah (*litter*) (n = 40, data tidak ditampilkan) adalah lebih rendah pada plot M-P (18,0) daripada plot M-SF (42,2). Hasil ini mengindikasikan bahwa kualitas bahan serasah pada plot M-P adalah relatif lebih baik daripada kualitas bahan serasah pada plot M-SF. Kualitas serasah yang baik (rasio C/N lebih rendah) akan lebih mudah terdekomposisi/terurai. Penambahan bahan organik serasah dengan rasio C/N rendah dari lantai hutan ke dalam tanah merupakan praktik yang baik untuk perkembangan tanah. Serasah/residu tanaman dan padatan organik lainnya diproses lebih lanjut menjadi SOC melalui proses humifi-

kasi dan penyatuannya ke dalam agregat tanah (McKenzie, 2010) menjadi suatu bentuk yang tidak segera diemisikan kembali (Sundermeier *et al.*, 2005).

Kandungan SOC yang lebih rendah pada plot M-SF daripada kandungan SOC pada plot M-P pada setiap lapisan terutama pada kedalaman 0-30 cm disebabkan oleh produktivitas hutan sekunder yang rendah serta jumlah pohon yang sedikit sehingga pasokan bahan organik (serasah) yang masuk ke dalam tanah terbatas. Kandungan SOC yang rendah di dalam tanah disebabkan oleh laju pergantian akar halus (*fine root*) yang rendah dan rasio C/N yang tinggi sehingga bahan organik kurang terurai (Ngo *et al.*, 2013). Pada tanah-tanah hutan, sebagian besar pasokan bahan organik berasal dari permukaan tanah (IPCC, 2006) sehingga bahan organik tanah cenderung terkonsentrasi pada horizon tanah bagian atas (IPCC, 2006).

Bahan tanaman menyediakan sumber utama SOC melalui serasah tanaman, produksi eksudat akar (*root exudates*), dan akar mati (Bird *et al.*, 2001). Akibatnya, ukuran, morfologi (misalnya pohon,

Tabel (Table) 2. Perbandingan kandungan karbon tanah (C%) pada dua tipe penggunaan lahan (M-P dan M-SF) berdasarkan seri waktu pengambilan contoh pada tujuh lapisan tanah (*Comparison of mean values of soil carbon content (C%) on the two land use types (M-P and M-SF) based on the sampling time series at seven soil layers*)

Tipe penggunaan lahan ( <i>Land-use type</i> )	Kedalaman ( <i>Depths</i> )	N	Kandungan karbon tanah ( <i>Soil carbon content</i> ), C (%), rerata ( <i>mean</i> ) ± SD		Anova Nilai F ( <i>F-value</i> )
			Seri ke-1 ( <i>1<sup>st</sup> serie</i> )	Seri ke-2 ( <i>2<sup>th</sup> serie</i> )	
M-P	0-5	40	4,03 ± 0,84	4,79 ± 0,88	15,58**
	5-10	40	3,15 ± 0,60	3,67 ± 0,67	13,72**
	10-20	40	2,45 ± 0,54	2,86 ± 0,60	10,08**
	20-30	40	2,04 ± 0,43	2,30 ± 0,49	6,66*
	30-50	5	1,82 ± 0,38	1,89 ± 0,32	0,09
	50-70	5	1,51 ± 0,42	1,48 ± 0,29	0,03
	70-100	5	1,43 ± 0,52	1,07 ± 0,29	1,85
M-SF	0-5	40	3,37 ± 0,55	3,81 ± 0,48	14,77**
	5-10	40	2,65 ± 0,44	2,77 ± 0,34	1,93
	10-20	40	2,16 ± 0,44	2,22 ± 0,28	0,51
	20-30	40	1,75 ± 0,27	1,79 ± 0,20	0,64
	30-50	5	1,47 ± 0,22	1,50 ± 0,27	0,02
	50-70	5	1,25 ± 0,26	1,20 ± 0,30	0,08
	70-100	5	0,88 ± 0,26	0,92 ± 0,28	0,06

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

semak, rumput), dan distribusi sebaran tanaman mempengaruhi tempat di mana C masuk ke dalam tanah (Jackson & Caldwell, 1993; Hook & Burke, 2000). Produksi serasah dan kualitas serasah dipengaruhi oleh jenis tanaman dan mempunyai pengaruh yang kuat terhadap dinamika SOC (Berg, 2000; Vesterdal *et al.*, 2008). 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). Kapasitas tanah yang berfungsi sebagai penyimpan/penyerap karbon (*carbon sink*) juga dipengaruhi oleh berapa cepat serasah mengubah C menjadi humus (Karnava & Smolander, 2007; Prescott, 2010). Besaran perubahan kandungan SOC tergantung pada tipe tanah dan vegetasi, dan biasanya mengikuti distribusi kerapatan akar pada vegetasi yang dominan (Spain *et al.*, 1983). Pola pertumbuhan tanaman juga mempengaruhi lokasi sumber kandungan SOC seperti biomassa mikroba dan fauna tanah. Komponen ini akan cenderung berkumpul di sekitar daerah yang sudah tinggi kandungan C organik, yang selanjutnya berkontribusi terhadap heterogenitas kandungan organik tanah (Bird *et al.*, 2001).

Pada lapisan tanah yang lebih dalam (*subsoil*), di samping faktor durasi dekomposisi yang cenderung meningkat (Lorenz & Lal, 2005), kandungan SOC mengalami penurunan pasokan dari serasah permukaan dan penurunan kepadatan akar dengan meningkatnya kedalaman (Jobaggy & Jackson, 2000; Schoning & Kogel-Knabner, 2006; Schenk, 2008). Sumber utama SOC pada lapisan bawah tanah (*subsoil*) adalah pasokan C dari akar tanaman (misalnya lignin, suberin, dan *rhizodeposition* - akar yang masih hidup melepaskan senyawa organik ke ling-

kungan sekitarnya), jamur 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 tannin yang tinggi pada akar tanaman kemungkinan berkontribusi terhadap laju dekomposisi yang rendah pada akar tanaman sehingga pasokan C pada *subsoil* menjadi rendah (Waid, 1974; Beuch *et al.*, 2000; Kraus *et al.*, 2003). Biomassa mikroba - komponen yang hidup pada bahan organik tanah - umumnya berkurang pada lapisan bawah tanah dibandingkan dengan yang ada pada lapisan atas tanah, kemungkinan besar sebagai akibat penurunan kandungan SOC (Taylor *et al.*, 2002).

Besaran dan peningkatan perubahan kandungan C setelah perubahan tataguna lahan sangat bervariasi karena pengaruh faktor-faktor yang berbeda, antara lain: input (*net primary production/NPP*) dan pola perakaran (Jobaggy & Jackson, 2000), kualitas pasokan bahan organik (Berg, 2000), sifat-sifat tanah tertentu- ketersediaan hara, tekstur tanah (Golchin *et al.*, 1994; Mendham *et al.*, 2003), intensitas pengelolaan lahan pada masa lalu dan sekarang (Balesdent *et al.*, 2000), dan iklim (Van Cleve & Powers, 1995). Perubahan SOC dikontrol oleh laju dekomposisinya karena perubahan iklim mikro dan perubahan dalam kuantitas dan kualitas C yang mengalami siklus di dalam sistem (Juo *et al.*, 1996). Selanjutnya penggunaan lahan secara langsung mempengaruhi, baik iklim mikro maupun kuantitas, kualitas, dan jalur masuk pasokan karbon.

Jenis pohon juga mempunyai dampak yang berbeda terhadap gudang dan dinamika karbon tanah (*soil C pools and dynamics*) (Paul *et al.*, 2002; Quideau *et al.*, 2000). Hutan dengan jenis pohon pengikat nitrogen (*N-fixing*) mengakumulasi C lebih banyak di dalam tanah daripada hutan sejenis tanpa pohon pengikat nitrogen. Perbedaan ini dapat berkembang dari

proses yang berbeda secara fundamental, baik melalui akumulasi pasokan karbon baru yang lebih besar maupun melalui pengurangan dekomposisi karbon yang sudah lebih dulu/tua berada di dalam tanah. Kandungan nitrogen yang lebih tinggi di dalam tanah juga berfungsi untuk menahan laju dekomposisi karbon tanah (Resh *et al.*, 2002).

## 2. Kerapatan Massa Tanah

Kerapatan massa (BD) tanah, baik pada *A. mangium* (M-P) maupun hutan sekunder (M-SF) pada T<sub>2</sub> secara umum cenderung menurun/lebih rendah, baik secara nyata maupun tidak nyata pada setiap lapisan kedalaman tanah. BD tanah meningkat secara tajam dengan meningkatnya kedalaman tanah mengindikasikan penurunan laju pergantian (*turnover rate*) dan translokasi bahan organik tanah (karbon) pada *subsoil* relatif rendah (Romkens *et al.*, 1998).

Rata-rata keseluruhan BD tanah pada M-P pada kedalaman 0-100 cm berkisar antara 0,73-0,90 g/cm<sup>3</sup> pada T<sub>1</sub> dan 0,62-0,90 g/cm<sup>3</sup> pada T<sub>2</sub>. BD tanah pada M-P pada T<sub>2</sub> menurun secara sangat nyata pa-

da lapisan 0-5 cm dan 5-10 cm (p<0,001), namun tidak berbeda secara statistik pada lapisan kedalaman yang lebih dalam (10-100 cm) di antara kedua seri waktu pengambilan contoh (T<sub>1</sub> dan T<sub>2</sub>) (Tabel 3, Lampiran 4). Pada M-SF, rata-rata keseluruhan BD tanah pada kedalaman 0-100 cm berkisar antara 0,86-0,94 g/cm<sup>3</sup> pada T<sub>1</sub> dan 0,76-0,89 g/cm<sup>3</sup> pada T<sub>2</sub>. BD tanah pada M-SF pada T<sub>2</sub> menurun secara nyata pada lapisan tanah 0-5 cm (p < 0,001) dan 20-30 cm (p < 0,01). Pada lapisan 5-10 cm, 10-20 cm, dan pada lapisan kedalaman 30-100 cm, BD tanah tidak berbeda secara statistik di antara kedua seri waktu pengambilan contoh (Tabel 3, Lampiran 5).

Penurunan BD tanah pada lapisan atas tanah berkaitan erat dengan meningkatnya jumlah serasah, akar, dan kandungan karbon tanah (Carvalho *et al.*, 2009). Pada lapisan tanah yang lebih bawah, pasokan bahan organik dari lapisan atas dan laju dekomposisi bahan organik dari bahan akar yang rendah diduga sebagai penyebab BD tanah tidak berbeda secara statistik di antara kedua seri waktu pengukuran, sedangkan BD tanah yang lebih

Tabel (Table) 3. Perbandingan kerapatan massa tanah (BD) pada dua tipe penggunaan lahan berdasarkan dua seri waktu pengambilan contoh pada tujuh lapisan tanah (*Comparison of mean values of soil bulk density (BD) on the two land use types based on the two time series of sampling at seven soil layers*)

Tipe penggunaan lahan ( <i>Land-use type</i> )	Lapisan tanah ( <i>Soil layer</i> )	N	Kerapatan tanah ( <i>Bulk density</i> ), BD (g/cm <sup>3</sup> ), rerata ( <i>mean</i> ) ± SD		Anova Nilai F ( <i>F-value</i> )
			T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	
M-P	0-5	40	0,73 ± 0,09	0,62 ± 0,11	23,20 <sup>***</sup>
	5-10	40	0,83 ± 0,08	0,75 ± 0,11	15,37 <sup>***</sup>
	10-20	40	0,86 ± 0,10	0,83 ± 0,11	2,29
	20-30	40	0,89 ± 0,10	0,85 ± 0,10	3,22
	30-50	5	0,86 ± 0,08	0,82 ± 0,11	0,44
	50-70	5	0,86 ± 0,09	0,90 ± 0,20	0,17
	70-100	5	0,90 ± 0,09	0,74 ± 0,20	2,64
M-SF	0-5	40	0,86 ± 0,09	0,76 ± 0,09	27,52 <sup>***</sup>
	5-10	40	0,90 ± 0,10	0,87 ± 0,10	2,34
	10-20	40	0,93 ± 0,08	0,89 ± 0,12	3,84
	20-30	40	0,94 ± 0,06	0,89 ± 0,09	10,24 <sup>**</sup>
	30-50	5	0,93 ± 0,06	0,84 ± 0,09	2,85
	50-70	5	0,91 ± 0,02	0,88 ± 0,13	0,35
	70-100	5	0,91 ± 0,06	0,84 ± 0,17	0,65

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

tinggi pada M-SF daripada M-P pada setiap lapisan tanah (Tabel 3) kemungkinan besar lebih disebabkan oleh lebih rendahnya volume akar kasar maupun akar halus, aktivitas biologis di dalam tanah, produktivitas, dan akibat penggembalaan ternak, dan alat berat. Tanah pada padang rumput (*pasture land*) secara tipikal mempunyai BD yang lebih tinggi karena praktik pengelolaan pertanian dan lebih rendahnya volume akar kasar (Mendham *et al.*, 2003).

### 3. Kerapatan dan Massa Kumulatif pada Fraksi Mineral Tanah

Kerapatan fraksi mineral tanah (BDmf) pada M-P dan M-SF pada T<sub>2</sub> lebih rendah daripada BDmf pada T<sub>1</sub> pada setiap lapisan tanah, terkecuali pada lapisan 50-70 cm pada plot M-P. Massa fraksi mineral tanah kumulatif (MFmass) pada plot M-P dan M-SF pada T<sub>2</sub> juga lebih rendah daripada MFmass pada T<sub>1</sub> (Tabel 4). Rasio T<sub>2</sub>/T<sub>1</sub> untuk MFmass berkisar dari 0,84 ke 0,99 pada plot M-P dan 0,87 ke 0,94 pada plot M-SF, dan terendah pada kedalaman 0-5 cm pada kedua plot. MFmass pada M-P pada kedalaman 0-5, 0-10, 0-20, 0-30, 0-50, 0-70, dan 0-100 cm pada T<sub>2</sub> adalah setara dengan kedalaman/ketebalan 4,20; 8,69; 18,27; 27,79; 48,07; 69,13; dan 93,79 cm pada T<sub>1</sub> secara berurutan.

MFmass pada M-SF pada kedalaman yang sama adalah setara dengan kedalaman 4,37; 9,19; 18,73; 28,17; 44,98; 64,26; dan 92,15 cm pada T<sub>1</sub> secara berurutan. Berdasarkan data pada Tabel 4, perubahan MFmass pada kedua plot adalah lebih tinggi pada plot M-P daripada plot M-SF pada T<sub>2</sub>.

Perubahan Mfmass, baik pada plot M-P maupun pada plot M-SF mengindikasikan bahwa telah terjadi penggemburan tanah (*soil expansion*). Penggemburan tanah pada M-P adalah lebih tinggi daripada penggemburan pada M-SF dalam kurun waktu yang sama empat tahun 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 kohesi. Penggemburan tanah atau 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 dalam periode waktu tertentu, 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 sekitar 28% (Don *et al.*, 2010).

### B. Simpanan Karbon Organik Tanah

Secara umum berdasarkan Tabel 5, perubahan simpanan karbon organik tanah (SOC) kumulatif pada kedua tipe lahan adalah lebih tinggi pada plot hutan tanaman *A. mangium* (M-P) daripada plot hutan sekunder muda (M-SF) pada T<sub>2</sub>. Simpanan SOC kumulatif pada plot M-P pada T<sub>2</sub> meningkat secara sangat nyata ( $p < 0,001$ ) pada kedalaman 0-5, 0-10, 0-20, dan 0-30 cm (Tabel 5, Lampiran 6), sedangkan pada plot M-SF, simpanan SOC tanah pada T<sub>2</sub> meningkat secara nyata ( $p < 0,05$ ) hanya pada kedalaman 0-5 dan 0-10 cm (Tabel 5 Lampiran 7). Perubahan simpanan SOC kumulatif pada plot M-P pada kedalaman 0-30 cm setelah periode waktu empat tahun (T<sub>2</sub>) meningkat sebesar 8,8 ton/ha dari 66,1 ton/ha ke 74,9 ton/ha dengan laju sekuestrasi/pemindahan

Tabel (Table) 4. Perbandingan kerapatan dan massa kumulatif fraksi mineral tanah pada dua tipe penggunaan lahan berdasarkan seri waktu pengambilan contoh pada tujuh lapisan tanah (Comparison of mean values of density and cumulative mass of soil mineral fraction on the two land use types based on the sampling time series at seven soil layers)

Tipe penggunaan lahan (Land use type)	N	Kerapatan massa fraksi mineral tanah (Density of soil mineral fraction/BDmf), rerata (mean), ton/ha/cm		Massa kumulatif fraksi mineral tanah (Cumulative mass of soil mineral fraction/MF mass), rerata (mean), ton/ha				Ketebalan setara T <sub>2</sub> ke T <sub>1</sub> (Equivalent thickness of T <sub>2</sub> to T <sub>1</sub> ), (cm)	
		Kedalaman (Depth)	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	Kedalaman (Depth)	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>		T <sub>2</sub> /T <sub>1</sub>
M-P	40	0-5	68	57	0-5	339	285	0,84	4,20
	40	5-10	79	70	0-10	732	636	0,87	8,69
	40	10-20	82	79	0-20	1556	1421	0,91	18,27
	40	20-30	86	81	0-30	2413	2235	0,93	27,79
	5	30-50	84	80	0-50	3997	3843	0,96	48,07
	5	50-70	83	88	0-70	5666	5596	0,99	69,13
	5	70-100	88	73	0-100	8304	7788	0,94	93,79
M-SF	40	0-5	81	71	0-5	406	355	0,87	4,37
	40	5-10	86	83	0-10	836	768	0,92	9,19
	40	10-20	90	86	0-20	1736	1626	0,94	18,73
	40	20-30	92	86	0-30	2652	2491	0,94	28,17
	5	30-50	90	82	0-50	4481	4031	0,90	44,98
	5	50-70	89	86	0-70	6266	5752	0,92	64,26
	5	70-100	89	83	0-100	8943	8240	0,92	92,15

Tabel (Table) 5. Perbandingan nilai rerata simpanan karbon tanah berdasarkan seri waktu sampling pada kedalaman yang berbeda pada dua tipe penggunaan lahan (Comparison of mean values of cumulative soil carbon stock based on the two time series of sampling at different depths of two land-use types)

Tipe tataguna lahan (Land-use types)	Kedalaman (Depths), cm	N	Simpanan karbon tanah kumulatif (Cumulative soil carbon stock), Rerata (Mean) ± SD, (ton/ha)		ANOVA, Nilai F (F-value)	Laju sekuestrasi karbon tanah (Soil carbon sequestration rates), [ton/ha/tahun (yr)] Δ (T <sub>2</sub> -T <sub>1</sub> )/4
			T1	T2		
M-P	0-5	40	14,4 ± 2,3	16,6 ± 2,6	16,65 <sup>***</sup>	0,57
	0-10	40	27,4 ± 3,7	30,9 ± 3,7	18,65 <sup>***</sup>	0,91
	0-20	40	48,2 ± 6,9	54,6 ± 6,3	18,75 <sup>***</sup>	1,67
	0-30	40	66,1 ± 9,4	74,9 ± 8,5	19,52 <sup>***</sup>	2,29
	0-50	5	99,6 ± 14,1	101,7 ± 13,5	<0,1	ns
	0-70	5	125,2 ± 18,9	125,8 ± 15,6	<0,1	ns
	0-100	5	164,6 ± 25,2	155,6 ± 28,8	0,27	ns
M-SF	0-5	40	14,40 ± 2,1	15,8 ± 2,0	10,31 <sup>*</sup>	0,36
	0-10	40	26,3 ± 3,6	27,9 ± 2,8	5,10 <sup>*</sup>	0,42
	0-20	40	46,3 ± 6,3	48,1 ± 4,8	2,04	ns
	0-30	40	62,7 ± 7,4	64,9 ± 5,9	2,30	ns
	0-50	5	90,9 ± 11,6	87,3 ± 10,2	0,27	ns
	0-70	5	113,7 ± 15,4	107,4 ± 13,8	0,47	ns
	0-100	5	137,4 ± 20,8	131,5 ± 18,4	0,22	ns

Keterangan (Remarks): \* = p < 0,05; \*\* = p < 0,01; \*\*\* = p < 0,001; ns = tidak berbeda nyata (not significantly different)

karbon ke dalam tanah sebesar 2,3 ton/ha/tahun (3,3% per tahun dari SOC awal) atau setara dengan mitigasi CO<sub>2</sub> atmosfer ke dalam tanah sebesar 8,4 ton/ha/tahun

(faktor konversi C ke CO<sub>2</sub> = 3,67). Pada plot M-SF pada kedalaman dan periode waktu yang sama, perubahan simpanan SOC kumulatif meningkat hanya sebesar

2,2 ton C/ha dari 62,7 ton C/ha ke 64,9 ton C/ha dengan laju sekuestrasi karbon ke dalam tanah sebesar 0,55 ton C/ha/tahun (0,9% per tahun dari SOC awal) atau setara dengan mitigasi CO<sub>2</sub> atmosfer sebesar 1,5 ton/ha/tahun. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan tataguna lahan dari hutan sekunder muda menjadi hutan tanaman *A. mangium* setelah periode waktu empat tahun pada tipe tanah masam Acrisols berpengaruh terhadap peningkatan simpanan SOC tanah, dan oleh karena itu, berfungsi sebagai penyerap karbon ke dalam tanah (*soil carbon sink*).

Perbedaan perubahan jumlah simpanan SOC disebabkan oleh perbedaan dalam jumlah, komposisi kimia, dan laju transformasi bahan organik yang berasal dari serasah daun dan akar pada masing-masing tipe hutan (Chen *et al.*, 2004). Jenis pohon juga mempunyai pengaruh yang berbeda terhadap dinamika dan simpanan/akumulasi karbon tanah (*soil C pools and dynamics*) (Howard *et al.*, 1998; Quideau *et al.*, 2000; dan Paul *et al.*, 2002). Hasil penelitian Resh *et al.* (2002) menunjukkan bahwa sekuestrasi SOC adalah lebih besar pada pohon pengikat nitrogen (*N-fixers*) dibandingkan dengan *Eucalyptus* sp. (*non-N-fixers*).

Peningkatan jumlah simpanan SOC pada M-P yang lebih tinggi daripada M-SF pada kedalaman 0-30 cm berkaitan erat dengan produktivitas *A. mangium* yang tinggi sebagai jenis pohon cepat tumbuh dan naungan tebal (*dense shade*) (Pearson *et al.*, 2005). Produktivitasnya yang tinggi akan menghasilkan pasokan bahan organik yang lebih tinggi ke dalam tanah. Praktik-praktik pengelolaan terbaik untuk membangun simpanan karbon di dalam tanah pada dasarnya adalah praktik pengelolaan yang meningkatkan masukan bahan organik ke dalam tanah, dan/atau menurunkan laju dekomposisi bahan organik tanah (Batjes, 1999). Di samping itu, *A. mangium* adalah termasuk jenis pohon pengikat nitrogen. Sebagai jenis pohon pengikat nitrogen, jenis tanaman

ini 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 kemudian 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 (Resh *et al.*, 2002). Pada umumnya, jumlah karbon organik tanah pada tanaman pengikat nitrogen adalah lebih besar 20-100% atau setara dengan 0,5-1,2 ton C/ha/tahun daripada tanaman yang bukan pengikat nitrogen (Lal, 2005).

Peningkatan simpanan SOC yang signifikan pada plot hutan tanaman *A. mangium* (M-P) kemungkinan besar juga disebabkan oleh faktor tataguna lahan pada lokasi penelitian yang sebelumnya berupa hutan sekunder muda yang telah digunakan menjadi lahan pertanian seperti perladangan berpindah. Lahan pertanian dan terutama lahan pertanian yang terkikis oleh erosi pada umumnya mengandung simpanan SOC yang lebih rendah daripada kapasitas potensinya (Lal, 2005). Aforestasi pada lahan pertanian dapat membalikkan beberapa proses degradasi dan menyebabkan peningkatan atau sekuestrasi/penyerapan simpanan SOC. Laju sekuestrasi SOC secara potensi adalah sangat besar pada tanah yang telah kehilangan relatif paling banyak karbon terhadap keadaan dasarnya (*steady state*) (Corisi *et al.*, 2012).

Hasil penelitian ini juga mengindikasikan bahwa pengaruh perubahan tataguna lahan dari hutan sekunder muda menjadi hutan tanaman *A. mangium* pada tipe tanah Acrisols di Maribaya terhadap perubahan akumulasi/simpanan SOC yang signifikan terbatas pada kedalaman 0-30 cm. Untuk pengukuran atau estimasi simpanan karbon organik tanah IPCC (2006) merekomendasikan pengambilan sampel pada kedalaman 30 cm tanah karena perubahan simpanan SOC pada perubahan



tataguna lahan atau pengelolaan adalah utamanya pada kedalaman 10 cm atau 30 cm pada sebagian besar tanah (Dalal & Mayer, 1986; Knowles & Singh, 2003; Dalal *et al.* 2005).

#### IV. KESIMPULAN DAN SARAN

##### A. Kesimpulan

1. Pengaruh konversi hutan sekunder muda menjadi hutan tanaman *A. mangium* pada tipe tanah Acrisols dapat berfungsi nyata sebagai penyerap karbon (*carbon sink*).
2. Simpanan karbon organik tanah (SOC) kumulatif pada hutan tanaman *A. mangium* (M-P) pada kedalaman 0-30 cm meningkat sebesar 8,8 ton C/ha dari 66,1 ton/ha menjadi 74,9 ton/ha, dengan potensi sekuestrasi karbon ke dalam tanah sebesar 2,30 ton C/ha/tahun (3,3% per tahun) atau setara dengan mitigasi CO<sub>2</sub> atmosfer ke dalam tanah sebesar 8,4 ton/ha/tahun dalam periode waktu empat tahun setelah perubahan tataguna lahan.
3. Simpanan SOC kumulatif pada hutan sekunder muda (M-SF) pada kedalaman yang sama meningkat sebesar 2,2 ton C/ha dari 62,7 ton/ha menjadi 64,9 ton/ha, dengan potensi sekuestrasi karbon ke dalam tanah sebesar 0,55 ton/ha/tahun (0,9% per tahun) atau setara dengan mitigasi CO<sub>2</sub> atmosfer ke dalam tanah sebesar 1,5 ton/ha/tahun.
4. Perubahan simpanan karbon organik tanah yang signifikan pada perubahan tataguna lahan dari hutan sekunder muda ke hutan tanaman *A. mangium* pada tipe tanah masam Acrisols terjadi pada kedalaman 0-30 cm.

##### B. Saran

Pemilihan jenis tanaman sangat penting untuk peningkatan simpanan karbon organik tanah. Oleh karena itu, kontribusi, baik reforestasi, aforestasi, maupun pembangunan hutan tanaman terhadap se-

kuestrasi karbon ke dalam tanah (*soil carbon sequestration*) dapat ditingkatkan dengan memilih jenis pohon pengikat nitrogen (*N-fixers*).

#### DAFTAR PUSTAKA

- Badan Planologi Kehutanan (Baplan). (2005). *Buku rekalkulasi penutupan lahan Indonesia tahun 2005*. Jakarta: Badan Planologi Kehutanan.
- 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. (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.
- 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.
- Bird, S. B., Herrick, J. E., & Wander, M. M. (2001). Exploiting heterogeneity of soil organic matter in rangelands: Benefits for carbon sequestration. In Follet, R. F., Kimble, J. M., and Lal, R. (Ed.), *The potential of U.S. grazing lands to sequester carbon*

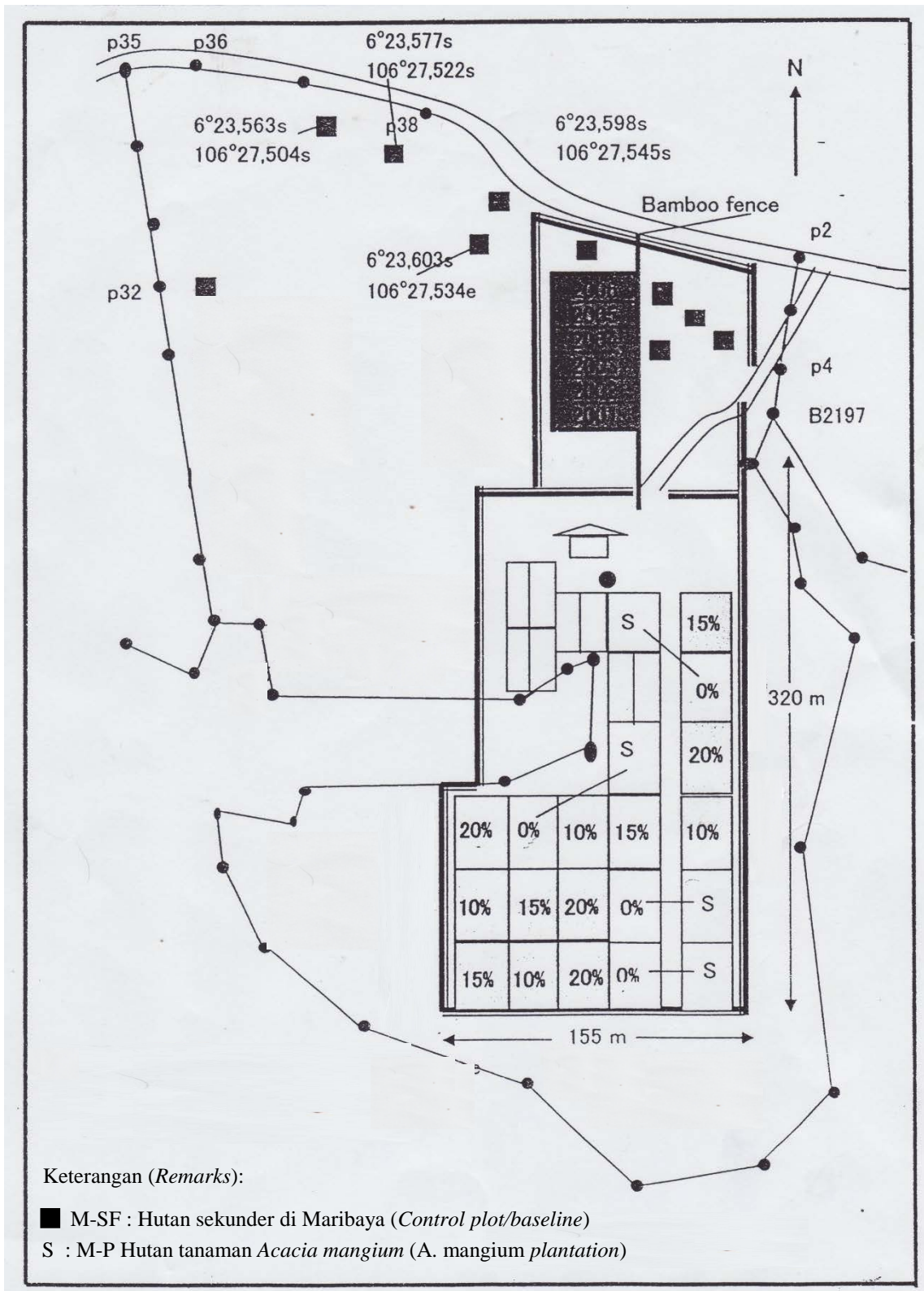
- and mitigate the greenhouse effect.* (pp. 121-138). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Carvalho, J.L.N, Cerri, C.E. P., Feigl, B.J., Piccolo, M. de C., Godinho, V.de P., Herpin, U., & Cerri, C.C. (2009). Conversion of cerrado into agricultural land in the south-western Amazon: Carbon stocks and soil fertility. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)* 66 (2), 233-241.
- Chen, C.R., Xu, Z.H., & Mathers, N.J. (2004). Soil carbon pools in adjacent natural and plantation forests of subtropical Australia. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68, 282-291.
- 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 Manag.* 16, 2012.
- Dalal, R. C., & Mayer, R.J. (1986). Long-term trends in fertility of soils under continuous cultivation and cereal cropping in southern Queensland. II. Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. *Aust. J. Soil Res.* 24, 281-292.
- Dalal, R.C., Harms, B.P, Krull, E., & Wang, W.J. (2005). Total organic matter and its labile pools following mulga (*Acacia aneura*) clearing for pasture development and cropping 1. Total and labile carbon. *Aust. J. Soil Res.* 43, 13-20.
- Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C., & Wisniewski, J. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263, 185-190.
- Don, A., Scholtons, T., & Schulze, E.D. (2009). Conversion of cropland into grassland: Implications for soil organic-carbon stocks in two soils with different texture. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 172, 53-62.
- Don, A., Schumacher, J., & Freibauer, A. (2010). Impact of tropical landuse change on soil organic carbon stocks - a metaanalysis. *Global Change Biol.* 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.
- FAO. (2001). Global forest resources assessment 2000. (Main report). *Forestry Paper* 140, 479.
- FAO. (2006). Global forest resources assessment 2005. Progress towards sustainable forest management. *Forestry Paper* 147, 350.
- FAO/ISRIC/ISSS. (1998). World reference base for soil resources. *World Soil Resources Report* 84.
- 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.
- Guo, L.B. & Gifford, R.M. (2002). Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biol.* 8, 345-360.
- Hook, P.B., & Burke, I.C. (2000). Biogeochemistry in a shortgrass landscape: control by topography, soil texture, and microclimate. *Ecology* 81, 2686-2703.
- Howard, P.J.A., Howard, D.M.L., & Lowe, L.E. (1998). Effects of tree

- species and soil physico-chemical conditions on the nature of soil organic matter. *Soil Biol. Biochem.* 30, 285-297.
- IPCC. (2006). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. In Eggleston, S. Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (Ed.), *Agriculture, Forestry and Other Land Use* (Vol. 4). Japan: IGES.
- IPCC. (2007). *IPCC special report on land use, land-use change and forestry*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jackson, R. B., & Caldwell, M.M. (1993). Geostatistical patterns of soil heterogeneity around individual perennial plants. *J. of Ecol.* 81, 683-692.
- Jobbagy, E.G. & Jackson, R.B. (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecol. Appl.* 10(2), 423-436.
- Juo, A.S.R., & Manu, A. (1996). Chemical dynamics in slash-and-burn agriculture. *Agric. Ecos. & Env.* 58, 49-60.
- 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.
- Knowles, T.A. & Singh, B. (2003). Carbon storage in cotton soils of northern New South Wales. *Australian J. of Soil Res.* 41, 889-903.
- 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.
- Laganiere J, Angers, D.A., & Paré, D. (2010). Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. *Global Change Biol.* 16, 439-453.
- Lal, R. (2005). Soil carbon sequestration in natural and managed tropical forest ecosystems. *Jour. of Sustainable For.* 21(1), 1-30.
- 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.
- McKenzie, N.J., Grundy, M.J., Webster, R., & Ringrose-Voase, A.J. (2008). Guidelines for surveying soil and land resources. *CSIRO Publishing*, 576.
- McKenzie, R. (2010). *Soil carbon sequestration under pasture in Australian dairy regions*. Dairy Australia: Project MCK 13538.
- 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. *Agric., Ecosystems & Env.* 95(1), 143-156.
- Ngo, K.M., Turner, B.L, Muller-Landau, H.C., Davies, S.J., Larjavaara, M. Hassan, N.F.B.N., & Lumd, S. (2013). Carbon stocks in primary and secondary tropical forests in Singapore. *Forest Ecol. and Manage.* 296, 81-89.
- Nguyen, C. (2003). Rhizodeposition of organic C by plants: Mechanisms and controls. *Agronomie* 23, 375-396.
- Ohta, S. (2001). *Outlined procedure of soil survey and soil sampling (Draft)*. Carbon Fixing Forest Management Project. Indonesia: Japan International Cooperation Agency and Forestry Research and Development Agency.
- Paul, K., Ipolglase, P.J., Nyakuengama, J.G., & Khanna, P.K. (2002). Change in soil carbon following afforestation. *Forest Ecol. and Manage.*, 168, 241-257.
- Pearson, T., Walker, S., & Brown, S. (2005). *Sourcebook for land use, land-use change and forestry projects*. Bio Carbon Fund and Winrock International.

- Perez-Cruzado, C., Mansilla-Saliner, 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* (pp. 21).
- Poeplau, C., Don, A., Vesterdal, L., Leifeld, J., Van Wesemael, B., Schumacher, J., & Gensior, A. (2011). Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone-carbon response functions as a model approach. *Global Change Biol.* 17(7), 2415-2427.
- 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? *Biogeochem.* 101, 1-17.
- Pribyl, D.W. (2010). A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma* 156, 75-83.
- Quideau, S.A., Anderson, M.A. Graham, R.C. Chadwick, O.A., & Trumbore, S.E. (2000). Soil organic matter processes: characterization by <sup>13</sup>C NMR and <sup>14</sup>C measurements. *For. Ecol. Manage.* 138, 19-27.
- 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.
- Romkens, P., Hassink, J., & Van der Plicht, J. (1998). Soil organic C-14 dynamics: Effects of pasture installation on arable land. *Radiocarbon* 40, 1023-1031.
- Sall, J., Creighton, L., & Lehman, A. (2005). *JMP start statistics. A guide to statistics and data analysis using JMP and JMP in Software.* (3<sup>rd</sup> ed., pp. 560). Thomson Learning Academic Resource Center.
- Sanderman, J., Farquharson, R., & Baldock, J. (2010). Soil carbon sequestration potential : A review for Australian agriculture. *CSIRO Land and Water*, 76.
- Schenk, H.J. (2008). The shallowest possible water extraction profile: A null model for global root distributions. *Vadose Zone J.* 7, 1119-1124.
- Schlesinger, W.H. (1977). Carbon balance in terrestrial detritus. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 8, 51-81.
- Schlesinger, W.H. (1997). *Biogeochemistry : An analysis of global change.* (2<sup>nd</sup> ed.). San Diego: Academic Press.
- 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.
- Siringoringo, H.H., Siregar, C.A., & Hatori, H. (2003). Analysis of soil carbon accumulation of *Acacia mangium* plantation in Maribaya, West Java. *Buletin Penelitian Hutan* 634, 59-78.
- Soil Survey Staff. (1999). *Keys to soil taxonomy.* Washington DC: USDA Natural Resources Conservation Service.
- Spain, A.V., Isbell, R.F., & Probert, M.E. (1983). Soil organic matter. In Allen, D.E., Pringle, M.J., Page, K.L., & Dalal, R.C. (Ed.), *A review of sampling designs for the measurement of soil organic carbon in Australian grazing lands. The Rangeland Journal* 2010(32), 227-246.
- Sundermeier, A., Reeder, R., & Lal, R. (2005). *Soil carbon sequestration - Fundamentals.* (Extension Fact-Sheet). The Ohio State University:

- Food, Agricultural, and Biological Engineering.
- 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. & Biochem.* 34, 387-401.
- The Word Bank. (2012). *Carbon sequestration in agricultural soils*. (Agriculture and Rural Development, Report Number 67395-GLB). Washington: The World Bank.
- Toriyama, J., T. 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. & Manage.* 262, 1659-1667.
- Van Cleve, K. & Powers, R.F. (1995). Soil carbon, soil formation, and ecosystem development. In McFee, W.W. & Kelly, J.M. (Ed.), *Carbon Forms and Functions in Forest Soils*. USA: Soil Science Society of America Inc.
- 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.
- Van der Werf, G.R., Morton, D.C., & DeFries, R.S. (2009). CO<sub>2</sub> emissions from forest loss. *Nature Geosci.* 2, 737-738.
- 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. Manage.* 255, 35-48.
- Waid, J. S. (1974). Decomposition of roots. In Dickinson, C.H. & Pugh, G.J.F. (Ed.), *Biology of Plant Litter Decomposition* (pp. 175-211). London: Academic Press.
- Wallander, H., Oransson, H.G., & Rosengren, U. (2004). Production, standing biomass and natural abundance of <sup>15</sup>N and <sup>13</sup>C in ectomycorrhizal mycelia collected at different soil depths in two forest types. *Oecologia* 139, 89-97.
- West, T.O., Marland, G., King, A.W., & Post, W.M. (2004). Carbon management response curves: Estimates of temporal soil carbon dynamics. *Env. Manage.* 33(4), 507-518.
- Wuest, S.B. (2009). Correction of bulk density and sampling method biases using soil mass per unit area. *SSSAJ* 73(1).

Lampiran (Appendix) 1. Tata letak plot pada lokasi penelitian *A. mangium* dan hutan sekunder muda (Plot setting for *A. mangium* and young secondary forest experimental sites)



Lampiran (Appendix) 2. Analisis keragaman kandungan karbon tanah (C%) pada hutan tanaman *A. mangium* (M-P) berdasarkan seri waktu pengambilan contoh pada tujuh lapisan tanah di Maribaya (*Analysis of variance of carbon content (C%) of A. mangium plantation (M-P) based on the sampling time series 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	Tahun observasi (Years of observation)	1	11,509	11,509	15,578	0,0002*
	Galat (Error)	78	57,626	0,739		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	69,135			
5-10	Tahun observasi (Years of observation)	1	5,514	5,514	13,719	0,0004*
	Galat (Error)	78	31,349	0,402		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	36,863			
10-20	Tahun observasi (Years of observation)	1	3,251	3,251	10,075	0,0022*
	Galat (Error)	78	25,171	0,323		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	28,422			
20-30	Tahun observasi (Years of observation)	1	1,408	1,408	6,664	0,0117*
	Galat (Error)	78	16,480	0,211		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	17,888			
30-50	Tahun observasi (Years of observation)	1	0,011	0,011	0,088	0,7740
	Galat (Error)	8	1,000	0,125		
	Total terkoreksi (Corrected total)	9	1,0112			
50-70	Tahun observasi (Years of observation)	1	0,0034	0,0034	0,0267	0,8744
	Galat (Error)	8	1,0350	0,1294		
	Total terkoreksi (Corrected total)	9	1,0384			
70-100	Tahun observasi (Years of observation)	1	0,326	0,326	1,847	0,2112
	Galat (Error)	8	1,411	0,176		
	Total terkoreksi (Corrected total)	9	1,737			

Lampiran (Appendix) 3. Analisis keragaman kandungan karbon tanah (C%) pada hutan sekunder muda (M-SF) berdasarkan seri waktu pengambilan contoh pada tujuh lapisan tanah di Maribaya (*Analysis of variance of carbon content (C%) of young secondary forest (M-SF) based on the sampling time series 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	Tahun observasi (Years of observation)	1	3,9137	3,9137	14,7678	0,0002*
	Galat (Error)	78	20,6714	0,2650		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	24,5851			
5-10	Tahun observasi (Years of observation)	1	0,2981	0,2981	1,9279	0,1689
	Galat (Error)	78	12,0587	0,1546		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	12,3568			
10-20	Tahun observasi (Years of observation)	1	0,0685	0,0685	0,5059	0,4791
	Galat (Error)	78	10,5564	0,13534		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	10,625			
20-30	Tahun observasi (Years of observation)	1	0,0353	0,0354	0,6454	0,4242
	Galat (Error)	78	4,2721	0,0548		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	4,3074			
30-50	Tahun observasi (Years of observation)	1	0,0014	0,0014	0,0237	0,8815
	Galat (Error)	8	0,4914	0,0614		
	Total terkoreksi (Corrected total)	9	0,4928			
50-70	Tahun observasi (Years of observation)	1	0,0060	0,0060	0,0751	0,7910
	Galat (Error)	8	0,6426	0,0803		
	Total terkoreksi (Corrected total)	9	0,6486			
70-100	Tahun observasi (Years of observation)	1	0,0045	0,0045	0,0606	0,8117
	Galat (Error)	8	0,5883	0,0735		
	Total terkoreksi (Corrected total)	9	0,5927			



Lampiran (*Appendix*) 4. Analisis keragaman kerapatan massa tanah (BD) pada hutan tanaman *A. mangium* (M-P) berdasarkan seri waktu pengambilan contoh pada tujuh lapisan tanah di Maribaya (*Analysis of variance of soil bulk density (BD) of A. mangium plantation (M-P) based on the sampling time series at seven soil layers in Maribaya*)

Kedalaman ( <i>Depth</i> ), cm	Sumber keragaman ( <i>Source of variations</i> )	Db ( <i>df</i> )	Jumlah kuadrat ( <i>Sum of square</i> )	Rataan kuadrat ( <i>Mean of square</i> )	F-rasio ( <i>F-ratio</i> )	Peluang > F ( <i>Prob &gt; F</i> )
0-5	Tahun observasi ( <i>Years of observation</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	Tahun observasi ( <i>Years of observation</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	Tahun observasi ( <i>Years of observation</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	Tahun observasi ( <i>Years of observation</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	Tahun observasi ( <i>Years of observation</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	Tahun observasi ( <i>Years of observation</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	Tahun observasi ( <i>Years of observation</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) 5. Analisis keragaman kerapatan massa tanah (BD) pada hutan sekunder muda (M-SF) berdasarkan seri waktu pengambilan contoh pada tujuh lapisan tanah di Maribaya (*Analysis of variance of soil bulk density (BD) of young secondary forest (M-SF) based on the sampling time series 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	Tahun observasi (Years of observation)	1	0,2093	0,2093	27,5223	<,0001*
	Galat (Error)	78	0,5932	0,0076		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	0,8025			
5-10	Tahun observasi (Years of observation)	1	0,0223	0,0223	2,3409	0,1301
	Galat (Error)	78	0,7418	0,0095		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	0,7640			
10-20	Tahun observasi (Years of observation)	1	0,0372	0,0372	3,8447	0,0535
	Galat (Error)	78	0,7544	0,0097		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	0,7916			
20-30	Tahun observasi (Years of observation)	1	0,0539	0,0539	10,2393	0,0020*
	Galat (Error)	78	0,4104	0,0052		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	0,4643			
30-50	Tahun observasi (Years of observation)	1	0,0172	0,0172	2,8536	0,1296
	Galat (Error)	8	0,0482	0,006		
	Total terkoreksi (Corrected total)	9	0,0653			
50-70	Tahun observasi (Years of observation)	1	0,0028	0,0029	0,3492	0,5709
	Galat (Error)	8	0,0654	0,0082		
	Total terkoreksi (Corrected total)	9	0,0682			
70-100	Tahun observasi (Years of observation)	1	0,0101	0,0101	0,6455	0,4449
	Galat (Error)	8	0,1248	0,0156		
	Total terkoreksi (Corrected total)	9	0,1348			

Lampiran (*Appendix*) 6. Analisis keragaman simpanan karbon tanah kumulatif pada hutan tanaman *A. mangium* (M-P) berdasarkan seri waktu pengambilan contoh pada tujuh kedalaman tanah di Maribaya (*Analysis of variance of cumulative soil carbon stock of A. mangium plantation (M-P) based on the sampling time series at seven soil depths in Maribaya*)

Kedalaman ( <i>Depth</i> ), cm	Sumber keragaman ( <i>Source of variations</i> )	Db ( <i>df</i> )	Jumlah kuadrat ( <i>Sum of square</i> )	Rataan kuadrat ( <i>Mean of square</i> )	F-rasio ( <i>F-ratio</i> )	Peluang > F ( <i>Prob &gt; F</i> )
0-5	Tahun observasi ( <i>Years of observation</i> )	1	99,820	99,820	16,6486	<,0001*
	Galat ( <i>Error</i> )	78	467,665	5,996		
	Total terkoreksi ( <i>Corrected total</i> )	79	567,485			
0-10	Tahun observasi ( <i>Years of observation</i> )	1	255,935	255,935	18,6570	<,0001*
	Galat ( <i>Error</i> )	78	1069,996	13,718		
	Total terkoreksi ( <i>Corrected total</i> )	79	1325,931			
0-20	Tahun observasi ( <i>Years of observation</i> )	1	820,998	820,998	18,7507	<,0001*
	Galat ( <i>Error</i> )	78	3415,231	43,785		
	Total terkoreksi ( <i>Corrected total</i> )	79	4236,229			
0-30	Tahun observasi ( <i>Years of observation</i> )	1	1562,767	1562,77	19,5232	<,0001*
	Galat ( <i>Error</i> )	78	6243,642	80,05		
	Total terkoreksi ( <i>Corrected total</i> )	79	7806,409			
0-50	Tahun observasi ( <i>Years of observation</i> )	1	11,541	11,541	0,0605	0,8119
	Galat ( <i>Error</i> )	8	1526,144	190,768		
	Total terkoreksi ( <i>Corrected total</i> )	9	1537,684			
0-70	Tahun observasi ( <i>Years of observation</i> )	1	1,0271	1,027	0,0034	0,9549
	Galat ( <i>Error</i> )	8	2409,6700	301,209		
	Total terkoreksi ( <i>Corrected total</i> )	9	2410,697			
0-100	Tahun observasi ( <i>Years of observation</i> )	1	200,020	200,020	0,2727	0,6157
	Galat ( <i>Error</i> )	8	5868,056	733,507		
	Total terkoreksi ( <i>Corrected total</i> )	9	6068,076			

Lampiran (Appendix) 7. Analisis keragaman simpanan karbon tanah kumulatif pada hutan sekunder muda (M-SF) berdasarkan seri waktu pengambilan contoh pada tujuh kedalaman tanah di Maribaya (*Analysis of variance of cumulative soil carbon stock of young secondary forest based (M-SF) on the sampling time series 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	Tahun observasi (Years of observation)	1	42,3188	42,3188	10,3076	0,0019*
	Galat (Error)	78	320,2354	4,1056		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	362,5543			
0-10	Tahun observasi (Years of observation)	1	53,1056	53,1056	5,0964	0,0268*
	Galat (Error)	78	812,7697	10,4201		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	865,8752			
0-20	Tahun observasi (Years of observation)	1	64,0895	64,0895	2,0430	0,1569
	Galat (Error)	78	2446,8787	31,3702		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	2510,9682			
0-30	Tahun observasi (Years of observation)	1	102,1425	102,143	2,2986	0,1335
	Galat (Error)	78	3466,1208	44,437		
	Total terkoreksi (Corrected total)	79	3568,2633			
0-50	Tahun observasi (Years of observation)	1	32,4245	32,424	0,2726	0,6157
	Galat (Error)	8	951,4188	118,927		
	Total terkoreksi (Corrected total)	9	983,8433			
0-70	Tahun observasi (Years of observation)	1	100,0160	100,016	0,4700	0,5124
	Galat (Error)	8	1702,4803	212,810		
	Total terkoreksi (Corrected total)	9	1802,4963			
0-100	Tahun observasi (Years of observation)	1	86,8852	86,885	0,2249	0,6480
	Galat (Error)	8	3090,4402	386,305		
	Total terkoreksi (Corrected total)	9	3177,3254			