



## DAMPAK MUKA AIR TANAH DAN AMELIORAN TERHADAP KELEMBAPAN TANAH, EMISI CO<sub>2</sub> DAN PRODUKSI KELAPA SAWIT PADA TANAH GAMBUT

### IMPACTS OF WATER TABLE AND SOIL AMELIORANT ON SOIL MOISTURE, CO<sub>2</sub> EMISSION, AND OIL PALM YIELD ON PEAT SOIL

Winarna, M. Arif Yusuf, S. Rahutomo, dan Edy S. Sutarta

**Abstrak** Penelitian lapangan dampak kedalaman muka air tanah dan aplikasi amelioran (terak baja) telah dilakukan pada tanaman kelapa sawit menghasilkan di lahan gambut. Perlakuan terdiri dari tiga pengelolaan kedalaman muka air tanah (WLM-1, WLM-2, dan WLM-3) dan empat dosis terak baja (0; 3.15; 6.51; 9.86 kg pohon<sup>-1</sup>). Perlakuan WLM-1 adalah pengelolaan kedalaman muka air tanah pada kisaran 35-50 cm dari permukaan tanah, WLM-2 pada 60-75 cm, dan WLM-3 pada >75 cm. Penelitian disusun dalam rancangan acak kelompok petak terpisah dengan pengelolaan kedalaman muka air tanah sebagai petak utama dan dosis terak baja sebagai anak petak. Pengamatan meliputi kadar air tanah aktual, sifat-sifat tanah gambut, emisi CO<sub>2</sub>, pertumbuhan, dan produksi tanaman kelapa sawit. Perlakuan muka air tanah pada kisaran 35-75 cm dari permukaan tanah mampu menjaga kelembapan tanah aktual hingga lapisan atas tanah gambut, sedangkan penurunan kedalaman muka air tanah gambut hingga >75 cm di bawah permukaan tanah nyata berpengaruh terhadap penurunan kelembapan tanah ke lapisan atas (0-10 cm). Hasil pengukuran emisi CO<sub>2</sub> sebesar 37, 40, dan 45 ton ha<sup>-1</sup> tahun<sup>-1</sup> berturut-turut untuk

kondisi muka air tanah pada WLM-1, WLM-2, dan WLM-3. Penurunan muka air tanah hingga >75 cm nyata meningkatkan emisi CO<sub>2</sub> pada petak penelitian berkisar 11-18%, dibandingkan dengan perlakuan WLM-1 dan WLM-2. Aplikasi terak baja tidak nyata menurunkan emisi CO<sub>2</sub>. Kedalaman muka air tanah <75 cm nyata meningkatkan produksi TBS dibandingkan perlakuan muka air tanah >75 cm, yaitu sebesar 7-10% dan 36 – 60% berturut-turut untuk produksi 2014 dan 2015. Aplikasi berbagai dosis terak baja tidak berpengaruh nyata terhadap produksi TBS, namun dapat meningkatkan rerata berat tandan.

**Kata kunci:** amelioran, emisi CO<sub>2</sub>, kelapa sawit, tanah gambut

**Abstracts** A field study on peat soil to investigate impacts of soil water table depth and soil ameliorant (steel sludge) had been carried out on mature oil palm. Three treatments of soil water table management and four rates of steel sludge application were applied in this study. Treatments of soil water table management were WLM-1, WLM-2, and WLM-3, where soil water table depth was maintained at 35-50 cm, 60-75 cm, and >75 cm below the soil surface, respectively. Treatments of steel sludge were application of this soil ameliorant at the rate of 0; 3.15; 6.51; 9.86 kg tree<sup>-1</sup>. The study was arranged as split plot randomized block design by assigning soil water table management as main plot and rate of steel sludge as sub plot. Soil Data observed were actual soil water

*Penulis yang tidak disertai dengan catatan kaki instansi adalah peneliti pada Pusat Penelitian Kelapa Sawit*

Winarna (✉)  
Pusat Penelitian Kelapa Sawit  
Jl. Brigjen Katamso No. 51 Medan, Indonesia  
Email: winarnappks@gmail.com

content, peat soil properties, CO<sub>2</sub> emission, vegetative growth, and palm yield. The results showed that maintaining soil water table depth at < 75 cm could maintain actual soil moisture up to top parts of peat soil. On the other hand, deeper soil water table (>75 cm, WLM-3) caused significant effects on decreasing of soil moisture in the 0-10 cm layer of peat soil. CO<sub>2</sub> emission was 37, 40, dan 45 ton ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> under WLM-1, WLM-2, and WLM-3, respectively. The drop of soil water table to >75 cm (WLM-3) significantly increased CO<sub>2</sub> emission to about 11-18% higher than that on WLM-1 and WLM-2. Steel sludge application did not significantly decrease CO<sub>2</sub> emission. The highest FFB yield was observed under WLM-1, then followed by WLM-2 and WLM-3. FFB yield was significantly higher when soil water depth was maintained at 35-75 cm than that at > 75 cm, it was 7-10% and 36-60% higher in 2014 and 2015, respectively. There were no significant effects of steel sludge application on FFB yield, but there was improvement on average bunch weight.

**Key words** : ameliorant, CO<sub>2</sub> emission, oil palm, peat soil

## PENDAHULUAN

Fluktuasi muka air tanah akibat drainase tanah gambut yang tidak terkendali selain berpengaruh terhadap hidrofobisitas, juga berpengaruh pada emisi karbon dari tanah (Berglund dan Berglund, 2011; Handayani, 2009), penurunan permukaan gambut (Verry *et al.*, 2011), produksi kelapa sawit (Hasnol *et al.*, 2010, 2011; Lim *et al.*, 2012), serta sifat-sifat tanah lainnya. Pengembangan sistem tata air dengan mempertahankan muka air tanah pada kedalaman tertentu sudah banyak dilakukan, namun kaitannya dengan distribusi kelembapan tanah (melalui gaya kapiler) sampai ke permukaan tanah belum banyak diketahui. Kedalaman muka air tanah juga harus dikaitkan dengan upaya menekan emisi karbon dari lahan gambut dan adanya peningkatan produksi tanaman. Dalam kerangka pengembangan kelapa sawit yang berkelanjutan pada lahan gambut, pengelolaan lahan seharusnya tidak lagi hanya menekankan pada aktivitas untuk meningkatkan produksi tanpa memperhatikan kelestarian sifat-sifat tanah gambut, tetapi harus ditekankan terhadap keduanya (Hasnol *et al.*, 2011).

Selain pengelolaan air, untuk mencegah degradasi tanah gambut dilakukan ameliorasi untuk meningkatkan stabilitas gambut dan memperbaiki kesuburan tanah serta meningkatkan produktivitas tanaman (Sabiham, *et al.*, 2012). Dalam proses stabilisasi, kehilangan karbon organik gambut sebagai hasil dekomposisi mikroorganisme berupa gas rumah kaca (CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub>) dapat ditekan (Sollins *et al.*, 1996). Ikatan kation polivalen dan senyawa organik akan membentuk kompleks yang stabil dan tahan terhadap proses dekomposisi. Kation Fe<sup>3+</sup> memiliki afinitas tertinggi dan paling stabil berikatan dengan senyawa-senyawa organik dibanding kation-kation lainnya. Mario (2002) melaporkan adanya peningkatan hasil gabah dan penurunan emisi karbon dengan penggunaan terak baja (bahan kaya besi). Penggunaan amelioran berkadar besi tinggi juga dilaporkan mampu meningkatkan daya simpan air (Michel, 2009), sehingga berpotensi mencegah terjadinya hidrofobisitas tanah gambut (Szajdak dan Szatyłowicz, 2010).

Informasi pengaruh muka air tanah dan pemberian bahan amelioran kaya besi (terak baja) terhadap kelembapan tanah gambut, emisi karbon dioksida, pertumbuhan dan produksi kelapa sawit belum banyak diketahui secara mendalam. Penelitian lapangan ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh kedalaman muka air tanah dan dosis terak baja terhadap perubahan sifat-sifat gambut, kelembapan tanah gambut, emisi karbon dioksida, pertumbuhan dan produksi kelapa sawit.

## BAHAN DAN METODE

### Lokasi Penelitian

Percobaan lapangan dilaksanakan pada periode 2013 – 2015 di areal tanaman menghasilkan kebun Panai Jaya, Kabupaten Labuhan Batu, Sumatra Utara. Posisi geografi kebun Panai Jaya pada 2°22'25"-2°22'50" N dan 100°16'0"-100°17'10" E. Jenis tanah di kebun Panai Jaya adalah tanah gambut yang tergolong gambut dalam dengan tingkat kematangan saprik di lapisan atas dan hemik di lapisan bawah. Bobot isi tanah gambut ini berkisar 0,14-0,21 g/cm<sup>3</sup>, dengan tingkat kemasaman yang tergolong sangat masam (pH 3,3-3,9). Kapasitas tukar kation tergolong sangat tinggi berkisar 108-110 (cmol(+) kg<sup>-1</sup>), namun

kejenuhan basa sangat rendah berkisar 9,9-11%. Kandungan K-dd, Ca-dd, dan Mg-dd berturut-turut sebesar 0,4; 6,73; dan 4,98 (cmol(+) kg<sup>-1</sup>).

Blok tanaman kelapa sawit yang digunakan sebagai petak penelitian terdiri dari 5 blok tanaman menghasilkan tahun tanam 2008. Blok tanaman telah dilengkapi dengan sarana tata air yang terdiri dari saluran utama (*main drain*), saluran sekunder (*collection drain*), dan sekat-sekat air.

### Rancangan Percobaan

Penelitian lapangan menggunakan Rancangan Acak Kelompok Petak Terpisah. Petak utama adalah kedalaman muka air tanah yang terdiri dari 3 taraf:

1. WLM-1 = kedalaman muka air tanah pada kisaran 35-50 cm.
2. WLM-2 = kedalaman muka air tanah pada kisaran 60-75 cm.
3. WLM-3 = kedalaman muka air tanah pada >75 cm.

Anak petak adalah dosis terak baja yang terdiri dari 4 taraf, yaitu:

1. A0 = tanpa aplikasi terak baja.
2. A1 = dosis terak baja 3.15 kg pohon<sup>-1</sup>
3. A2 = dosis terak baja 6.51 kg pohon<sup>-1</sup>
4. A3 = dosis terak baja 9.86 kg pohon<sup>-1</sup>

Bahan terak baja yang digunakan sebagai amelioran tanah gambut dalam penelitian berbentuk serbuk kering dengan ukuran butir lolos saringan 2 mm. Hasil analisis kandungan kimia terak baja tersebut meliputi Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, CaO, MgO berturut-turut sebesar 20,45%; 13,05%; 9,81%; dan 8,50%. Selain itu, terak baja juga mengandung unsur mikro seperti Cu dan Zn (masing-masing kurang dari 0,5%). Dosis terak baja A1, A2, dan A3 dihitung setara untuk netralisasi tanah gambut guna meningkatkan kejenuhan basa berturut-turut menjadi 20, 30, dan 40%. Diketahui terak baja memiliki daya netralisasi untuk memperbaiki tanah masam sekitar 70%.

Aplikasi terak baja dilakukan 2 kali setahun dengan cara menyebar secara merata pada daerah piringan pohon tanaman kelapa sawit. Setiap kombinasi perlakuan diulang sebanyak 3 kali, sehingga terdapat

36 kombinasi perlakuan atau 36 petak penelitian. Satu petak penelitian terdiri dari 36 pohon kelapa sawit, terdiri dari 16 pohon pengamatan dan 20 pohon pagar. Untuk mengetahui perbedaan pengaruh perlakuan dilakukan analisis ragam (ANOVA), sedangkan perbedaan pada masing-masing perlakuan dan interaksinya dilakukan Uji Jarak Berganda Duncan (*Duncan's Multiple Range Test*). Analisis statistik pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak SAS (*Statistical Analysis System*).

### Pengamatan Emisi Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>)

Pengukuran emisi gas CO<sub>2</sub> dari tanah gambut dilakukan secara langsung pada setiap petak penelitian dengan metode *close chamber technique* yang diadopsi dari Setyanto *et al.* (2010). Pengambilan sampel gas dilakukan secara manual di lapangan menggunakan sungkup (*chamber*) dari pipa PVC diameter 25 cm dan panjang 30 cm. *Syringe* dengan volume 10 ml digunakan untuk mengambil sampel gas. Dalam satu kali pengamatan, dilakukan pengambilan sampel gas dengan interval waktu 10, 20, 30 dan 40 menit. Pengambilan sampel gas dilakukan pada pukul 06.00-07.00 pagi dan 13.00-14.00 siang. Analisis konsentrasi gas dilakukan langsung di lapangan dengan menggunakan *micro Gas Chromatograph (micro-GC) CP 4900*. Konsentrasi gas CO<sub>2</sub> diperoleh berdasarkan nilai area dari satu standar gas dan area gas sampel yang akan dihitung dengan persamaan:

$$\frac{C_{sp}}{C_{std}} = \frac{A_{sp}}{A_{std}}$$

di mana, *C<sub>sp</sub>* adalah nilai konsentrasi gas dari satu sampel (*ppm*), *C<sub>std</sub>* adalah konsentrasi dari gas standar, *A<sub>sp</sub>* adalah *area* dari *peak* hasil pembacaan kromatogram, dan *A<sub>std</sub>* adalah *area* dari pembacaan kromatogram gas standar.

Perhitungan fluks CO<sub>2</sub> menggunakan persamaan dari IAEA (1993), sebagai berikut:

$$E = \frac{Bm}{Vm} \times \frac{\delta C_{sp}}{\delta t} \times \frac{V}{A} \times \frac{273.2}{T + 273.2}$$

di mana:

- E* = emisi CO<sub>2</sub> (mg m<sup>-2</sup> jam<sup>-1</sup>)  
*V* = volume sungkup (m<sup>3</sup>)  
*A* = luas dasar sungkup (m<sup>2</sup>)

$T$  = suhu udara rata-rata di dalam sungkup ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $C_{sp/t}$  = laju perubahan konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  (ppm/menit)  
 $B_m$  = berat molekul gas  $\text{CO}_2$  dalam kondisi standar  
 $V_m$  = volume gas pada kondisi *stp* (*standard temperature and pressure*) yaitu 22,41 liter pada  $23^{\circ}\text{K}$

Pengukuran fluks dan emisi gas dilakukan pada bulan Maret (bulan lembap), Juli (bulan kering), dan November (bulan basah). Pengukuran emisi karbon dilakukan di dua titik pengambilan sampel gas yaitu: (i) di bawah naungan tanaman berjarak 1 m dari pohon, (ii) di bawah naungan tanaman berjarak 2 m dari pohon, dan (iii) di sela-sela antar tanaman kelapa sawit (4,5 m dari pohon). Pengulangan dilakukan sebanyak 2 kali di setiap titik pengambilan sampel gas.

#### **Pengamatan Kelembapan Tanah Gambut**

Pengamatan kelembapan tanah dilakukan pada lapisan tanah bagian atas yaitu pada kedalaman 0-50 cm dari permukaan tanah. Sampel tanah untuk pengamatan kelembapan tanah diambil pada interval kedalaman 0-2,5, 2,5-5, 5-10, 10-20, 20-30, dan 30-50 cm. Pengamatan kelembapan tanah dilakukan pada piringan pohon dan di gawangan antar pohon. Sampel tanah pada setiap lapisan selanjutnya ditentukan kadar air aktualnya secara gravimetrik (Kurnia *et al.*, 2006).

#### **Pengamatan Pertumbuhan dan Produksi Kelapa Sawit**

Pengamatan produksi dilakukan setiap bulan selama pelaksanaan penelitian, sedangkan pengamatan pertumbuhan atau vegetatif tanaman dilakukan setiap semester. Parameter pertumbuhan tanaman kelapa sawit meliputi *Petiole cross-section* (PCS), *Leaf area index* (LAI), sedangkan parameter produksi meliputi produksi TBS/ha/tahun dan rerata berat tandan (Syarovy *et al.*, 2014).

#### **Pengukuran Kedalaman Muka Air Tanah**

Kedalaman muka air tanah di dalam blok tanaman dikontrol menggunakan *piezometer* yang dibuat dari

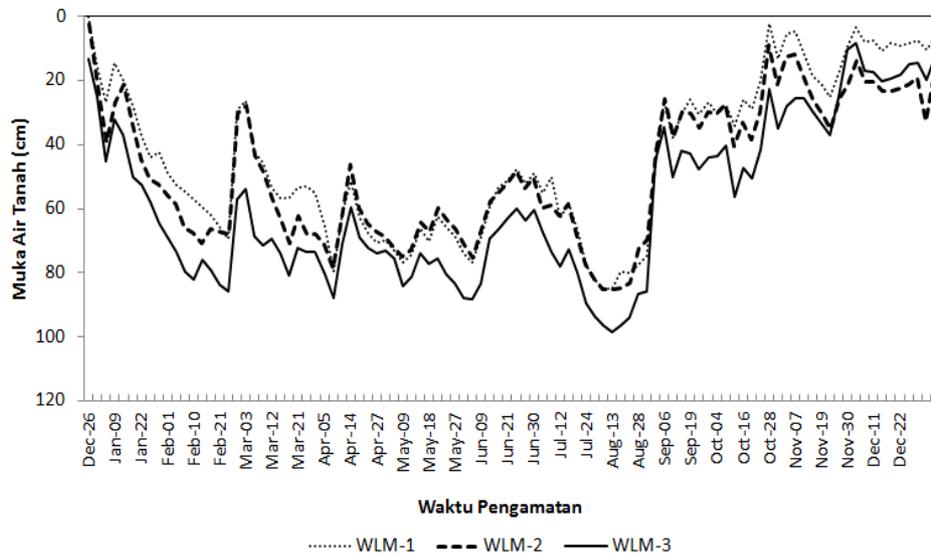
bahan pipa PVC berukuran diameter 2 inci dan panjang 140 cm atau disesuaikan dengan kondisi muka air tanah. Setiap petak penelitian dipasang 2 buah *piezometer* dengan interval sekitar 50 meter. Kedalaman muka air tanah diukur menggunakan meteran pada setiap *piezometer*.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

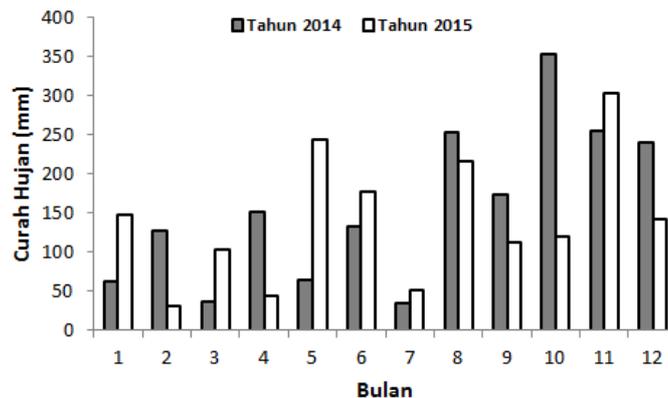
### **Fluktuasi Muka Air Tanah**

Gambar 1 menunjukkan fluktuasi curah hujan dan kedalaman muka air tanah selama periode penelitian. Fluktuasi kedalaman muka air tanah dikelompokkan menjadi tiga berdasarkan pengelolaannya. Pengelolaan kedalaman muka air tanah ini dilakukan dengan memasang sekat-sekat air pada kanal sekunder yang dilengkapi dengan sarana *over flow*, sehingga diperoleh fluktuasi tinggi muka air yang berbeda di antara ketiganya. Pengelolaan WLM-1 dilakukan dengan mengatur *over flow* untuk memperoleh kedalaman muka air tanah pada kisaran 35-50 cm di bawah permukaan tanah, WLM-2 mengatur *over flow* untuk memperoleh kedalaman muka air tanah pada kisaran 60-75 cm, sedangkan WLM-3 tidak dilakukan pembuatan sekat air dan kedalaman muka air tanah lebih dari 75 cm di bawah permukaan tanah. Namun dalam pelaksanaannya, sangat sulit untuk mempertahankan ketiga kisaran kedalaman muka air tanah (sesuai perlakuan awal) tetap stabil selama periode penelitian. Ketiga pengelolaan muka air tanah di atas menghasilkan kondisi fluktuasi muka air tanah yang hampir sama selama periode penelitian, bahkan untuk perlakuan WLM-1 dan WLM-2 pada beberapa periode pengamatan keduanya berhimpit.

Secara umum kondisi fluktuasi kedalaman muka air tanah mengikuti pola curah hujan di lokasi penelitian. Apabila terjadi hujan, maka pada hari yang sama akan diikuti oleh kenaikan muka air tanah mendekati permukaan tanah. Korelasi curah hujan dengan kedalaman muka air tanah menghasilkan nilai koefisien korelasi tertinggi adalah 0,608 pada *time lag* 0, yaitu curah hujan berpengaruh pada pergerakan muka air tanah pada hari yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa fluktuasi kedalaman muka air tanah sangat dipengaruhi oleh curah hujan. Curah hujan lokasi penelitian selama periode 2014-2015 disajikan pada Gambar 2.



Gambar 1. Fluktuasi kedalaman muka air tanah dalam petak penelitian selama periode pelaksanaan penelitian  
 Figure 1. Fluctuations of groundwater depth in the research plots during the study period

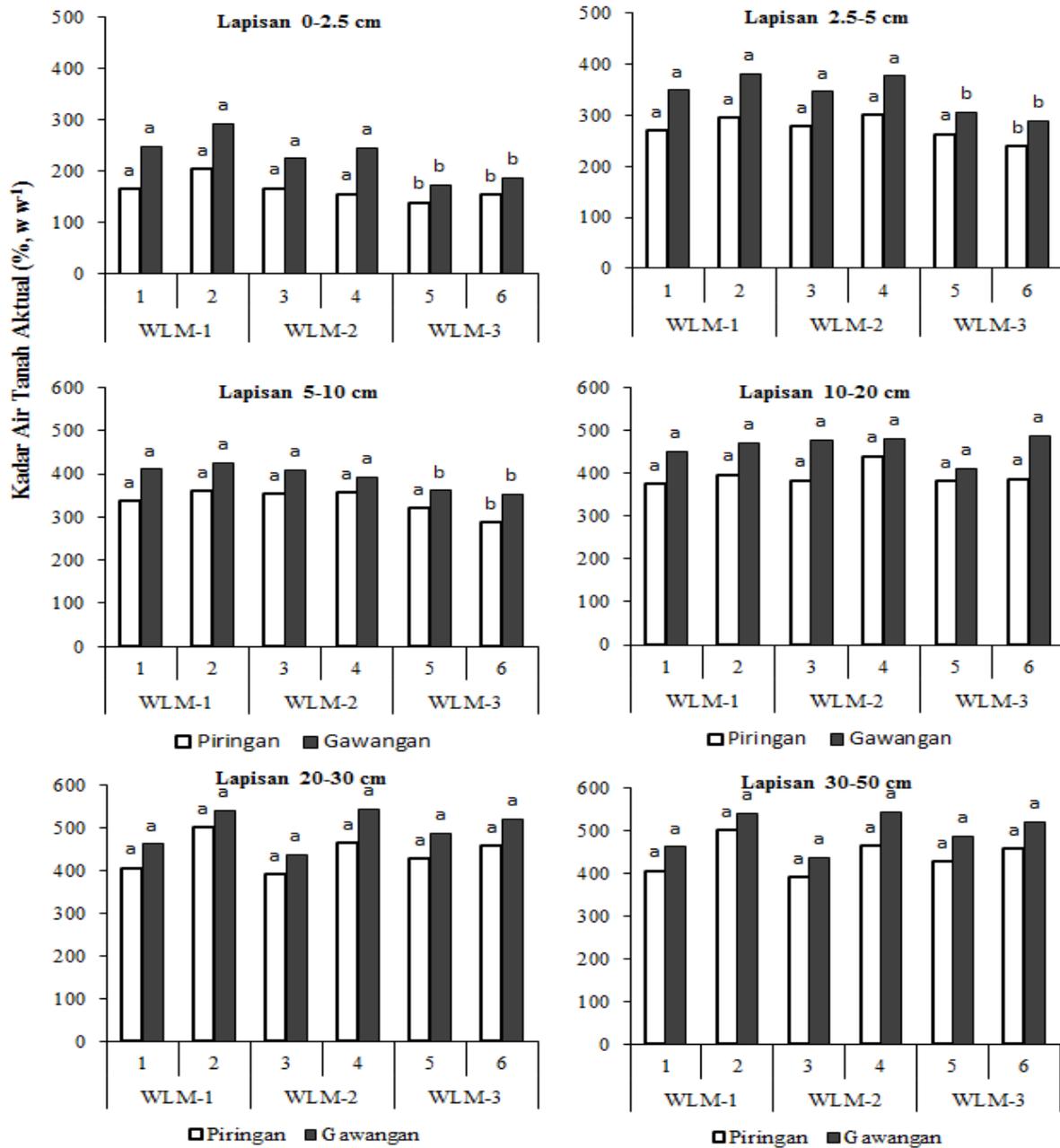


Gambar 2. Sebaran curah hujan bulanan di lokasi penelitian periode 2014 - 2015  
 Figure 2. Distribution of monthly rainfall at the location of the study period 2014 - 2015

### Kadar Air Aktual Tanah Gambut

Gambar 3 menyajikan kadar air tanah aktual dan distribusinya pada profil tanah lapisan atas di piringan pohon dan gawangan pada kondisi muka air tanah yang berbeda pada periode pengamatan Februari – November 2014. Kelembapan tanah aktual pada profil tanah meningkat dengan bertambahnya kedalaman lapisan tanah gambut, terjadi pada semua kondisi muka air tanah baik di piringan pohon maupun di

gawangan. Kadar air aktual tanah pada lapisan 0-2,5 cm < 2,5-5 cm < 5-10 cm < 10-20 cm < 20-50 cm, hal ini karena semakin dalam lapisan tanah gambut akan semakin mendekati muka air tanah. Secara umum, pada lapisan 0-10 cm menunjukkan bahwa kadar air aktual tanah gambut pada WLM-1 > WLM-2 > WLM-3 baik di piringan pohon maupun di gawangan. WLM-1 berkisar 30-50 cm, WLM-2 berkisar 45-70 cm, dan WLM-3 berkisar 70-90 cm.



Gambar 3. Kadar air tanah aktual dan distribusinya pada profil tanah lapisan atas di piringan dan gawangan pada kondisi muka air tanah berbeda pada periode Februari – November 2014. Waktu pengamatan : 1 = Oktober 2014; 2 = November 2014; 3 = Februari 2014; 4 = Maret 2014; 5 = Juni 2014; 6 = Juli 2014. Bar yang diikuti huruf yang sama pada piringan atau gawangan adalah tidak berbeda nyata pada taraf 5%

Figure 3. Actual ground water content and its distribution on top soil profiles on circle weeded and interrow with different groundwater conditions on period February - November 2014. Observation time: 1 = October 2014; 2 = November 2014; 3 = February 2014; 4 = March 2014; 5 = June 2014; 6 = July 2014. The bars followed by the same letter on the circle weeded or interrow are not significantly different at level 5%

Perbedaan kondisi muka air tanah menyebabkan adanya perbedaan distribusi kelembapan tanah aktual pada lapisan profil tanah 0-50 cm. Kondisi WLM-3 (70-90 cm) nyata ( $P < 0,05$ ) menurunkan kelembapan tanah pada lapisan 0-2,5; 2,5-5, dan 5-10 cm di daerah piringan pohon dibandingkan dengan WLM-1 dan WLM-2. Hal ini akan mudah terjadi pada saat bulan kering atau terdapat *dry spell*. Kondisi muka air tanah WLM-3 nyata ( $P < 0,05$ ) menurunkan kelembapan tanah gambut di daerah gawangan dibandingkan WLM-1 dan WLM-2, yaitu pada lapisan tanah gambut 0-2,5; 2,5-5; dan 5-10 cm. Sementara pada lapisan tanah lebih dalam dari 10 cm (baik di piringan pohon dan gawangan) tidak menunjukkan perbedaan kadar air tanah aktual yang nyata.

Penurunan muka air tanah yang terlalu dalam (WLM-3) akan mempengaruhi distribusi kelembapan tanah pada seluruh profil tanah gambut dan mengakibatkan terjadinya pelepasan sejumlah volume air tanah dari lapisan di atasnya (Kurnain, 2008). Sifat-sifat tanah gambut seperti konduktivitas hidrolik dan porositas gambut yang tinggi mempercepat pelepasan kadar air tanah akibat isapan penurunan muka air tanah. Penurunan kadar air tanah aktual akibat kondisi muka air tanah WLM-3 di piringan pohon lebih besar dibandingkan di gawangan. Hal ini karena kondisi piringan pohon yang lebih terbuka dan cepat mengalami kekeringan. Piringan pohon lebih terbuka karena pemeliharaan yang intensif secara kimia dari gulma (tanaman penutup tanah) dan adanya volume perakaran yang lebih banyak.

### Emisi Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>)

Interaksi antara kedalaman muka air tanah dan dosis terak baja tidak berpengaruh nyata terhadap emisi CO<sub>2</sub> (Tabel 1). Secara mandiri, kedalaman muka air tanah menunjukkan pengaruh nyata terhadap emisi CO<sub>2</sub>, yaitu antara perlakuan WLM-1, WLM-2, dan WLM-3. Perlakuan aplikasi dosis terak baja, secara mandiri tidak menunjukkan berpengaruh nyata terhadap emisi CO<sub>2</sub>.

Pada perlakuan kedalaman muka air tanah WLM-1, terjadi penurunan lapisan oksidatif dan menyebabkan penurunan aktivitas mikroorganisme perombak, sehingga oksidasi bahan gambut menurun. Menurut Kechavarzi *et al.*, (2010), kelembapan tanah yang berlebihan menurunkan ketersediaan oksigen tanah dan menghambat aktivitas mikroba perombak, sehingga menurunkan emisi CO<sub>2</sub>. Pada WLM-2, terjadi peningkatan kedalaman muka air tanah (menjadi 45-70 cm) yang menyebabkan adanya peningkatan lapisan oksidatif dan peningkatan emisi CO<sub>2</sub> hasil oksidasi bahan gambut dan respirasi akar tanaman. Pada WLM-3 (70-90 cm), terjadi peningkatan lapisan oksidasi yang lebih besar dibandingkan WLM-1 dan WLM-2. Hal ini menyebabkan terjadinya peningkatan emisi CO<sub>2</sub> dari tanah gambut yang lebih besar dibandingkan pada WLM-1 dan WLM-2. Emisi CO<sub>2</sub> pada kondisi kedalaman muka air tanah WLM-3 > WLM-2 > WLM-1, di mana menunjukkan bahwa semakin dalam muka air tanah menyebabkan peningkatan emisi CO<sub>2</sub>. Persentase peningkatan emisi CO<sub>2</sub> pada WLM-3 dibandingkan WLM-1 dan WLM-2 berturut-turut adalah 77% dan 32%.

Tabel 1. Pengaruh kedalaman muka air tanah dan dosis terak baja terhadap emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>)  
 Table 1. Effect of groundwater depth and doses of steel slag on carbon dioxide emissions (CO<sub>2</sub>)

Muka Air Tanah (cm)	Dosis Terak Baja (kg pohon <sup>-1</sup> )				Rerata
	0,00	3,15	6,51	9,86	
	----- Emisi CO <sub>2</sub> (ton ha <sup>-1</sup> tahun <sup>-1</sup> ) -----				
WLM-1	25,64	28,48	32,14	27,09	28,33 <sup>a</sup>
WLM-2	37,67	36,15	40,86	36,99	37,92 <sup>b</sup>
WLM-3	49,99	48,12	51,00	51,81	50,23 <sup>c</sup>
Rerata	37,77 <sup>a</sup>	37,58 <sup>a</sup>	41,33 <sup>a</sup>	38,63 <sup>a</sup>	

Nilai rerata yang diikuti oleh huruf yang sama pada kolom atau baris yang sama adalah tidak berbeda nyata pada taraf  $\alpha = 5\%$

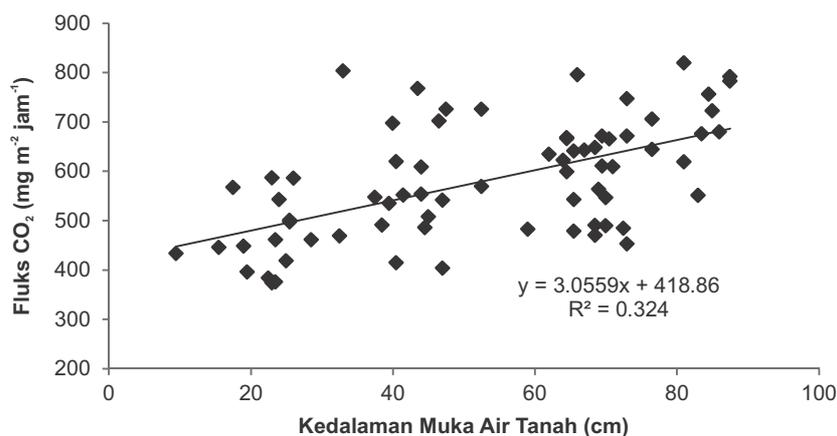
Pengelolaan kedalaman muka air tanah pada WLM-1 dan WLM-2 menunjukkan hasil emisi CO<sub>2</sub> lebih rendah dari faktor emisi CO<sub>2</sub> yang ditetapkan oleh IPCC (2014) sebesar 40 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> tahun<sup>-1</sup>, sedangkan perlakuan kedalaman muka air tanah pada WLM-3 menunjukkan emisi CO<sub>2</sub> > 40 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> tahun<sup>-1</sup>. Hal ini menunjukkan bahwa, untuk menekan emisi CO<sub>2</sub> pada nilai yang kecil, maka kedalaman muka air tanah harus diatur pada kedalaman lebih dangkal dari 70 cm dari permukaan tanah. Namun tentunya juga harus mempertimbangkan umur tanaman kelapa sawit, kaitannya dengan distribusi perakarannya.

Emisi CO<sub>2</sub> pada WLM-3 > WLM-2 > WLM-1, artinya terjadi peningkatan emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang nyata dengan semakin dalamnya muka air tanah. Gambar 4 menunjukkan hubungan yang linier antara fluks CO<sub>2</sub> dengan kedalaman muka air tanah (cm) dari permukaan tanah gambut. Fluks CO<sub>2</sub> berbanding lurus dengan kedalaman muka air tanah, jadi jika terjadi penurunan muka air tanah akan meningkatkan emisi CO<sub>2</sub>. Menurut Handayani (2009) dan Dariah *et al.* (2013) bahwa peningkatan emisi CO<sub>2</sub> dengan semakin dalamnya muka air tanah terjadi pada lahan gambut yang masih relatif baru diusahakan, biasanya kematangan gambut masih didominasi oleh gambut yang belum matang.

Berdasarkan hubungan pada Gambar 3, diperoleh bahwa setiap penurunan kedalaman muka air tanah sedalam 10 cm dari permukaan tanah akan

meningkatkan fluks CO<sub>2</sub> sebesar 30.6 mg m<sup>-2</sup> jam<sup>-1</sup> atau emisi CO<sub>2</sub> sebesar 2,7 ton ha<sup>-1</sup> tahun<sup>-1</sup>. Hasil pengukuran emisi CO<sub>2</sub> oleh peneliti sebelumnya di lahan gambut untuk perkebunan kelapa sawit juga diperoleh hubungan yang linier antara emisi CO<sub>2</sub> dan kedalaman muka air tanah (Hooijer *et al.*, 2010, 2012; Husnain *et al.*, 2014). Marwanto *et al.* (2013) menambahkan bahwa emisi CO<sub>2</sub> dari lahan gambut dikontrol oleh kelembapan tanah, selain faktor respirasi akar yang dominan (Sabiham *et al.*, 2014). Setyanto *et al.* (2010) memperoleh angka peningkatan sebesar 5,73 ton CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> tahun<sup>-1</sup> pada setiap penurunan kedalaman muka air tanah 10 cm pada gambut Sumatra.

Berdasarkan Tabel 1 di atas, pengaruh interaksi kedalaman muka air tanah dan dosis terak baja tidak berpengaruh nyata terhadap emisi CO<sub>2</sub>. Pengaruh mandiri dosis terak baja juga menunjukkan pengaruh yang tidak nyata terhadap emisi CO<sub>2</sub>. Pengaruh aplikasi terak baja yang tidak nyata terhadap emisi CO<sub>2</sub> pada periode penelitian selama satu tahun diduga karena pelarutan terak baja belum seluruhnya efektif. Penambahan terak baja sebagai bahan amelioran tanah gambut dalam penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan stabilitas tanah dari proses oksidasi oleh mikroorganisme perombak. Namun pengaruh berbagai dosis terak baja belum berpengaruh nyata terhadap penurunan emisi CO<sub>2</sub> sebagai indikator stabilitas gambut. Hal ini diduga karena pelarutan bahan terak baja dan pembentukan kompleks organo-logam yang stabil belum efektif sampai dengan pengamatan terakhir.



Gambar 4. Hubungan antara fluks CO<sub>2</sub> dan kedalaman muka air tanah gambut, ( $P < 0.05$ ;  $N = 72$ )  
 Figure 4. The relationship between CO<sub>2</sub> flux and groundwater depth of peat soil, ( $P < 0.05$ ;  $N = 72$ )

### Pertumbuhan Tanaman Kelapa Sawit

Tabel 2 menyajikan hasil pengamatan pertumbuhan (vegetatif) tanaman kelapa sawit pada berbagai kedalaman muka air tanah dan aplikasi terak baja. Pengaruh interaksi kedalaman muka air tanah dan dosis terak baja tidak berpengaruh nyata terhadap PCS, biomassa daun 17, dan LAI. Perlakuan mandiri kedalaman muka air tanah (WLM-1, WLM-2, dan WLM-3) nyata berpengaruh pada LA, PCS, biomassa kering daun 17, dan LAI. Penerapan WLM-1 dan WLM-2 nyata meningkatkan nilai LA, PCS, biomassa kering daun 17 dan LAI dibandingkan perlakuan WLM-3, sedangkan antara perlakuan WLM-1 dan WLM-2 tidak menunjukkan pengaruh yang nyata pada pertumbuhan tanaman.

Nilai LAI untuk tanaman kelapa sawit berumur 6 – 7 tahun rata-rata 4,9 (untuk tanah mineral), sedangkan LAI pada perlakuan WLM-1 dan WLM-2 adalah sekitar 4.0 serta pada WLM-3 adalah kurang dari 4,0. Nilai LAI dan PCS menjadi indikasi penting pertumbuhan vegetatif tanaman, terutama tanaman kelapa sawit muda. Kedua variabel tersebut juga memiliki korelasi positif dengan produksi kelapa sawit (Fairhurst dan

Hardter 2003). Nilai LAI ini berkorelasi positif dengan biomassa kering daun 17 ( $r = 0.811$ ,  $P < 0.05$ ) dan produksi TBS ( $r = 0.644$ ,  $P < 0.05$ ). PCS juga berkorelasi positif dengan produksi TBS, dalam penelitian ini diperoleh nilai koefisien korelasinya sebesar 0.578 ( $P < 0.05$ ). Nilai LAI dan PCS meningkat dengan bertambahnya umur tanaman, serta tergantung pada beberapa faktor lingkungan seperti panjang penyinaran, suhu, kelembapan tanah, dan genetik bahan tanaman (Corley dan Tinker, 2003). Fairhurst dan Hardter (2003) menambahkan bahwa LAI dan PCS mempunyai respon kuat terhadap kultur teknis dan kondisi lingkungan (iklim dan pemupukan).

Penurunan muka air tanah menyebabkan tanah gambut menjadi kering dan mengganggu pertumbuhan tanaman. Penurunan muka air tanah hingga lebih dalam dari 70 cm (WLM-3) menyebabkan terjadinya penurunan kelembapan tanah lapisan atas. Berdasarkan analisis kadar air aktual pada lapisan olah, pada kondisi WLM-3 mengalami penurunan hingga mencapai 255% ( $w w^{-1}$ ). Nilai kadar air tanah pada kondisi titik layu permanen (pF4.2) pada piringan pohon untuk tanah gambut di petak penelitian berkisar

Tabel 2. Pengaruh kedalaman muka air tanah dan dosis terak baja terhadap pertumbuhan kelapa sawit  
Table 2. Effect of groundwater depth and doses of steel slag on the growth of oil palm

Pengelolaan Muka Air Tanah (cm)	Dosis Terak Baja (kg pohon <sup>-1</sup> )				Rerata
	0,00	3,15	6,51	9,86	
<i>Petiole Cross-Section (m<sup>2</sup>)</i>					
WLM-1	20,45	17,65	20,84	20,02	19,74 <sup>a</sup>
WLM-2	18,82	19,55	21,47	17,56	19,35 <sup>a</sup>
WLM-3	15,55	15,37	15,36	17,14	15,85 <sup>b</sup>
<b>Rerata</b>	<b>18,27<sup>a</sup></b>	<b>17,52<sup>a</sup></b>	<b>19,22<sup>a</sup></b>	<b>18,24<sup>a</sup></b>	
<i>Biomassa kering daun 17 (kg)</i>					
WLM-1	1,98	2,01	2,34	2,25	2,14 <sup>a</sup>
WLM-2	2,13	2,20	2,40	2,00	2,18 <sup>a</sup>
WLM-3	1,80	1,78	1,78	1,96	1,83 <sup>b</sup>
<b>Rerata</b>	<b>1,97<sup>a</sup></b>	<b>2,00<sup>a</sup></b>	<b>2,17<sup>a</sup></b>	<b>2,07<sup>a</sup></b>	
<i>LAI</i>					
WLM-1	3,83	3,60	4,51	4,30	4,06 <sup>a</sup>
WLM-2	3,88	4,14	4,44	3,82	4,07 <sup>a</sup>
WLM-3	3,23	3,21	3,24	3,73	3,35 <sup>b</sup>
<b>Rerata</b>	<b>3,65<sup>a</sup></b>	<b>3,65<sup>a</sup></b>	<b>4,06<sup>a</sup></b>	<b>3,95<sup>a</sup></b>	

Keterangan: LAI = Leaf Area Index; Nilai rerata yang diikuti oleh huruf yang sama pada kolom atau baris yang sama adalah tidak berbeda nyata pada taraf  $\alpha = 5\%$

231-248% (Tabel 16), sehingga air tersedia yang dapat diserap tanaman hanya sekitar 7 – 24%. Hal ini tentunya akan berdampak pada terhambatnya pertumbuhan tanaman. Tanaman kelapa sawit membutuhkan air yang cukup secara kontinyu untuk menjaga kelangsungan fungsi fisiologis dalam jaringan tanaman, transportasi hara, dan untuk proses asimilasi dalam tanaman (Fairhurst dan Hardter, 2003).

Pengaruh mandiri aplikasi berbagai dosis terak baja tidak menunjukkan pengaruh yang nyata terhadap parameter pertumbuhan tanaman. Aplikasi terak baja dengan dosis hingga 6.51 kg pohon<sup>-1</sup> menunjukkan kecenderungan peningkatan PCS, biomassa kering daun 17, dan LAI. Namun nilai PCS, biomassa kering daun 17, dan LAI kemudian turun dengan penambahan dosis menjadi 9.86 kg pohon<sup>-1</sup>. Nilai tertinggi PCS, biomassa kering daun 17, dan LAI diperoleh pada dosis 6.51 kg pohon<sup>-1</sup>. Peningkatan pertumbuhan tanaman tersebut merupakan akibat adanya peranan terak baja terhadap perbaikan kesuburan tanah gambut, yaitu melalui peningkatan pH dan kadar abu tanah gambut. Parameter pertumbuhan tanaman seperti LAI dan PCS mempunyai respon yang kuat terhadap perubahan kondisi lingkungan dan pemupukan (Fairhurst dan Hardter, 2003).

### Produksi Tandan Buah Segar

Tabel 3 menunjukkan pengaruh kedalaman muka air tanah dan aplikasi berbagai dosis terak baja terhadap produksi tandan buah segar (TBS) tahun produksi 2014 dan 2015. Interaksi antara pengelolaan kedalaman muka air tanah dengan perlakuan berbagai dosis terak baja tidak berpengaruh nyata terhadap produksi TBS. Perlakuan mandiri pengelolaan kedalaman muka air tanah WLM-3 nyata menurunkan produksi TBS dibandingkan perlakuan WLM-1 dan WLM-2, sedangkan antara WLM-1 dan WLM-2 tidak berbeda nyata. Peningkatan produksi TBS pada perlakuan WLM-1 > WLM-2 > WLM-3. Kedalaman muka air tanah WLM-1 dan WLM-2 nyata meningkatkan produksi TBS dibandingkan perlakuan WLM-3 sebesar 7-10% dan 36 – 60% berturut-turut untuk produksi 2014 dan 2015.

Tabel 4 menunjukkan pengaruh kedalaman muka air tanah dan aplikasi terak baja terhadap rerata berat tandan (RBT) kelapa sawit. Interaksi antara pengelolaan muka air tanah dengan perlakuan berbagai dosis terak baja tidak menunjukkan pengaruh nyata terhadap RBT. Perlakuan mandiri kedalaman muka air tanah berpengaruh nyata terhadap RBT, dimana perlakuan WLM-3 nyata menurunkan RBT

Tabel 3. Pengaruh pengelolaan kedalaman muka air tanah dan dosis terak baja terhadap produksi tandan buah segar (TBS)

Table 3. Effect of groundwater level management and steel slag doses on fresh fruit bunch (FFB) production

Pengelolaan Muka Air Tanah (cm)	Dosis Terak Baja (kg pohon <sup>-1</sup> )				Rerata
	0,00	3,15	6,51	9,86	
----- ton TBS ha <sup>-1</sup> tahun <sup>-1</sup> -----					
<b>Tahun 2014</b>					
WLM-1	19,92 <sup>abc</sup>	19,63 <sup>abc</sup>	21,16 <sup>a</sup>	20,89 <sup>ab</sup>	20,40 <sup>a</sup>
WLM-2	19,43 <sup>abc</sup>	19,54 <sup>abc</sup>	19,50 <sup>abc</sup>	20,82 <sup>ab</sup>	19,82 <sup>b</sup>
WLM-3	19,58 <sup>abc</sup>	17,29 <sup>c</sup>	18,99 <sup>abc</sup>	17,89 <sup>bc</sup>	18,44 <sup>c</sup>
<b>Rerata</b>	<b>19,65<sup>a</sup></b>	<b>18,82<sup>a</sup></b>	<b>19,89<sup>a</sup></b>	<b>19,87<sup>a</sup></b>	
<b>Tahun 2015</b>					
WLM-1	21,33 <sup>a</sup>	21,59 <sup>a</sup>	21,85 <sup>a</sup>	22,49 <sup>a</sup>	21,81 <sup>a</sup>
WLM-2	19,27 <sup>abc</sup>	18,93 <sup>abc</sup>	17,74 <sup>abc</sup>	19,58 <sup>ab</sup>	18,88 <sup>b</sup>
WLM-3	14,50 <sup>cd</sup>	12,72 <sup>d</sup>	14,64 <sup>bcd</sup>	12,64 <sup>d</sup>	13,62 <sup>c</sup>
<b>Rerata</b>	<b>18,37<sup>a</sup></b>	<b>17,75<sup>a</sup></b>	<b>18,08<sup>a</sup></b>	<b>18,24<sup>a</sup></b>	

Keterangan: LAI = Leaf Area Index; Nilai rerata yang diikuti oleh huruf yang sama pada kolom atau baris yang sama adalah tidak berbeda nyata pada taraf  $\alpha = 5\%$

kelapa sawit dibandingkan dengan perlakuan WLM-1 dan WLM-2. Perlakuan WLM-2 menghasilkan RBT tertinggi dan diikuti oleh WLM-1, sedangkan RBT terendah diperoleh pada WLM-3. Hal ini berarti bahwa penurunan kedalaman muka air tanah lebih dari 70 cm berpengaruh pada penurunan RBT kelapa sawit. Berat tandan kelapa sawit adalah komponen produksi yang dapat merespon adanya perubahan lingkungan dan pemupukan lebih cepat (kurang dari 6 bulan) dibandingkan komponen produksi yang lain (Corley dan Tinker 2003; Fairhurst dan Hardter 2003). Sementara itu, pengaruh mandiri aplikasi berbagai dosis terak baja tidak menunjukkan pengaruh yang nyata terhadap produksi TBS dan RBT. Peningkatan RBT diperoleh pada perlakuan aplikasi terak baja dosis 6,51 dan 9,86 kg pohon<sup>-1</sup>.

## KESIMPULAN

1. Perlakuan muka air tanah pada kisaran 35-75 cm di bawah permukaan tanah mampu menjaga kelembapan tanah aktual hingga lapisan atas tanah gambut, sedangkan penurunan kedalaman muka air tanah gambut hingga > 75 cm nyata

berpengaruh terhadap penurunan kelembapan tanah ke lapisan atas (0-10 cm). Emisi CO<sub>2</sub> adalah sebesar 37, 40, dan 45 ton ha<sup>-1</sup> tahun<sup>-1</sup> berturut-turut untuk kondisi muka air tanah pada 35-50 cm, 60-75 cm, dan >75 cm.

2. Penurunan muka air tanah hingga >75 cm nyata meningkatkan emisi CO<sub>2</sub> pada petak penelitian berkisar 11-18%, dibandingkan dengan perlakuan muka air tanah pada kisaran 35-75 cm. Aplikasi terak baja tidak nyata menurunkan emisi CO<sub>2</sub>. Kedalaman muka air tanah 35-75 cm nyata meningkatkan produksi TBS dibandingkan perlakuan muka air tanah >75 cm, yaitu sebesar 7-10% dan 36 – 60% berturut-turut untuk produksi tahun 2014 dan 2015. Aplikasi berbagai dosis terak baja tidak berpengaruh nyata terhadap produksi TBS, namun dapat meningkatkan rerata berat tandan.
3. Pengelolaan muka air tanah di lahan gambut yang terbaik dilakukan pada kisaran 35 – 50 cm yang mana mampu menjaga kelembapan tanah gambut hingga lapisan atas, menurunkan emisi CO<sub>2</sub>, serta meningkatkan pertumbuhan dan produksi kelapa sawit.

Tabel 4. Pengaruh pengelolaan kedalaman muka air tanah dan dosis terak baja terhadap rerata berat tandan  
Table 4. Effect of groundwater level management and steel slag doses on the average weight of bunches

Pengelolaan Muka Air Tanah (cm)	Dosis Terak Baja (kg pohon <sup>-1</sup> )				Rerata
	0,00	3,15	6,51	9,86	
----- (kg tandan <sup>-1</sup> ) -----					
<b>Tahun 2014</b>					
WLM-1	7,08 <sup>bc</sup>	7,13 <sup>bc</sup>	7,18 <sup>bc</sup>	7,09 <sup>bc</sup>	7,12 <sup>b</sup>
WLM-2	7,18 <sup>bc</sup>	7,22 <sup>abc</sup>	7,52 <sup>ab</sup>	7,72 <sup>a</sup>	7,41 <sup>a</sup>
WLM-3	6,88 <sup>c</sup>	6,71 <sup>c</sup>	6,89 <sup>c</sup>	6,79 <sup>c</sup>	6,82 <sup>c</sup>
<b>Rerata</b>	<b>7,05<sup>a</sup></b>	<b>7,02<sup>a</sup></b>	<b>7,20<sup>a</sup></b>	<b>7,20<sup>a</sup></b>	
<b>Tahun 2015</b>					
WLM-1	8,30 <sup>ab</sup>	8,32 <sup>ab</sup>	8,46 <sup>ab</sup>	8,28 <sup>ab</sup>	8,34 <sup>b</sup>
WLM-2	8,76 <sup>ab</sup>	8,33 <sup>ab</sup>	9,23 <sup>a</sup>	8,68 <sup>ab</sup>	8,75 <sup>a</sup>
WLM-3	7,67 <sup>b</sup>	7,81 <sup>b</sup>	7,78 <sup>b</sup>	7,77 <sup>b</sup>	7,76 <sup>c</sup>
<b>Rerata</b>	<b>8,24<sup>a</sup></b>	<b>8,15<sup>a</sup></b>	<b>8,49<sup>a</sup></b>	<b>8,24<sup>a</sup></b>	

Keterangan: LAI = Leaf Area Index; Nilai rerata yang diikuti oleh huruf yang sama pada kolom atau baris yang sama adalah tidak berbeda nyata pada taraf  $\alpha = 5\%$

## DAFTAR PUSTAKA

- Berglund, O. and K. Berglund. 2011. Influence of water table level and soil properties on emissions of greenhouse gases from cultivated peat soil. *Soil Biol. & Biochem.* 43(5): 923-931.
- Corley, R.H.V. and P.B. Tinker. 2003. *The Oil Palm*. Fourth edition. Blackwell Science, Malden.
- Dariah, A., S. Marwanto, and F. Agus. 2013. Root- and peat-based CO<sub>2</sub> emissions from oil palm plantations. *J. Mitig. Adapt Strateg Glob Change.* 19(6): 831-843.
- Fairhurst, T. and R. Hardter. 2003. *Oil Palm: Management for Large and Sustainable Yields*. Potash and Phosphate Institute, Singapore.
- Handayani, E.P. 2009. Emisi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan metan (CH<sub>4</sub>) pada perkebunan kelapa sawit di lahan gambut yang memiliki keragaman dalam ketebalan gambut dan umur tanaman. Disertasi. Institut Pertanian Bogor.
- Hasnol, O., A.T. Mohammed, M.H. Harun, F.M. Darus, and H. Mos. 2010. Best management practices for oil palm planting on peat: optimum ground water table. *MPOB Information Series*, Kuala Lumpur
- Hasnol, O., A.T. Mohammed, F.M. Darus, M.H. Harun, and M.P. Zambri. 2011. Best management practices for oil palm cultivation on peat: ground water table maintenance in relation to peat subsidence and estimation of CO<sub>2</sub> emissions at Sessang, Sarawak. *Journal of Oil Palm Research.* 23(April): 1078-1086.
- Hooijer, A., S. Page, J.G. Canadell, M. Silvius, J. Kwadijk, H. Wosten, and J. Jauhiainen. 2010. Current and future CO<sub>2</sub> emissions from drained peatlands in Southeast Asia. *Biogeosciences.* 7: 1505–1514.
- Hooijer, A., S. Page, J. Jauhiainen, W.A. Lee, X.X. Lu, A. Idris, and G. Anshari. 2012. Subsidence and carbon loss in drained tropical peatlands. *Biogeosciences.* 9:1053–1071.
- Husnain, H., I.G.P. Wigena, A. Dariah, S. Marwanto, P. Setyanto, and F. Agus. 2014. CO<sub>2</sub> emission from tropical drained peat in Sumatra, Indonesia. *J. Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change.* 19(6): 845-862.
- IAEA. 1993. *Manual on Measurement of Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agricultural*. Vienna (AT): International Atomic Energy Agency.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. Edited by T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, J. Baasansuren, M. Fukuda, and T.G. Troxler. IPCC: Switzerland.
- Kechavarzi, C., Q. Dawson, and M. Bartlett. 2010. The role of soil moisture, temperature and nutrient amendment on CO<sub>2</sub> fluxes from agricultural peat soil microcosm. *Geoderma.* 154(3-4): 203–210.
- Kurnain, A. 2008. Potensi air tersedia tanah gambut tropika bagi kebutuhan tanaman. *Kalimantan Scientiae.* 71(2): 39-46.
- Kurnia, U., F. Agus, A. Adimihardja, dan A. Dariah. 2006. *Sifat Fisik Tanah dan Metode Analisisnya*. Balai Besar Litbang Sumber Daya Lahan Pertanian, Bogor
- Lim, K.H., S.S. Lim, F. Parish, and R. Suharto. 2012. *RSPO Manual on Best Management Practices (BMPs) for Existing Oil Palm Cultivation on Peat*. RSPO, Kuala Lumpur
- Marwanto, S. and F. Agus. 2013. Is CO<sub>2</sub> flux from oil palm plantations on peatland controlled by soil moisture and/or soil and air temperatures? *Mitig Adapt Strateg Glob Change.* 19(6): 809-819.
- Michel, J.C. 2009. Influence of clay addition on physical properties and wettability of peat-growing media. *Hort. Science.* 44(6): 1694–1697.
- Sabiham, S., S.D. Tarigan, Hariyadi, I. Las, F. Agus, Sukarman, P. Setyanto, dan Wahyunto. 2012. Organic carbon storage and management strategies for reducing carbon emission from peatlands: a case study in oil palm plantations in West and Central Kalimantan, Indonesia. *Pedologist.* 55(3): 426-434.

- Sabiham, S., S. Marwanto, T. Watanabe, S. Funakawa, U. Sudadi, and F. Agus. 2014. Estimating the relative contributions of root respiration and peat decomposition to the total CO<sub>2</sub> flux from peat soil at an oil palm plantation in Sumatra, Indonesia. *Trop. Agr. and Develop.* 58(3): 87-93.
- Setyanto, P., H.L. Susilawati, S. Rahutomo, and L. Erningpraja. 2010. CO<sub>2</sub> emission from peat under oil palm plantation. In: *Proceeding of International Oil Palm Conference*, 1-3 June 2010. Yogyakarta, Indonesia. Indonesian Oil Palm Research Institute, Medan.
- Sollins, P., P. Homann, and B.A. Caldwell. 1996. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. *Geoderma.* 74(1): 65-105.
- Syarovy, M., H. Santoso, dan E. S. Sutarta. 2014. Pengukuran pertumbuhan tanaman kelapa sawit. Pusat Penelitian Kelapa Sawit. Publikasi Intern.
- Szajdak, L. and J. Szatylowicz. 2010. Impact of drainage on hidrofobicity of fen peat-moorsh soils. *Mires and Peat.* 6: 58-174.
- Verry, E.S., D.H. Boelter, J. Päivänen, D.S. Nichols, T. Malterer, and A. Gafni. 2011. Physical properties of organic soils, In: *Peatland Biogeochemistry and Watershed Hydrology.* Taylor and Francis, Boca Raton.

