

Variabilitas Konsentrasi Karbon Dioksida Berdasarkan Data Satelit OCO-2 dan Keterkaitannya dengan El Niño–La Niña di Kalimantan Barat

Erryka Tantania^{1,2*}, Habib Burrahman², Gusti Zakaria Anshari^{1,3}, dan Gusti Hardiansyah^{1,4}

¹Magister Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Tanjungpura, Pontianak, Indonesia; e-mail: erryka.tantania@bmkgo.id

²Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta Pusat, Indonesia

³Departemen Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Tanjungpura, Pontianak, Indonesia

⁴Fakultas Kehutanan, Universitas Tanjungpura, Pontianak, Indonesia

ABSTRAK

Pemantauan konsentrasi karbon dioksida (CO₂) atmosfer di Kalimantan Barat masih terbatas karena belum tersedianya stasiun pengamatan CO₂ berbasis darat. Oleh karena itu, penginderaan jauh berbasis satelit menjadi alternatif penting untuk pemantauan karbon regional. Penelitian ini menganalisis kecenderungan tahunan konsentrasi CO₂ di Kalimantan Barat selama periode 2015–2022 menggunakan data satelit *Orbiting Carbon Observatory-2* (OCO-2). Hasil analisis menunjukkan adanya peningkatan konsentrasi CO₂ dari 385–402 ppm menjadi 405–422 ppm pada periode tersebut. Variabilitas konsentrasi CO₂ menunjukkan keterkaitan dengan kondisi iklim, khususnya fase El Niño dan La Niña. Pada fase *El Niño* 2015–2016, laju peningkatan relatif lebih tinggi ($\pm 3,52$ ppm/tahun), yang diduga berkaitan dengan berkurangnya curah hujan dan meningkatnya kejadian kebakaran hutan dan lahan. Sebaliknya, pada fase *La Niña* 2020–2022, laju peningkatan cenderung lebih rendah ($\pm 1,90$ ppm/tahun), sejalan dengan kondisi lebih basah yang berpotensi menekan kejadian kebakaran. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan XCO₂ di Kalimantan Barat disertai variasi antartahun yang menunjukkan keterkaitan temporal dengan perubahan fase ENSO selama periode pengamatan.

Kata kunci: Karbon Dioksida (CO₂), Satelit OCO-2, Variabilitas Iklim, *El Niño*, *La Niña*

ABSTRACT

Monitoring atmospheric carbon dioxide (CO₂) concentrations in West Kalimantan remains limited due to the absence of ground-based CO₂ observation stations. Therefore, satellite-based remote sensing provides an important alternative for regional carbon monitoring. This study analyzes annual trends in atmospheric CO₂ concentrations in West Kalimantan during the 2015–2022 period using data from the *Orbiting Carbon Observatory-2* (OCO-2) satellite. The results show an increase in CO₂ concentrations from approximately 385–402 ppm to 405–422 ppm over the study period. Variability in CO₂ concentrations shows an association with climatic conditions, particularly the El Niño and La Niña phases. During the 2015–2016 El Niño phase, the rate of increase was relatively higher (± 3.52 ppm/year), which was potentially associated with reduced rainfall and an increased occurrence of forest and land fires. In contrast, during the 2020–2022 La Niña phase, the rate of increase tended to be lower (± 1.90 ppm/year), consistent with wetter conditions that may have suppressed fire occurrence. These findings indicate that the increase in XCO₂ over West Kalimantan was accompanied by interannual variations that showed a temporal association with changes in ENSO phases during the observation period.

Keywords: Karbon Dioksida (CO₂), Satelit OCO-2, Variabilitas Iklim, *El Niño*, *La Niña*

Citation: Tantania, E., Burrahman, H., Anshari, G. Z., dan Hardiansyah, G. (2026). Variabilitas Konsentrasi Karbon Dioksida Berdasarkan Data Satelit OCO-2 dan Keterkaitannya dengan El Niño–La Niña di Kalimantan Barat. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(5), 1101-1106, doi:10.14710/jil.24.5.1101-1106

1. PENDAHULUAN

Aktivitas manusia, terutama sejak Revolusi Industri, telah meningkatkan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer dan mempercepat pemanasan global (Baiquni, 2009). Mekanisme

efek rumah kaca terjadi ketika gas-gas seperti CO₂, CH₄, dan uap air menyerap serta memerangkap radiasi gelombang panjang yang dipancarkan permukaan Bumi, sehingga menaikkan suhu rata-rata atmosfer (Jeffrey et al., 2021; BMKG, 2021). Pada skala regional, Kalimantan Barat

menunjukkan kecenderungan peningkatan suhu yang signifikan sejak awal abad ke-21, sebagaimana tercermin pada visualisasi warning stripes BMKG (2025), yang mengindikasikan sinyal perubahan iklim yang semakin nyata.

Aktivitas manusia berkontribusi terhadap peningkatan CO₂ atmosfer melalui pembakaran bahan bakar fosil, deforestasi, dan perubahan penggunaan lahan. Pembakaran bahan bakar fosil melepaskan karbon tersimpan ke atmosfer, sedangkan deforestasi dan konversi lahan mengurangi kapasitas penyerapan karbon serta dapat melepaskan karbon dari vegetasi dan tanah (Mancini et al., 2016; Yakin, 2011; Monde et al., 2008; Astuti et al., 2020). Selain pengaruh antropogenik, variabilitas iklim alami, khususnya *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO), juga berperan dalam memodulasi siklus karbon. *El Niño* umumnya menekan curah hujan, meningkatkan kondisi kering, serta memperbesar risiko kebakaran hutan, sehingga berpotensi menurunkan kapasitas vegetasi dalam menyerap karbon. Sebaliknya, *La Niña* cenderung meningkatkan curah hujan dan aktivitas konvektif yang dapat mendukung proses penyerapan karbon (McPhaden et al., 2006; Hidayat et al., 2018). ENSO dikendalikan oleh keterkaitan dinamis laut–atmosfer di Pasifik tropis dan ditandai oleh fluktuasi gradien tekanan antara wilayah Tahiti dan Darwin (Power & Smith, 2007), dengan dampak yang luas terhadap variabilitas iklim di Indonesia (Hendon, 2002; Wang et al., 2004).

Dalam konteks pemantauan CO₂ atmosferik, satelit Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) yang diluncurkan NASA pada 2 Juli 2014 dirancang untuk mengamati distribusi karbon dioksida secara global (NASA, 2014). OCO-2 memanfaatkan teknik spektroskopi inframerah untuk mengestimasi konsentrasi CO₂ melalui analisis pola serapan radiasi pada panjang gelombang tertentu yang khas bagi molekul CO₂ (Osterman, 2020; Wu et al., 2018). Informasi spektral ini kemudian diolah untuk menghasilkan estimasi kadar CO₂ dengan tingkat ketelitian tinggi. Produk data OCO-2 tersedia dalam format NetCDF dan dapat diproses menggunakan bahasa pemrograman yang relevan untuk analisis lanjut (Osterman, 2020). Evaluasi akurasi OCO-2 terhadap observasi di sejumlah stasiun pemantauan CO₂ telah dilakukan, antara lain oleh Hammerling dkk. (2012), menggunakan metrik mean squared error; kualitas model/produk umumnya dinilai baik ketika nilai RMSE mendekati nol (Cai dkk., 2015). Dalam kajian tersebut, RMSE yang diperoleh berkisar 0,2–0,7, yang mengindikasikan bahwa produk OCO-2 layak digunakan untuk pemantauan konsentrasi CO₂ secara global.

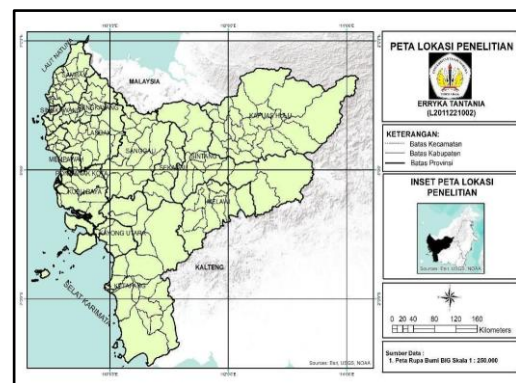
Studi terdahulu juga menegaskan peran variabilitas iklim dalam dinamika pertukaran

karbon. Spencer (2022) menunjukkan bahwa ENSO memengaruhi fotosintesis dan pertukaran karbon, sehingga memodulasi variasi tahunan penyerapan CO₂ oleh sistem Bumi. Berdasarkan deret waktu Mauna Loa periode 1959–2021, fluktuasi penyerapan CO₂ lebih kuat dijelaskan oleh ENSO dibandingkan indikasi pelemahan kemampuan Bumi dalam menyerap CO₂. Setelah pengaruh ENSO dikoreksi, sistem Bumi tetap menyerap sekitar 2% dari surplus CO₂ atmosferik setiap tahun. Sementara itu, Crips (2015) melaporkan bahwa pengamatan OCO-2 mampu mengidentifikasi wilayah dengan emisi karbon tinggi di belahan Bumi utara yang dikaitkan dengan dinamika pencairan es pada periode musim semi 2014–2015. Temuan-temuan tersebut menegaskan pentingnya OCO-2 sebagai instrumen observasi untuk mengevaluasi keterkaitan antara emisi karbon, variabilitas iklim, dan perubahan iklim.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif dengan menganalisis data satelit OCO-2 yang diolah menjadi grafik dan peta untuk mengidentifikasi tren konsentrasi karbon dioksida (CO₂) di wilayah Kalimantan Barat. Analisis dilakukan untuk mengidentifikasi keterkaitan antara fenomena iklim *El Niño* dan *La Niña* dengan fluktuasi konsentrasi CO₂ di atmosfer pada wilayah tersebut. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan gambaran awal mengenai pola temporal dan spasial XCO₂ di Kalimantan Barat serta keterkaitannya dengan variabilitas ENSO selama periode pengamatan.

Lokasi yang dipilih pada penelitian ini meliputi wilayah Provinsi Kalimantan barat yang terletak antara 0° - 3° LS dan 108° - 115° BT. Batas waktu pada penelitian bertepatan dengan periode pengamatan OCO-2 pertama kali hingga saat ini yaitu pada tahun 2015 – 2022.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data pengamatan satelit CO₂ yang masih bersifat mentah (raw data) dan selanjutnya diproses hingga siap dianalisis. Deskripsi data yang dimanfaatkan adalah sebagai berikut. Variabel konsentrasi CO₂ yang dianalisis berupa column-averaged dry-air mole fraction of CO₂ (XCO₂) yang diperoleh dari produk satelit OCO-2 dalam format NetCDF. Data tersedia dengan resolusi temporal harian pada periode 2015–2022, dengan resolusi spasial awal sebesar 2,5° × 2,5°. Produk yang digunakan berasal dari

subproduk OCO2_L2_Lite_FP_10r yang dapat diakses melalui laman. Produk OCO-2 Level 2 Lite menyediakan nilai XCO₂ yang telah melalui proses bias correction. Pengambilan XCO₂ OCO-2 dilakukan menggunakan algoritma retrieval ACOS dengan memanfaatkan tiga pita spektral, yaitu Oxygen-A, CO₂ weak, dan CO₂ strong. Selain itu, produk ini menyediakan XCO₂ Quality Flag yang dapat digunakan untuk menyaring data berkualitas rendah (Wang et al., 2023).

Salah satu keterbatasan utama data OCO-2 pada penelitian ini adalah resolusi spasialnya yang relatif kasar karena nilai XCO₂ telah dirata-ratakan pada grid 2,5° × 2,5°. Kondisi tersebut berpotensi membatasi ketelitian analisis pada skala regional, khususnya untuk wilayah Kalimantan Barat. Oleh karena itu, dilakukan proses regridding untuk menghasilkan representasi spasial yang lebih rapat dan memudahkan visualisasi pola distribusi XCO₂. Pengolahan data dari tahap pengunduhan hingga menghasilkan data siap analisis dilakukan melalui beberapa langkah. Pertama, pengunduhan data OCO-2 dilakukan dengan membuat akun pada laman URS Earthdata (<https://urs.earthdata.nasa.gov/>), kemudian mengakses layanan NASA GES DISC (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>) dan memilih subproduk OCO2_L2_Lite_FP_10r. Kedua, data XCO₂ yang telah diperoleh dilakukan pemotongan agar sesuai dengan domain wilayah studi, yaitu pada batas koordinat xmin = 106, ymin = -4, xmax = 115, dan ymax = 3. Tahapan ini bertujuan untuk memfokuskan analisis pada area yang relevan serta mengurangi data di luar wilayah penelitian. Ketiga, data hasil pemotongan kemudian dilakukan regridding menggunakan Climate Data Operators (CDO) dengan metode interpolasi bilinear (remapbil) dari grid 2,5° × 2,5° menjadi grid 0,1° × 0,1° (sekitar 11 × 11 km). Metode ini mengestimasi nilai pada grid target berdasarkan nilai grid sumber di sekitarnya. Proses regridding dilakukan untuk menghasilkan representasi spasial yang lebih rapat sehingga pola distribusi XCO₂ di wilayah Kalimantan Barat dapat divisualisasikan dan dianalisis secara lebih kontinu. Meskipun demikian, proses interpolasi tersebut tidak menambah informasi spasial baru maupun meningkatkan resolusi observasi.

Klasifikasi fase ENSO dalam penelitian ini mengacu pada indeks Niño3.4 dari National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2026). Indeks Niño3.4 merupakan salah satu indikator yang umum digunakan untuk memantau perkembangan fenomena El Niño–Southern Oscillation (ENSO). Kawasan Niño3.4 dianggap representatif karena mencakup wilayah interaksi laut dan atmosfer yang berperan penting dalam perubahan kondisi ENSO, baik menuju fase El Niño, La Niña, maupun netral.

Secara operasional, kondisi El Niño ditandai ketika anomali suhu permukaan laut (SST) mencapai $\geq +0,8^{\circ}\text{C}$ dan berlangsung selama beberapa bulan berturut-turut. Sebaliknya, La Niña ditetapkan ketika anomali SST mencapai $\leq -0,8^{\circ}\text{C}$ dalam periode yang relatif berkesinambungan (Cai et al., 2015). Hasil penelitian Rahmawati dan Prastowo (2016) menunjukkan bahwa variabilitas ENSO yang direpresentasikan oleh indeks Niño3.4/ONI memiliki hubungan yang signifikan dengan perubahan curah hujan di Indonesia. Nilai ONI berkorelasi negatif sedang dengan anomali curah hujan, yaitu sebesar $r = -0,63$ dengan $p \leq 0,001$, yang menunjukkan bahwa peningkatan anomali suhu muka laut di wilayah Niño3.4 pada fase El Niño cenderung diikuti oleh penurunan curah hujan. Dampak paling kuat terjadi pada periode Juni–Juli–Agustus (JJA) dan September–Oktober–November (SON), dengan defisit curah hujan muncul sekitar tiga bulan sebelum puncak El Niño pada November–Desember–Januari (NDJ). Sebaliknya, fase La Niña cenderung berkaitan dengan peningkatan curah hujan di Indonesia

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kecenderungan Perubahan Konsentrasi CO₂ Tiap Tahun

Berdasarkan Tabel 1, rata-rata konsentrasi CO₂ (ppm) di kabupaten/kota di Kalimantan Barat selama periode 2015–2022 menunjukkan kecenderungan meningkat. Peningkatan ini terjadi secara relatif merata antarwilayah dan mengindikasikan akumulasi CO₂ atmosferik yang konsisten, selaras dengan tren kenaikan konsentrasi CO₂ pada skala global. Pada awal periode pengamatan (2015), konsentrasi CO₂ berada pada kisaran ±385–402 ppm, sedangkan pada akhir periode (2022) meningkat menjadi ±405–422 ppm, yang menegaskan adanya kenaikan berkelanjutan selama delapan tahun observasi.

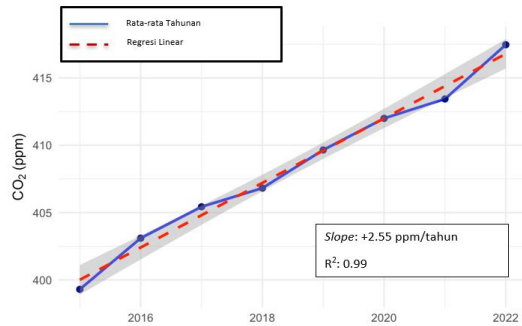
Tabel 1. Konsentrasi CO₂ Kalimantan Barat

Tahun	Minimum (ppm)	Wilayah min	Maksimum (ppm)	Wilayah max
2015	385,26	Kayong Utara	402,17	Sekadau
2016	400,48	Kubu Raya	403,75	Sanggau
2017	400,30	Sambas	408,60	Sanggau
2018	402,13	Sanggau	411,50	Kapuas Hulu
2019	406,03	Sanggau	413,38	Singkawang
2020	409,40	Sambas	417,44	Kayong Utara
2021	398,61	Kayong Utara	418,05	Sanggau
2022	405,31	Singkawang	421,95	Bengkayang

Pada tahun 2022, konsentrasi CO₂ rata-rata tertinggi tercatat di Kabupaten Bengkayang (421,95 ppm). Secara umum, Bengkayang, Ketapang, dan Pontianak menunjukkan nilai XCO₂ yang relatif lebih tinggi dibandingkan beberapa wilayah lainnya. Namun, secara keseluruhan, konsentrasi XCO₂ di Kalimantan Barat menunjukkan kecenderungan meningkat selama periode 2015–2022.

Secara keseluruhan, kecenderungan peningkatan konsentrasi CO₂ di sebagian besar wilayah Kalimantan Barat menunjukkan pola yang cenderung linear. Meskipun menunjukkan fluktuasi antartahun, konsentrasi XCO₂

secara umum tetap memperlihatkan kecenderungan meningkat selama periode pengamatan 2015–2022.

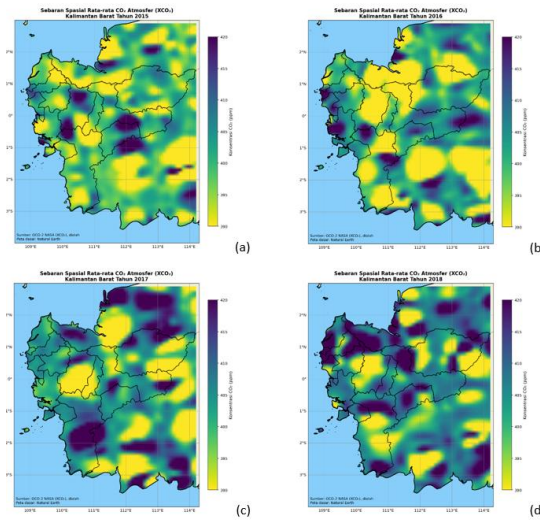


Gambar 2. Konsentrasi CO₂ Periode 2015 sampai 2022 di Kalimantan Barat menurut Data OCO-2

Meskipun peningkatan konsentrasi CO₂ tiap tahunnya menunjukkan pola yang hampir linear, terdapat fluktuasi pada kecenderungan tersebut. Konsentrasi CO₂ terus meningkat dari tahun 2015 hingga 2022, dengan kenaikan dimulai pada periode 2015–2016. Setelah itu, laju peningkatan CO₂ terlihat sedikit melambat pada tahun 2020–2021 sebelum kembali meningkat pada tahun-tahun berikutnya. Secara keseluruhan, meskipun terdapat variasi antartahun, konsentrasi CO₂ tetap menunjukkan kecenderungan meningkat dari waktu ke waktu.

Berdasarkan hasil analisis spasial terhadap rata-rata tahunan konsentrasi karbon dioksida (CO₂) atmosfer yang direpresentasikan oleh XCO₂ di Provinsi Kalimantan Barat pada periode 2015–2018, terdapat indikasi peningkatan konsentrasi CO₂ yang berlangsung dari tahun ke tahun di hampir seluruh wilayah. Pada fase awal pengamatan, khususnya tahun 2015–2016, distribusi XCO₂ masih berada pada kisaran sekitar 390–400 ppm dan menunjukkan pola yang relatif seragam antarwilayah, sehingga variasi spasialnya belum tampak menonjol. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pada periode tersebut, perbedaan konsentrasi CO₂ antarbagian provinsi masih terbatas dan global lebih dominan dibandingkan kontras lokal.

Namun, memasuki tahun 2017 hingga 2018, nilai rata-rata CO₂ menunjukkan peningkatan yang lebih jelas, meskipun distribusinya tetap relatif merata dan tidak membentuk kontras spasial yang tajam antarwilayah.



Gambar 3. Peta Spasial Konsentrasi CO₂ di Provinsi Kalimantan Barat periode (a) 2015, (b) 2016, (c) 2017, (d) 2018

3.2. Variabilitas XCO₂ pada Periode El Niño dan La Niña

Untuk pemantauan indeks Nino3.4 dilakukan dalam skala musiman karena fenomena *El Niño* dan *La Niña* memiliki karakteristik yang berkembang dalam periode beberapa bulan, bukan sepanjang tahun. Perubahan suhu permukaan laut di wilayah Nino3.4 umumnya muncul, mencapai puncak, dan melemah dalam rentang waktu 3–6 bulan, sehingga analisis musiman (DJF, MAM, JJA, SON) lebih mampu merepresentasikan dinamika dan intensitas ENSO dibandingkan analisis tahunan yang dapat mengaburkan variasi antarmusim. Pada periode 2015–2016, nilai indeks Nino3.4 yang konsisten melebihi +0.4 menandakan terjadinya *El Niño*, sedangkan pada periode 2020–2021, nilai indeks yang berada di bawah -0.4 menunjukkan kondisi *La Niña*.

Tabel 2. Rata -Rata Indeks Nino34 Tiap Musiman

Tahun	Bulan			
	DJF	MAM	JJA	SON
2015	0.46	0.69	1.52	2.43
2016	2.49	0.94	-0.36	-0.69
2017	-0.33	0.20	0.14	-0.65
2018	-0.91	-0.50	0.08	0.75
2019	0.75	0.66	0.28	0.34
2020	0.49	0.18	-0.41	-1.17
2021	-1.05	-0.40	-0.66	-0.80

Sumber data dari hasil pengamatan indeks Nino34 NOAA

Tabel 3. Rata-Rata Tahunan dan Laju Perubahan XCO₂ di Kalimantan Barat

Tahun	Rata-rata CO ₂ tahunan (ppm)	Laju CO ₂ (ppm/tahun)	Catatan iklim
2015	399.43	–	Awal <i>El Niño</i>
2016	402.94	3.52	<i>El Niño</i> kuat
2017	405.22	2.28	Pasca <i>El Niño</i>
2018	407.19	1.97	Netral
2019	409.86	2.67	Netral
2020	412.05	2.19	Awal <i>La Niña</i>
2021	413.95	1.90	<i>La Niña</i>
2022	417.28	3.34	pasca <i>La Niña</i>

Sumber data diolah dari hasil pengamatan satelit OCO-2

Pada periode yang bertepatan dengan *El Niño*, khususnya tahun 2016, laju peningkatan XCO₂ mencapai

sekitar 3,52 ppm/tahun, sedangkan pada periode La Niña laju peningkatan tercatat lebih rendah, yaitu sekitar 2,19 ppm/tahun pada 2020 dan 1,90 ppm/tahun pada 2021. Pola tersebut menunjukkan adanya keterkaitan temporal antara fase ENSO dan variasi laju XCO₂ selama periode pengamatan. Namun, perubahan XCO₂ tidak hanya berkaitan dengan kondisi ENSO, tetapi juga dapat dipengaruhi oleh transport atmosfer, sirkulasi regional, aktivitas biosfer, serta perubahan konsentrasi CO₂ latar global. Oleh karena itu, hasil penelitian ini belum dapat menunjukkan bahwa ENSO merupakan faktor utama yang mengontrol perubahan XCO₂ di Kalimantan Barat.

3.3. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasil. Pertama, analisis menggunakan data XCO₂ OCO-2 yang kemudian diregridding dari grid 2,5° × 2,5° menjadi 0,1° × 0,1° menggunakan interpolasi bilinear. Proses ini hanya menghasilkan grid yang lebih rapat untuk membantu visualisasi dan tidak menambah informasi observasi baru, sehingga perbedaan XCO₂ antarwilayah pada peta hasil regridding tidak dapat diinterpretasikan sebagai variasi pada resolusi 0,1° yang benar-benar teramati. Kedua, hasil XCO₂ belum divalidasi menggunakan pengamatan CO₂ berbasis permukaan di Kalimantan Barat, sehingga tingkat kesesuaian nilai satelit terhadap kondisi lokal belum dapat dievaluasi secara langsung. Ketiga, penelitian ini hanya mencakup periode 2015–2022 sehingga jumlah episode El Niño dan La Niña yang dianalisis relatif terbatas. Oleh karena itu, perbedaan laju peningkatan XCO₂ yang ditemukan antara periode El Niño dan La Niña belum dapat digeneralisasikan untuk seluruh kejadian ENSO. Keempat, penelitian ini tidak menggunakan data emisi, serapan karbon, penggunaan lahan, maupun kebakaran hutan dan lahan sebagai variabel analisis. Dengan demikian, penelitian ini belum dapat menentukan faktor penyebab perubahan XCO₂ maupun mengatribusi peningkatan konsentrasi CO₂ secara langsung terhadap sumber emisi tertentu. Validasi produk XCO₂ berbasis satelit umumnya dilakukan menggunakan pengamatan Total Carbon Column Observing Network (TCCON). Wang et al. (2023), misalnya, menggunakan pengamatan dari 29 stasiun TCCON untuk mengevaluasi produk XCO₂ OCO-2. Dalam penelitian ini, validasi serupa belum dilakukan karena tidak tersedianya pengamatan permukaan yang sesuai di wilayah penelitian. Dengan keterbatasan tersebut, penelitian ini dapat diposisikan sebagai studi awal pemanfaatan data satelit OCO-2 untuk menggambarkan kecenderungan dan variabilitas

XCO₂ di Kalimantan Barat, terutama pada wilayah yang belum memiliki pengamatan CO₂ berbasis darat. Hasil penelitian memberikan informasi dasar untuk pengembangan kajian selanjutnya yang mengintegrasikan tren latar global, faktor atmosfer, serta data pendukung regional.

4. KESIMPULAN

Data OCO-2 menunjukkan bahwa konsentrasi XCO₂ di Kalimantan Barat mengalami peningkatan selama periode 2015–2022, dengan rata-rata tahunan meningkat dari sekitar 399,43 ppm pada 2015 menjadi 417,28 ppm pada 2022. Laju peningkatan XCO₂ menunjukkan variasi antartahun, dengan nilai relatif lebih tinggi pada periode El Niño 2015–2016, yaitu sekitar 3,52 ppm/tahun, dibandingkan pada periode La Niña 2020–2021 yang mencapai sekitar 1,90 ppm/tahun. Hasil tersebut menunjukkan adanya keterkaitan antara variabilitas ENSO dan perubahan laju konsentrasi XCO₂ selama periode pengamatan. Namun, data OCO-2 yang digunakan merepresentasikan konsentrasi CO₂ rata-rata kolom atmosfer dan tidak secara langsung mengukur emisi maupun serapan karbon di permukaan. Selain itu, keterbatasan jumlah episode ENSO yang dianalisis menyebabkan pola yang diperoleh belum dapat digeneralisasikan untuk seluruh kejadian El Niño dan La Niña.

DAFTAR PUSTAKA

- Astuti, R., Wasib, B., & Hilwan, I. (2020). Potensi cadangan karbon pada lahan rehabilitasi di Kabupaten Gunung Mas, Kalimantan Tengah. *Media Konservasi*, 25(2), 140–148. <https://doi.org/10.29244/medkon.25.2.140-148>
- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. (2021). Laporan tahunan BMKG 2021. BMKG.
- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. (2025). Proyeksi iklim Indonesia tahun 2025. BMKG.
- Baiquni, M. (2009). Perubahan iklim dan dampaknya terhadap lingkungan hidup. Fakultas Geografi UGM.
- Boer, R., Ardiansyah, M., & Ekayani, M. (2022). Reconciling Conflict of Interest in the Management of Forest Restoration Ecosystem Sustainability, 14(21), 13924. DOI: 10.3390/su142113924
- Cai, W., A. Santoso, G. Wang, et al. "ENSO and Greenhouse Warming." *Nature Climate Change* (2015). <https://doi.org/10.1038/nclimate2743>.
- Crips, G. M. (2015). Climate change and its implication on marine biodiversity. *Marine Ecology Progress Series*, 534, 259–271. <https://doi.org/10.3354/meps11377>
- Hendon, H. H. (2002). Indonesian rainfall variability: Impacts of ENSO and MJO. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(1), 121–127. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2002\)083%3C0121:IRVIOE%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2002)083%3C0121:IRVIOE%3E2.3.CO;2)
- Hidayat, R., Siregar, I. Z., & Sopaheluwakan, A. (2018). Seasonal prediction of rainfall in Indonesia using statistical and dynamical models. *Journal of Meteorology and Geophysics*, 19(1), 1–12. <https://doi.org/10.31172/jmg.v19i1.622>
- Jeffrey, M., Surmaini, E., & Nugroho, A. (2021). Kajian dampak iklim ekstrem terhadap produksi pangan di Indonesia. Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian.

- Mancini, Maria Serena, Alessandro Galli, Valentina Niccolucci, David Lin, Simone Bastianoni, Mathis Wackernagel, and Nadia Marchettini. 2016. "Ecological Footprint: Refining the Carbon Footprint Calculation." *Ecological Indicators* 61: 390–403. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.09.040>
- McPhaden, M. J., Zebiak, S. E., & Glantz, M. H. (2006). ENSO as an integrating concept in earth science. *Science*, 314(5806), 1740–1745. <https://doi.org/10.1126/science.1132588>
- Monde, Oleh : A, N Sinukaban, K Murti Laksono, and N Pandjaitan. 2008. "Dinamika Karbon (C) Akibat Alih Guna Lahan Hutan Menjadi Lahan Pertanian." *J. Agroland* 15 (1): 22–26.
- National Aeronautics and Space Administration. (2014). Understanding global climate change. NASA Climate Portal. <https://climate.nasa.gov>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2026). Niño 3.4 SST Index from the NOAA ERSST V5. Physical Sciences Laboratory. Retrieved August 21, 2026, from https://psl.noaa.gov/data/timeseries/month/Nino34_CPC
- Osterman, L. E. (2020). Benthic foraminiferal response to Holocene climate variability. *Quaternary Science Reviews*, 234, 106250. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106250>
- Power, S., & Smith, I. (2007). Weakening of the Walker Circulation and apparent dominance of El Niño. *Climate Dynamics*, 27(1), 351–364. <https://doi.org/10.1007/s00382-006-0160-7>
- Rahmawati, E., & Prastowo, T. (2026). Asymmetric patterns of ENSO phases in Indonesia between 1975–2025 and corresponding impacts on rainfall variability. *Annals of Geophysics*, 69. <https://doi.org/10.4401/ag-9533>
- Spencer, T. (2022). Mangrove forest carbon dynamics in a changing climate. *Nature Climate Change*, 12, 15–25. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01239-w>
- Wang, Y., Yuan, Q., Li, T., Yang, Y., Zhou, S., & Zhang, L. (2023). Seamless mapping of long-term (2010–2020) daily global XCO₂ and XCH₄ from the Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT), Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO-2), and CAMS global greenhouse gas reanalysis (CAMS-EGG4) with a spatiotemporally self-supervised fusion method. *Earth System Science Data*, 15, 3597–3622. <https://doi.org/10.5194/essd-15-3597-2023>
- Wang, C., Zhang, L., Lee, S. K., & Wu, L. (2004). Interdecadal change of the leading mode of North Pacific SST variability. *Climate Dynamics*, 22(1), 71–94. <https://doi.org/10.1007/s00382-003-0361-9>
- Wu, X., Wang, M., & Xia, J. (2018). Carbon emissions and environmental policy in China. *Journal of Environmental Management*, 207, 338–351. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.045>
- Yakin. 2011. "Prospek dan Tantangan Implementasi Pasar." Seminar Nasional ASEAN Dan UNRAM, 1–22.