

FAKTOR-FAKTOR LINGKUNGAN YANG MEMPENGARUHI EMISI CO₂ DI LAHAN GAMBUT TERBUKA



Dwi Astiani¹, Burhanuddin¹

¹Fakultas Kehutanan Universitas Tanjungpura

Email korespondensi: astiani.dwi@gmail.com

ABSTRAK

Hutan dan lahan gambut tropis merupakan sistem lahan basah yang peka terhadap perubahan tata air, terlebih-lebih lahan rawa gambut Ombrogen, di mana asupan air dan hara hanya bersumber dari curah hujan. Kawasan gambut tropis Kalimantan Barat seluas ~1,5 juta hektar merupakan lahan yang berpotensi untuk menjadi sumber emisi karena semakin meningkatnya degradasi, deforestasi, dan perubahan lahan dan hutan menjadi kawasan gambut terbuka dan turunnya tinggi muka air. Oleh karena itu, kajian terhadap kondisi tapak yang berpotensi terhadap peningkatan emisi CO₂ di lahan gambut diperlukan. Tujuan penelitian untuk mengkaji faktor-faktor kondisi tapak yang berpengaruh terhadap emisi CO₂ di lahan gambut tropis yang sudah terbuka Kalimantan Barat. Data yang diambil langsung di lapangan meliputi suhu, kelembapan tanah gambut, tinggi muka air gambut, kadar air gambut, kadar CO₂ tanah, kadar uap air (H₂O) pada saat pengukuran data emisi. Hasil pengukuran respirasi CO₂ sebelumnya dari penelitian yang berbeda, rerata respirasi CO₂ di kawasan gambut terbuka berkisar antara 0 s/d 24,8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ detik}^{-1}$. Faktor-faktor tapak yang mempengaruhi laju respirasi di lahan gambut adalah faktor tinggi muka air, uap air, kelembapan relatif, dan suhu. Namun dari multilinier regresi antar semua faktor tapak faktor tinggi muka air dan kelembapan tanah secara signifikan sangat berperan terhadap respirasi CO₂. Penurunan emisi/respirasi CO₂ di lahan gambut dapat dilakukan dengan menjaga dan mengatur keseimbangan faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhinya, terutama tinggi muka air gambut.

Keywords: faktor tapak, gambut tropis, respirasi CO₂, tinggi muka air

PENDAHULUAN

Hutan rawa gambut tropis merupakan sistem lahan basah yang peka terhadap perubahan tata air, terlebih-lebih pada hutan rawa gambut Ombrogen, dimana asupan air dan hara hanya bersumber dari curah hujan. Tren perubahan iklim pada lahan gambut yang mengakibatkan berkurangnya curah hujan harus diantisipasi terutama melalui modifikasi rezim hidrologi (Erwin, 2009). Dampak penting dari pemanasan global pada ekosistem lahan basah adalah jumlah curah hujan dan perubahan suhu. Peningkatan suhu dapat mempercepat berkurangnya kadar air di tanah gambut, terutama tanah gambut terbuka akibat perubahan hutan rawa gambut ke penggunaan lain.

Pemanasan global dapat juga meningkatkan frekuensi dan intensitas gejala *El Niño* (gejala perubahan iklim terjadi intensitas curah hujan <100 mm perbulan selama paling sedikit 3 bulan lamanya). Kondisi beberapa bulan kering mempengaruhi kondisi fisik terutama kadar air dan proses-proses pada tumbuhan dan mikrobiologi tanah, termasuk emisi CO₂ dari tanah (Sowerby, 2008). Gejala *El Niño* menciptakan berkurangnya suplai air di hutan

rawa gambut. Kondisi hidrologi menentukan tingkat respirasi gas-gas tersebut dari tanah (Chimner & Ewel, 2004). Turunnya tinggi muka air mengakibatkan kekeringan lahan gambut yang selanjutnya meningkatnya tingkat respirasi tanah (Silvola *et al.*, 1996; Chimner & Cooper, 2003) karena meningkatnya ketersediaan oksigen yang bergerak ke arah gambut yang tidak jenuh di mana lebih tersedia transportasi oksigen yang lebih aktif dan meningkatnya respirasi aerobik. Beberapa penelitian menunjukkan pengaruh dari faktor-faktor yang berbeda pada fluktuasi emisi CO₂ dari lahan gambut (Astiani, 2014; Astiani *et al.*, 2015)

Lahan gambut tropis Kalimantan Barat seluas ~1,74 juta hektare merupakan lahan yang berpotensi untuk menjadi sumber emisi karena semakin meningkatnya degradasi, deforestasi, dan perubahan lahan dan hutan menjadi kawasan gambut terbuka dan turunnya tinggi muka air. Oleh karena itu diperlukan kajian lebih lanjut terhadap kondisi tapak yang berpotensi terhadap peningkatan emisi CO₂ di lahan gambut.

Pembukaan hutan gambut di Kalimantan Barat untuk keperluan pertanian skala kecil maupun perkebunan komersil, dilakukan

pembangunan jaringan drainase untuk mengeringkan lapisan atas gambut agar dapat menumbuhkan komoditi yang diinginkan. Namun, perubahan kondisi hidrologi pada lahan gambut juga mempengaruhi kondisi karakteristik lahan. Perubahan kondisi tapak pada lahan gambut tersebut dapat berpengaruh terhadap peningkatan emisi CO₂ dari lahan gambut. Terlebih-lebih adanya tren variasi iklim yang tidak menentu belakangan ini semakin sering terjadi.

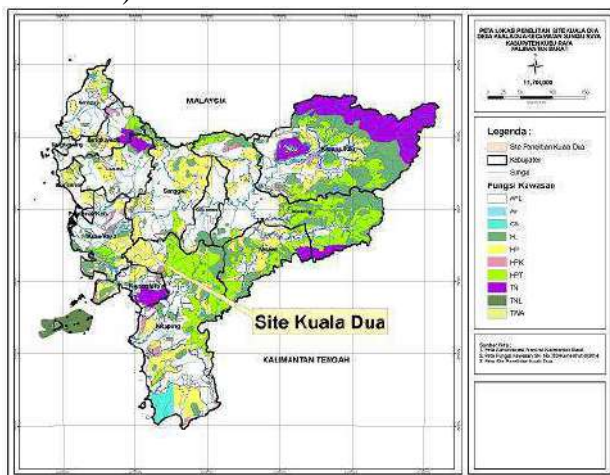
Faktor-faktor lingkungan yang berubah dapat merangsang kegiatan pelapukan gambut yang berdampak pada meningkatnya emisi CO₂. Namun belum diketahui faktor kondisi tapak apa saja yang berpengaruh terhadap emisi CO₂ di lahan gambut. Faktor kondisi tapak tersebut perlu dikaji, sehingga dapat dilakukan upaya untuk menurunkan emisi CO₂.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui faktor-faktor kondisi tapak yang berpengaruh terhadap emisi CO₂ di lahan gambut tropis Kalimantan Barat. Penelitian berkontribusi pada pengelolaan kawasan gambut sebagai informasi dasar untuk mengurangi emisi karbon pada permukaan lahan gambut.

METODOLOGI METODE PENELITIAN

A. Tempat dan Waktu Penelitian

Pengukuran dilakukan di areal lahan gambut terbuka di Desa Kuala Dua Kabupaten Kubu Raya (Gambar 1).



Gambar 1: Peta lokasi penelitian

B. Bahan dan Alat

Bahan-bahan yang digunakan adalah lahan gambut terbuka bekas terbakar 3-4 tahun lalu yang didominasi oleh tutupan suksesi sekunder berupa

pakis dan tumbuhan semak lain seluas 3-6 ha. Alat-alat yang digunakan adalah alat ukur emisi dari penelitian Dikti (Licor 8100). Alat ukur suhu dan kelembapan yang bisa terhubung dan diukur dengan alat Licor tersebut, termometer dan pengukur suhu udara, penggaris untuk mengukur tinggi muka air, dan bor untuk pengambilan contoh tanah tidak terganggu.

C. Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan berupa data yang diukur langsung di lapang meliputi suhu, kelembapan tanah gambut, tinggi muka air gambut, kadar air gambut, kadar CO₂ tanah, kadar uap air (H₂O) pada saat pengukuran data emisi.

D. Pelaksanaan Penelitian

1. Pengukuran Emisi

Emisi CO₂ diukur dengan alat *Li-Cor 8100 Automated Soil CO₂ flux system* using 20 cm diameter fixed sipada tapak yang tetap dan berulang di atas kolar tanah PVC (IRGA, Li-Cor 8100, Li-Cor Inc., Lincoln, Nebraska 68504, USA). Kolar tanah tadi dibenamkan sekitar 10 cm ke dalam tanah dan 2 cm di atas permukaan tanah. dan kemudian dihubungkan dengan *Li-Cor 8100-102 soil flux Survey Chamber*. Pengukuran emisi CO₂ dilakukan setiap minggu selama 2.5 bulan selama (10 minggu) dengan mempertimbangkan emisi rerata emisi setiap harinya. Dari pengalaman mengukur emisi, rerata harian emisi di lahan gsmbut tropis ini dapat diwakili oleh dua kali pengukuran, yaitu pengukuran minimum (6:00 - 8:00) dan maximum (12:00 - 14:00) setiap harinya.

2. Pengukuran Faktor kondisi tapak

Pada saat pengukuran emisi CO₂ di lapangan, dengan alat Licor 8100, dilakukan pengukuran kadar air tanah, suhu tanah, dan kelembapan tanah, kadar CO₂ tanah, tinggi muka air, kondisi uap air di permukaan gambut.



Gambar 2: Kegiatan pengukuran faktor lingkungan di lahan gambut terbuka berupa: a) pengukuran emisi dan faktor lingkungan yang mempengaruhi, b) pengukuran tinggi muka air melalui pezometer, c) soil collar tempat pengukuran kadar CO₂, kelembapan relatif tanah, CO₂ dan suhu gambut, dan d) piezometer

E. Analisis Data

Hasil pengukuran faktor-faktor tapak yang mempengaruhi emisi akan dipresentasikan dalam bentuk rerata harian dan simpangan baku,

sedangkan presentasi besaran dikonversi ke rerata per tahun. Hasil dari setiap faktor diuji regresi dan korelasi hubungannya dengan besaran emisi CO₂.

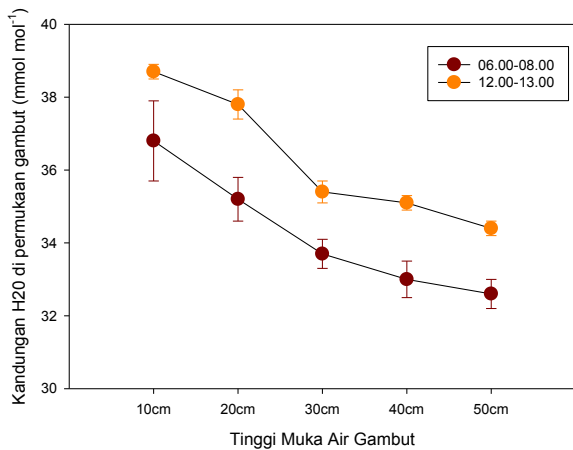
HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari pengukuran respirasi CO₂ untuk penelitian yang berbeda hasil rerata respirasi CO₂ di kawasan gambut terbuka desa Kuala Dua sebesar 6,4 umol m⁻² detik⁻¹ dengan nilai dari 0 s/d 24,8 umol m⁻² detik⁻¹. Hasil riset tersebut menunjukkan bahwa tinggi muka air gambut berpengaruh sangat nyata ($p = < 0,001$) terhadap besaran emisi dari lahan gambut. Meski dalam skala kecil seperti di kawasan gambut Kalimantan Barat dan pada pertukaran CO₂ secara umum, variasi dari pertukaran tersebut lebih kurang dapat diinterpretasikan dengan faktor-faktor lingkungan (seperti Belasario *et al.* 1999; Moore *et al.* 1994; Shannon and White, 1994). Perubahan frekuensi dan intensitas event cuaca, seperti penurunan tinggi muka air setempat pada musim kering dapat berpengaruh signifikan pada emisi karbon. Telah dibuktikan oleh Aerts dan Ludwig (1997) bahwa perubahan tinggi muka air meningkatkan laju tinggi komposisi 1,5-3 kali lipat. Namun, studi yang lain menunjukkan perubahan kecil pada fluktuasi tinggi muka air hanya menunjukkan sedikit perubahan pada laju respirasi tanah (Chimner, 2004).

Beberapa faktor lingkungan yang pada saat pengukuran emisi di lahan terbuka di lahan gambut terbuka desa Kuala Dua disajikan sebagai berikut.

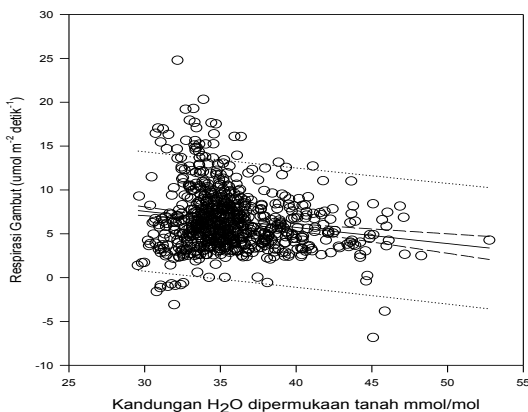
A. Kandungan Uap Air Tanah (H₂O)

Rerata kandungan uap air gambut disajikan pada Gambar 2. Kandungan uap air rerata di lahan gambut ini $35,7 \pm 0,1$ mmol mol⁻¹. Kejenuhan uap air di permukaan gambut dipengaruhi oleh faktor lingkungan lain dipermukaan gambut, terutama tinggi muka air gambut dan suhu tanah. Gambar 2 menunjukkan bahwa kandungan uap air di permukaan bervariasi diberbagai jeluk muka air, dan kondisi tersebut berbeda pada siang dan pagi harinya. Perbedaan kondisi pagi dan siang hari terutama perbedaan suhunya berperan penting pada kandungan air di permukaan gambut.



Gambar 3: Gambar Kandungaan uap air (H₂O) pada permukaan tanah diberbagai level muka air

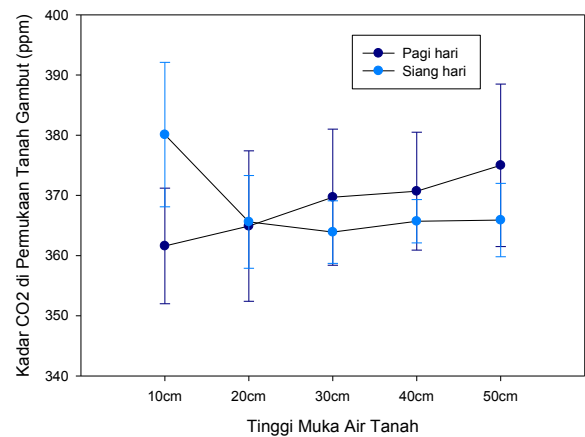
Kadar uap air tanah berpengaruh sangat nyata ($p = <0,001$) terhadap respirasi gambut (Gambar 3). Meningkatnya kandungaan uap air yang berkisar antara 25,6 -52,8 mmol mol⁻¹ berpengaruh menurunkan emisi CO₂ di lahan gambut.



Gambar 4: Regresi kandungaan uap air tanah terhadap respirasi CO₂ dari lahan gambut

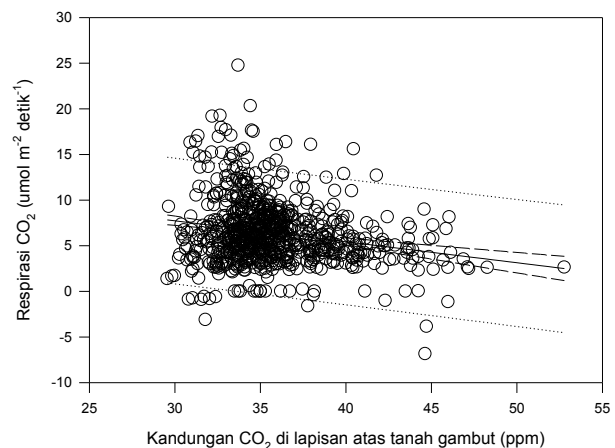
B. Kandungaan CO₂ di lapisan tanah bagian atas

Di lahan gambut terbuka, kadar CO₂ relatif stabil dan hampir sama diberbagai tinggi muka air kecuali pada kondisi air 10 cm di bawah permukaan gambut kondisinya lebih tinggi pada siang hari. Namun kandungaan CO₂ di permukaan lahan gambut sebaliknya, kecenderungannya lebih meningkat pada kondisi tanah yang lebih kering.



Gambar 5: Kadar CO₂ di lapisan atas tanah gambut di berbagai tinggi muka air gambut

Analisis regresi antara kadar CO₂ di permukaan gambut sebelum pengukuran respirasinya, berpengaruh sangat nyata mempengaruhi respirasi CO₂ dari lahan gambut.

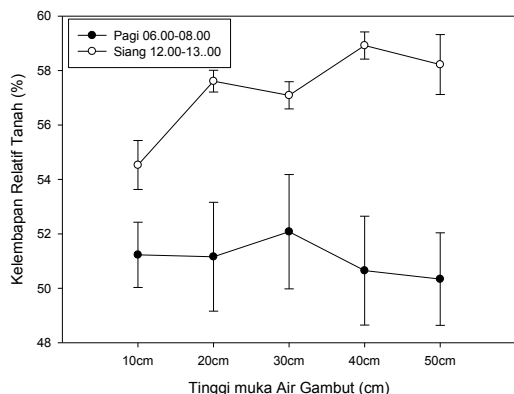


Gambar 6: Kadar Karbondioksida di lapisan atas tanah di lahan gambut

C. Kelembapan tanah gambut

Terdapat perbedaan magnitude dari kelembapan tanah gambut pada pagi hari dibanding kondisinya pada siang hari. Pada pagi hari kondisi kelembapan tanah gambut cenderung seragam namun agak sedikit menurun tetapi tidak berbeda, sedangkan pada siang hari cenderung meningkat dengan bertambahnya tinggi muka air gambut. Fenomena alam ini dimungkinkan, karena pada gambut terbuka, suhu pada siang hari cenderung meningkat dan pergerakan difusi uap air bergerak lebih tinggi ketempat yang lebih kering (karena tinggi muka air yang dalam) sehingga pengukuran kelembapan di permukaan gambut menjadi lebih tinggi, sedangkan pada pagi

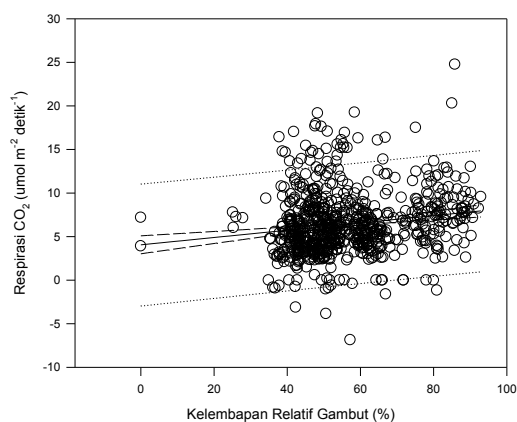
hari kecepatan pergerakan tidak dipengaruhi oleh suhu tanah.



Gambar 7: Kondisi kelembapan rerata permukaan tanah gambut di berbagai tinggi muka air lahan gambut

Hubungan regresi antara kelembapan relatif tanah dengan laju respirasi disajikan pada Gambar 8. Peningkatan kelembapan relatif gambut sangat nyata ($p < 0,001$) meningkatkan respirasi CO_2 dari lahan gambut. Kondisi laju pergerakan uap air sangat berpengaruh pada siang hari, sehingga dapat diasumsikan bawa emisi di lahan gambut terjadi peningkatan bila tinggi muka air lebih jauh dari permukaan gambut, terutama pada siang hari.

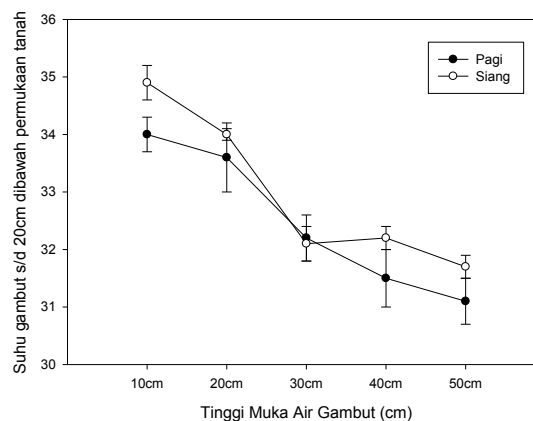
Kelembapan tanah di permukaan lahan gambut cenderung meningkat dengan naiknya suhu tanah pada siang hari dan juga pergerakan difusi uap air diatas permukaan tanah karena faktor alam lainnya. Hasil analisis menunjukkan rerata peningkatan kelembapan $\sim 7\%$ pada siang hari dibanding pagi harinya.



Gambar 8: Hubungan regresi antara kelembapan relatif tanah dan respirasi CO_2 di lahan gambut

D. Suhu tanah di Lahan Gambut

Kondisi suhu tanah cenderung menurun bila tinggi muka air tanah lebih dalam. Penurunan suhu pada kedalaman air 50 cm dibanding kedalaman 10 cm rerata $\sim 3^{\circ}C$ baik pada pagi maupun siang hari. Gambut jenuh air tersebut cenderung mengantarkan panas lebih cepat dan menyimpannya, sehingga gambut yang lebih basah suhunya lebih panas.



Gambar 9: Sebaran suhu tanah diberbagai kedalaman tinggi muka air di lahan gambut terbuka

Peningkatan suhu menyebabkan naiknya laju respirasi dari suhu $15-20^{\circ}C$ seperti yang dikemukakan oleh Davidson dan Janssens (2006). Kenaikan suhu sampai pada batas tertentu meningkatkan laju respirasi di tanah. Namun diatas suhu rerata maksimum terjadi sebaliknya. Analisis regresi hubungan suhu permukaan tanah dengan respirasi CO_2 di lahan gambut menunjukkan hubungan polinomial order kedua, yang ditunjukkan R^2 yang lebih tinggi dari regresi linearnya. Persamaan regresinya :

$Emisi = 2,406 + (0,395 * Suhu) - (0,00819 * Suhu^2, p = < 0,001)$ di mana sampai pada titik suhu tertentu hasilnya sudah menurun dari titik maksimumnya. Hasil ini tidak seperti yang terjadi di kawasan beriklim sedang, dimana pada suhu $32,2^{\circ}C$ terjadi penurunan nilai respirasi CO_2 . Di kawasan gambut tropis ini Peningkatan suhu sampai $48,8^{\circ}C$ baru menurunkan emisi di titik terendahnya.

Beberapa riset sebelumnya juga telah mengkaji perubahan yang merespon terhadap curah hujan (Fay *et al.*, 2000; Jensen *et al.*, 2003; Davidson *et al.*, 2004; Borken *et al.*, 2006). Schulze dan Freibauer (2005) menekankan bahwa dekomposisi terjadi tidak melulu karena pengaruh suhu, tetapi kombinasi antara suhu tinggi dan

kekeringan. Selaras dengan hasil riset ini pada pengaruh faktor lingkungan terhadap respirasi karbon dari lahan gambut, Ciaisi *et al.* (2005) mengemukakan bahwa kombinasi antara suhu dan kekeringan menunjukkan pengaruh fiksasi dan penguraian karbon.

E. Korelasi dan Multilinear Regresi antar faktor lingkungan yang Mempengaruhi Respirasi CO₂ di Lahan Gambut

Analisis korelasi antar faktor dan multilinear regresinya dilakukan karena semua pengaruh lingkungan secara bersama-sama mempengaruhi laju respirasi karbon dioksida di lahan gambut. Hubungan keeratan antar faktor yang mempengaruhi disajikan pada Tabel 1 dan Gambar 9.

Tabel 1: Tabel nilai korelasi antar faktor

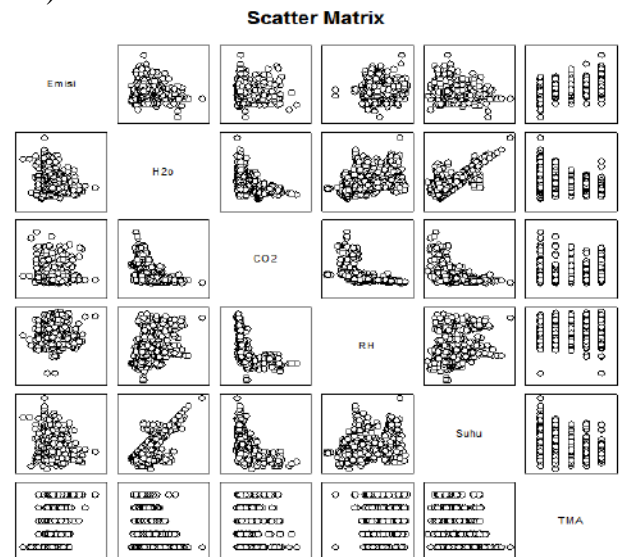
Faktor		H ₂ O	CO ₂	RH	Suhu	TMA
Emisi	Koefisien	-0,211	0,0479	0,167	-0,174	0,537
	Nilai P	<0,001	0,192	<0,001	<0,001	<0,001
H ₂ O	Koefisien		-0,319	0,357	0,758	-0,464
	Nilai P		<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
CO ₂	Koefisien			-0,528	-0,389	0,0577
	Nilai P			<0,001	<0,001	0,116
RH	Koefisien				0,332	0,0324
	Nilai P				<0,001	0,377
Suhu	Koefisien					-0,363
	Nilai P					<0,001

Pada Tabel 1, faktor tinggi muka air menunjukkan koefisien yang tinggi dan sangat mempengaruhi emisi CO₂ dari lahan gambut, meskipun faktor-faktor lingkungan lain berpengaruh sangat nyata namun kontribusinya kecil. Beberapa faktor tapak saling mempengaruhi seperti faktor kadar uap air dan suhu tanah, dimana kenaikan suhu dapat meningkatkan kadar uap air di permukaan tanah. Demikian pula dengan hubungan antara kadar CO₂ dan dan persen kelembapan tanah.

Multilinear regresi antar semua faktor yang diukur menunjukkan bahwa faktor tinggi muka air dan kelembapan relatif lebih berpotensi dan nyata terhadap besaran respirasi dari lahan gambut ($R^2 =$

0,60. $p < 0.05$). Hal ini terjadi karena salah satu faktor tapak dapat mempengaruhi faktor lainnya.

Dari hasil uji regresi, faktor tapak yang sangat nyata berpengaruh secara sendiri ataupun bersama faktor lainnya adalah faktor tinggi muka air tanah gambut. Prediksi perubahan iklim saat ini akan mengubah pola curah hujan di kawasan equator di Indonesia (IPCC 2001; Li *et al.* 2007). Perubahan pada pola curah hujan tersebut akan sangat berpengaruh pada ekosistem rawa gambut karena pola curah hujan merupakan faktor yang sangat dominan mengontrol proses-proses di ekosistemnya termasuk *net primary production* (Churkina & Running, 1998; Knapp & Smith, 2001) dan pertukaran/perpindahan karbon dioksida dari lahan gambut, baik di lahan yang ditutupi hutan, tanaman hortikultura, maupun gambut terbuka (Astiani *et al.*, 2015; Astiani, 2014).



Gambar 10: Korelasi antar faktor tapak yang diukur

Berbeda dengan kondisi tanah mineral yang sangat baik menunjang proses dekomposisi sehingga kerapatan karbonnya rendah, pada lahan dan hutan rawa gambut di mana kondisi anaerobik sering terjadi, proses dekomposisi terjadi lebih lambat. Namun, musim kering yang panjang dapat mengakibatkan berubahnya pola dekomposisi karbon di lahan gambut. Selain itu pembuatan kanal-kanal/saluran-saluran di lahan gambut yang umumnya digunakan menurunkan tinggi muka air demi produktivitas dan pertumbuhan tanaman yang diinginkan, dapat menjadi penyebab meningkatnya proses dekomposisi bahan organik. Terlebih-lebih lagi

kanal yang tidak dilengkapi pintu kontrol air yang memadai menyebabkan lari/lepasnya air dari lapisan gambut sehingga gambut menjadi kering dan mudah terbakar serta meningkatnya proses dekomposisi gambut.

Beberapa penelitian yang mengukur flux dari karbon pada tanah yang disebabkan oleh perubahan iklim (Bellamy *et al.*, 2005; Knorr *et al.*, 2005). Penelitian-penelitian tersebut fokusnya terutama mengukur tentang respon flux karbon terhadap suhu terutama di kawasan beriklim sedang (Giardina & Ryan, 2000; Davidson & Janssens, 2006). Hasil riset ini menunjukkan respon lingkungan yang lebih bervariasi di kawasan tropis menyebabkan fluktuasi dan respirasi dari lahan gambutnya lebih besar.

KESIMPULAN

Faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhi laju respirasi di lahan gambut adalah faktor tinggi muka air, uap air, kelembapan relatif, dan suhu. Namun, dari multilinier regresi antar semua faktor tapak faktor tinggi muka air dan kelembapan tanah secara signifikan sangat berperan terhadap respirasi CO₂. Dari hasil ini, beberapa kondisi lingkungan yang menunjang penurunan tinggi muka air di gambut seperti tingginya evaporasi yang berhubungan dengan naiknya suhu di lahan gambut terbuka, menyebabkan tingginya kelembapan tanah gambut dan aktivitas perubahan tutup lahan dengan membangun saluran air yang berdampak pada turunnya tinggi muka air dihindari aktivitasnya.

Penurunan emisi/respirasi CO₂ di lahan gambut dapat dilakukan dengan menjaga dan mengatur keseimbangan faktor-faktor lingkungan yang mempengaruhinya, terutama tinggi muka air gambut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kami sampaikan kepada Fakultas Kehutanan Universitas Tanjungpura yang telah memberikan dukungan dana melalui dana PNB (DIPA) Fakultas Kehutanan UNTAN TA 2016.

DAFTAR PUSTAKA

Alue Dohong. (2003). Pemanfaatan Lahan Gambut untuk Kegiatan Pertanian Holtikultura: Belajar dari Pengalaman Petani Desa Kalamangan, Kalimantan

Tengah. Wetlands International - Indonesia Programme. *Warta Konservasi Lahan Basah* 11, 2.

Astiani D. (2014). Bornean Peatlands: Forest Dynamics, Land Use and Carbon Flux. PhD Dissertation. Yale University, New Haven, USA.

Astiani D, Mujiman, Hatta M, Hanisah, Fifian F. (2015). Soil CO₂ Respiration along Annual Crops or Land Cover Type Gradients on West Kalimantan Degraded Peatland. *Procedia Environmental Science Elsevier* 28: 231-242.

Bellamy PH, Loveland PJ, Bradley RI, Lark MR, Kirk GJD (2005). Carbon losses from all soils across England and Wales 1978–2003. *Nature*, 437, 245–248.

Bellisario LM, Bubier JR, Moore TR. (1999). Control of CH₄ emissions from northern peatland. *Global Biogeochemical Cycles*, 13, 1, 81-91

Borken W, Savage K, Davidson EA, Trumbore SE. (2006). Effects of experimental drought on soil respiration and radiocarbon efflux from a temperate forest soil. *Global Change Biology*, 12, 177–193.

Chimner RA, Ewel KC. (2004). Differences in carbon fluxes between forested and cultivated Micronesian tropical peatlands. *Wetland Ecology and Management*, 12, 5, 419-427.

Churkina G, Running SW. (1998). Contrasting Climatic Controls on the Estimated Productivity of Global Terrestrial Biomes. *Ecosystems* 1, 206–215.

Ciais PH, Reichstein M, Viovy N. (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437, 529–533.

Davidson EA, Ishida FY, Nepstad DC. (2004). Effects of experimental drought on soil emissions of carbon dioxide,

- methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest. *Global Change Biology*, 10, 718–730.
- Davidson EA, Janssens A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature* 440, 165-173.
- Fay PA, Carlisle JD, Knapp AK, Blair JM, Collins SL. (2000). Altering rainfall timing and quantity in a mesic grassland ecosystem: design and performance of rainfall manipulation shelters. *Ecosystems* 3, 308–319.
- Giardina CP, Ryan MG. (2000). Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature. *Nature*, 404, 858–861.
- Jensen K, Beier C, Michelsen A et al. (2003). Effects of experimental drought on microbial processes in two temperate heathlands at contrasting water conditions. *Applied Soil Ecology*, 24, 165–176.
- Knapp AK, Smith MD. (2001). Variation Among Biomes in Temporal Dynamics of Aboveground Primary Production *Science* 291, 5503, 481 – 484.
- Knorr W, Prentice IC, House JI, Holland EA. (2005). Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature* 433, 298–301.
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001: Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Li WH, Dickinson RE, Fu R, Niu GY, Yang ZL, Canadel JG. (2007). Future precipitation change and their implication for tropical peatlands. *Geophysical Research Letter*, 34, 1-6.
- Moore T. R. (1994). Trace gas emissions from Canadian peatlands and the effect of climatic change. *Wetlands*, 14, 223-228
- Schulze D, Freibauer A. (2005). Carbon unlocked from soils. *Nature*, 437, 205–206
- Shannon RD, White JR. (1996). The effects of spatial and temporal variations in acetate and sulfate on methane cycling in two Michigan peatlands. *Limnology and Oceanography*, 41(3), 435-443.
- Wahyunto S. (2003). Sebaran Gambut dan Kandungan Karbon Pulau Sumatera (Peat Distributions and Carbon Contents of Sumatera Island). Puslitbangtanak. CCFPI – WI-IP – WHC – CIDA. Bogor.