

Pengukuran Emisi CO₂ dan CH₄ pada Tiga Jenis Pohon Asli Hutan Rawa Gambut Sekunder

Eko Yuono¹, Gusti Z. Anshari², dan Nisa Novita³

¹Program Pascasarjana Magister Ilmu Lingkungan, Universitas Tanjungpura, Pontianak, Indonesia; e-mail: gzanshari@live.untan.ac.id; onoeko27@gmail.com

²Fakultas Pertanian, Universitas Tanjungpura, Pontianak Indonesia

³Yayasan Konservasi Alam Nusantara

ABSTRAK

Pohon di hutan rawa gambut berperan penting dalam siklus karbon sebagai penyerap sekaligus pelepas karbon. Namun, emisi gas rumah kaca dari batang pohon masih jarang diteliti. Penelitian ini bertujuan mengukur emisi CO₂ dan CH₄ dari batang tiga jenis pohon dominan di hutan rawa gambut sekunder serta menganalisis pengaruh jenis pohon, kelas diameter, posisi sungkup, dan waktu pengamatan terhadap besarnya emisi. Penelitian dilakukan di hutan rawa gambut sekunder Desa Anjungan Dalam, Kabupaten Mempawah, Kalimantan Barat. Sebanyak 27 pohon yang mewakili *Gymnostoma nobile*, *Pentace borneensis*, dan *Syzygium napiforme* diamati pada tiga kelas diameter (10–15 cm, 15–20 cm, dan 20–25 cm). Emisi batang diukur menggunakan LI-COR 7810 dengan metode sungkup tertutup pada ketinggian 65 cm dan 130 cm selama empat minggu. Data dianalisis menggunakan General Linear Model, ANOVA, dan uji Tukey. Hasil penelitian menunjukkan bahwa emisi CO₂ dan CH₄ dari batang pohon dipengaruhi oleh berbagai faktor. *Gymnostoma nobile* menghasilkan emisi CO₂ tertinggi, sedangkan *S. napiforme* menghasilkan emisi CH₄ tertinggi. Pohon berdiameter besar umumnya menghasilkan emisi CO₂ lebih tinggi dibandingkan pohon berdiameter kecil, sementara emisi CH₄ tertinggi ditemukan pada *S. napiforme* berdiameter besar. Posisi sungkup berpengaruh nyata terhadap emisi CO₂, tetapi tidak terhadap CH₄. Suhu tidak berpengaruh nyata terhadap kedua gas, sedangkan kelembapan relatif berpengaruh terhadap emisi CH₄ dan tekanan udara berpengaruh terhadap emisi CO₂ maupun CH₄. Temuan ini menunjukkan bahwa vegetasi hutan rawa gambut secara alami melepaskan CO₂ dan CH₄ sehingga berkontribusi terhadap dinamika karbon ekosistem.

Kata kunci: emisi batang, CO₂, CH₄, hutan rawa gambut, jenis, sungkup

ABSTRACT

Peat swamp forest trees play an important role in the carbon cycle by acting as both carbon sinks and sources. However, greenhouse gas emissions from tree stems remain poorly studied. This study aimed to quantify CO₂ and CH₄ emissions from the stems of three dominant tree species in a secondary peat swamp forest and to examine the effects of tree species, diameter class, chamber position, and observation time on emission rates. The study was conducted in a secondary peat swamp forest in Anjungan Dalam Village, Mempawah Regency, West Kalimantan, Indonesia. A total of 27 trees representing three dominant species—*Gymnostoma nobile*, *Pentace borneensis*, and *Syzygium napiforme*—were sampled across three diameter classes (10–15 cm, 15–20 cm, and 20–25 cm). Stem gas emissions were measured using a LI-COR 7810 with a closed-chamber method at heights of 65 cm and 130 cm above the ground over a four-week period. Data were analyzed using the General Linear Model (GLM), analysis of variance (ANOVA), and Tukey's post hoc test. The results showed that stem CO₂ and CH₄ emissions were influenced by multiple factors. *Gymnostoma nobile* exhibited the highest CO₂ emissions, whereas *S. napiforme* produced the highest CH₄ emissions. In general, larger-diameter trees emitted more CO₂ than smaller trees, while the highest CH₄ emissions were recorded in large-diameter *S. napiforme*. Chamber position significantly affected CO₂ emissions but had no significant effect on CH₄ emissions. Temperature had no significant effect on either gas, whereas relative humidity significantly affected CH₄ emissions, and atmospheric pressure significantly influenced both CO₂ and CH₄ emissions. These findings indicate that peat swamp forest vegetation naturally releases CO₂ and CH₄, thereby contributing to ecosystem carbon dynamics.

Keywords: stem emission, CO₂, CH₄, peat swamp forest, tree species, chamber

Citation: Yuono, E., Anshari, G. Z., dan Novita, N. (2026). Pengukuran Emisi CO₂ dan CH₄ pada Tiga Jenis Pohon Asli Hutan Rawa Gambut Sekunder. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(2), 441-450, doi:10.14710/jil.24.2.441-450

1. PENDAHULUAN

Hutan rawa gambut merupakan salah satu ekosistem yang paling unik dan penting dalam

menyimpan Karbon dioksida (CO₂) secara global. Ekosistem ini memiliki kemampuan untuk menyerap dan menyimpan CO₂ dalam jumlah yang sangat besar,

baik di atas maupun di bawah permukaan tanah. Di atas tanah, tegakan pohon yang tumbuh di hutan rawa gambut mampu menyerap Gas Rumah Kaca (GRK), terutama CO₂, melalui proses fotosintesis. CO₂ ini disimpan dalam jaringan tanaman seperti batang, daun, dan akar.

Keunikan dari hutan rawa gambut tidak hanya terletak pada vegetasinya, tetapi juga pada tanah gambut itu sendiri. Tanah gambut terbentuk dari akumulasi bahan organik seperti daun, ranting, dan akar yang terurai sangat lambat karena kondisi lingkungan yang jenuh air dan rendah oksigen. Proses pelapukan yang lambat ini menyebabkan penumpukan bahan organik, sehingga mampu menyimpan CO₂ dalam jumlah besar. Rata-rata simpanan CO₂ hutan rawa gambut sekunder adalah sekitar 533 Mg C/ha (Novita, 2016; Basuki, 2017).

Hutan primer rawa gambut merupakan ekosistem gambut yang masih utuh tanpa ada aktivitas manusia, memiliki kemampuan menyimpan CO₂ jauh lebih besar dibandingkan dengan hutan rawa gambut sekunder yakni sebesar 4.234 Mg C/ha (Basuki, 2017; Novita, 2016). Hal ini disebabkan oleh tegakan pohon yang lebih besar dan lebih tua, serta lapisan gambut yang lebih tebal dan terpelihara dengan baik. Dengan demikian, hutan primer rawa gambut dapat dianggap sebagai salah satu penyimpan CO₂ terpenting di dunia, yang sangat berperan dalam mengurangi dampak perubahan iklim.

Dalam konteks siklus karbon, hutan rawa gambut berperan ganda, yakni sebagai penyerap sekaligus sumber emisi gas rumah kaca (GRK). Pada sisi penyimpanan, karbon tersimpan dalam dua kompartemen utama; di atas permukaan (*aboveground*), dan di bawah permukaan (*belowground*) yang merupakan ruang penyimpanan terbesar dibandingkan biomassa pohon (Murdiyarso et al., 2010). Namun disisi lain ekosistem ini juga melepaskan CO₂ dan CH₄ ke atmosfer dalam bentuk (GRK). Emisi tersebut dapat terjadi melalui proses alami seperti respirasi akar, dekomposisi bahan organik, serta proses anaerobik di dalam tanah, maupun gangguan eksternal seperti pembuatan kanal, kebakaran, dan pembukaan lahan (Kristell Anaik Hergoualc'h & Louis Vincent Verchot, 2012). Dengan demikian, keberadaan hutan rawa gambut memiliki implikasi penting dalam neraca karbon regional maupun global.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa vegetasi, khususnya batang pohon dapat berperan sebagai jalur keluarnya GRK dari tanah ke atmosfer (Pangala et al., 2013, 2017). Mekanisme ini terjadi melalui difusi dan transportasi gas dari dalam tanah jenuh air yang kemudian dilepaskan melalui jaringan batang pohon. Temuan ini memperluas pemahaman bahwa pohon tidak hanya berfungsi sebagai penyimpan karbon dalam bentuk biomassa, tetapi juga berpotensi sebagai sumber emisi CO₂ dan CH₄.

Kajian emisi GRK yang berasal dari batang pohon di hutan rawa gambut, khususnya di Indonesia, masih sangat terbatas. Sebagian besar penelitian masih

berfokus pada emisi tanah dan kehilangan cadangan karbon akibat perubahan penggunaan lahan (Taufik et al., 2019). Padahal, memahami kontribusi emisi dari batang pohon sangat penting untuk menyusun estimasi neraca karbon yang lebih akurat pada tingkat ekosistem. Hal ini menjadi semakin relevan pada hutan rawa gambut sekunder yang kini mendominasi akibat degradasi, dimana dinamika ekosistem dan proses pelepasan karbon bisa berbeda dengan hutan primer.

Oleh karena itu, penelitian mengenai emisi CO₂ dan CH₄ dari batang pohon di hutan rawa gambut sekunder perlu dilakukan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya basis pengetahuan ilmiah tentang peran pohon dalam siklus karbon pada ekosistem gambut tropis, sekaligus memberikan dasar ilmiah untuk mendukung kebijakan pengelolaan gambut yang berkelanjutan dan mitigasi perubahan iklim.

2. METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian adalah hutan sekunder yang terletak di Pal 6, Desa Anjongan Dalam Kecamatan Anjongan Kabupaten Mempawah (0.36948°N, 109.11837°E). Lokasi penelitian terletak di pinggir jalan raya yang menghubungkan Kec. Anjongan dengan Kota Mempawah. Kondisi hutan rawa gambut sekunder yang dijadikan tempat penelitian adalah seperti hutan sekunder pada umumnya, banyak didominasi oleh tanaman dengan kelas diameter pancang (tinggi $\geq$ 150 cm, diameter < 10 cm) dan tiang (diameter 10-20 cm). Tetapi di lokasi masih ditemukan jenis lain yang bukan jenis komersil/sering diperjual belikan sebagai kayu pertukangan, yaitu kelompok jenis cemara (*Gymnostoma* sp), jambu-jambuan (*Syzygium* sp) yang masih dijumpai dengan tingkat kelas diameter > 20 cm (pohon) pada saat kegiatan survei vegetasi. Hutan rawa gambut sekunder yang dijadikan lokasi pengamatan dengan luas $\pm$ 4 Ha yang telah terfragmentasi dan dikelilingi oleh kebun sawit Masyarakat.

Waktu pelaksanaan pengambilan data emisi CO₂ dan CH₄ pada batang pohon dominan (*Gymnostoma nobile*, *Pentace borneensis*, dan *Syzygium napiforme*) dilakukan dibulan Juli 2024.

2.1. Survei Vegetasi

Pohon yang akan diamati merupakan pohon dominan yang diperoleh dari kegiatan survei vegetasi pada lokasi kajian, kegiatan survei vegetasi dilakukan sebelum pengamatan/penghitungan laju emisi GRK pada batang pohon. Dari kegiatan survei vegetasi diperoleh data pendukung berupa; pohon dominan dan LBDS (luas bidang dasar) per jenis pohon yang diamati, LBDS/*stem area* digunakan sebagai nilai koefisien luasan selubung pohon terhadap luasan areal per hektar (Tabel 2). Metode pengukuran emisi GRK pada batang pohon dilakukan sama seperti metode yang umum digunakan pada pengukuran emisi GRK pada tanah, yang membedakannya

hanya perlu faktor pengali/kofisien luasan selubung pohon agar nilai emisi GRK yang diperoleh tidak melebihi perkiraan (*overestimate*), cara perhitungan luas selubung pohon mengacu pada penelitian (Pangala et al., 2013).

2.2. Pengukuran Laju Emisi CO₂ dan CH₄

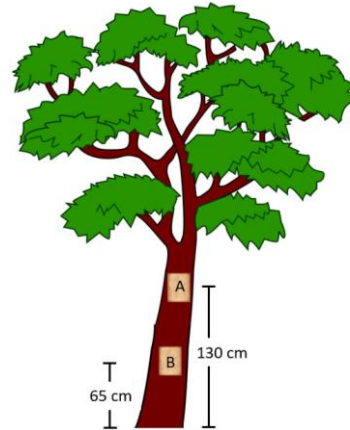
Pada pohon yang akan diamati dipasang sungkup dengan dimensi 12 x 8 x 4 cm, bentuk sungkup mengacu (Machacova et al., 2016a) di ketinggian A = 130 cm (DBH) dan B = 65 cm dari permukaan tanah (Gambar 1), pemasangan sungkup pada ketinggian 130 cm dari permukaan tanah sesuai dengan standar inventarisasi hutan internasional. Pengukuran pada ketinggian tersebut untuk memperoleh ukuran batang yang konsisten, mengurangi pengaruh akar banir dan pembesaran pangkal batang, serta memungkinkan perbandingan antara pohon dan antar penelitian (Avery & Burkhart, 2015), sedangkan sungkup B dipasang pada ketinggian 65 cm dari permukaan tanah untuk mengevaluasi variasi vertikal emisi CO₂ dan CH₄ pada batang pohon. Ketinggian 65 cm dipilih karena cukup dekat dengan sistem perakaran sehingga berpotensi menangkap pengaruh transportasi gas dari tanah melalui jaringan xilem. Perbandingan kedua ketinggian tersebut memungkinkan evaluasi pengaruh posisi pengukuran terhadap fluks gas rumah kaca dari batang, sebagaimana dilaporkan pada penelitian sebelumnya yang menunjukkan adanya gradien vertikal emisi sepanjang batang pohon (Pangala et al., 2017; Barba et al., 2019; Covey & Magonigal, 2019). Sungkup ini kemudian dihubungkan dengan alat *Gas Analyzer* (Li-Cor 7810) untuk membaca laju emisi yang dihasilkan batang pohon dan direkam tiap detik. Setiap sungkup (A dan B) yang diamati dilakukan pengukuran laju emisi sebanyak tiga kali.

Tabel 1. Jenis, Kelas Diameter dan Jumlah Pohon

Jenis Pohon	Kelas Diameter	Jumlah Pohon
<i>Gymnostoma nobile</i>	1 (10-15 cm)	3
<i>Gymnostoma nobile</i>	2 (15-20 cm)	3
<i>Gymnostoma nobile</i>	3 (20-25 cm)	3
<i>Pentace borneensis</i>	1 (10-15 cm)	3
<i>Pentace borneensis</i>	2 (15-20 cm)	3
<i>Pentace borneensis</i>	3 (20-25 cm)	3
<i>Syzygium napiforme</i>	1 (10-15 cm)	3
<i>Syzygium napiforme</i>	2 (15-20 cm)	3
<i>Syzygium napiforme</i>	3 (20-25 cm)	3
Total Pohon		27

Pengumpulan data untuk satu jenis pohon yang sama dilakukan dalam 1 hari berjumlah 9 pohon yang terdiri dari 3 kelas diameter (dapat dilihat pada tabel 1), jumlah sungkup yang diukur dalam 1 hari berjumlah 18 sungkup (9 pohon x 2 sungkup/pohon) dan dilakukan pengukuran dihari berikutnya untuk

dua jenis pohon yang lain (total selama 3 hari berjumlah 27 pohon) selama 1 bulan (4 minggu) ada 108 data (27 pohon x 4), pengukuran dilakukan ditiga hari berturut-turut.



Gambar 1. Penempatan Sungkup Pengukuran Emisi CO₂ dan CH₄ pada Pohon yang Diamati

Untuk perhitungan *flux*/aliran gas untuk setiap gas yang sesuai per unit luas (J):

$$J = m \frac{M_w P V}{A R T} \quad (\text{Novita et al., 2023})$$

Keterangan:

M_w = Berat molekul GRK (gr) berat molekul CO₂ adalah 44,01 gr dan CH₄ adalah 16,02 gr

m = Slope dari konsentrasi gas per waktu (ppms⁻¹)

A = Luas sungkup (m²)

P = Tekanan udara (Pa)

V = Volume sungkup (m³)

R = Konstanta gas (8,314 m³Pa K⁻¹mol⁻¹)

T = Suhu (K)

Nilai konversi emisi gas rumah kaca ke satuan CO₂-equivalent (CO₂-e) dilakukan menggunakan nilai *Global Warming Potential* (GWP) sesuai pedoman IPCC, dimana CO₂ memiliki GWP sebesar 1 sehingga nilai CO₂ tetap sama setelah dikonversi menjadi CO₂-e, sedangkan GWP CH₄ sebesar 28(AR5) 1 ton CH₄ menjadi 28 ton CO₂-e (IPCC, 2021)

2.3. Analisa Data

Untuk mengetahui faktor-faktor yang memengaruhi emisi gas dari batang pohon, dilakukan beberapa tahapan analisis statistik.

Pertama, digunakan analisis ANOVA (*General Linier Model*) untuk melihat apakah variabel seperti jenis tanaman, waktu pengamatan, dan posisi sungkup memberikan pengaruh yang nyata terhadap emisi gas yang diamati.

Tabel 2. Kofisien Luas Selubung Pohon per Jenis

Nama Ilmiah	Stem Area (m ²)	Plot Area (m ²)	Plot Area (ha)	Stem Area per ha (m ² ha ⁻¹)	Stem Area Coefficient
<i>Pentace borneensis</i>	90,856	1884	0,188	482,252	0,048
<i>Gymnostoma nobile</i>	48,093	1884	0,188	255,271	0,026
<i>Syzygium napiforme</i>	23,981	1884	0,188	127,290	0,013

Sumber data survei vegetasi

Untuk memberikan gambaran visual mengenai sebaran data dari masing-masing kelompok hasil, pengamatan kemudian disajikan dalam bentuk diagram boxplot. Diagram ini memudahkan dalam melihat perbedaan median, keragaman data, dan kemunculan pencilan (*outlier*) dari masing-masing jenis tanaman atau perlakuan.

Selanjutnya, untuk mengetahui apakah perbedaan posisi sungkup (misalnya, sungkup yang lebih dekat atau lebih jauh dari permukaan tanah) memengaruhi tingkat emisi, dilakukan uji T berpasangan. Uji ini membandingkan emisi pada dua kondisi sungkup untuk pohon yang sama, sehingga hasilnya dapat menunjukkan perbedaan secara lebih akurat.

Setelah itu, dilakukan analisis lanjutan menggunakan Model Linier untuk melihat pengaruh berbagai faktor terhadap variabel target (emisi gas CO₂ atau CH₄). Model ini memungkinkan peneliti untuk mengetahui seberapa besar kontribusi masing-masing faktor, seperti jenis pohon, ukuran batang, suhu, kelembaban, dan tekanan udara, terhadap tingkat emisi yang dihasilkan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Emisi CO₂

Hasil pengukuran emisi CO₂ pada batang dari tiga jenis pohon pada hutan rawa gambut sekunder, yaitu *G. nobile* (GN), *P. borneensis* (PB), dan *S. napiforme* (SN), menunjukkan adanya variasi antar jenis, antar kelas diameter, dan perlakuan posisi sungkup (A dan B).

Secara umum, emisi CO₂ tertinggi tercatat pada jenis *G. nobile* dengan perlakuan sungkup A, dengan rata-rata sebesar 17,93 ± 1,93; 10,24 ± 1,63 dan 2,04 ± 0,21 ton CO₂ ha⁻¹ thn⁻¹ untuk kelas diameter 1, 2, dan 3 dengan total rata-rata 9,97 ± 7,80 ton CO₂ ha⁻¹ thn⁻¹. Nilai ini konsisten dengan tren pada setiap minggu pengamatan (W1 – W4) yang menunjukkan fluktuasi namun tetap dalam kisaran relatif tinggi, misalnya pada W4 emisi mencapai total 31,80 ton CO₂ ha⁻¹ thn⁻¹. Tingginya emisi pada *G. nobile* diduga berkaitan dengan sifat fisiologisnya sebagai spesies pionir yang memiliki laju metabolisme batang lebih aktif, serta sistem perakaran yang berasosiasi dengan tanah kaya bahan organik, sehingga mendukung transportasi dan difusi CO₂ melalui batang (Machacova et al., 2016b; Teskey et al., 2008).

Pada *P. borneensis*, nilai emisi cenderung lebih rendah dibanding *G. nobile*. Rata-rata emisi batang pada perlakuan posisi sungkup A tercatat 12,85 ± 4,24; 5,13 ± 0,65 dan 1,42 ± 0,35 ton CO₂ ha⁻¹ thn⁻¹ dengan total rata-rata 6,47 ± 5,83 ton CO₂ ha⁻¹ thn⁻¹, sedangkan pada perlakuan B nilai totalnya sedikit rendah, yaitu 5,71 ± 5,28 ton CO₂ ha⁻¹ thn⁻¹, meskipun lebih kecil, fluktuasi mingguan tetap terlihat jelas, misalnya pada W4 mencapai 24,54 ton CO₂ ha⁻¹ thn⁻¹ (sungkup A) dan 22,22 ton CO₂ ha⁻¹ thn⁻¹ (sungkup B). Hal ini menunjukkan bahwa meskipun *P. borneensis* memiliki batang berdiameter lebih besar, aktivitas respirasi batang masih berperan signifikan sebagai

jalur pelepasan CO₂ (Ryan et al., 1997; Trumbore et al., 2013).

Sementara *S. napiforme* memperlihatkan pola yang berbeda. Pada sungkup A, emisi tertinggi justru muncul pada kelas diameter 1 (10,08 ± 1,34 ton CO₂ ha⁻¹ thn⁻¹) maupun kelas diameter 3 (3,39 ± 0,82 ton CO₂ ha⁻¹ thn⁻¹). Hal ini mengindikasikan adanya perbedaan kontribusi fisiologis antar kelas diameter, dimana pohon berdiameter menengah jaringan aerenkim masih aktif dalam respirasi batang dibandingkan pohon berdiameter lebih besar. Nilai total rata-rata pada sungkup A sebesar 9,48 ± 5,22 ton CO₂ ha⁻¹ thn⁻¹, sedangkan pada sungkup B sebesar 9,19 ± 5,46 ton CO₂ ha⁻¹ thn⁻¹. Fluktuasi mingguan juga terlihat stabil, dengan kisaran total emisi antara 25,23 – 32,24 ton CO₂ ha⁻¹ thn⁻¹. Pola ini sejalan dengan temuan bahwa pohon dengan ukuran menengah seringkali masih berada pada fase pertumbuhan aktif, sehingga aktivitas respirasi batangnya relatif tinggi (Meir et al., 2008).

Jika dibandingkan antara sungkup, Posisi sungkup A secara umum menghasilkan nilai rata-rata emisi batang yang lebih tinggi dibandingkan posisi sungkup B pada ketiga jenis pohon. Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi mikro pada batang tertutup sungkup A (akumulasi gas) dapat meningkatkan laju pelepasan CO₂. Secara total rata-rata, perlakuan A menunjukkan emisi sebesar 8,64 ± 1,90 ton CO₂ ha⁻¹ thn⁻¹, sedangkan sungkup B lebih rendah, yakni 7,34 ± 1,75 ton CO₂ ha⁻¹ thn⁻¹. Temuan ini menegaskan bahwa batang pohon rawa gambut sekunder merupakan salah satu jalur signifikan pelepasan CO₂ ke atmosfer, dengan kontribusi yang berbeda tergantung pada spesies, ukuran batang, serta kondisi mikro di sekitar batang, hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa batang pohon dapat menjadi sumber emisi gas rumah kaca penting selain tanah, terutama pada ekosistem hutan tropis basah dan rawa gambut (Pangala et al., 2017).

Tabel 3 menampilkan hasil model umum linear S3. Faktor jenis pohon berpengaruh sangat nyata terhadap emisi CO₂ (F = 39,38; p < 0,001), hal ini mengindikasikan bahwa perbedaan karakteristik fisiologis antar spesies, seperti laju respirasi, struktur jaringan, dan kapasitas metabolisme, berkontribusi terhadap variasi emisi CO₂ yang dihasilkan. Setiap jenis pohon memiliki kemampuan respirasi batang yang berbeda, sehingga menghasilkan fluks CO₂ yang tidak seragam (Maier et al., 2018).

Kelas diameter menunjukkan hasil yang paling dominan terhadap emisi CO₂, dengan nilai F sangat tinggi (F = 376,95; p < 0,001). Hal ini menunjukkan bahwa ukuran batang merupakan faktor utama yang mengontrol besarnya emisi CO₂. Pohon dengan diameter lebih besar cenderung memiliki biomassa dan luas jaringan hidup yang lebih tinggi, sehingga meningkatkan aktivitas respirasi batang dan menghasilkan emisi CO₂ yang lebih besar dibandingkan dengan pohon berdiameter kecil.

Faktor posisi sungkup juga berpengaruh signifikan terhadap emisi CO₂ (F = 17,23; p < 0,001). Hal ini

menunjukkan bahwa perbedaan posisi pengukuran pada batang dapat mempengaruhi nilai emisi yang terdeteksi. Variasi ini dapat disebabkan oleh perbedaan aktivitas fisiologis jaringan batang pada ketinggian tertentu, serta kemungkinan adanya suhu dan kelembaban mikro disekitar batang (Aubrey & Teskey, 2009).

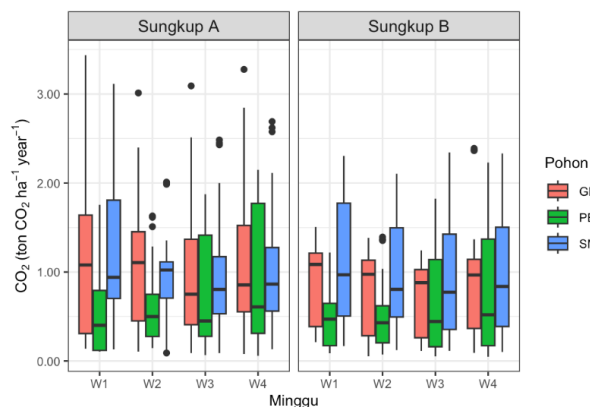
Selain itu, faktor waktu pengukuran (minggu) juga memberikan pengaruh yang signifikan ($f = 4,25$; $p = 0,006$). Hal ini mengindikasikan bahwa emisi CO₂ batang pohon mengalami dinamika temporal selama periode pengamatan. Perubahan ini kemungkinan dipengaruhi oleh fluktuasi kondisi lingkungan, seperti suhu, kelembaban, dan ketersediaan air, yang mempengaruhi aktivitas respirasi tanaman (Ohashi et al., 2008).

Interaksi jenis pohon vs kelas diameter signifikan (Adj SS = 18,91; $F = 24,28$; $p < 0,001$), menandakan bahwa pengaruh ukuran batang terhadap emisi CO₂ tidak seragam antar spesies. Dengan kata lain, peningkatan diameter tidak selalu menghasilkan peningkatan emisi yang sama pada semua spesies, karena adanya perbedaan karakteristik fisiologis masing-masing jenis (Teskey et al., 2008).

Interaksi jenis pohon vs posisi sungkup juga berpengaruh signifikan ($F = 6,31$; $p = 0,002$), menunjukkan adanya perbedaan respon antar spesies terhadap variasi posisi sungkup. Hal ini dapat berkaitan dengan variasi struktur batang dan distribusi jaringan aktif pada masing-masing jenis pohon (Ryan et al., 1997).

Sebaliknya, interaksi kelas diameter vs posisi sungkup tidak signifikan ($F = 2,22$; $p = 0,110$). Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh diameter terhadap emisi CO₂ relatif konsisten pada berbagai posisi sungkup, sehingga kedua faktor tersebut bekerja secara independen dalam mempengaruhi emisi CO₂ pada batang pohon (Ryan et al., 1997).

Nilai galat (*error*) yang relatif kecil ($MS = 0,195$) menunjukkan bahwa model yang digunakan cukup baik dalam menjelaskan variasi data. Namun dari uji *lack-of-fit* menghasilkan nilai signifikan ($F = 3,43$; $p < 0,001$), mengindikasikan bahwa model linier yang digunakan belum sepenuhnya mampu menjelaskan pola variasi yang ada. Oleh karena itu perlu menggunakan model lanjutan guna menangkap kompleksitas pola emisi pada batang pohon.



Gambar 2. Box Plot Emisi CO₂

Hasil analisis menggunakan model linier menunjukkan bahwa beberapa variabel berpengaruh nyata terhadap emisi gas yang diamati. Berdasarkan nilai koefisien dan signifikansi statistik, kelas diameter batang pohon merupakan faktor yang paling berpengaruh. Dibandingkan dengan kelas diameter 1 sebagai referensi, kelas diameter 2 menunjukkan penurunan emisi sebesar 0,33 ($p < 0,001$), sedangkan kelas diameter 3 mengalami penurunan yang lebih tajam sebesar 1,13 ($p < 0,001$). Hal ini mengindikasikan bahwa semakin besar diameter batang pohon, maka emisi yang dihasilkan cenderung semakin rendah.

Jenis pohon juga mempengaruhi besaran emisi. Jenis PB menunjukkan pengaruh negatif yang nyata terhadap emisi dibandingkan jenis GN, dengan penurunan sebesar 0,27 ($p < 0,001$). Sementara itu, jenis SN menunjukkan kecenderungan peningkatan emisi sebesar 0,087, namun pengaruh ini tidak nyata secara statistik ($p = 0,06$).

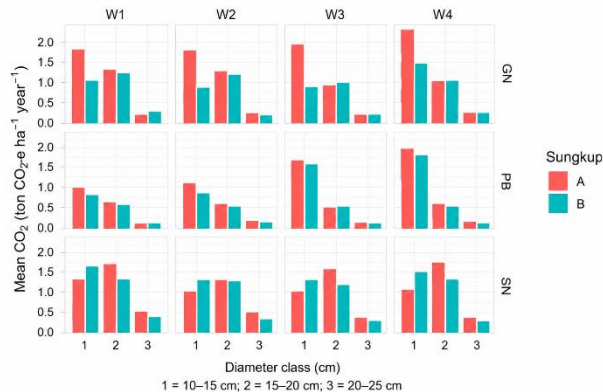
Faktor posisi sungkup juga berpengaruh nyata, di mana pohon yang berada di sungkup B menghasilkan emisi 0,15 lebih rendah dibandingkan sungkup A ($p < 0,001$). Pada kondisi suhu normal, sungkup yang terletak jauh di atas permukaan tanah menghasilkan emisi CO₂ lebih tinggi dibandingkan posisi sungkup terletak dekat dengan tanah, dan berkebalikannya pada saat suhu lingkungan mengalami kenaikan (Teskey et al., 2008).

Tabel 3. General Linier Model emisi CO₂

Sumber	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat (Adj. SS)	Kuadrat Tengah (Adj. MS)	Nilai F	Nilai p
Jenis Pohon	2	15,331	7,6657	39,38	0,000
Kelas Diameter	2	146,766	73,3831	376,95	0,000
Posisi Sungkup	1	3,354	3,3537	17,23	0,000
Minggu	3	2,480	0,8265	4,25	0,006
Jenis Pohon*Kelas Diameter	4	18,906	4,7264	24,28	0,000
Jenis Pohon*Posisi Sungkup	2	2,457	1,2287	6,31	0,002
Kelas Diameter*Posisi Sungkup	2	0,863	0,4317	2,22	0,110
Error	631	122,842	0,1947		
Lack-of-Fit	55	30,327	0,5514	3,43	0,000
Pure Error	576	92,515	0,1606		
Total	647	312,999			

Sebaliknya, variabel lingkungan seperti suhu ($p = 0,43$), kelembaban relatif ($p = 0,92$), dan tekanan udara ($p = 0,84$) tidak menunjukkan pengaruh yang nyata terhadap emisi. Demikian pula, faktor waktu pengamatan (minggu ke-2, ke-3, dan ke-4) tidak menunjukkan perbedaan yang nyata dibandingkan minggu pertama, meskipun pada minggu ke-4 terdapat kecenderungan peningkatan emisi ($p = 0,09$).

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa karakteristik pohon seperti diameter dan jenis, serta perlakuan eksperimental seperti posisi sungkup, lebih berpengaruh terhadap emisi dibandingkan faktor lingkungan atau waktu pengamatan.



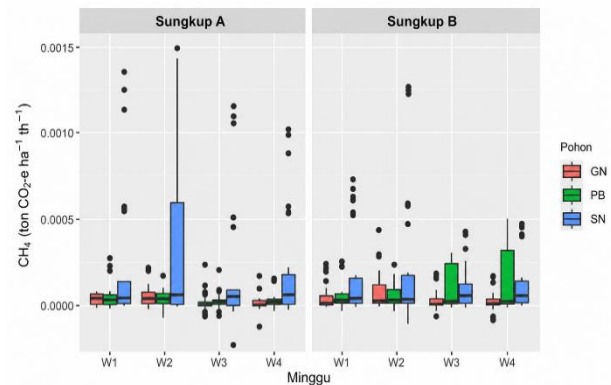
Gambar 3. Data Emisi CO₂

Tabel 4. Uji Lanjut (Tukey) Emisi CO₂ pada Batang Pohon

Perbandingan	p-value	Signifikansi
GN vs PB	0,000	Ya
GN vs SN	0,000	Ya
PB vs SN	0,024	Ya

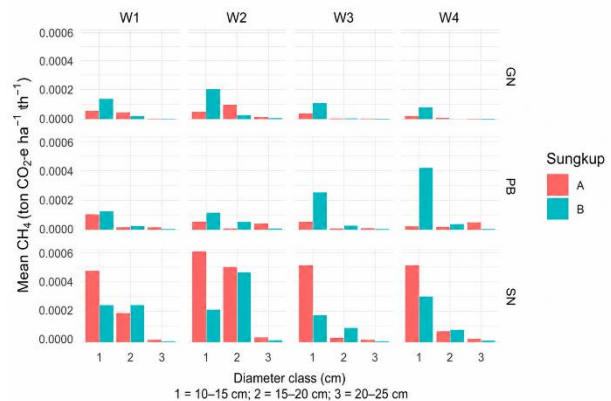
3.2. Emisi CH₄

Hasil pengukuran emisi CH₄ pada *G. nobile* relatif rendah dibandingkan dua jenis pohon lainnya. Rata-rata emisi CH₄ pada sungkup A adalah $0,40 \pm 0,13$; $0,38 \pm 0,38$ dan $0,08 \pm 0,07 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹ pada kelas diameter 1, 2, dan 3, dengan total rata-rata $0,29 \pm 0,18 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹. Nilai mingguan menunjukkan fluktuasi dari 0,374 hingga $1,544 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹, dengan puncak tertinggi pada minggu kedua (W2). Pada sungkup B, emisi meningkat lebih tinggi, terutama pada kelas diameter 1 ($1,21 \pm 0,48 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹), sehingga total rata-rata menjadi $0,46 \pm 0,65 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹. Fluktuasi mingguan menunjukkan nilai tertinggi pada W2 ($2,214 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹). Rendahnya emisi CH₄ pada batang *G. nobile* sejalan dengan sifat fisiologisnya sebagai spesies dengan kayu padat dan porositas batang rendah, sehingga peluang transportasi metana melalui batang lebih terbatas (Machacova et al., 2016; Pitz et al., 2018).



Gambar 4. Box Plot Emisi CH₄

Pada *P. borneensis*, emisi CH₄ menunjukkan variasi lebih besar. Rata-rata emisi pada sungkup A adalah $0,57 \pm 0,31$; $0,15 \pm 0,06$; dan $0,30 \pm 0,18 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹, dengan total rata-rata $0,34 \pm 0,21 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹. Nilai pengamatan mingguan relatif stabil ($0,759 - 1,330 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹). Dengan kecenderungan lebih tinggi pada W1. Sebaliknya pada sungkup B menunjukkan emisi CH₄ jauh lebih tinggi, khususnya pada W4 yang mencapai $4,214 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹, dengan total rata-rata $0,83 \pm 1,08 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹. Pola ini mengindikasikan bahwa kondisi batang yang lebih jenuh air dan akumulasi gas CH₄ pada sungkup B dapat meningkatkan difusi metana ke atmosfer, fenomena ini sesuai dengan temuan bahwa fluks CH₄ batang dipengaruhi oleh kondisi hidrologi tanah dan ketersediaan substrat metanogen yang dapat ditransportasikan melalui xilem (Covey & Megonigal, 2019; Pangala et al., 2017).



Gambar 5. Data Emisi CH₄

Berbeda dengan kedua spesies sebelumnya, *S. napiforme* menunjukkan nilai emisi CH₄ yang jauh lebih tinggi. Pada sungkup A rata-rata emisi CH₄ pada batang adalah $4,64 \pm 0,38$; $1,82 \pm 1,89$; dan $0,22 \pm 0,07 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹, dengan total rata-rata $2,23 \pm 2,23 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹. Nilai mingguan terdapat fluktuasi, misalnya pada W2 yang mencapai $9,958 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹. Pada sungkup B juga memperlihatkan emisi tinggi dengan total rata-rata $1,42 \pm 1,15 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹ bahkan mencapai $6,273 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹ pada W2. Tingginya emisi CH₄ pada *S. Napiforme* kemungkinan

dipengaruhi oleh sifat anatomi batang yang lebih permeabel, serta posisi sungkup yang lebih dekat ke tanah sehingga memudahkan transportasi gas metana dari tanah ke atmosfer melalui batang (Pangala et al., 2013; Covey & Megonigal, 2019).

Jika dibandingkan antar perlakuan posisi sungkup, sungkup B cenderung menghasilkan emisi lebih tinggi pada *G. nobile* dan *P. borneensis*, sedangkan pada *S. napiforme* justru sungkup A yang menghasilkan emisi CH₄ lebih tinggi. Hal ini menunjukkan adanya interaksi antara spesies pohon, struktur anatomi batang, serta kondisi mikro lingkungan yang mempengaruhi besarnya fluks metana. Secara total rata-rata, sungkup A menghasilkan $0,95 \pm 1,11 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹, sedikit lebih tinggi dibandingkan pada sungkup B ($0,91 \pm 0,48 \times 10^{-3}$ ton CO₂e ha⁻¹ thn⁻¹).

Temuan ini menegaskan bahwa batang pohon di ekosistem rawa gambut sekunder bukan hanya berfungsi sebagai saluran respirasi CO₂, tetapi juga jalur transportasi CH₄ ke atmosfer, meskipun kontribusinya bervariasi antara spesies. Peran batang sebagai jalur emisi CH₄ semakin diakui dalam literatur terbaru, dan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap neraca karbon di hutan rawa tropis. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pohon berdiameter kecil cenderung menghasilkan emisi CH₄ yang lebih tinggi. Pola tersebut diduga berkaitan dengan jaringan pengangkut yang masih aktif, konduktivitas hidraulik yang lebih tinggi, serta efisiensi transport gas dari sistem perakaran menuju batang, dibandingkan pohon berdiameter besar (Pangala et al., 2017; Covey & Megonigal, 2019).

Ekosistem hutan yang telah mengalami suksesi menuju tahap lanjut, karakteristik pertumbuhan pohon cenderung berubah. Pohon-pohon dominan yang berdiameter besar memiliki pertumbuhan yang lebih lambat, jaringan aerenkim yang semakin berkurang, serta rasio luas permukaan terhadap volume yang kecil, sehingga laju respirasi batang per satuan volume relatif lebih rendah (Mori et al., 2010). Dengan demikian, meskipun pohon besar tetap berkontribusi terhadap emisi CH₄, perannya lebih dominan sebagai penyimpan karbon jangka panjang akibat akumulasi biomassa yang besar (Luyssaert et al., 2008). Hal ini menjelaskan bahwa pada hutan

sekunder muda, emisi batang dari pohon berdiameter kecil dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap total fluks karbon ekosistem, sedangkan pada hutan tua, yang telah mencapai kondisi klimaks, dinamika karbon lebih ditentukan oleh keseimbangan antara respirasi dan akumulasi karbon stok.

Analisa sidik ragam menunjukkan bahwa faktor jenis pohon berpengaruh nyata terhadap emisi CH₄ dari batang ($F = 45,97$; $p < 0,001$). Hal ini mengindikasikan bahwa perbedaan karakteristik fisiologis antar spesies, seperti struktur anatomi batang dan laju respirasi, berkontribusi terhadap variasi emisi CH₄. Setiap spesies memiliki kemampuan metabolisme yang berbeda sehingga menghasilkan fluks CH₄ yang tidak seragam (Ryan et al., 1997).

Faktor kelas diameter juga signifikan ($F = 55,04$; $p < 0,001$), dengan kontribusi variasi lebih besar dibandingkan jenis pohon. Hasil ini menegaskan bahwa kelas diameter merupakan faktor utama dalam menentukan emisi CH₄ dari batang pohon, diikuti oleh jenis pohon. Hal ini sejalan dengan penelitian (Covey & Megonigal, 2019) dan (S. Pitz & Megonigal, 2017) yang menunjukkan bahwa ukuran batang dan spesies mempengaruhi intensitas emisi GRK melalui perbedaan anatomi kayu, aktivitas metabolik dan keberadaan jalur transportasi gas di jaringan batang. Pohon berdiameter kecil umumnya memiliki jaringan aktif lebih relatif luas dibandingkan volumenya sehingga mampu menghasilkan dan/atau melepaskan CH₄ lebih tinggi per satuan luas permukaan.

Faktor posisi sungkup tidak signifikan terhadap emisi CH₄ ($F = 0,11$; $p = 0,738$). Hal ini menunjukkan bahwa perbedaan posisi pengukuran pada batang tidak memberikan variasi yang berarti terhadap nilai emisi CH₄. Dengan demikian, distribusi respirasi batang relatif homogen pada posisi yang diamati untuk mempengaruhi laju emisi secara signifikan (Pangala et al., 2013).

Faktor minggu pengamatan menunjukkan pengaruh signifikan ($F = 3,13$; $p = 0,025$), yang mengindikasikan adanya dinamika temporal dalam emisi CH₄ pada batang pohon. Variasi ini kemungkinan dipengaruhi oleh lingkungan, seperti suhu dan kelembaban, yang mempengaruhi aktivitas respirasi tanaman dari waktu ke waktu (Trumbore et al., 2013).

Tabel 5. General Linear Model Emisi CH₄

Sumber	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat (Adj. SS)	Kuadrat Tengah (Adj. MS)	Nilai F	Nilai p
Jenis Pohon	2	3,2779	1,63896	45,97	0
Kelas Diameter	2	3,9247	1,96235	55,04	0
Posisi Sungkup	1	0,004	0,00399	0,11	0,738
Minggu	3	0,3351	0,11169	3,13	0,025
Jenis Pohon*Kelas Diameter	4	1,7165	0,42912	12,04	0
Jenis Pohon*Posisi Sungkup	2	0,6121	0,30603	8,58	0
Kelas Diameter*Posisi Sungkup	2	0,0107	0,00537	0,15	0,86
Error	631	22,4969	0,03565		
Lack-of-Fit	55	3,989	0,07253	2,26	0
Pure Error	576	18,5079	0,03213		
Total	647	32,3779			

Interaksi antara faktor jenis pohon vs posisi sungkup signifikan ($F = 8,58$; $p < 0,001$), yang menandakan bahwa respon terhadap posisi pengukuran berbeda antar spesies. Hal ini kemungkinan terkait dengan perbedaan distribusi lentisel, luka batang atau jaringan aerasi antar jenis pohon (Barba et al., 2019).

Interaksi jenis pohon vs kelas diameter signifikan ($F = 12,04$; $p < 0,001$), yang menegaskan bahwa hubungan diameter dengan emisi CH_4 tidak seragam; misalnya pada beberapa jenis pohon peningkatan diameter dapat menurunkan laju emisi karena berkurangnya proporsi jaringan hidup, sementara pada jenis lain pola penurunan tidak terlalu jelas (Gauci et al., 2010).

Sebaliknya interaksi kelas diameter vs posisi sungkup tidak signifikan ($F = 0,15$; $p = 0,860$). Faktor jenis pohon yang signifikan menunjukkan adanya perbedaan strategi fisiologis antar spesies dalam mengatur difusi gas dari batang. Pada hutan rawa gambut sekunder, spesies tertentu dapat berfungsi sebagai ventilasi gas metana dari tanah ke atmosfer melalui jaringan batang (Pangala et al., 2013).

Nilai galat (error) yang relatif kecil ($MS = 0,036$) menunjukkan bahwa model cukup baik dalam menjelaskan variasi data. Namun demikian, dari uji *lack-of-fit* menunjukkan hasil signifikan ($F = 2,26$; $p < 0,001$), yang mengindikasikan bahwa model linier yang digunakan belum sepenuhnya mampu menjelaskan variasi data dan perlu menggunakan model lanjutan guna menangkap kompleksitas pola emisi CH_4 pada batang pohon.

Tabel 6. Uji Lanjut (Tukey) Emisi CH_4 pada Batang Pohon

Perbandingan	p-value	Signifikansi
GN vs PB	0,994	Tidak
GN vs SN	0,000	Ya
PB vs SN	0,000	Ya

Hasil uji Tukey terhadap perbandingan emisi gas rumah kaca dari batang tiga jenis pohon, yaitu *Gymnostoma nobile* (GN), *Pentace borneensis* (PB), dan *Syzygium napiforme* (SN), menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antar jenis. Secara khusus, emisi dari *Syzygium napiforme* berbeda nyata dibandingkan dengan *Gymnostoma nobile* dan *Pentace borneensis* ($p\text{-value} < 0,001$), sedangkan antara GN dan PB tidak terdapat perbedaan yang signifikan ($p\text{-value} = 0,994$). Hal ini menunjukkan bahwa *S. napiforme* memiliki karakteristik fisiologis atau morfologis yang mempengaruhi laju emisi gas rumah kaca secara berbeda dibanding dua jenis lainnya.

Perbedaan ini dapat dikaitkan dengan faktor-faktor seperti struktur jaringan batang, aktivitas metabolik, dan kemampuan transportasi gas.

Syzygium diketahui memiliki jaringan parenkim yang lebih aktif dalam pertukaran gas, serta potensi respirasi batang yang lebih tinggi (Meir et al., 2008; Teskey et al., 2008). Selain itu, *S. napiforme* yang berasal dari famili Myrtaceae, memiliki porositas kayu dan struktur anatomi batang yang memungkinkan difusi gas lebih besar, sehingga berpotensi menghasilkan emisi yang lebih tinggi (Pangala et al., 2013; Maier et al., 2017).

Hasil analisis menggunakan model linier menunjukkan bahwa kelas diameter batang pohon berpengaruh nyata terhadap besarnya emisi CH_4 yang dilepaskan. Pohon dengan diameter batang kecil (kelas diameter 1) menunjukkan tingkat emisi CH_4 yang lebih tinggi dibandingkan dengan pohon berdiameter lebih besar. Pada kelas diameter 2, terjadi penurunan emisi sekitar 0,15 satuan ($p < 0,001$), dan pada kelas diameter 3, penurunan mencapai 0,22 satuan ($p < 0,001$). Temuan ini menunjukkan bahwa semakin besar diameter batang pohon, emisi CH_4 yang dihasilkan cenderung semakin kecil. Fenomena ini konsisten dengan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa pohon dengan diameter kecil memiliki rasio luas permukaan terhadap volume yang lebih besar, serta sistem akar yang lebih aktif dalam mentransportasikan metana dari tanah jenuh air ke atmosfer (Pangala et al., 2017). Selain itu, variasi fluks antar individu pohon juga dipengaruhi oleh ukuran batang dan karakteristik jaringan kayu, di mana pohon kecil cenderung memiliki jalur difusi gas yang lebih efisien (Barba et al., 2019). Perbedaan struktur anatomi dan kerapatan jaringan batang juga dapat mempengaruhi kecepatan difusi gas dari jaringan tanaman menuju atmosfer, sebagaimana ditunjukkan oleh Rice et al. (2010).

Faktor lingkungan juga memberikan pengaruh yang cukup kuat dalam model. Kelembaban relatif (RH) menunjukkan hubungan positif dan nyata terhadap emisi CH_4 . Artinya, semakin lembap kondisi lingkungan, semakin tinggi pula emisi yang dihasilkan, dengan kenaikan sekitar 0,0047 satuan untuk setiap peningkatan satu satuan kelembaban ($p < 0,001$). Sebaliknya, tekanan udara menunjukkan pengaruh negatif; setiap kenaikan satu satuan tekanan udara menyebabkan penurunan emisi sebesar 0,0195 satuan ($p = 0,039$). Sementara suhu lingkungan menunjukkan kecenderungan meningkatkan emisi, namun pengaruhnya belum nyata secara statistik ($p = 0,056$).

Jenis pohon juga terbukti mempengaruhi besarnya emisi CH_4 . Dibandingkan jenis GN, jenis SN menunjukkan peningkatan emisi yang nyata, sekitar 0,16 satuan ($p < 0,001$). Sementara itu, jenis PB juga menunjukkan kenaikan emisi sebesar 0,024 satuan, namun tidak nyata ($p = 0,201$).

Tabel 7. Variabel Lingkungan

Variabel Lingkungan (Udara)	Rata-rata + Standar Deviasi			Emisi CO ₂ Uji Anova (p value < 0,05)	Emisi CH ₄ Uji Anova (p value < 0,05)
	GN	PB	SN		
Suhu (°C)	30,57 + 2,39	30,70 + 1,87	30,70 + 2,84	0,157	0,830
Kelembaban (%)	78,90 + 10,56	76,99 + 8,7	78,23 + 12,11	0,357	0,001
Tekanan (hPa)	1006,74 + 0,42	1006,38 + 0,54	1006,53 + 0,58	0,033	0,000

Perbedaan letak sungkup (*chamber*) tidak memberikan pengaruh berarti terhadap emisi, dengan perbedaan yang sangat kecil antara Chamber A dan Chamber B ($p = 0,756$). Dari sisi waktu, emisi CH₄ tercatat meningkat secara nyata pada minggu ke-2 dibanding minggu pertama, yaitu sebesar 0,05 satuan ($p = 0,033$). Pada minggu ke-3 terdapat kecenderungan penurunan emisi, namun tidak nyata ($p = 0,056$), dan pada minggu ke-4 tidak ditemukan perbedaan yang berarti ($p = 0,394$). Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa karakteristik pohon (terutama diameter dan jenis), kondisi lingkungan seperti kelembaban dan tekanan udara, serta waktu pengamatan pada minggu ke-2, merupakan faktor-faktor yang secara nyata mempengaruhi besarnya emisi CH₄.

Waktu pengukuran tidak menunjukkan banyak perbedaan dalam empat minggu pelaksanaan penelitian (Lihat Gambar 6). Hal ini kemungkinan disebabkan oleh waktu pengukuran yang konsisten pada pagi hari, sehingga variasi faktor lingkungan seperti suhu dan kelembaban relatif menjadi minim (Kreutzer & Butterbach-Bahl, 2000). Meskipun hasil ANOVA menunjukkan nilai p untuk waktu pengukuran terhadap emisi CO₂ ($p = 0,16$) dan CH₄ ($p = 0,08$) tidak signifikan, penting untuk diingat bahwa interaksi antara faktor lingkungan, waktu, dan spesies tanaman dapat mempengaruhi emisi gas rumah kaca (Aubrey & Teskey, 2009; Machacova et al., 2016).

Hasil uji T berpasangan menunjukkan bahwa posisi sungkup berbeda signifikan menurut spesies. Posisi sungkup pada *G. nobile* dan *P. borneensis* menghasilkan perbedaan signifikan, posisi sungkup pada *S. napiforme* menghasilkan perbedaan tidak signifikan ($P\text{-value} = 0,67$) untuk emisi CO₂. Perbedaan signifikan ($p\text{-value} < 0,05$) tercatat pada posisi sungkup pengukuran emisi CH₄ *G. nobile*, *P. borneensis*, dan *S. napiforme*. Pola emisi CO₂ menunjukkan jumlah emisi yang lebih besar pada sungkup A dibandingkan sungkup B pada jenis *G. nobile* dan *P. borneensis*. Emisi CH₄ dari kedua spesies ini lebih besar pada sungkup B daripada sungkup A. Emisi CH₄ *S. napiforme* lebih besar dari sungkup A dibandingkan sungkup B. Faktor spesies menentukan besar kecilnya emisi dari posisi sungkup. Dalam hal ini, sungkup A cenderung menghasilkan emisi CO₂ lebih besar, dan kebalikannya menjadi lebih kecil pada emisi CH₄ (Lihat Gambar 9). Hal ini konsisten dengan temuan Pangala et al. (2013) dan Maier et al. (2017) yang menunjukkan bahwa letak sungkup pada batang mempengaruhi hasil pengukuran emisi gas, karena perbedaan tekanan pori, aliran gas dari akar, dan struktur batang.

3.3. Variabel Lingkungan Udara

Variabel lingkungan selama penelitian relatif seragam, dengan suhu udara berkisar 30,57 – 30,70 °C, kelembaban 76,99 – 78,90%, dan tekanan udara 1006,38 – 1006,74 hPa. Analisis ANOVA menunjukkan bahwa suhu udara tidak berpengaruh nyata terhadap emisi CO₂ maupun CH₄ ($p > 0,05$). Kelembaban udara berpengaruh sangat nyata terhadap emisi CH₄ ($p = 0,001$), tetapi tidak terhadap CO₂ ($p = 0,357$). Sebaliknya, tekanan udara berpengaruh nyata terhadap emisi CO₂ ($p = 0,033$) dan CH₄ ($p < 0,001$), yang menunjukkan bahwa perubahan tekanan atmosfer mempengaruhi proses difusi gas dari batang ke atmosfer. Hasil ini, mengindikasikan bahwa kelembaban dan tekanan udara merupakan faktor lingkungan yang lebih menentukan dinamika emisi CH₄ dibandingkan CO₂ pada batang pohon hutan rawa gambut sekunder (Aubrey & Teskey, 2009; Pangala et al., 2017).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa batang pohon pada hutan rawa gambut sekunder merupakan salah satu jalur penting pelepasan GRK CO₂ maupun CH₄, dengan besarnya emisi dipengaruhi oleh karakteristik spesies, kelas diameter batang, posisi sungkup, dan waktu pengamatan. Emisi CO₂ tertinggi dihasilkan oleh *G. nobile*, sedangkan emisi CH₄ tertinggi dihasilkan oleh *S. napiforme*. Kelas diameter merupakan faktor yang dominan mempengaruhi variasi emisi kedua gas, menunjukkan bahwa ukuran batang berperan penting dalam mengendalikan respirasi batang dan transportasi gas dari jaringan internal batang pohon menuju atmosfer.

Analisis sidik ragam menunjukkan bahwa emisi CO₂ dipengaruhi nyata oleh jenis pohon, kelas diameter, posisi sungkup, waktu pengukuran, serta interaksi antara jenis pohon dengan kelas diameter dan posisi sungkup. Hal sebaliknya pada emisi CH₄ posisi sungkup secara Tunggal tidak berpengaruh nyata, namun interaksinya dengan jenis pohon menunjukkan pengaruh yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa respon emisi batang terhadap posisi pengukuran bergantung pada karakteristik fisiologis dan anatomi masing-masing jenis pohon.

Variabel lingkungan selama penelitian menunjukkan kondisi yang relatif seragam, namun hanya kelembaban udara dan tekanan atmosfer yang berpengaruh terhadap emisi gas rumah kaca dari batang pohon. Kelembaban udara berpengaruh nyata terhadap emisi CH₄, sedangkan tekanan udara berpengaruh nyata terhadap emisi CO₂ dan CH₄,

sementara suhu udara tidak memberikan pengaruh yang signifikan. Hasil ini menunjukkan bahwa dinamika emisi gas rumah kaca pada batang pohon hutan rawa gambut sekunder lebih dipengaruhi oleh kondisi kelembaban dan tekanan atmosfer dibandingkan suhu udara.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menegaskan bahwa pengukuran emisi batang perlu mempertimbangkan variasi jenis pohon, kelas diameter, dan posisi pengukuran untuk memperoleh estimasi emisi yang lebih representatif pada ekosistem hutan rawa gambut. Penelitian ini hanya berlangsung selama empat minggu dan terbatas pada tiga jenis pohon dominan di hutan rawa gambut sekunder. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk dilakukan dalam jangka waktu yang lebih panjang serta mencakup lebih banyak jenis pohon dan kelas diameter yang lebih beragam agar hasil yang diperoleh lebih representatif dan komprehensif. Penelitian ini memberikan informasi dalam kegiatan inventarisasi GRK berbasis ekosistem gambut serta mendukung pengembangan strategi pengelolaan dan konservasi hutan rawa gambut sebagai bagian dari Upaya mitigasi perubahan iklim.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Yayasan Konservasi Alam Nusantara (YKAN) atas dukungan teknis dan peminjaman alat *Gas Analyzer* guna terlaksananya penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Program Studi Magister Ilmu Lingkungan, Universitas Tanjungpura serta Pembimbing tesis yang selalu dengan kesabaran memberikan masukan dan bantuan dalam penyelesaian tulisan artikel dan tesis. seluruh tim lapangan yang telah membantu dalam proses pengumpulan data. Penulis juga menghargai masukan dari para reviewer dan editor yang telah membantu dalam penyempurnaan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

Aubrey, D. P., & Teskey, R. O. (2009). Root-derived CO₂ efflux via xylem stream rivals soil CO₂ efflux. *New Phytologist*, 184(1), 35–40. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02971.x>

Barba, J., Poyatos, R., & Vargas, R. (2019). Automated measurements of greenhouse gases fluxes from tree stems and soils: magnitudes, patterns and drivers. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39663-8>

Basuki, imam. (2017). *Carbon Dynamics in Response to Land Cover Change in Tropical Peatlands, Kalimantan, Indonesia* [Oregon State University]. https://ir.library.oregonstate.edu/concern/graduate_thesis_or_dissertations/xg94hvv18k

Covey, K. R., & Megonigal, J. P. (2019). Methane production and emissions in trees and forests. In *New Phytologist* (Vol. 222, Number 1, pp. 35–51). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/nph.15624>

D. Murdiyarso, K. Hergoualc'h, & L. V. Verchot. (2010). Opportunities for reducing greenhouse gas emissions in tropical peatlands. *PNAS*, 107(46), 1–6.

Kristell Anaik Hergoualc'h, & Louis Vincent Verchot. (2012). Changes in soil CH₄ fluxes from the conversion of tropical peat swamp forests: a meta-analysis. *Taylor & Francis*, Vol. 9, No. 2 (Journal of Integrative Environmental Sciences).

Machacova, K., Bäck, J., Vanhatalo, A., Halmeenmäki, E., Kolari, P., Mammarella, I., Pumpanen, J., Acosta, M., Urban, O., & Pihlatie, M. (2016a). Pinus sylvestris as a missing source of nitrous oxide and methane in boreal forest. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep23410>

Machacova, K., Bäck, J., Vanhatalo, A., Halmeenmäki, E., Kolari, P., Mammarella, I., Pumpanen, J., Acosta, M., Urban, O., & Pihlatie, M. (2016b). Pinus sylvestris as a missing source of nitrous oxide and methane in boreal forest. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep23410>

Maier, M., Machacova, K., Lang, F., Svobodova, K., & Urban, O. (2018). Combining soil and tree-stem flux measurements and soil gas profiles to understand CH₄ pathways in Fagus sylvatica forests. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181(1), 31–35. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600405>

Novita, N. (2016). Title: *Carbon Stocks and Soil Greenhouse Gas Emissions Associated with Forest Conversion to Oil Palm Plantations in Tanjung Puting Tropical Peatlands, Indonesia*.

Ohashi, M., Kumagai, T., Kume, T., Gyokusen, K., Saitoh, T. M., & Suzuki, M. (2008). Characteristics of soil CO₂ efflux variability in an aseasonal tropical rainforest in Borneo Island. *Biogeochemistry*, 90(3), 275–289. <https://doi.org/10.1007/s10533-008-9253-0>

Pangala, S. R., Enrich-Prast, A., Basso, L. S., Peixoto, R. B., Bastviken, D., Hornibrook, E. R. C., Gatti, L. V., Marotta, H., Calazans, L. S. B., Sakuragui, C. M., Bastos, W. R., Malm, O., Gloor, E., Miller, J. B., & Gauci, V. (2017). Large emissions from floodplain trees close the Amazon methane budget. *Nature*, 552(7684), 230–234. <https://doi.org/10.1038/nature24639>

Pangala, S. R., Moore, S., Hornibrook, E. R. C., & Gauci, V. (2013). Trees are major conduits for methane egress from tropical forested wetlands. *New Phytologist*, 197(2), 524–531. <https://doi.org/10.1111/nph.12031>

Pitz, S. L., Megonigal, J. P., Chang, C. H., & Szlavecz, K. (2018). Methane fluxes from tree stems and soils along a habitat gradient. *Biogeochemistry*, 137(3), 307–320. <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0400-3>

Taufik, M., Veldhuizen, A. A., Wösten, J. H. M., & van Lanen, H. A. J. (2019). Exploration of the importance of physical properties of Indonesian peatlands to assess critical groundwater table depths, associated drought and fire hazard. *Geoderma*, 347, 160–169. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.04.001>

Teskey, R. O., Saveyn, A., Steppe, K., & McGuire, M. A. (2008). Origin, fate and significance of CO₂ in tree stems. In *New Phytologist* (Vol. 177, Number 1, pp. 17–32). <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02286.x>