

Analisis Peran ENSO terhadap Variasi Ozon Troposferik dan Prekursornya di Kalimantan Timur Periode 2005–2024

Analysis of ENSO Influence on Tropospheric Ozone Variation and Its Precursors in East Kalimantan for 2005–2024

Alva Josia Lumbantoruan¹, Dodo Gunawan¹, Ervan Ferdiansyah¹, Sayful Amri¹

¹Program Sarjana Terapan Klimatologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Tangerang, Indonesia.

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3028>

Article Info Received: August, 10 th 2026 Revised: August, 30 th 2026 Accepted: September, 10 th 2026 Correspondence: Phone: +628979781651	Abstract: This paper analyzed tropospheric ozone (O ₃) and precursor variability, examined ENSO effects through drought and fire, and evaluated differences in O ₃ responses between areas with contrasting anthropogenic activity in East Kalimantan during 2005–2024. The datasets included O ₃ , NO ₂ , CO, HCHO, the Oceanic Nino Index (ONI), SPI-1, MODIS hotspots, and population density. Analyses used the Mann–Kendall test, Sen’s slope, cross-correlation, fixed-effects panel regression, and 500-replication bootstrap validation. O ₃ , NO ₂ , and HCHO showed no significant long-term trends, whereas CO decreased significantly by 0.357 ppbv year ^{−1} . Seasonality differed among gases: CO peaked in JJA, HCHO in MAM, and NO ₂ and O ₃ in SON. ENSO was negatively correlated with SPI-1 at lag 0 ($r = -0.477$) and positively correlated with hotspots at lag 1 ($r = 0.669$). All three indirect ENSO pathways to O ₃ were significant, with drought mediation largest ($\beta = 0.031$). In low-anthropogenic areas, O ₃ responded to ONI_lag, CO, NO ₂ , SPI-1, and hotspots, whereas high-anthropogenic areas were mainly associated with ONI_lag and CO. Keywords: Tropospheric Ozone; ENSO; Ozone Precursors; Drought; Fire; East Kalimantan.
--	--

Citation: Lumbantoruan, A. J., Gunawan, D., Ferdiansyah, E., & Amri, S. (2026). Analisis Peran ENSO terhadap Variasi Ozon Troposferik dan Prekursornya di Kalimantan Timur Periode 2005–2024. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(4), 5272–5277. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i4.3028>

Pendahuluan

El Nino–Southern Oscillation (ENSO) merupakan fenomena variabilitas iklim antar-tahunan yang memengaruhi suhu permukaan laut, sirkulasi atmosfer, dan pola curah hujan di kawasan tropis, termasuk Indonesia sebagai bagian dari Maritime Continent (Santoso dkk., 2017). Di Indonesia, fase El Nino umumnya menurunkan curah hujan, sedangkan La Nina meningkatkan curah hujan (Supari dkk., 2018). Kondisi kering pada fase El Nino dapat meningkatkan risiko kebakaran hutan dan lahan yang melepaskan CO dan senyawa organik volatil (VOC) ke atmosfer (Huijnen dkk., 2016; Stockwell dkk., 2016). Emisi pembakaran biomassa tersebut merupakan sumber penting

prekursor ozon, terutama CO dan senyawa organik yang berperan dalam pembentukan O₃ (Yokelson dkk., 2022).

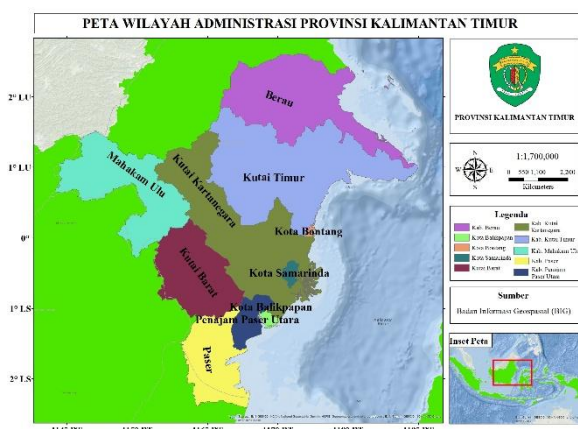
Ozon troposferik terbentuk melalui reaksi fotokimia yang melibatkan radiasi matahari, NO₂, CO, dan VOC (Monks dkk., 2015). Sebagai polutan sekunder, O₃ dapat terbentuk dan tertransportasi jauh dari sumber prekursornya. Selain faktor meteorologis, aktivitas industri, transportasi, pertambangan, dan permukiman dapat meningkatkan emisi prekursor, terutama NO₂ dan CO. Di Kalimantan Timur, peningkatan aktivitas antropogenik juga tercermin pada distribusi NO₂ yang relatif tinggi di pusat perkotaan dan kawasan industri (Hartanto dkk., 2024).

Kalimantan Timur dipilih karena mempertemukan pengaruh variabilitas iklim, kebakaran biomassa, dan tekanan antropogenik. Wilayah ini memiliki kawasan hutan dan lahan yang rentan terhadap kebakaran pada periode El Nino, sekaligus memiliki aktivitas pertambangan, industri, dan pembangunan yang intensif. Karakter tersebut menjadikan Kalimantan Timur relevan untuk mengkaji pengaruh ENSO, kekeringan, kebakaran, dan sumber emisi terhadap dinamika ozon troposferik.

Kajian hubungan ENSO dan ozon di Indonesia masih banyak membahas kebakaran atau variabel polutan secara terpisah. Penelitian ini mengintegrasikan variasi O₃ dan prekursoranya (NO₂, CO, dan HCHO), ENSO, kekeringan, kebakaran, serta karakter aktivitas antropogenik selama 2005–2024. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan menganalisis variasi ozon troposferik dan prekursoranya, mengkaji peran ENSO melalui jalur kekeringan dan kebakaran, serta mengevaluasi perbedaan respons O₃ pada wilayah dengan aktivitas antropogenik tinggi dan rendah.

Metode

Penelitian mencakup wilayah kajian Provinsi Kalimantan Timur ditunjukkan pada Gambar 1 dengan periode penelitian 2005–2024. Data yang digunakan meliputi NO₂, HCHO, dan total column ozone dari satelit Aura OMI, CO dari satelit Aqua AIRS; Oceanic Nino Index (ONI) dari NOAA, curah hujan CHIRPS, hotspot MODIS dari FIRMS; serta jumlah penduduk dan luas wilayah dari BPS. O₃ troposferik diperoleh melalui pengurangan total column ozone dengan komponen ozon stratosferik.



Gambar 1. Wilayah kajian penelitian di Provinsi Kalimantan Timur

Seluruh data penelitian pada Tabel 1 berikut dipotong mengikuti batas administratif Kalimantan Timur dan diagregasi menjadi deret bulanan. Data NO₂ disaring menggunakan cloud fraction <30%, HCHO menggunakan produk OMI yang telah dikoreksi destriping, sedangkan CO diseleksi

berdasarkan nilai kualitas yang valid. Perbedaan resolusi spasial OMI (0,25° × 0,25°) dan AIRS (0,5° × 0,5°) diseragamkan dengan regridding/resampling CO ke 0,25° × 0,25° menggunakan interpolasi konservatif. Missing value hanya ditemukan pada HCHO dan terkonsentrasi di Balikpapan serta Samarinda; celah data tersebut ditangani dengan interpolasi linear berdasarkan nilai periode sebelum dan sesudahnya. Rata-rata wilayah dihitung dari grid di dalam batas kajian.

Tabel 1. Data penelitian (2005–2024)

Data	Resolusi Spasial
NO ₂ (Aura OMI)	0,25° × 0,25°
O ₃ (Aura OMI)	0,25° × 0,25°
HCHO (Aura OMI)	0,25° × 0,25°
CO (Aqua AIRS)	0,5° × 0,5°
ONI	–
Curah hujan (CHIRPS)	0,25° × 0,25°
Hotspot (MODIS)	~1 km
Penduduk & luas wilayah (BPS)	–

Tren jangka panjang diuji menggunakan Mann-Kendall dan kemiringan Sen (Sen's slope). Indeks kekeringan dihitung menggunakan Standardized Precipitation Index skala satu bulan (SPI-1). Hubungan awal ENSO dengan SPI-1 dan ln(1+hotspot) dianalisis menggunakan korelasi silang (CCF) dengan pergeseran lag 0–3 bulan untuk menentukan respons waktu yang paling kuat.

Peran ENSO terhadap O₃ dianalisis dengan regresi panel berantai yang menguji hubungan ENSO→SPI-1, ENSO dan SPI-1→ln(1+hotspot), serta ENSO, SPI-1, dan ln(1+hotspot)→O₃. Model yang sama juga digunakan untuk mengevaluasi respons NO₂, HCHO, dan CO terhadap jalur ENSO–kekeringan–kebakaran. Efek tidak langsung divalidasi dengan 500 replikasi bootstrap dan selang kepercayaan 95%.

Untuk membandingkan respons antarwilayah, sepuluh kabupaten/kota dikelompokkan menjadi aktivitas antropogenik tinggi dan rendah berdasarkan median rata-rata kepadatan penduduk 2005–2024. Pemisahan kelompok divalidasi dengan uji Mann-Whitney U. Dalam regresi perbandingan, variabel NO₂, CO, HCHO, ONI ter-lag, SPI-1, dan ln(1+hotspot) distandardisasi dengan Z-score sehingga koefisien dapat dibandingkan langsung antar kelompok. Multikolinearitas diperiksa menggunakan VIF, sedangkan diagnostik residual mencakup Durbin-Watson, Jarque-Bera, dan Breusch-Pagan.

Hasil dan Pembahasan

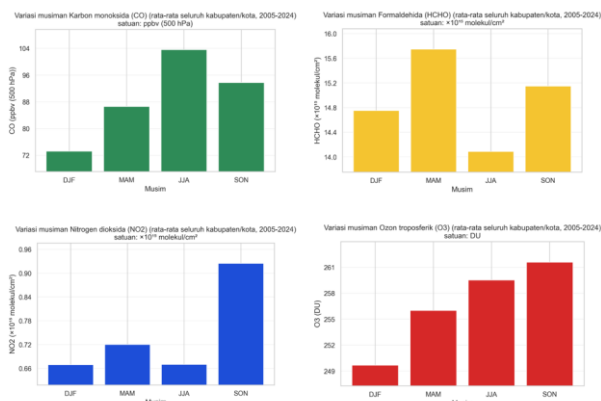
Variasi Ozon Troposferik dan Prekursornya

Uji Mann–Kendall menunjukkan bahwa O₃ ($\tau = 0,284$; $p = 0,086$), NO₂ ($\tau = -0,200$; $p = 0,230$), dan HCHO ($\tau = 0,168$; $p = 0,315$) tidak memiliki tren jangka panjang yang signifikan, sedangkan CO mengalami tren menurun signifikan ($\tau = -0,379$; $p = 0,021$) dengan Sen's slope $-0,357$ ppbv/tahun (Tabel 2, Gambar 2). Ketidadaan tren signifikan pada O₃ menunjukkan bahwa variasi antartahun dan keseimbangan antara produksi fotokimia, transportasi, dan deposisi lebih dominan daripada perubahan monotonik jangka panjang. Hasil ini juga menunjukkan bahwa tren ozon dapat berbeda menurut wilayah dan kondisi meteorologisnya.

Tabel 2. Hasil uji tren Mann–Kendall keempat gas

Gas	τ	p	Keputusan
O ₃	0,284	0,086	Tidak signifikan
NO ₂	-0,200	0,230	Tidak signifikan
HCHO	0,168	0,315	Tidak signifikan
CO	-0,379	0,021	Turun signifikan

Arah tren CO yang menurun signifikan, sementara HCHO dan NO₂ tidak menunjukkan tren signifikan, mengindikasikan bahwa pengendali masing-masing gas berbeda. Sen's slope HCHO tetap positif ($+0,457 \times 10^{15}$ molekul/cm²/tahun) tetapi tidak signifikan, sedangkan NO₂ memiliki Sen's slope $-0,0021 \times 10^{15}$ molekul/cm²/tahun dan juga tidak signifikan. Penurunan CO tidak cukup untuk disimpulkan sebagai akibat perubahan sumber tertentu tanpa dukungan inventori emisi. Variasi HCHO yang sangat menceng dan kaya nilai ekstrem konsisten dengan pengaruh sumber VOC biogenik dan antropogenik serta proses kimia atmosfer (Kusumaningtyas dkk., 2024).



Gambar 2. Variasi musiman O₃, NO₂, HCHO, dan CO

Pola musiman pada Gambar 2 tidak seragam antargas. CO mencapai konsentrasi tertinggi pada JJA sekitar 104 ppbv, NO₂ pada SON sekitar $0,93 \times 10^{15}$ molekul/cm², O₃ pada SON sekitar 261 DU, sedangkan HCHO justru tertinggi pada MAM sekitar $15,8 \times 10^{15}$ molekul/cm². O₃ meningkat teratur dari DJF menuju SON, sedangkan CO meningkat lebih awal dan mencapai puncak pada JJA. Pola ini menunjukkan bahwa musim memengaruhi setiap gas melalui kombinasi sumber emisi, kekeringan, radiasi, dan proses fotokimia yang berbeda. Peningkatan CO dan NO_x pada musim kering konsisten dengan pengaruh pembakaran biomassa di Asia Tenggara (Marvin dkk., 2021; Yokelson dkk., 2022).

Peran ENSO dalam Memodulasi Ozon melalui Kekeringan dan Kebakaran

Analisis CCF menunjukkan bahwa hubungan ENSO–SPI-1 terkuat pada lag 0 bulan ($r = -0,4766$), sedangkan hubungan ENSO–ln(1+hotspot) terkuat pada lag 1 bulan ($r = 0,6694$) (Tabel 3, Gambar 4). Hasil ini menunjukkan bahwa respons kekeringan berlangsung lebih cepat, sedangkan peningkatan hotspot mengikuti dengan jeda sekitar satu bulan. Pola keterkaitan ENSO dengan kondisi hidrologis lokal ini konsisten dengan kajian ENSO terhadap debit Sungai Mahakam di Kalimantan Timur (Rahmianti dkk., 2023). Lag tersebut kemudian digunakan dalam regresi panel jalur.

Tabel 3. Hasil korelasi silang (CCF) untuk penentuan lag ENSO

Jalur	Lag (bulan)	r
ENSO → SPI-1	0	-0,477
ENSO → ln(1+hotspot)	1	0,669

Regresi panel menunjukkan ENSO berpengaruh negatif terhadap SPI-1 ($\beta = -0,416$; $p < 0,001$), sedangkan ENSO berpengaruh positif terhadap ln(1+hotspot) pada lag 1 bulan ($\beta = 0,173$; $p < 0,001$). SPI-1 juga berpengaruh negatif terhadap hotspot ($\beta = -0,189$; $p < 0,001$), sehingga kondisi yang semakin kering diikuti peningkatan aktivitas kebakaran. Pada model O₃, ONI_lag berpengaruh negatif ($\beta = -0,165$; $p < 0,001$), SPI-1 berpengaruh negatif ($\beta = -0,075$; $p < 0,001$), dan ln(1+hotspot) berpengaruh positif ($\beta = 0,075$; $p < 0,001$). Dengan demikian, baik jalur meteorologis maupun jalur kebakaran berkontribusi secara langsung terhadap variasi O₃.

Tabel 4. Koefisien regresi panel efek tetap jalur ENSO–kekeringan–kebakaran–ozon

Model	Prediktor	β	p	Lag
SPI-1	ONI	-0,416	<0,001	0
ln(1+HS)	ONI	0,173	<0,001	1
ln(1+HS)	SPI-1	-0,189	<0,001	0
O ₃	ONI_lag	-0,165	<0,001	1

O3	SPI-1	-0,075	<0,001	0
O3	ln(1+HS)	0,075	<0,001	0

Uji validasi bootstrap 500 replikasi (Tabel 5) menunjukkan bahwa ketiga jalur mediasi tidak langsung ENSO terhadap O3 signifikan: ENSO → SPI-1 → O3 ($\beta = 0,031$; CI95% [0,020; 0,040]; $p < 0,001$), ENSO → hotspot → O3 ($\beta = 0,013$; CI95% [0,005; 0,023]; $p = 0,004$), dan ENSO → SPI-1 → hotspot → O3 ($\beta = 0,006$; CI95% [0,002; 0,010]; $p = 0,004$). Total efek tidak langsung juga signifikan ($\beta = 0,050$; CI95% [0,035; 0,065]; $p < 0,001$). Dengan demikian, jalur kekeringan memberikan kontribusi mediasi terbesar, tetapi jalur kebakaran dan jalur berantai melalui kekeringan dan kebakaran juga berperan terhadap variasi O3.

Tabel 5. Hasil uji validasi bootstrap (500 replikasi) efek mediasi tidak langsung ENSO terhadap O3

Jalur	β	CI 95%	p	Sig.
ENSO→SPI-1→O3	0,031	[0,020; 0,040]	<0,001	Ya
ENSO→hotspot→O3	0,013	[0,005; 0,023]	0,004	Ya
ENSO→SPI-1→hotspot→O3	0,006	[0,002; 0,010]	0,004	Ya
Total efek tidak langsung	0,050	[0,035; 0,065]	<0,001	Ya

Hasil bootstrap 500 replikasi pada Tabel 5 menunjukkan bahwa ketiga jalur mediasi ENSO terhadap O3 signifikan: ENSO→SPI-1→O3 ($\beta = 0,031$; CI95% 0,020–0,040; $p < 0,001$), ENSO→hotspot→O3 ($\beta = 0,013$; CI95% 0,005–0,023; $p = 0,004$), dan ENSO→SPI-1→hotspot→O3 ($\beta = 0,006$; CI95% 0,002–0,010; $p = 0,004$). Total efek tidak langsung juga signifikan ($\beta = 0,050$; CI95% 0,035–0,065; $p < 0,001$). Jalur kekeringan merupakan jalur mediasi terbesar, tetapi hasil ini sekaligus menunjukkan bahwa kebakaran tetap berkontribusi terhadap keterkaitan ENSO dan O3. Temuan mengenai kontribusi kebakaran konsisten dengan besarnya emisi CO dan prekursor lain yang dilepaskan selama kebakaran biomassa di Borneo dan Sumatra (Yokelson dkk., 2022).

Perbedaan Respons Prekursor Ozon antar Wilayah Antropogenik

Pengelompokan sepuluh kabupaten/kota berdasarkan median rata-rata kepadatan penduduk menghasilkan klaster antropogenik tinggi yang terdiri atas Balikpapan, Samarinda, Bontang, Penajam Paser Utara, dan Kutai Kartanegara, serta klaster antropogenik rendah yang terdiri atas Paser, Kutai Timur, Kutai Barat, Berau, dan Mahakam Ulu. Uji Mann-Whitney U menunjukkan kedua kelompok berbeda signifikan ($U = 0$; $p = 0,007937$). Nilai VIF seluruh variabel berada pada kisaran 1,08–1,26 sehingga tidak menunjukkan multikolinearitas kuat.

Tabel 6. Koefisien regresi terstandarisasi faktor penggerak O3 pada kedua klaster antropogenik

Klaster	Variabel	β (Z)	p	Sig.
Rendah	ONI_lag	-0,208	0,001	***
Rendah	CO	0,204	0,001	***
Rendah	NO2	-0,095	0,032	*
Rendah	HCHO	0,089	0,075	ns
Rendah	SPI-1	-0,054	0,048	*
Rendah	log-hotspot	0,073	0,022	*
Tinggi	ONI_lag	-0,195	0,001	***
Tinggi	CO	0,187	0,001	***
Tinggi	NO2	0,056	0,073	ns
Tinggi	HCHO	0,015	0,451	ns
Tinggi	SPI-1	-0,024	0,360	ns
Tinggi	log-hotspot	0,031	0,470	ns

Perbandingan koefisien terstandarisasi menunjukkan respons yang berbeda antar kelompok. Pada wilayah antropogenik rendah, O3 dipengaruhi secara signifikan oleh ONI_lag ($\beta = -0,208$; $p = 0,001$), CO ($\beta = 0,204$; $p = 0,001$), NO2 ($\beta = -0,095$; $p = 0,032$), SPI-1 ($\beta = -0,054$; $p = 0,048$), dan log-hotspot ($\beta = 0,073$; $p = 0,022$), sedangkan HCHO tidak signifikan ($\beta = 0,089$; $p = 0,075$). Pada wilayah antropogenik tinggi, hanya ONI_lag ($\beta = -0,195$; $p = 0,001$) dan CO ($\beta = 0,187$; $p = 0,001$) yang signifikan; NO2 ($\beta = 0,056$; $p = 0,073$), hotspot, SPI-1, dan HCHO tidak signifikan. Pola ini sejalan dengan temuan bahwa lingkungan urban dan rural dapat memperlihatkan sensitivitas O3 yang berbeda terhadap faktor meteorologi dan prekursor (Kusumaningtyas dkk., 2024).

Perubahan tanda koefisien NO2 dari negatif signifikan di wilayah rendah menjadi positif tetapi belum signifikan di wilayah tinggi menunjukkan bahwa hubungan NO2–O3 tidak seragam antarkondisi wilayah. Pola tersebut konsisten dengan kemungkinan perbedaan kondisi kimia NOx–VOC dan pengaruh titrasi O3 di lingkungan dengan karakter emisi berbeda, tetapi hasil penelitian ini tidak cukup untuk menyatakan perubahan rezim VOC-limited/NOx-limited secara definitif karena koefisien NO2 pada klaster tinggi tidak signifikan. Di wilayah rendah, kekeringan dan hotspot tetap berperan signifikan, sedangkan wilayah tinggi lebih didominasi ENSO dan CO. Temuan ini mendukung pengelolaan kualitas udara yang mempertimbangkan konteks wilayah (Marvin dkk., 2021; Kusumaningtyas dkk., 2024).

Kesimpulan

Variasi O3 troposferik dan prekursornya di Kalimantan Timur selama 2005–2024 menunjukkan pola yang berbeda antargas. O3 tidak memiliki tren jangka panjang yang signifikan dan memiliki rerata 256,70 DU, sedangkan CO merupakan satu-satunya

gas dengan tren signifikan, yaitu penurunan $-0,357$ ppbv/tahun. Secara musiman, CO memuncak pada JJA, HCHO pada MAM, serta NO₂ dan O₃ pada SON. Secara spasial, CO tertinggi terdapat di Mahakam Ulu, HCHO didominasi Samarinda, NO₂ terkonsentrasi pada koridor Balikpapan-Samarinda-Bontang, sedangkan O₃ relatif homogen dengan rentang sekitar 2 DU.

ENSO berperan dalam memodulasi O₃ melalui dua jalur. Jalur kekeringan merespons pada lag 0 bulan (ENSO→SPI-1, $r = -0,477$) dan menghasilkan efek mediasi terbesar pada O₃ ($\beta = 0,031$). Jalur kebakaran merespons sekitar satu bulan kemudian (ENSO→hotspot, $r = 0,669$) dan juga signifikan terhadap O₃, baik secara langsung maupun melalui jalur berantai. Dengan demikian, pengaruh ENSO terhadap O₃ tidak hanya berlangsung melalui perubahan emisi kebakaran, tetapi juga melalui perubahan kondisi hidrometeorologis yang mendukung pembentukan dan akumulasi O₃.

Pada wilayah antropogenik rendah, O₃ dipengaruhi oleh kombinasi ONI_lag, CO, NO₂, SPI-1, dan hotspot, sedangkan pada wilayah antropogenik tinggi pengaruh yang signifikan terutama berasal dari ONI_lag dan CO. Perubahan tanda koefisien NO₂ menjadi positif di wilayah tinggi merupakan indikasi perbedaan kondisi kimia atmosfer, tetapi belum dapat dianggap sebagai bukti perubahan rezim pembentukan ozon karena pengaruhnya tidak signifikan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (STMKG) atas dukungan akademik, kepada NASA GES DISC, NOAA, CHIRPS, FIRMS, dan Badan Pusat Statistik atas ketersediaan data terbuka yang digunakan dalam penelitian ini, serta kepada dosen pembimbing dan tim penguji atas bimbingan dan masukan yang diberikan selama penyusunan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Delphia, R. (2024). Pembangunan IKN dan perlindungan keanekaragaman hayati. *Jurnal Lingkungan dan Pembangunan*, 1(1), 23-32.
- Feng, Z., De Marco, A., Anav, A., Gualtieri, M., Sicard, P., Tian, H., Fornasier, F., Tao, F., Guo, A., & Paoletti, E. (2019). Economic losses due to ozone impacts on human health, forest productivity and crop yield across China. *Environment International*, 131, 104966. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104966>
- Hartanto, N., Ni'matuzzahroh, Mauliya, D. J., Al Fath'qi, R. R., Julpa, I. S., Fariz, T. R., Haris, A., & Jabbar, A. (2024). Study of nitrogen dioxide (NO₂) and sulphur dioxide (SO₂) concentrations on the island of Borneo using Google Earth Engine. *Envirotek: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan*, 16(1), 48-52.
- Huijnen, V., Wooster, M. J., Kaiser, J. W., Gaveau, D. L. A., Flemming, J., Parrington, M., Inness, A., Murdiyarso, D., Main, B., & Van Weele, M. (2016). Fire carbon emissions over maritime southeast Asia in 2015 largest since 1997. *Scientific Reports*, 6, 26886. <https://doi.org/10.1038/srep26886>
- Jin, X., Fiore, A. M., Murray, L. T., Valin, L. C., Lamsal, L. N., Duncan, B., Boersma, K. F., De Smedt, I., Abad, G. G., Chance, K., & Tonnesen, G. S. (2017). Evaluating a space-based indicator of surface ozone-NO_x-VOC sensitivity over midlatitude source regions and application to decadal trends. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(19), 10439-10461. <https://doi.org/10.1002/2017JD026720>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2020). Road map pengembangan dan pemanfaatan batubara 2021-2025. Kementerian ESDM RI.
- Kusumaningtyas, S. D. A., Tonokura, K., Muharsyah, R., Gunawan, D., Sopaheluwakan, A., Iriana, W., Lestari, P., Permadi, D. A., Rahmawati, R., & Samputra, N. A. R. (2024). Comprehensive analysis of long-term trends, meteorological influences, and ozone formation sensitivity in the Jakarta Greater Area. *Scientific Reports*, 14(1), 1-13. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60374-2>
- Li, X., Hu, Z., McPhaden, M. J., Zhu, C., & Liu, Y. (2023). Triple-dip La Niñas in 1998-2001 and 2020-2023: Impact of mean state changes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2023JD038843. <https://doi.org/10.1029/2023JD038843>
- Marvin, M. R., Palmer, P. I., Latter, B. G., Siddans, R., Kerridge, B. J., Talib Latif, M., & Firoz Khan, M. (2021). Photochemical environment over Southeast Asia primed for hazardous ozone levels with influx of nitrogen oxides from seasonal biomass burning. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(3), 1917-1935.
- Monks, P. S., Archibald, A. T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., Fowler, D., Granier, C., Law, K. S., Mills, G. E., Stevenson, D. S., Tarasova, O., Thouret, V., Von Schneidmesser, E., Sommariva, R., Wild, O., & Williams, M. L. (2015). Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(15), 8889-8973. <https://doi.org/10.5194/acp-15-8889-2015>
- Nurdiati, S., Sopaheluwakan, A., & Septiawan, P. (2021). Spatial and temporal analysis of El Niño

- impact on land and forest fire in Kalimantan and Sumatra. *Agromet*, 35(1), 1-10. <https://doi.org/10.29244/j.agromet.35.1.1-10>
- Qonitan, F. D. (2018). Pengaruh fenomena El Nino Southern Oscillation (ENSO) terhadap peningkatan ozon troposferik di Indonesia. *Jurnal Rekayasa Hijau*, 2(3), 203-211. <https://doi.org/10.26760/jrh.v2i3.2508>
- Rahmiati, R., & Mandang, I. (2023). Pengaruh El Nino Southern Oscillation (ENSO) terhadap debit Sungai Mahakam Kalimantan Timur. *Geosains Kutai Basin*, 5(2), 3-6. <https://doi.org/10.30872/geofisunmul.v5i2.1064>
- Rowlinson, M. J., Rap, A., Arnold, S. R., Pope, R. J., Chipperfield, M. P., McNorton, J., Forster, P., Gordon, H., Pringle, K. J., Feng, W., Kerridge, B. J., Latter, B. L., & Siddans, R. (2019). Impact of El Niño-Southern Oscillation on the interannual variability of methane and tropospheric ozone. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(13), 8669-8686. <https://doi.org/10.5194/acp-19-8669-2019>
- Santoso, A., McPhaden, M. J., & Cai, W. (2017). The defining characteristics of ENSO extremes and the strong 2015/2016 El Niño. *Reviews of Geophysics*, 55(4), 1079-1129. <https://doi.org/10.1002/2017RG000560>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Stockwell, C. E., Jayarathne, T., Cochrane, M. A., Ryan, K. C., Putra, E. I., Saharjo, B. H., Nurhayati, A. D., Albar, I., Blake, D. R., Simpson, I. J., Stone, E. A., & Yokelson, R. J. (2016). Field measurements of trace gases and aerosols emitted by peat fires in Central Kalimantan, Indonesia, during the 2015 El Niño. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(18), 11711-11732. <https://doi.org/10.5194/acp-16-11711-2016>
- Sujiman, S. (2023). Trends in ambient air quality (NO₂ and SO₂) in Tenggarong City, Kutai Kartanegara District, East Kalimantan. *International Journal of Environmental, Sustainability, and Social Science*, 4(5), 1497-1504. <https://doi.org/10.38142/ijesss.v4i5.854>
- Sulaeman, N. F., Nuryadin, A., Widyastuti, R., & Subagiyo, L. (2020). Air quality index and the urgency of environmental education in Kalimantan. *Jurnal Pendidikan IPA Indonesia*, 9(3), 371-383. <https://doi.org/10.15294/jpii.v9i3.24049>
- Supari, Tangang, F., Salimun, E., Aldrian, E., Sopaheluwakan, A., & Juneng, L. (2018). ENSO modulation of seasonal rainfall and extremes in Indonesia. *Climate Dynamics*, 51(7-8), 2559-2580. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-4028-8>
- Yokelson, R. J., Saharjo, B. H., Stockwell, C. E., Putra, E. I., Jayarathne, T., Akbar, A., Albar, I., Blake, D. R., Graham, L. L. B., Kurniawan, A., Meinardi, S., Ningrum, D., Nurhayati, A. D., Saad, A., Sakuntaladewi, N., Setianto, E., Simpson, I. J., Stone, E. A., Sutikno, S., Cochrane, M. A. (2022). Tropical peat fire emissions: 2019 field measurements in Sumatra and Borneo and synthesis with previous studies. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(15), 10173-10194. <https://doi.org/10.5194/acp-22-10173-2022>
- Zhang, J. J., Wei, Y., & Fang, Z. (2019). Ozone pollution: A major health hazard worldwide. *Frontiers in Immunology*, 10, 2518. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2019.02518>