

Menyingkap ancaman tak kasat mata: Jejak satelit titik panas NO_x Indonesia

Katherine Hasan
Rosa Gierens
Nadine Zahiruddin
Abdul Baits Swastika

08/2026

Menyingkap ancaman tak kasat mata: Jejak satelit titik panas NO_x Indonesia

13 Agustus 2026

Penulis

Katherine Hasan , Analis

Rosa Gierens , PhD, Lead Data

Nadine Zahiruddin, Peneliti terdahulu

Abdul Baits Swastika , Peneliti

Contributor

Oscar Druiventak, Software Engineer terdahulu sebagai pemimpin desain dan implementasi *dashboard* EmisiMap

Lauri Myllyvirta , Analis Utama & Co-founder CREA sebagai peninjau utama

Editor

Jonathan Seidman , Spesialis Komunikasi

Gambar sampul

David Kristianto, [Unsplash](#)

Tentang CREA

Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA) adalah organisasi penelitian independen yang berfokus pada pengungkapan tren, penyebab, dan dampak kesehatan, serta solusi untuk polusi udara. CREA menggunakan data ilmiah, penelitian, dan bukti untuk mendukung upaya pemerintah, perusahaan, dan organisasi kampanye di seluruh dunia dalam upaya mereka untuk beralih ke energi bersih dan udara bersih, dengan keyakinan bahwa penelitian dan komunikasi yang efektif adalah kunci keberhasilan kebijakan, keputusan investasi, dan upaya advokasi. CREA didirikan di Helsinki dan memiliki staf di beberapa negara Asia dan Eropa.

Penafian

CREA bersifat independen secara politik. Penamaan yang digunakan dan penyajian materi pada peta yang terdapat dalam laporan ini tidak menyiratkan ekspresi pendapat apapun mengenai status hukum negara, wilayah, kota, atau area mana pun atau otoritasnya, atau mengenai penetapan perbatasan atau batasnya.

Menyingkap ancaman tak kasat mata: Jejak satelit titik panas NO_x Indonesia

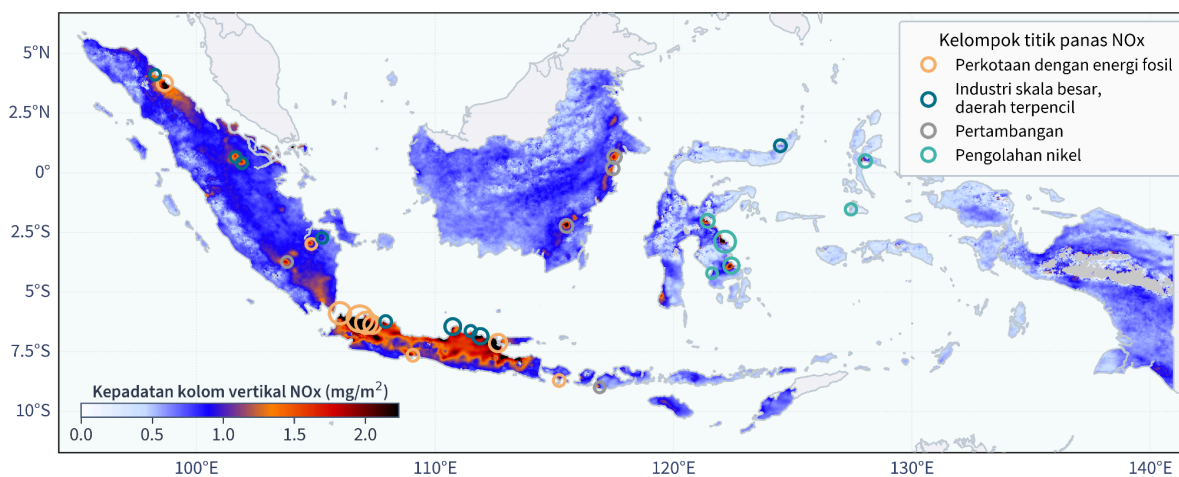
Temuan utama

- Karena sektor transportasi, energi, dan industri belum terlepas dari ketergantungan pada bahan bakar fosil, emisi nitrogen oksida (NO_x) nasional Indonesia melonjak lebih dari 50% sepanjang 2010 dan 2022. Padahal, standar kualitas udara tahunan di Indonesia saat ini masih lima kali lipat lebih longgar dibandingkan panduan Organisasi Kesehatan Dunia (WHO).
- Studi ini memetakan 29 sumber emisi NO_x utama di seluruh Indonesia dan menemukan penyumbang emisi terbesar — tiga kali lipat lebih banyak daripada yang tercatat dalam katalog global sebelumnya.
 - **Sembilan dari titik panas (hotspot) tersebut berada di wilayah perkotaan terpadat di Indonesia** seperti Jabodetabek, Surabaya, dan Medan, bersumber tidak hanya dari emisi lokal namun juga dari persebaran polusi lintas batas yang diperparah oleh kompleks pembangkit listrik fosil dan *boiler* industri di sekitarnya.
 - **Sembilan titik panas lainnya terdeteksi di daerah terpencil.** Emisi NO_x dari kompleks pembangkit listrik tenaga batubara (PLTU) dan tanur semen di Jawa, bersanding dengan pabrik *pulp* dan kertas kraft skala besar di Sumatera, menggeser beban polusi udara nasional ke masyarakat daerah.
 - **Enam titik panas dipicu oleh agresifnya program hilirisasi Indonesia**, dimana lonjakan kapasitas PLTU *captive* yang tumbuh lebih dari enam kali lipat mengakibatkan emisi NO_x di Sulawesi dan Maluku Utara melampaui total emisi seluruh wilayah Jabodetabek.
 - **Lima titik panas sisanya terkonsentrasi di kawasan pertambangan batubara terbuka di Kalimantan.** Emisi di wilayah ini didorong oleh penggunaan alat berat bermesin diesel, armada pengangkut, serta jaringan listrik PLTU mulut tambang yang terdesentralisasi. Fasilitas-fasilitas ini beroperasi di bawah kerangka pengelolaan lingkungan yang bersifat umum, alih-alih penerapan baku mutu emisi cerobong yang terstandarisasi.

- Demi menjaga kualitas udara tanpa mengorbankan pertumbuhan ekonomi, pemerintah harus berani mengambil langkah tegas. Pengawasan pasif yang tertutup harus digantikan dengan intervensi nyata, termasuk mewajibkan pemantauan menyeluruh dan pelaporan terbuka bagi penyumbang emisi skala besar.
- Saat pemerintah mulai menerapkan sistem inventarisasi emisi dan peringatan dini yang baru diberlakukan, penyusun kebijakan harus memanfaatkan data tersebut sebagai instrumen penegakan hukum yang nyata, bukan sekadar imbauan. Perbaikan kualitas udara yang berkelanjutan hanya dapat terwujud saat standar yang ketat dapat diprioritaskan — bukan berfokus pada solusi jangka pendek, teknologi pengendalian polusi dapat dilaksanakan, serta kepatuhan dapat terjaga secara konsisten di seluruh sektor.

Gambar KF1 menampilkan visualisasi kadar NO_x di atmosfer berdasarkan hasil pengukuran satelit, di mana titik-titik panas (*hotspot*) NO_x yang teridentifikasi terlihat sangat jelas.

Kadar NO_x di seluruh Indonesia (2025)



Sumber: TVCD NO₂ dari Sentinel-5P/TROPOMI, dikonversi menjadi TVCD NO_x menggunakan data ozon dari reanalisis CAMS.



Gambar KF1 — Rata-rata Kepadatan Kolom NO_x Troposfer (*Tropospheric NO_x Column Number Density, TVCD*) Indonesia pada tahun 2025

Daftar isi

Temuan utama	iii
Apa itu NOx, dan mengapa polutan ini penting?	1
Lebih dari sekadar parameter regulasi, NOx merupakan jejak pembakaran bahan bakar fosil dan indikator utama kualitas udara	1
Tiga sektor penyumbang emisi NOx terbesar — transportasi, ketenagalistrikan, dan industri	2
Menggunakan data satelit untuk memetakan titik panas NOx di Indonesia	6
Metodologi	6
Mengatribusikan sumber titik panas dengan penghasil emisi	8
Kontribusi terhadap kualitas udara ambien	8
Mengkategorikan titik panas NOx Indonesia	11
Perkotaan, berdekatan dengan fasilitas pembangkit listrik dan industri utama – 9 titik panas	11
Industri skala besar, daerah terpencil – 9 titik panas, dan Pertambangan – 5 titik panas	18
Jawa, pusat pembangkitan listrik dan industri semen nasional	19
Sumatera, pusat pembakaran biomassa dan pengolahan pulp	20
Kalimantan, penambangan batu bara dan pembangkit listrik di mulut tambang	22
Pengolahan nikel – 6 titik panas	24
Ekspansi industri nikel membawa beban polusi yang sangat tidak proporsional	28
Celah regulasi dalam transisi energi Indonesia	29
Menjembatani jurang transparansi pemantauan kualitas udara untuk akuntabilitas dan tata kelola	30
Rekomendasi kebijakan	33
Referensi	35
Lampiran	44

Apa itu NO_x, dan mengapa polutan ini penting?

Lebih dari sekadar parameter regulasi, NO_x merupakan jejak pembakaran bahan bakar fosil dan indikator utama kualitas udara

Nitrogen Oksida (NO_x) adalah istilah kolektif yang digunakan untuk mewakili berbagai gas yang sangat reaktif yang terdiri dari molekul nitrogen dan oksigen. Gas yang paling signifikan secara lingkungan dan relevan secara toksikologis adalah Nitrogen Monoksida (NO) dan Nitrogen Dioksida (NO₂).

NO₂ — berbau menyengat, berwarna coklat — memiliki relevansi tinggi karena kontribusinya terhadap pembentukan lapisan kabut asap, serta semakin banyaknya bukti ilmiah mengenai dampaknya terhadap kesehatan (Yang et al., 2025). Berbagai studi mengaitkan paparan NO₂ dengan penyakit jantung dan paru-paru, penghambatan perkembangan paru-paru pada anak-anak, gangguan pernapasan, peningkatan kunjungan darurat akibat asma, lonjakan reaksi alergi, hingga kematian dini.

Selain berdampak langsung terhadap kesehatan, NO_x di atmosfer dapat bertransformasi menjadi partikel PM_{2.5}, yang berkontribusi signifikan terhadap tingkat polusi PM_{2.5} di Indonesia. Melalui proses foto-oksidasi dengan bantuan sinar matahari, radikal hidroksil (•OH) mengubah NO₂ menjadi gas asam nitrat (HNO₃), yang kemudian menetralkan amonia (NH₃) di udara sekitar hingga membentuk aerosol amonium nitrat (NH₄NO₃).

Proses kondensasi dari bentuk gas ke partikel ini menghasilkan PM_{2.5} sekunder, di mana reaksinya dipengaruhi oleh kondisi atmosfer—seperti suhu, kelembaban relatif, dan intensitas cahaya matahari—serta ketersediaan gas prekursor (Zhang et al., 2015). Selain itu, NO_x juga memicu pembentukan ozon permukaan tanah (*ground-level ozone*), pencemaran nutrisi di kawasan pesisir, dan hujan asam (De Vries, 2021).

WHO telah menetapkan pedoman tingkat paparan NO₂ yang aman dan merekomendasikan agar konsentrasi NO₂ ambien tidak melebihi 25 µg/m³ dalam periode 24 jam dan 10 µg/m³ untuk rata-rata tahunan dalam Pedoman Kualitas Udara 2021 (Air Quality Guideline, AQG) (WHO, 2021a). Sebagai catatan, terdapat penurunan batas ambang yang signifikan dalam AQG 2021 dibandingkan dengan AQG 2005 sebelumnya, yang kala itu menetapkan ambang batas tahunan sebesar 40 µg/m³ (WHO, 2021b). **Arah kebijakan ini mencerminkan tingginya urgensi untuk mendorong upaya global terpadu dalam menekan polusi udara, mengingat semakin banyak bukti mengenai dampak buruknya terhadap kesehatan masyarakat.**

Pemerintah Indonesia juga telah mengadopsi baku mutu udara ambien nasional pada tahun 2021, yang menetapkan batas konsentrasi NO_2 ambien, bersama dengan polutan udara utama lainnya, sebesar $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dalam pengukuran 1 jam, $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dalam periode 24 jam, dan $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk rata-rata tahunan (JDIH BPK, 2021). Sayangnya, nilai baku mutu ini jauh lebih longgar dibandingkan Target Interim terendah yang ditetapkan oleh WHO sebagai panduan bagi pemerintah, yaitu $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk periode 24 jam dan $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk rata-rata tahunan. **Dengan kata lain, standar nasional Indonesia saat ini 5 kali lebih longgar daripada pedoman kesehatan global, sehingga sebagian besar penduduk terpapar pada tingkat yang dianggap tidak aman oleh WHO.**

Tiga sektor penyumbang emisi NO_x terbesar — transportasi, ketenagalistrikan, dan industri

NO_x terutama dihasilkan melalui **proses pembakaran bahan bakar fosil pada suhu tinggi dari berbagai aktivitas antropogenik** seperti transportasi, pembangkitan listrik, dan operasional industri, serta sebagian kecil dari sumber alami, termasuk petir dan aktivitas mikroba dalam tanah. Secara global, produksi listrik dan panas serta proses industri (sumber tidak bergerak), merupakan kontributor terbesar, setara dengan sektor transportasi (sumber bergerak) yang mencakup transportasi darat, pelayaran, dan penerbangan.

Pembakaran bahan bakar fosil seperti batubara, minyak, dan gas, yang dibutuhkan untuk memasok energi skala besar dalam produksi listrik atau proses industri, menghasilkan emisi NO_x dalam jumlah besar sebagai produk sampingan dari proses suhu tinggi. Emisi dapat dikategorikan sebagai NO_x termal — terbentuk dari nitrogen dan oksigen di udara pada suhu tinggi, dan NO_x bahan bakar — dari nitrogen yang terdapat dalam bahan bakar itu sendiri. Batubara dikenal memiliki kandungan nitrogen yang tinggi, sehingga berkontribusi secara signifikan terhadap pembentukan NO_x bahan bakar.

Sebagai gas berusia pendek, NO_x mengalami transformasi reaksi kimia di bawah paparan sinar matahari dalam rentang waktu 2 hingga 8 jam. Oleh karena itu, konsentrasi NO_x akan berkurang seiring bertambahnya jarak dari sumber emisi, sehingga penerapan langkah mitigasi langsung di titik sumber menjadi krusial. Karena polutan berbahaya lainnya ikut teremisikan bersamaan dengan NO_x selama pembakaran bahan bakar fosil, estimasi emisi NO_x dapat berfungsi sebagai indikator dalam mendeteksi polutan tersebut.

Jumlah populasi suatu kota juga dapat menjadi indikator kuat emisi NO_x di kota tersebut. Semakin tinggi kepadatan penduduk di suatu wilayah, semakin besar pula permintaan akan energi, transportasi, dan barang-barang industri — semuanya adalah sumber utama NO_x . Hubungan ini umumnya terungkap dalam citra satelit, dimana sebagian besar titik panas NO_x akan hampir sejajar sempurna dengan kota-kota dan wilayah perkotaan terpadat. Tren historis yang diperoleh dari analisis temporal citra satelit dapat memperlihatkan kenaikan emisi, sekaligus sejauh mana langkah mitigasi kualitas udara yang diterapkan dapat menekan tren tersebut.

Data satelit mampu memetakan sumber spesifik NO_x , yang sering terlihat sebagai sebaran asap (*plume*) yang khas terlihat sebagai titik panas lokal. Dalam hal ini, terdapat tiga sektor utama yang dapat diidentifikasi sebagai kontributor utama. Pertama, dan yang paling meluas, adalah sektor **transportasi darat**, dimana peta satelit dapat menampilkan tingginya konsentrasi NO_x di sepanjang jalan raya utama dan di pusat kota yang padat.

Kedua, **pembangkit listrik dan kompleks industri** merupakan sumber polusi yang signifikan, dengan data satelit memperlihatkan titik panas yang berintensitas tinggi dengan jelas. Emisi dari sektor ini umumnya muncul sebagai titik-titik lokal berintensitas tingkat yang menonjol di tengah sebaran polusi perkotaan yang lebih luas.

Terakhir, **pusat transportasi utama** seperti pelabuhan dan bandara juga berkontribusi besar terhadap polusi udara perkotaan, dimana data satelit dapat menunjukkan peningkatan kadar NO_x di atas fasilitas tersebut dan di sepanjang jalur pelayaran utama.

Menurut data terbaru dari Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) untuk tahun 2022 dan Community Emissions Data System (CEDS) untuk tahun 2023, **sektor transportasi dan produksi energi telah diidentifikasi sebagai pendorong utama emisi NO_x di Indonesia.**, meskipun kedua inventaris emisi tersebut memiliki perbedaan dalam proporsi bobot antar-sektor (EU JRC, n.d.; PNNL, n.d.).

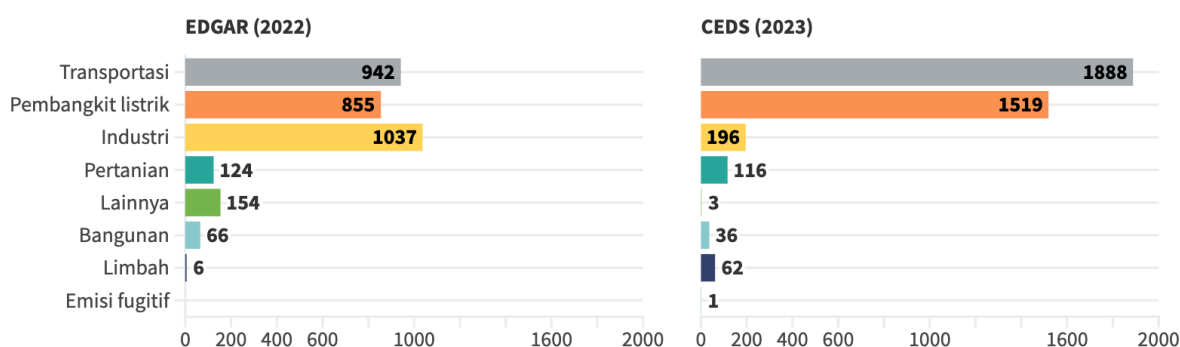
Kedua dataset menunjukkan bahwa **transportasi** adalah penyumbang utama. EDGAR mengaitkan sebagian besar emisi dengan transportasi, yaitu hampir 30% (942 kt), sedangkan CEDS menunjukkan bobot yang lebih tinggi, mewakili hampir setengah dari total emisi nasional (1.888 kt). Untuk **pembangkit listrik**, CEDS menunjukkan porsi yang signifikan sebesar 40% (1.519 kt), sementara EDGAR memperkirakan sedikit lebih rendah yaitu 27% (855 kt).

Perbedaan yang mencolok terlihat pada sektor **industri**, dimana EDGAR mengidentifikasi sektor ini sebagai sumber emisi NO_x terbesar, sekitar sepertiga dari total nasional (1.037 kt), sedangkan CEDS menunjukkan industri sebagai kontributor kecil hanya sebesar 5%

(196 kt). Secara keseluruhan, gabungan sektor pertanian, pemukiman atau bangunan, limbah, dan kategori lainnya hanya menyumbang porsi kecil dalam kedua inventaris emisi NO_x tersebut.

Inventarisasi emisi NO_x Indonesia berdasarkan sektor

Emisi tahunan dalam kiloton (kt)



Sumber: EDGAR - EU JRC, <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>, CEDs - PNNL, <https://github.com/jgcriceds/>

Catatan: Menampilkan data terkini yang tersedia – EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research; dikembangkan oleh JRC/PBL Komisi Eropa) menyediakan estimasi GRK global; CEDs (Community Emissions Data System; dikembangkan oleh JGCRI/PNNL/UMD) melacak emisi historis untuk pemodelan iklim. **Emisi fugitif** mengacu pada pelepasan gas, uap, atau materi partikulat yang tidak disengaja dan menyebar (misalnya, kebocoran peralatan, penyimpanan yang tidak tertutup rapat) ke atmosfer, yang berbeda dari pelepasan terkendali melalui cerobong atau ventilasi.



Gambar 1 — Rincian emisi NO_x Indonesia menurut sektor berdasarkan data terbaru dari inventaris emisi global, EDGAR dan CEDs

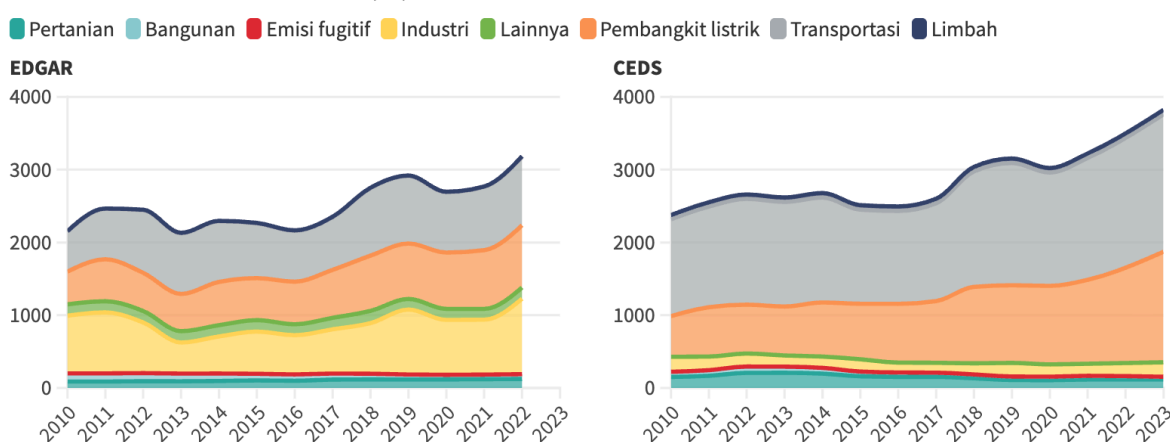
Selama 13 tahun terakhir, emisi NO_x nasional Indonesia mengalami peningkatan yang konsisten sebesar 46% menurut EDGAR (2010–2022) dan 59% menurut CEDs (2010–2023). Kenaikan yang terus berlanjut ini mencerminkan krisis kualitas udara yang kian meluas seiring pertumbuhan populasi dan ekonomi nasional yang belum terlepas dari ketergantungan pada bahan bakar fosil, serta penerapan mitigasi kualitas udara yang memadai. Seperti yang divisualisasikan pada Gambar 2, kedua kumpulan data tersebut memetakan tren peningkatan yang jelas selama dekade terakhir, meskipun berbeda dalam skala keseluruhan dan rincian sektoralnya.

Data CEDs menunjukkan total emisi tahunan meningkat dari sekitar 2.400 kt pada tahun 2010 menjadi hampir 3.800 kt pada tahun 2023. Tren ini sebagian besar didorong oleh ekspansi pesat di sektor transportasi dan pembangkit listrik, yang terakselerasi setelah tahun 2017. Sementara itu, EDGAR melacak volume keseluruhan yang lebih rendah, meningkat dari sedikit di atas 2.000 kt pada tahun 2010 menjadi sekitar 3.100 kt pada tahun 2022. Meskipun EDGAR juga mencatat pertumbuhan di sektor transportasi dan pembangkit listrik, data EDGAR mengatribusikan porsi yang jauh lebih besar dan konsisten pada sektor industri sepanjang rentang waktu tersebut.

Terlepas dari perbedaan ini, kedua inventaris emisi tersebut sepakat mengenai adanya fase stagnasi sementara sekitar tahun 2015 serta penurunan yang signifikan selama perlambatan ekonomi terkait pandemi tahun 2020–2021, disusul oleh lonjakan tajam. Perbedaan signifikan dalam garis dasar sektoral antara EDGAR dan CEDS menegaskan urgensi kebutuhan upaya penyelarasan inventarisasi data emisi.

Tren emisi NO_x Indonesia sejak tahun 2010

Emisi tahunan dalam kiloton (kt)



Sumber: EDGAR - EU JRC, <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>, CEDS - PNNL, <https://github.com/jgcriceds/>

Catatan: Menampilkan data terkini yang tersedia – EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research; dikembangkan oleh JRC/PBL Komisi Eropa) menyediakan estimasi GRK global; CEDS (Community Emissions Data System; dikembangkan oleh JGCRI/PNNL/UMD) melacak emisi historis untuk pemodelan iklim. **Emisi fugitif** mengacu pada pelepasan gas, uap, atau materi partikulat yang tidak disengaja dan menyebar (misalnya, kebocoran peralatan, penyimpanan yang tidak tertutup rapat) ke atmosfer, yang berbeda dari pelepasan terkendali melalui cerobong atau ventilasi.

Gambar 2 — Lintasan historis emisi NO_x Indonesia menurut sektor yang diperoleh dari inventarisasi emisi global, EDGAR dan CEDS

Menggunakan data satelit untuk memetakan titik panas NO_x di Indonesia

Dalam studi ini, CREA memanfaatkan penginderaan jauh berbasis satelit untuk menjembatani kesenjangan data inventarisasi emisi, sekaligus memetakan keterbatasan dalam krisis kualitas udara nasional. Meskipun pencitraan satelit ini berfungsi sebagai sinyal awal untuk memvalidasi tren inventaris yang saling bertentangan dan menunjukkan titik panas NO_x di seluruh wilayah perkotaan dan kawasan industri yang berkembang, intervensi udara bersih yang tepat sasaran pada akhirnya harus bergantung pada data aktual di lapangan yang andal, yang dibangun berdasarkan pelaporan emisi nasional Indonesia yang transparan dan terinci.

Metodologi

Metode berbasis satelit untuk mengestimasi emisi NO_x dari sumber industri skala besar telah berkembang secara signifikan sejak awal tahun 2000-an. Berkat kemajuan teknologi satelit dan perbaikan metodologis yang terus berjalan, teknik-teknik ini sekarang semakin teruji dan mampu memperkirakan emisi NO_x dengan tingkat akurasi yang memadai (rata-rata ketidakpastian dibawah 50%). Analisis CREA dalam studi ini berhasil mengembangkan katalog global titik panas NO_x dari [Beirle et al. \(2023\)](#), untuk meningkatkan deteksi emisi NO_x dan memberikan perkiraan emisi dan sumber baru yang diperbarui hingga tahun 2025 (Beirle et al., 2023).

Deteksi sumber titik dengan pendekatan *top-down* yang diterapkan dalam studi ini berhasil mengungkap 29 sumber titik di Indonesia, melampaui katalog awal dari Beirle et al. yang hanya mencakup 9 titik panas. Hasil estimasi emisi yang diperoleh tetap sebanding dengan estimasi yang diperoleh Beirle et al. (*detail lebih lanjut terlampir dalam laporan metodologi*).

Dua puluh titik tambahan ini tersebar di Jawa, Sumatera, Sulawesi dan Maluku, serta Kepulauan Nusa Tenggara. Di Jawa, sebanyak sepuluh titik dapat diidentifikasi — lima di antaranya baru, lima cocok dengan dataset dari Beirle et al., dan satu dari Beirle et al. tidak terdeteksi. Satu sumber yang tidak terdeteksi di dekat Cirebon, Jawa Barat, awalnya terdeteksi tetapi kemudian dikeluarkan dari daftar karena tidak lolos kontrol kualitas yang ditetapkan; namun, titik ini perlu menjadi perhatian untuk pelacakan di masa mendatang.

Di Kalimantan, terdapat tiga titik panas — satu diantaranya telah diidentifikasi sebelumnya oleh Beirle et al. Di seluruh Sumatera, terdapat total tujuh titik panas, yang tidak satupun sebelumnya diidentifikasi dalam penelitian Beirle et al. Sementara itu di Kepulauan Sulawesi dan Maluku, terdapat tujuh titik panas — hanya satu diantaranya telah diidentifikasi sebelumnya. Di Kepulauan Nusa Tenggara, terdapat dua titik panas — satu di Bali telah dicatat oleh Beirle et al., dan satu di Nusa Tenggara Barat merupakan sumber baru.

Sebaran 29 titik panas NO_x yang teridentifikasi dalam studi ini — bersanding dengan sembilan sumber yang tercakup dalam riset Beirle et al., diilustrasikan pada Gambar 3. Gambar 4 memberikan visualisasi kepadatan kolom vertikal NO_x (*vertical column density*) yang diperoleh menggunakan metodologi yang diadopsi dalam studi ini.

Titik emisi NO_x yang terdeteksi



Sumber: Katalog titik emisi NO_x (point source catalog) dari Beirle et al. v2 (2023) dan analisa CREA.



Gambar 3 — Peta titik panas NO_x oleh Beirle et al., dan sumber titik tambahan yang terungkap dari metodologi yang diperbarui dan yang diperluas hingga tahun 2025

Mengatribusikan sumber titik panas dengan penghasil emisi

Untuk mengaitkan sumber titik panas NO_x yang terdeteksi melalui pendekatan *top-down* dengan fasilitas penghasil emisi tertentu, studi ini mempertimbangkan informasi mengenai fasilitas yang diketahui menyumbang emisi NO_x dalam jumlah signifikan, yang tersedia dari Global Energy Monitor (GEM) dan Climate Trace. Referensi yang digunakan mencakup fasilitas pembangkit listrik tenaga batubara, minyak, dan gas dalam [Global Coal Plant Tracker \(GCPT\)](#), [Global Oil and Gas Plant Tracker \(GOGPT\)](#), fasilitas industri dan logistik lainnya dari pelacak GEM,¹ serta [peta emisi global Climate Trace](#).

Analisis ini mencakup **sumber emisi yang relevan (disebut sebagai *emitter*) yang berada dalam radius 15 km** dari lokasi sumber titik yang paling memungkinkan sebagai kontributor yang relevan.

Kontribusi terhadap kualitas udara ambien

Kemajuan dalam data satelit telah merevolusi pemahaman bersama tentang polusi udara dengan memetakan area berkonsentrasi tinggi atau titik panas untuk NO_x . Sudut pandang *top-down* yang tersedia dari data ini memungkinkan para ahli untuk mengidentifikasi sumber-sumber emisi utama, dan yang lebih penting, menilai bagaimana emisi tersebut berkontribusi terhadap kualitas udara ambien, baik pada skala lokal maupun regional.

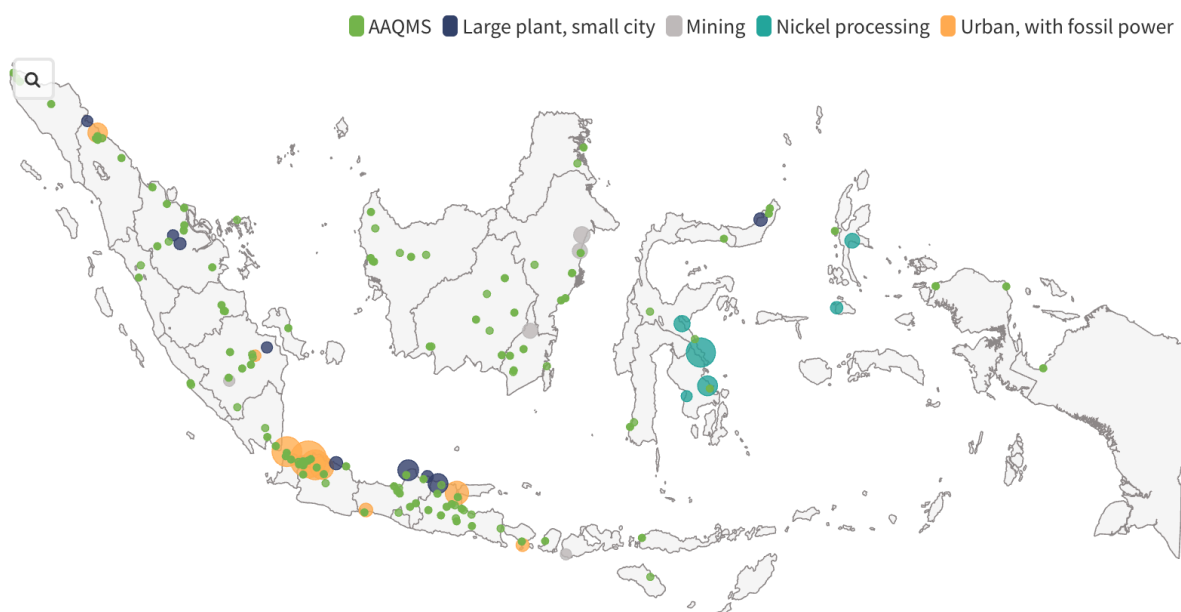
Emisi NO_x bukan sekedar masalah lokal; polutan ini merupakan prekursor bagi polutan berbahaya lainnya dan dapat melintasi jarak yang sangat luas, berdampak jauh melampaui sumber asalnya.

Analisis spasial yang menggabungkan konsentrasi NO_2 yang diperoleh dari satelit Sentinel-5P dengan jaringan lebih dari 100 titik stasiun pemantauan kualitas udara ambien (*Ambient Air Quality Monitoring Station, AAQMS*) resmi yang dikelola dan dioperasikan oleh Kementerian Lingkungan Hidup (KLH) dan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) dapat digunakan untuk mengungkap *blind spots* dalam pengawasan kualitas udara di Indonesia saat ini. Informasi ini dapat digunakan untuk menginformasikan tindakan lebih lanjut, misalnya, memandu perluasan strategis jaringan pemantauan untuk memprioritaskan zona emisi tinggi yang saat ini belum terpantau secara optimal atau belum terjangkau sama sekali.

¹Pelacak GEM yang disebutkan di sini mencakup fasilitas yang diketahui menghasilkan emisi NO_x yang signifikan, termasuk [Global Cement and Concrete Tracker \(GCCT\)](#), [Global Coal Mine Tracker \(GCMT\)](#), [Global Chemical Inventory \(GCHI\)](#), [Global Coal Terminals Tracker \(GCTT\)](#), [Global Bioenergy Power Tracker](#), [Global Iron and Steel Tracker \(GIST\)](#), dan [Global Gas Infrastructure Tracker \(GGIT\)](#)

Gambar 4 menunjukkan distribusi AAQMS di seluruh Indonesia, terhadap 29 titik panas NO_x yang diidentifikasi dalam studi ini. DKI Jakarta dapat dikatakan memiliki cakupan pemantauan terbaik, dengan 125 stasiun pemantauan tersebar di seluruh provinsi (Udara Jakarta, n.d.). Meskipun hanya 12 stasiun dianggap berstandar sebagai referensi (*reference grade*) dan sisanya adalah sensor *low cost*, akses terhadap pemantauan kualitas udara sangat memadai untuk Jakarta. Namun, di luar batas administratif DKI Jakarta, cakupan menurun drastis, dengan hanya ada satu sensor di Bekasi, dan tidak ada sama sekali yang mencakup daerah rawan polusi udara Karawang Barat dan Cikampek.

Stasiun pemantauan kualitas udara ambien dipetakan terhadap 29 titik panas NO_x di seluruh Indonesia



Sumber: Stasiun pemantauan kualitas udara ambien nasional yang dikelola oleh Kementerian Lingkungan Hidup (KLH) - <https://ispu.kemenvh.go.id/webv5/#/>, Badan Meteorologi, Klimatologi (BMKG) - <https://iklim.bmkg.go.id/id/kualitas-udara-indonesia/>, Sensor berbiaya rendah (low-cost sensors) regional, dari Dinas Lingkungan Hidup DKI Jakarta - <https://udara.jakarta.go.id/> • **AAQMS**, Ambient Air Quality Monitoring Station; **Empat kelompok utama** — Perkotaan, dengan energi fosil (**Urban, with fossil power**); Industri skala besar, wilayah terpencil (**Large plant, small city**); Pengolahan nikel (**Nickel processing**); dan Pertambangan (**Mining**)



Gambar 4 — Sebaran stasiun pemantauan kualitas udara darat resmi di Indonesia

Di seluruh Jawa, terdapat setidaknya satu sistem AAQMS resmi di dekat titik-titik panas yang diidentifikasi, yaitu Cilacap, Tanjung Jati, dan Rembang di Jawa Tengah, serta Tuban and Surabaya in East Java. Suralaya di Banten memiliki dua sensor di sekitarnya—satu berlokasi di dekat Kota Cilegon, dan satu lagi di dekat PT Krakatau Sarana Properti.

Adapun untuk titik panas di luar Pulau Jawa, wilayah-wilayah berikut juga memiliki setidaknya satu AAQMS: Medan di Sumatera Utara, Palembang dan Muara Enim di Sumatera Selatan, Denpasar di Bali, Kendari di Sulawesi Tenggara, serta Bontang di Kalimantan Timur. Titik-titik panas ini umumnya dikategorikan sebagai wilayah perkotaan, kecuali Muara Enim, Bontang, dan Kendari, tempat aktivitas padat emisi beroperasi secara dominan — masing-masing berupa penambangan batu bara, operasional pabrik industri skala besar, dan pengolahan nikel.

Mengategorikan titik panas NO_x Indonesia

Seiring berkembangnya teknologi deteksi *top-down* berbasis satelit, pemantauan polusi udara kini telah meluas melampaui jaringan pemantau darat konvensional untuk mengungkap skala dan sebaran dari emisi berbasis fosil.

Dengan menganalisis kepadatan kolom vertikal NO_x lokal berdampingan dengan infrastruktur pembangkit listrik tenaga termal dan industri yang dapat diidentifikasi, studi ini mengategorikan **29 titik panas ke dalam empat kelompok utama — Perkotaan, dengan energi fosil (Urban, with fossil power); Industri skala besar, daerah terpencil (Large plant, small city); Pengolahan nikel (Nickel processing); dan Pertambangan (Mining)**. Tabulasi lengkap disajikan dalam Lampiran, Tabel A1.

Pengelompokan ini bertujuan untuk membantu menjembatani kesenjangan antara data dan realitas lingkungan, menyoroti konsentrasi polusi tinggi di pusat-pusat populasi dan lokasi-lokasi spesifik tempat beroperasinya industri padat energi dan emisi, serta menyorot pergeseran signifikan dan tren yang terus berkembang di luar Pulau Jawa.

CREA telah meluncurkan **EmisiMap** (<https://emisimap.energyandcleanair.org/>) bersamaan dengan studi ini sebagai **alat visualisasi untuk memetakan data polusi geospasial bersama infrastruktur energi yang diketahui** — seperti pembangkit listrik berbasis bahan bakar fosil, pabrik peleburan logam, dan kawasan industri. Alat ini diharapkan untuk menjembatani keterbatasan pemantauan darat dan mengatribusikan emisi yang terdeteksi satelit ke sumber-sumber yang paling memungkinkan.

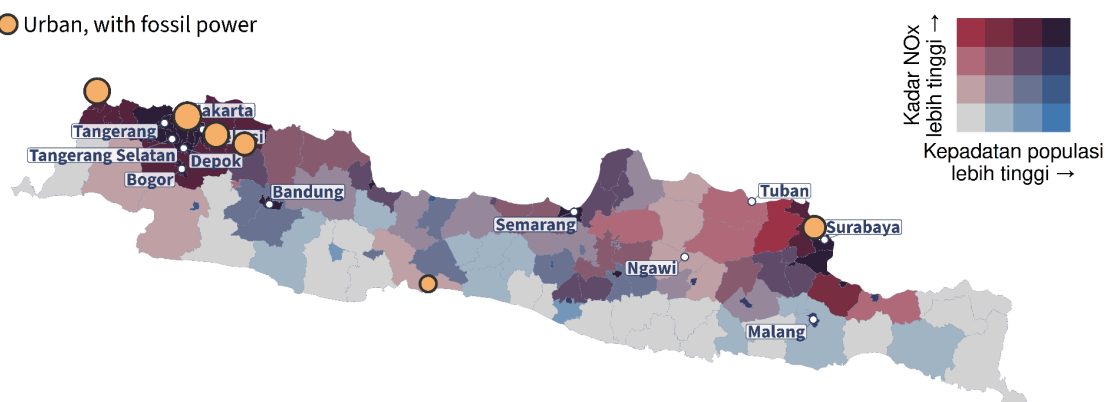
Perkotaan, berdekatan dengan fasilitas pembangkit listrik dan industri utama – 9 titik panas

Kelompok “**Perkotaan, dengan energi fosil**” mencakup sembilan titik panas utama yang terkonsentrasi di dalam atau berdekatan dengan wilayah metropolitan terpadat di Indonesia. Di wilayah ini, emisi dasar dari transportasi dengan kepadatan tinggi dan aktivitas domestik bertambah signifikan dengan keberadaan pembangkit listrik skala besar dan industri padat energi. Tumpang-tindih struktural ini memicu krisis kualitas udara di ruang udara bersama (*airshed*), yang mengungkapkan **sembilan titik panas berkarakter perkotaan di pusat metropolitan utama termasuk Jabodetabek (35+ juta jiwa), Surabaya (3,3 juta jiwa), dan Medan (2,3 juta jiwa)**.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5, lima dari sepuluh titik panas tertinggi dalam pengelompokan ini terkonsentrasi di Pulau Jawa, menunjukkan korelasi yang kuat antara kota-kota dengan kepadatan penduduk yang tinggi dan penggunaan bahan bakar fosil yang intensif. Peta bivariat ini mengilustrasikan titik temu antara konsentrasi NO_x dan kepadatan penduduk, menyoroti risiko paparan di sekitar simpul-simpul utama industri dan ketenagalistrikan.

Pemetaan kepadatan penduduk dan kadar NO_x untuk Pulau Jawa

● Urban, with fossil power



Sumber: NO_x berdasarkan TVCD NO₂ dari Sentinel-5P/TROPOMI; Gridded Population of the World, Versi 4 (GPWv4), Revisi 11. Lokasi dan nama kota: © kontributor OpenStreetMap.

 CREA

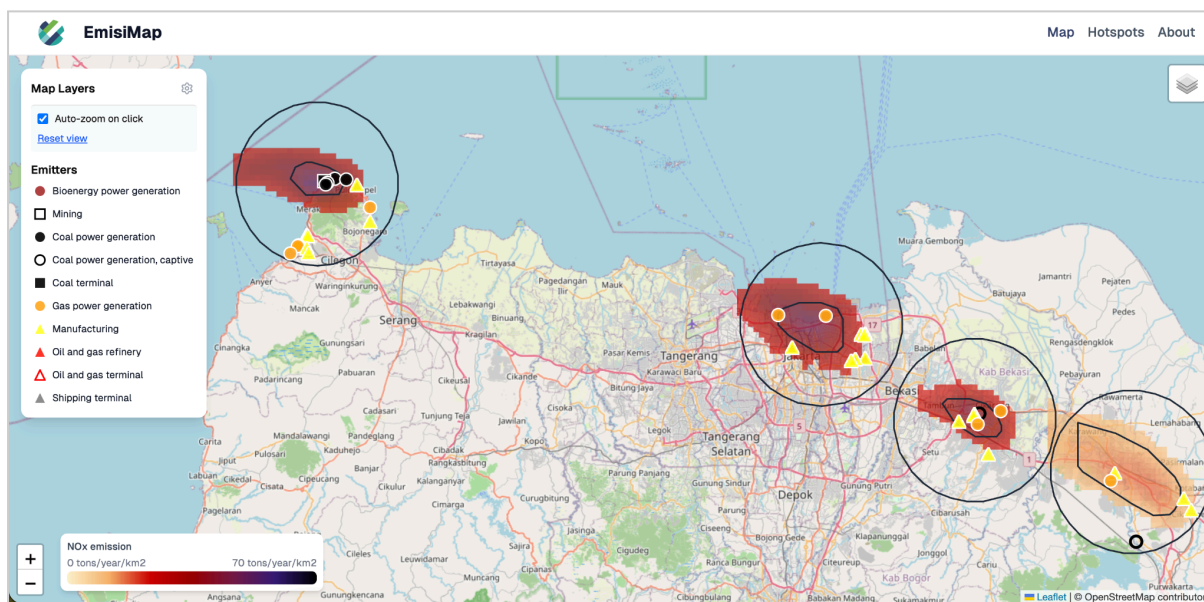
Gambar 5 — Lima titik panas perkotaan dengan emisi NO_x tertinggi di dekat fasilitas pembangkit listrik fosil

Temuan paling krusial menunjukkan adanya ***airshed* raksasa yang menaungi Jakarta dan kota-kota satelit di sekitarnya**. Jakarta Utara dan Bekasi Luar di Jawa Barat tidak hanya menjadi dua wilayah dengan tingkat emisi tertinggi di kawasan ini, tetapi juga menduduki posisi teratas dalam daftar nasional.

Daerah Jakarta Utara menampung pembangkit listrik tenaga gas utama dengan total kapasitas hingga 5 GW ([2.8 GW di Tanjung Priok](#) dan [2.1 GW di Muara Karang](#)), yang beroperasi tepat di sebelah wilayah yang dihuni hampir 2 juta orang. Belum lagi, terdapatnya kawasan industri yang padat di luar batas administratif kota Jakarta, membentang **dari Bekasi hingga Karawang Barat dan Cikampek**, terus-menerus menyumbang polutan udara dari *boiler* dan peralatan termal lainnya yang bergantung pada bahan bakar fosil, serta pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) *captive* yang mencapai hampir 1 GW ([PLTG Kawasan Industri Jababeka 864 MW](#); [PLTG Bekasi 130 MW](#)).

Pencemaran udara juga terbukti berpindah melintasi batas wilayah (*transboundary transport*). Partikulat sekunder yang berasal dari jarak lebih dari 100 km di Provinsi Banten terbawa angin hingga ke kawasan pinggiran kota dan dataran tinggi di sekitarnya. Sebagai **titik panas NO_x tertinggi ketiga di Indonesia, Suralaya di Cilegon, Banten**, terdapat kompleks pembangkit listrik berbasis bahan bakar fosil raksasa dengan total kapasitas lebih dari 8 GW — PLTU mencapai 6,8 GW ([6 GW Banten Suralaya](#); [660 MW Banten Serang](#); [Merak 120 MW](#)) dan PLTG 1,4 GW ([740 MW Cilegon](#); [520 MW Cilegon KDL](#); [120 MW Krakatau](#)). Di saat bersamaan, wilayah ini dipadati industri berat seperti fasilitas produksi besi dan baja ([Krakatau Steel](#) dan [Krakatau Posco](#)), semen ([Sun Fook](#) dan [Conch Cement](#)), serta bahan kimia ([INEOS Aromatics](#) dan [Lotte Chemical](#)).

Gambar 6 menunjukkan visualisasi sebaran rata-rata emisi NO_x di titik hotspot utama, yaitu Suralaya, Banten; Jakarta Utara, DKI Jakarta; Bekasi Luar, Jawa Barat; dan Karawang Barat & Cikampek, Jawa Barat (diurutkan dari barat ke timur).



Gambar 6 — Visualisasi EmisiMap untuk sebaran rata-rata NO_x dan sumber emisi dalam radius 15 km di empat hotspot utama di DKI Jakarta dan Jawa Barat

Tidak mengherankan jika paparan terus-menerus dari emisi intensitas tinggi dari kegiatan operasional pembangkit listrik dan aktivitas industri yang tiada henti berdampak buruk bagi kesehatan masyarakat sekitar. Krisis polusi udara kronis Jakarta berdampak pada setidaknya 10,7 juta penduduk dan lebih dari 30 juta jiwa di kawasan Jabodetabek.

Secara statistik, krisis ini berkaitan dengan hampir 2.500 kematian per tahun, lebih dari 7.000 kasus gangguan kesehatan pada anak-anak, lebih dari 10.000 kematian dini, serta lebih dari 5.000 rawat inap akibat serangan jantung, stroke, kanker paru-paru, dan penyakit pernapasan (World Population Review, 2026; Syuhada dkk., 2023). Sementara itu, di Bekasi, paparan berat dari asap kendaraan, PLTU, pabrik, dan emisi sektor residensial memangkas angka harapan hidup rata-rata hingga 5 tahun (Aulia, 2024).

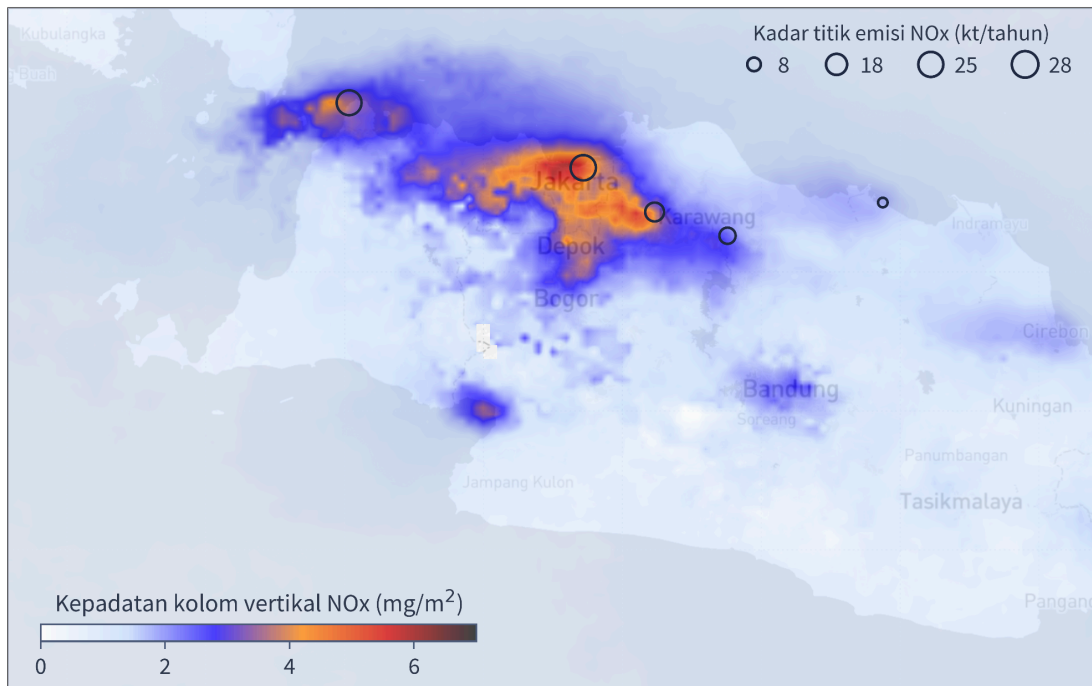
Sementara itu, sekitar 100 km dari arah barat Jakarta, kerusakan lingkungan dilaporkan telah merambah ekosistem pesisir. Kerusakan laut dan terus menurunnya hasil tangkapan ikan telah mengikis mata pencaharian nelayan tradisional (Dialogue Earth), 2021). Masuk ke dalam daftar [Toxic 20](#) – PLTU paling mencemari di Indonesia, [kompleks PLTU Banten Suralaya](#) menaikkan konsentrasi PM_{2.5} tahunan di seluruh sisi utara Banten, yang memapar 13 juta penduduk, serta memicu 1.063 kematian dini dan kerugian ekonomi sebesar USD 1,04 miliar setiap tahunnya (CELIOS et al., 2025; CREA, 2023b). Ancaman kesehatan masyarakat semakin intensif setelah ekspansi masif sebesar 2 GW pada akhir tahun 2025 (CNN Indonesia, 2025).

Karena polusi udara tidak berhenti pada batas wilayah administratif, penanganan isu udara bukan lagi sekedar prioritas lokal, tetapi mendesak secara regional dan nasional. Langkah tegas untuk menekan emisi tidak hanya bermanfaat bagi warga di pusat metropolitan, tetapi juga jutaan orang yang berbagi wilayah airshed yang sama. Hal ini menegaskan pentingnya intervensi lintas daerah dan lintas sektor yang terkoordinasi dengan target penurunan polusi yang terukur dan berbatas waktu.

Di kawasan *airshed* Jabodetabek, **emisi dari PLTU batu bara dan kawasan industri sering kali tertiuap jauh melampaui titik asalnya** menuju wilayah sekitar seperti Tangerang, Bogor, Depok, Bekasi, hingga ke dataran tinggi Puncak dan Cianjur. Dalam kondisi cuaca tertentu, gumpalan asap polusi bahkan dapat membentang hingga ratusan kilometer, memengaruhi Sumatera Selatan, Lampung, dan Jawa Tengah.

Analisis spasial CREA tahun 2020 memverifikasi bahwa sebaran kawasan industri bertumpang tindih langsung dengan hotspot emisi NO_x dan SO₂ utama di seluruh Jawa. Selain itu, pemodelan atmosfer saat episode polusi terparah di Jakarta menegaskan bahwa lintasan angin yang dominan melewati langsung koridor industri padat di Banten dan Jawa Barat sebelum menyelimuti ibu kota (CREA, 2020).

Gambar 7 menunjukkan visualisasi sebaran rata-rata emisi NO_x di kawasan tersebut.

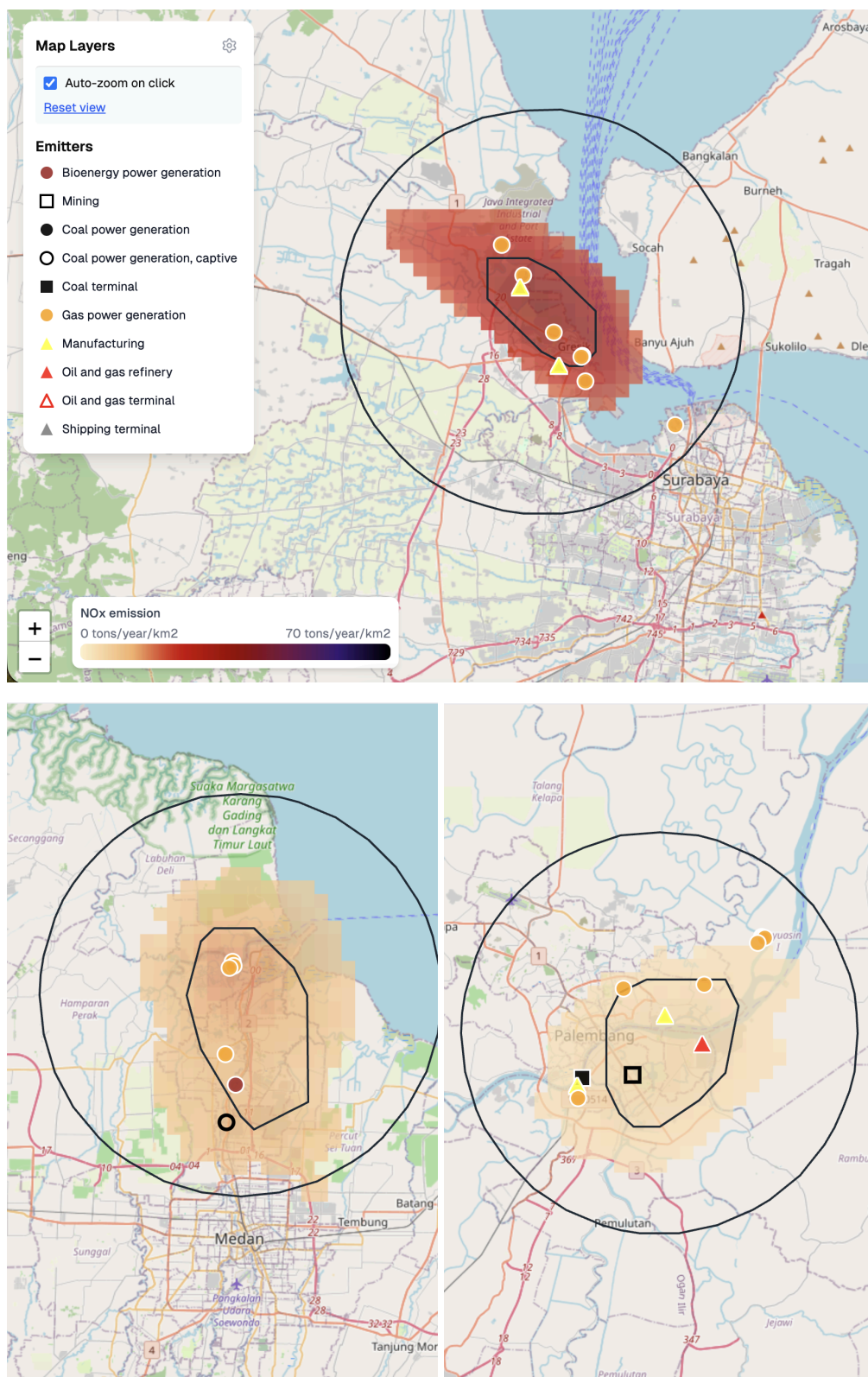


Sumber: TVCD NO_2 dari Sentinel-5P/TROPOMI, dikonversi menjadi TVCD NO_x menggunakan data ozon dari reanalisis CAMS.

 CREA

Gambar 7 — Rata-rata emisi NO_x di wilayah Jabodetabek pada tahun 2025

Di luar Jabodetabek, hotspot emisi NO_x perkotaan yang terdeteksi di Surabaya, Jawa Timur, serta Medan, Sumatera Utara, dan Palembang, Sumatera Selatan — kota terpadat kedua, keempat, dan kesembilan di Indonesia. Wilayah-wilayah ini memperlihatkan pola serupa: sumber emisi industri padat berpadu langsung dengan aktivitas kota, sehingga memperparah paparan polusi bagi warganya. Gambar 8 menampilkan sebaran emisi NO_x di wilayah airshed kota-kota tersebut.



Gambar 8 — Sebaran emisi NO_x di atas Surabaya, Medan, dan Palembang

Di **kawasan *airshed* Surabaya di Jawa Timur**, inti kota Surabaya yang padat penduduk, yang dihuni oleh 3,3 juta jiwa, menjadi penampung akumulasi polusi dari lalu lintas pelayaran kapal dan transportasi perkotaan yang padat. Kondisi ini diperparah oleh keberadaan kawasan industri di sekitarnya, seperti Gresik dan Sidoarjo. Dekatnya jarak antara pembangkit listrik pesisir dan manufaktur berbasis gas menciptakan emisi pekat yang keluar terus-menerus, lalu terbawa jauh ke pedalaman mengikuti arah angin utama.

Sebaliknya, ***airshed* Medan di Sumatera Utara** menunjukkan dinamika lintas batas yang berbeda bagi 2,3 juta penduduknya. Di sini, emisi dari pabrik lokal, pembangkit bioenergi, dan pabrik baja bercampur langsung dengan polusi transportasi harian. Data satelit menunjukkan bahwa emisi NO_x sering kali melintasi batas kota, menyebarkan beban polusi berat dari pusat kota langsung ke kawasan pertanian di pinggiran.

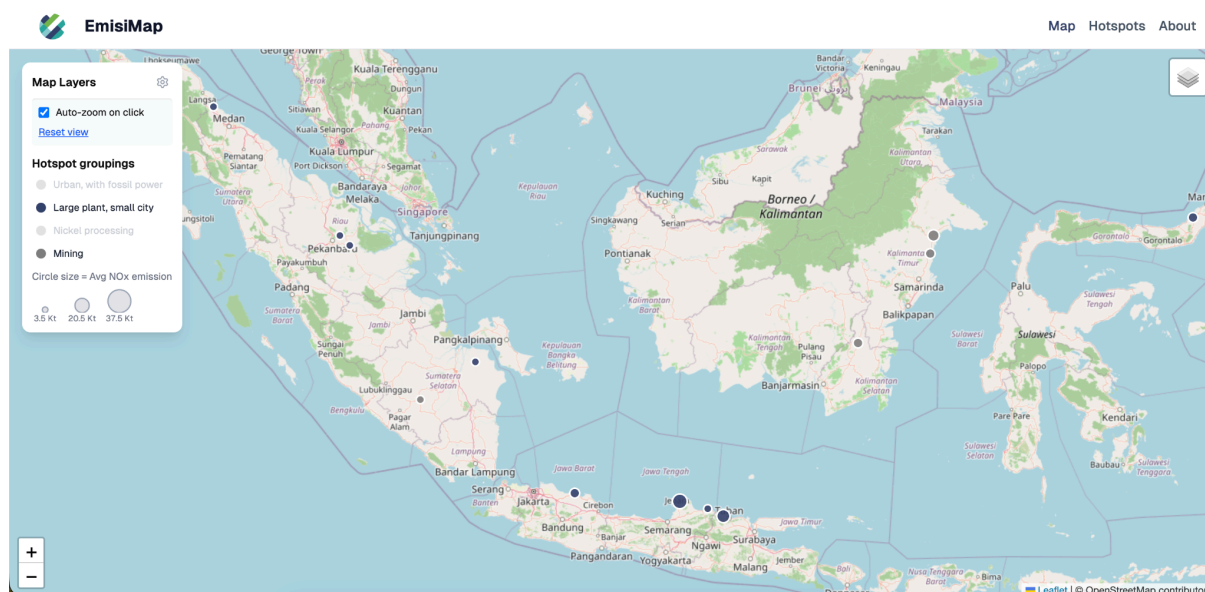
Di **Sumatera Selatan, *airshed* Palembang** menjadi pusat infrastruktur energi utama. Pembangkit listrik tenaga gas, kilang minyak dan gas, serta terminal batubara membentuk klaster industri yang mengepung pinggiran kota. Sebaran emisi ini memperlihatkan bagaimana pengolahan industri padat dan jaringan energi fosil mengurung penduduk kota dalam selubung polusi lokal.

Industri skala besar, daerah terpencil – 9 titik panas, dan Pertambangan – 5 titik panas

“Industri skala besar, daerah terpencil” (9 titik panas) dan “Pertambangan” (5 titik panas) secara struktural disatukan oleh karakteristik spasial yang sama: keberadaan industri dengan **skala besar dan padat sumber daya yang berlokasi di daerah pinggiran kota (peri-urban), pedesaan, atau pesisir dimana kepadatan penduduk relatif rendah.**

Meskipun kepadatan penduduk di sekitarnya tergolong rendah, kompleks industri dan ekstraksi ini menghasilkan emisi titik (point-source emissions) terpusat yang skalanya setara — atau bahkan melampaui — kawasan metropolitan utama. Pola sebaran ini mencerminkan dinamika yang lebih luas, di mana proyek-proyek padat energi dan emisi secara strategis dibangun dekat dengan cadangan sumber daya atau jalur pelayaran laut dalam. Selain itu, fasilitas-fasilitas ini kerap mengandalkan jaringan energi mandiri (captive power) daripada pasokan listrik jaringan nasional. Akibatnya, klaster industri ini mengalihkan beban polusi udara nasional ke masyarakat daerah terpencil dan kawasan *airshed* regional yang selama ini luput dari pemantauan udara perkotaan.

Gambar 9 mengilustrasikan sebaran 14 titik gabungan ini, memperlihatkan jejak sektoral di pulau-pulau utama: **PLTU yang dikombinasikan dengan industri manufaktur berat mendominasi Pulau Jawa, industri pulp dan kertas menopang Sumatera, dan sektor ekstraksi dan pertambangan mendominasi Kalimantan.**

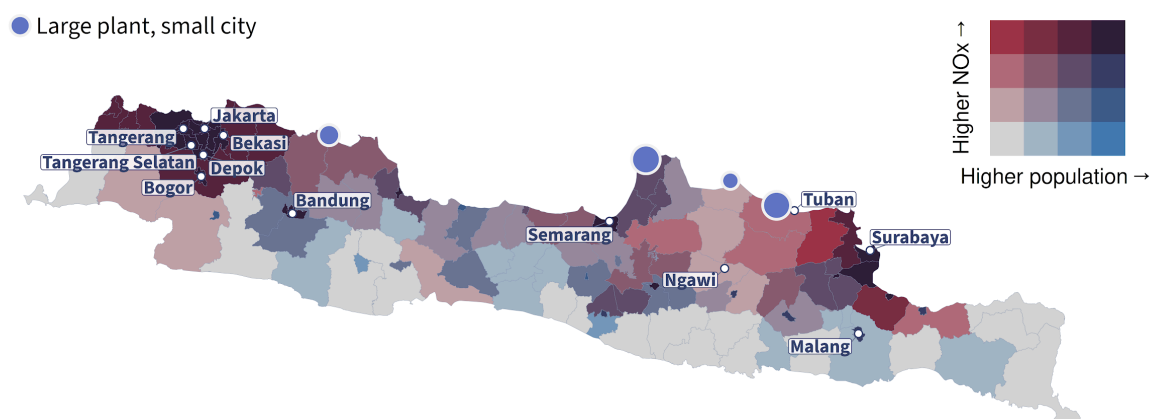


Gambar 9 — Sebaran titik panas NO_x yang terverifikasi satelit dalam kategori “Industri skala besar, daerah terpencil” dan “Pertambangan” di EmisiMap

Jawa, pusat pembangkitan listrik dan industri semen nasional

Meskipun Jawa memiliki rata-rata kepadatan penduduk yang tinggi, sumber emisi beban dasar terbesarnya kerap ditempatkan di kawasan pesisir untuk mempermudah transportasi bahan baku. Kategori ini mencakup **empat PLTU skala besar yang masuk dalam [daftar Toxic 20](#)** yaitu [990-MW PLTU Indramayu di Sukra, Indramayu, Jawa Barat](#); [4.64-GW PLTU Tanjung Jati B di Jepara, Tanjung Jati, Jawa Tengah](#); [630 MW PLTU Rembang di Rembang, Central Java](#); [700 MW PLTU Tanjung Awar-Awar di Tuban, Jawa Timur](#) (Gambar 10). Jika digabungkan, keempat fasilitas ini menyumbang hampir 7 GW pembangkit listrik berbasis batubara yang menyebabkan 680 kematian dini dan beban ekonomi terkait kesehatan sebesar USD 481 juta setiap tahunnya (CELIOS et al., 2025).

Population density and NO_x amount map for Java



Source: NO_x based on NO₂ TVCD from Sentinel-5P/TROPOMI; Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4), Revision 11. City locations and names: © OpenStreetMap contributors.

Gambar 10 — Empat titik panas “Industri skala besar, daerah terpencil” yang diidentifikasi di Pulau Jawa

Beban emisi ini makin diperparah oleh masifnya industri semen di Jawa—sektor yang menyedot hampir 5% konsumsi energi industri global, sekaligus satu dari tiga subsektor manufaktur paling padat energi di Indonesia bersama baja dan petrokimia (Climateworks Centre, 2025). Proses pembuatan kapur membutuhkan pembakaran batu kapur dalam tanur putar (*rotary kiln*) raksasa hingga suhunya melampaui 1.400°C. Proses ini menghasilkan NO_x termal dalam jumlah besar dan mengonsumsi sekitar 200 kg batu bara untuk setiap ton semen yang dihasilkan (Soomro et al., 2023).

Jalur produksi utama milik Semen Indonesia Group di [Tuban](#) (11,9 Mtpa) dan [Rembang](#) (3 Mtpa) terekam jelas dalam data citra satelit. Meskipun produsen telah berupaya menurunkan konsumsi batubara dengan menerapkan program substitusi bahan bakar berbasis RDF (Refuse-Derived Fuel atau bahan bakar dari sampah), material sampah ini kerap mengandung bahan plastik hingga 50%. Tanpa pemilahan awal yang canggih dan pengawasan cerobong yang ketat, pembakaran RDF berisiko melepas dioksin beracun serta memicu bau menyengat dan penurunan kualitas udara lokal — seperti yang berujung pada penutupan fasilitas uji coba pembakaran RDF di Jakarta akibat penolakan warga (Mongabay, 2025d; Tempo, 2025).

Sumatera, pusat pembakaran biomassa dan pengolahan *pulp*

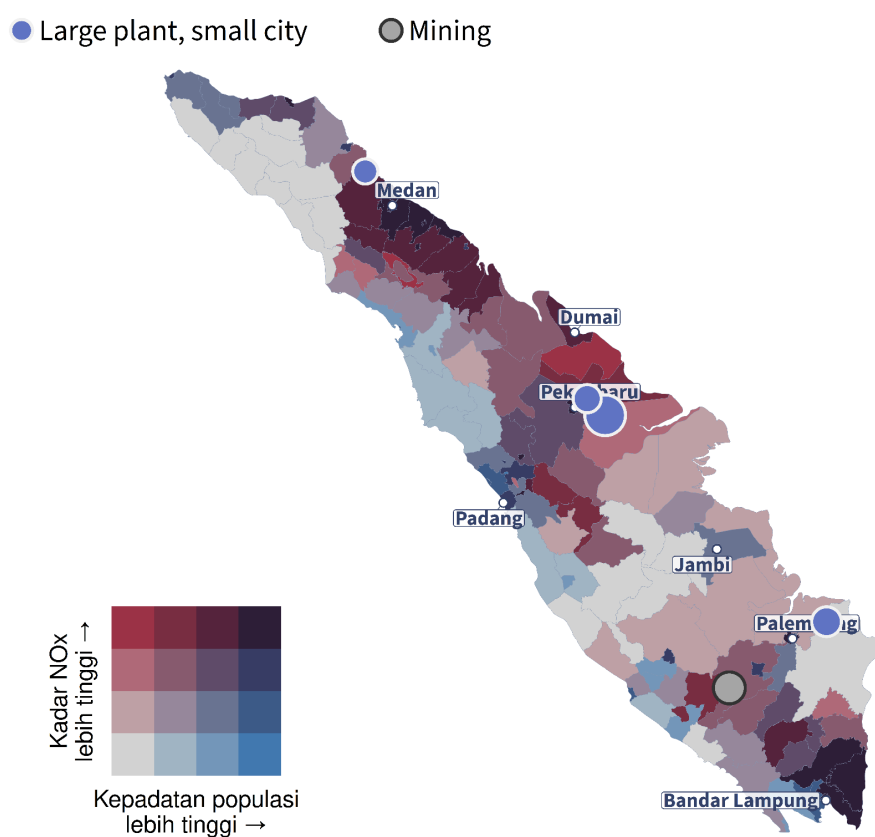
Di luar Jawa, industri *pulp* dan kertas merupakan penyumbang utama tingginya konsentrasi NO_x di luar kawasan perkotaan. Industri ini tergolong sebagai satu dari lima sektor paling padat energi di dunia (Barrios dkk., 2026). Pembuatan bubur kayu membutuhkan pasokan uap panas dan listrik secara terus-menerus dalam jumlah besar untuk pemrosesan kimia, yang umumnya dipasok oleh *boiler* skala besar di lokasi pabrik. Pembakaran bersuhu tinggi pada sistem tersebut menghasilkan emisi NO_x secara intensif, sementara proses kraft pulping berbasis kimia melepaskan senyawa organik volatil (*Volatile Organic Compound*, VOC) dan turunan belerang atau sulfur.

Kompleks mega industri pulp dan kertas di Sumatera—seperti Riau Andalan Pulp & Paper (RAPP) di Pangkalan Kerinci Timur (Pelalawan, Riau), PT Indah Kiat Pulp & Paper Tbk (IKPP) di Tualang (Siak, Riau), dan OKI Pulp Mill milik APP di Ogan Komering Ilir (Sumatera Selatan) (Gambar 11) — mengandalkan gabungan berbagai jenis bahan bakar (*hybrid fuel*) untuk memenuhi kebutuhan energi termal dan listrik beban dasar mereka. Operasi terpadu ini memanfaatkan infrastruktur bioenergi skala besar, seperti [pembangkit listrik bioenergi Kerinci Mill \(535 MW\)](#) dan [pembangkit bioenergi Sinar Mas OKI Paper Mill](#) dengan gasifikasi biomassa ganda (2 x 110 MW). Fasilitas ini memanfaatkan produk sampingan pengolahan pulp, seperti black liquor, kulit kayu, dan bio-sludge, sebagai sumber energi operasional utama.

Namun, bahan bakar fosil tetap digunakan secara signifikan dalam bauran energi industri kawasan ini untuk menjaga stabilitas suhu dan menjamin keberlangsungan produksi tanpa henti. Pabrik seperti IKPP Perawang mengoperasikan pembangkit listrik berbasis fosil mandiri (*captive power*), termasuk [PLTU Perawang Mill berkapasitas 755 MW](#). Sementara itu, pembakaran batu bara pendamping di kompleks RAPP Kerinci masih menyumbang 18% dari total profil energi sebesar 147.257 TJ (APRIL, 2026).

Seiring dengan proyeksi produksi kertas nasional Indonesia yang diperkirakan mencapai 29 juta ton pada tahun 2060, kompleks industri ini menjadi titik sumber emisi bervolume tinggi yang permanen. Hal ini membutuhkan pengawasan regulasi yang ketat serta jalur dekarbonisasi yang terarah (LBNL, 2024).

Pemetaan kepadatan penduduk dan kadar NO_x untuk Pulau Sumatra



Sumber: NO_x berdasarkan TVCD NO₂ dari Sentinel-5P/TROPOMI; Gridded Population of the World, Versi 4 (GPWv4), Revisi 11. Lokasi dan nama kota: © kontributor OpenStreetMap.

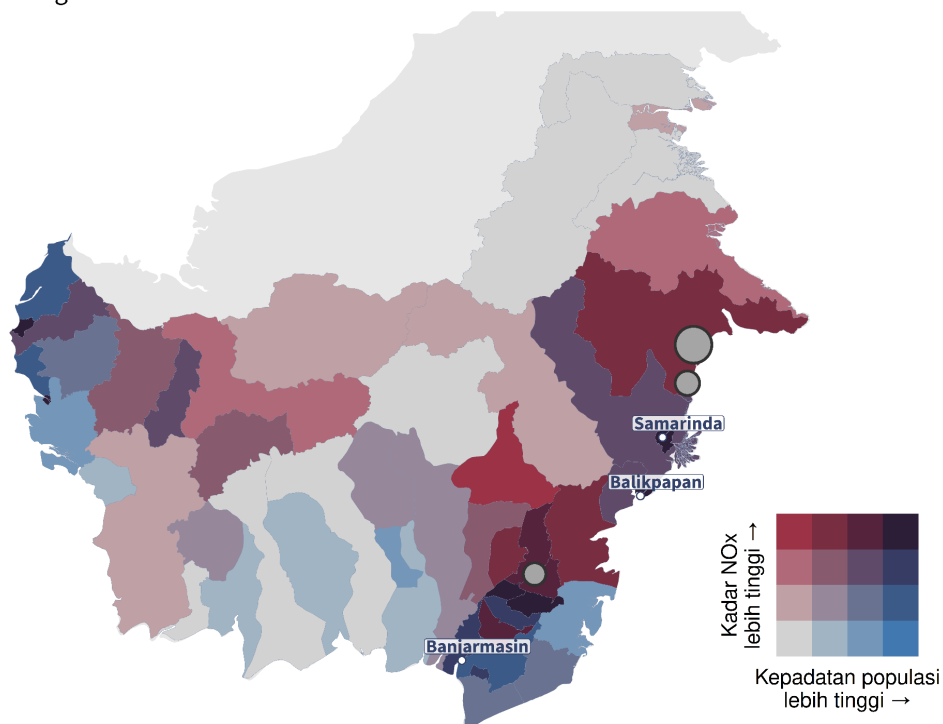
Gambar 11 — Empat titik panas “Industri besar, daerah terpencil” dan satu titik panas “Pertambangan” yang diidentifikasi di Pulau Sumatera

Kalimantan, penambangan batu bara dan pembangkit listrik di mulut tambang

Di Kabupaten Tabalong, Kalimantan Selatan, PT Adaro Indonesia mengoperasikan konsesi tambang terbuka (*open-pit*) skala besar — seperti [Tambang Batubara Tutupan](#) dan [Tambang Batubara Wara](#) — yang memasok batubara secara langsung ke infrastruktur pembangkit listrik di dekatnya, seperti [PLTU Tabalong \(200 MW\)](#) dan [PLTU Tabalong Wisesa \(60 MW\)](#). Di Kalimantan Timur, jejak kegiatan ekstraksi didominasi oleh tambang megaskala KPC Operation milik [PT Kaltim Prima Coal \(KPC\)](#) di Sangatta dan Bengalon, di samping operasi regional penting lainnya seperti [Tambang Batubara TMR](#) dan [Tambang Batubara Elynda Jaya](#) (Gambar 12).

Pemetaan kepadatan penduduk dan kadar NO_x untuk Pulau Kalimantan

● Mining



Sumber: NO_x berdasarkan TVCD NO₂ dari Sentinel-5P/TROPOMI; Gridded Population of the World, Versi 4 (GPWv4), Revisi 11. Lokasi dan nama kota: © kontributor OpenStreetMap.

 CREA

Gambar 12 — Tiga titik panas “Pertambangan” yang diidentifikasi di Pulau Kalimantan

Kompleks ekstraksi ini makin terintegrasi di satu lokasi dengan PLTU mulut tambang (*mine-mouth*) — seperti [PLTU Kaltim FTP2 berkapasitas 200 MW di Kalimantan Timur](#), serta [PLTU Tabalong \(200 MW\)](#) dan [PLTU Tabalong Wisesa \(60 MW\)](#) di Kalimantan Selatan. Integrasi industri yang padat ini menciptakan titik-titik emisi terkonsentrasi, melepaskan NO_x, SO₂, CO₂, dan debu halus (*particulate matter*, PM) dalam jumlah besar ke atmosfer lokal melalui gabungan sumber pembakaran armada bergerak dan tidak bergerak (Chu et al., 2023).

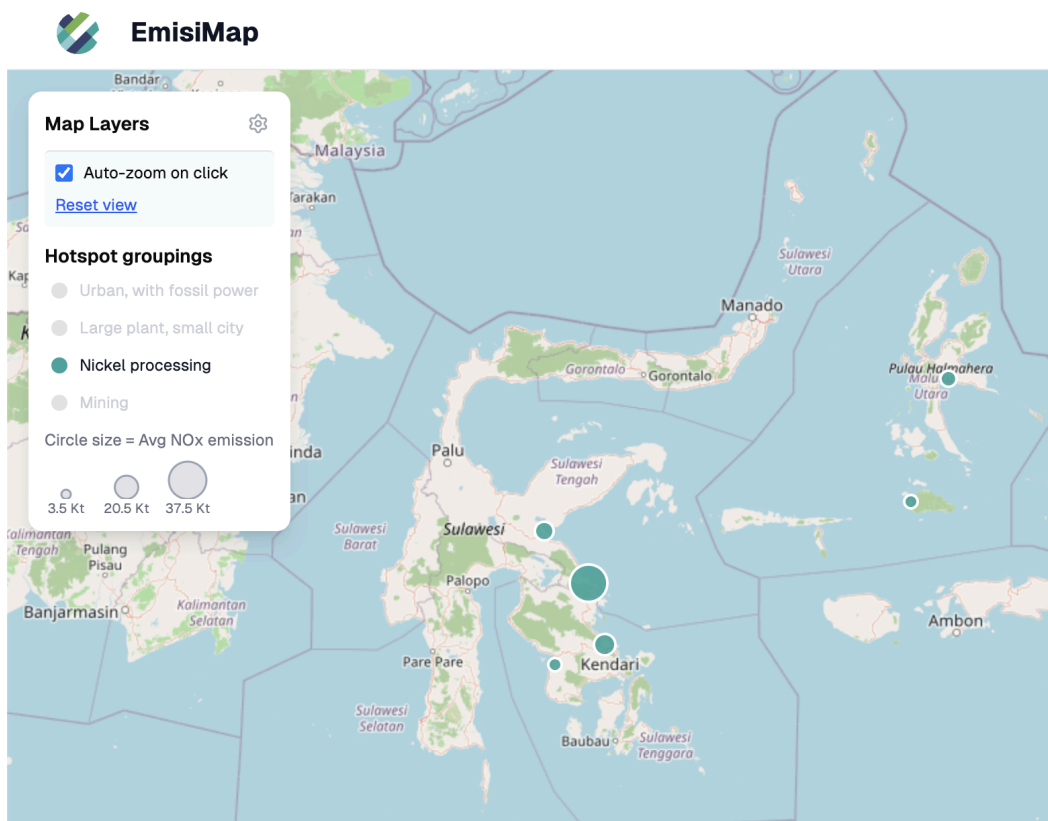
Beban emisi dari kegiatan ekstraksi dan pembangkit listrik ini makin bertambah dengan adanya kawasan manufaktur industri berat di Bontang, Kalimantan Timur. Di kawasan ini, fasilitas sintesis kimia berkapasitas tinggi — seperti [PT Kaltim Methanol Industri Bontang Methanol Plant](#) dioperasikan oleh PT Kaltim Methanol Industri (KMI) dan [PT Pupuk Kalimantan Timur Bontang Ammonia Complex](#) (Pupuk Kaltim) — menggunakan bahan baku gas alam yang dipadukan dengan *boiler* uap industri dan pembangkit listrik *captive*. Tumpang-tindih spasial antara penambangan terbuka, pembakaran batu bara, serta pengolahan pupuk dan metanol menghasilkan polusi multi-sektor di Kalimantan Timur.

Dari sudut pandang tata kelola, terdapat ketimpangan regulasi yang krusial antara pembangkitan listrik dan penambangan mineral. Pembangkit listrik termal secara hukum terikat pada ambang batas emisi titik dan wajib memasang sistem pemantauan emisi terus-menerus (*Continuous Emission Monitoring Systems*, CEMS) secara *real-time* yang dipantau oleh Kementerian Lingkungan Hidup. Sebaliknya, pengawasan regulasi di area pertambangan yang terpencil masih terfragmentasi.

Secara khusus, operasi tambang terbuka dikelola melalui kerangka kerja lingkungan tingkat bentang alam yang bersifat umum — seperti Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup — bukan melalui batas emisi cerobong (*stack emissions*) yang baku dan mengikat, atau standar emisi alat berat mesin diesel (*non-road diesel fleet standards*) (Nexus3 Foundation, 2022).

Pengolahan nikel – 6 titik panas

Pengamatan citra satelit menunjukkan bahwa ekspansi pesat PLTU captive dan infrastruktur *smelter* industri di daerah terpencil telah secara mendasar mengubah profil emisi Indonesia. Meski berada di luar kawasan perkotaan, skala emisi terpusat di kawasan industri ini sangatlah besar. Gambar 13 memberikan gambaran visual mengenai dinamika ini, memetakan intensitas dan sebaran spasial dari hotspot emisi NO_x rata-rata yang dihasilkan secara khusus oleh pusat-pusat pengolahan nikel di Sulawesi dan Maluku.



Gambar 13 — Titik panas “Pengolahan nikel” di EmisiMap di Sulawesi dan Maluku Utara

Didorong oleh tingginya permintaan global akan mineral kritis untuk transisi energi hijau, Indonesia secara agresif memanfaatkan posisinya sebagai pemilik cadangan nikel terbesar di dunia. Negara ini menyumbang 50% dari pasokan nikel murni global dan 51% dari total produksi tambang dunia (Kompas, 2025; IEEFA, 2024).

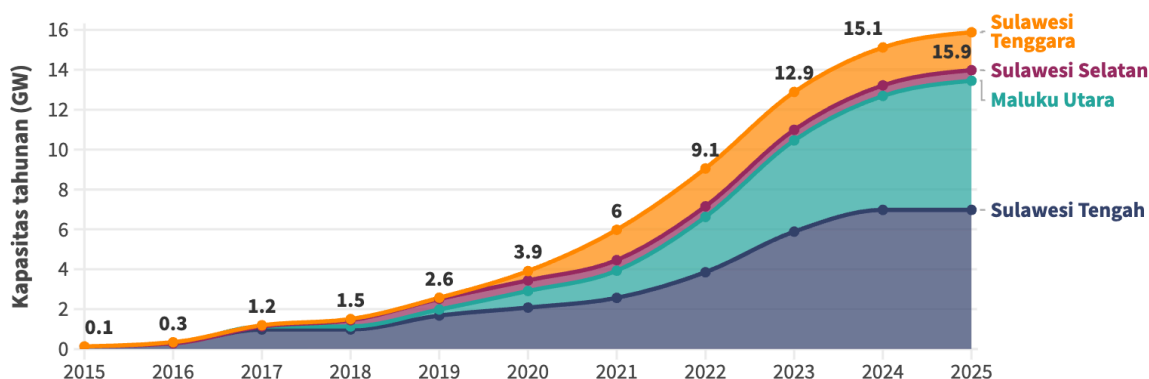
Sejak diberlakukannya larangan ekspor bijih nikel mentah pada tahun 2020 untuk mendorong hilirisasi domestik, aliran modal asing dengan cepat mengubah lanskap industri nasional. Pada tahun 2024, sebanyak 54 smelter nikel telah beroperasi, 120

smelter dalam tahap konstruksi, dan 16 smelter lainnya masih dalam perencanaan (Indonesia Business Post, 2025). Industrialisasi kilat ini menyulap kawasan Maluku dan Sulawesi menjadi hub mineral kritis skala raksasa.

Namun, hilirisasi yang serba cepat ini sangat bergantung pada PLTU tanpa mitigasi yang memadai. Pengolahan bijih nikel laterit—yang mayoritas menggunakan teknologi *Rotary Kiln Electric Furnace* (RKEF) untuk menghasilkan feronikel dan *nickel pig iron* — merupakan proses yang sangat padat energi, membutuhkan energi termal dan listrik dalam jumlah masif. Di Indonesia, kebutuhan beban dasar (*baseload*) ini hampir seluruhnya dipasok oleh PLTU captive di luar jaringan listrik nasional.

Pertumbuhan kapasitas PLTU captive yang terhubung langsung dengan industri nikel Indonesia ditunjukkan pada Gambar 14. Kapasitas gabungan di provinsi-provinsi penghasil nikel ini melonjak drastis dalam satu dekade terakhir. **Percepatan ini kian masif dalam lima tahun terakhir, di mana kapasitasnya melonjak lebih dari enam kali lipat, dari 3 GW pada 2019 menjadi 16 GW pada 2025.**

Kapasitas tahunan PLTU captive yang memasok listrik untuk industri nikel Indonesia di provinsi produsen utama



Sumber: Global Energy Monitor, Global Coal Plant Tracker, January 2026 release •
Jumlah ini tidak termasuk entri dengan kapasitas kurang dari 30 MW.

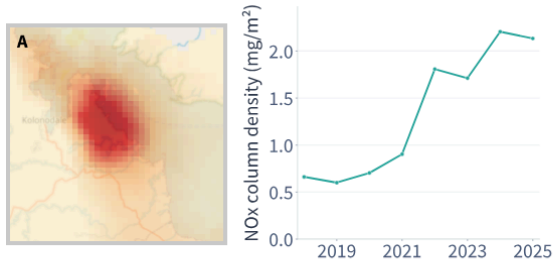


Gambar 14 — Pertumbuhan kapasitas PLTU captive yang terkait dengan industri nikel di provinsi utama pemilik cadangan bijih nikel (2019-2025)

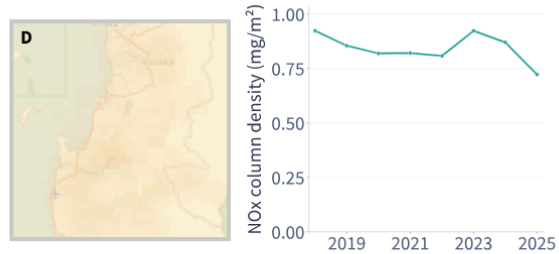
Ketergantungan struktural pada PLTU captive ini telah menciptakan sumber polusi udara industri tumbuh paling cepat dan paling rawan merusak lingkungan di kepulauan ini. Enam titik panas NO_x yang signifikan muncul tepat di atas kawasan pengolahan terisolasi ini. Walau terpengcil, skala emisi dari klaster masif ini belum teridentifikasi sebelumnya. Gambar 15 memvisualisasikan sebaran spasial emisi NO_x di berbagai pusat utama pengolahan nikel serta perubahan jumlah emisi NO_x dari tahun 2018 hingga 2025.



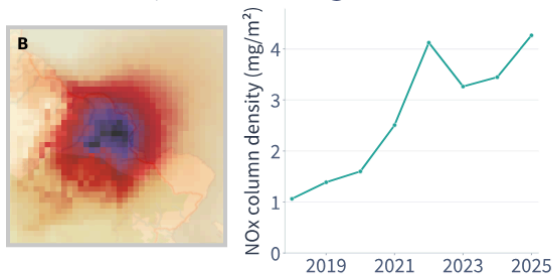
A. Morowali, Sulawesi Tengah - lokasi 2



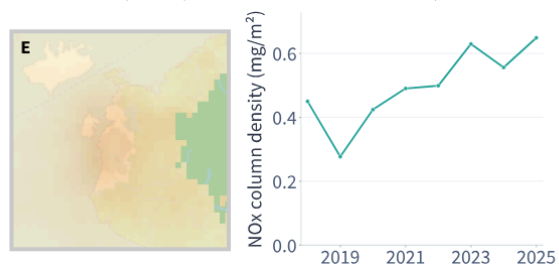
D. Pomalaa, Sulawesi Tenggara



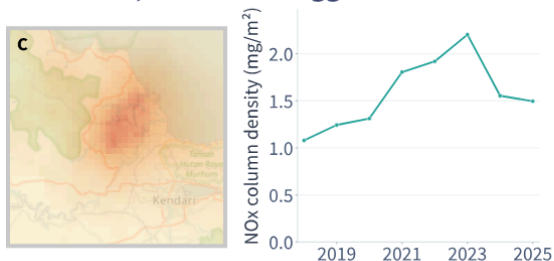
B. Morowali, Sulawesi Tengah - lokasi 1



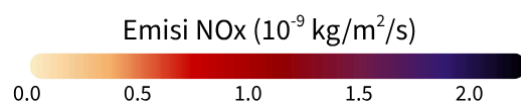
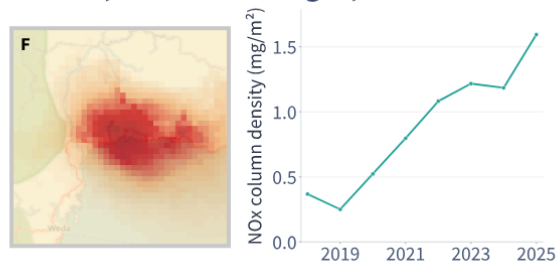
E. Kawasi, Obi, Halmahera Selatan, Maluku Utara



C. Kendari, Sulawesi Tenggara



F. Weda, Halmahera Tengah, Maluku Utara



Gambar 15 — Rata-rata emisi NO_x dan perubahan jumlah NO_x dari tahun 2018 hingga 2025 untuk enam titik panas "Pengolahan nikel" di Sulawesi dan Maluku Utara

Akibat kebijakan larangan ekspor bijih mentah tahun 2020 dan peningkatan kapasitas PLTU captive di luar jaringan listrik utama hingga enam kali lipat, muncul enam titik panas emisi lokal (A–F) di wilayah terpencil Sulawesi dan Maluku Utara.

Titik panas A, B, dan F menunjukkan lonjakan konsentrasi serta lintasan perluasan yang paling parah; hal ini mengonfirmasi bahwa teknologi pengolahan nikel yang intensif energi telah mengubah wilayah pesisir terpencil — yang sebelumnya memiliki tingkat dasar emisi rendah — menjadi sumber utama sebaran emisi industri.

Di Sulawesi Tengah, hotspot A dan B berpusat pada kompleks industri besar Morowali Utara dan Kawasan Industri Indonesia Morowali (IMIP). Hotspot A (-2.01461° , 121.43200°), mencakup PLTU captive [Delong Nikel Fase III \(945 MW\)](#) dan [Fase IV \(660 MW\)](#) yang beriringan dengan operasional PT Gunbuster Nickel Industry, menunjukkan akumulasi NO_x yang pekat. Wilayah ini terus mendapat sorotan regulasi terkait pelanggaran limbah cair dan emisi udara tanpa mitigasi, disertai risiko keselamatan kerja (CRI, 2024).

Tepat di sebelah selatan, Hotspot B (-2.88620° , 122.16446°) mencakup infrastruktur utama IMIP, yang didukung kompleks PLTU captive skala besar [Sulawesi Mining \(2,080 MW\)](#) dan [Sulawesi Labota \(3.360 MW\)](#). Buangan termal dan paparan debu partikulat di sini telah merusak ekosistem laut sekitar, memaksa nelayan melaut lebih jauh, serta memicu lonjakan tajam kasus Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA) di antara 203.000 warga kabupaten tersebut.

Bergeser ke Sulawesi Tenggara, Hotspot C dan D memperlihatkan perluasan jejak smelter berbasis batubara. Hotspot C (-3.89291° , 122.43082°), yang terletak di Kendari dan Konawe, ditopang oleh PLTU captive [Delong Nickel Fase I \(530 MW\)](#) dan [Delong Nickel Fase II \(1.840 MW\)](#), yang terhubung dengan produsen feronikel utama yaitu major ferronickel producers such as PT Virtue Dragon Nickel Industry dan PT Obsidian Stainless Steel. Polusi udara dan air yang dihasilkan telah memicu masalah pernapasan yang meluas di antara 375.000 penduduk Kendari, merusak budidaya udang lokal, dan memicu tantangan hukum atas komitmen komunitas yang tidak terpenuhi.

Lebih jauh ke selatan, Hotspot D (-4.20693° , 121.61804°) di Pomalaa mencerminkan produksi feronikel PT Aneka Tambang Tbk (Antam), yang ditopang oleh [PLTU captive Pomalaa berkapasitas 60 MW](#). Meskipun intensitasnya lebih kecil dalam jangka pendek, ekspansi HPAL yang sedang berlangsung oleh PT Vale Indonesia Tbk menyoroti dilema berkelanjutan antara pembangunan ekonomi dan kerusakan ekosistem pesisir, terutama pendangkalan terumbu karang akibat sedimentasi (Purnama dkk., 2025; Petromindo, 2026).

Di Maluku Utara, Hotspot E dan F mewakili dua klaster paling rawan merusak lingkungan yang dipetakan pada Gambar 16. Hotspot E (-1.53193°, 127.44299°), yang terletak di Pulau Obi, menjadi lokasi kompleks pengolahan logam skala besar, yang didukung oleh total kapasitas PLTU captive hampir 2 GW. Fasilitas pembangkit terhubung dengan [Smelter Nikel PT Halmahera Persada Lygend](#) (2.390 MW — 1.630 MW beroperasi, 780 MW dalam konstruksi), [Xinxing Ductile Iron Pipes](#) (152 MW), dan [Jinchuan Group WP&RKA](#) (150 MW). Limpasan limbah industri di pulau ini memicu kontaminasi kromium heksavalensi (Cr VI) pada pasokan air warga setempat — dengan kadar hingga 19 kali lipat di atas batas legal — dan memicu lonjakan penyakit pernapasan di Halmahera Selatan.

Terakhir, Hotspot F (0.49310°, 128.04688°) di kawasan Indonesia Weda Bay Industrial Park (IWIP), Halmahera Tengah, mencatat lonjakan kadar NO_x yang drastis. Disokong oleh [kompleks PLTU captive raksasa berkapasitas 4.540 MW](#), IWIP telah menggusur lebih dari 5.300 hektar hutan tropis menjadi infrastruktur industri (IWGIA, 2026). Alih fungsi lahan ini mencemari sungai-sungai lokal, meningkatkan kadar logam berat (merkuri dan arsenik) dalam tubuh warga sekitar, serta memicu lonjakan kasus ISPA dari 434 kasus pada 2020 menjadi lebih dari 10.500 kasus pada 2023 (Mongabay, 2025a; Mongabay, 2025c).

Ekspansi industri nikel membawa beban polusi yang sangat tidak proporsional

Emisi NO_x dari pembakaran batubara pada pembangkit listrik dan operasi smelter nikel, menimbulkan risiko kesehatan dan lingkungan yang mengkhawatirkan, terutama bagi masyarakat yang berada di dalam atau berdekatan dengan kawasan tersebut. Konsentrasi titik-titik panas di Sulawesi dan Maluku menyoroti beban emisi yang tidak proporsional dibandingkan dengan jumlah populasi yang terpapar.

Secara akumulatif, emisi NO_x dari titik-titik panas di Sulawesi dan Maluku mencapai total 43,5 kiloton — melampaui total emisi dari sumber titik di wilayah Metropolitan Jakarta, yang diestimasi sebesar 37,7 kiloton. Perbandingan ini mempertegas betapa parahnya tingkat emisi industri di kawasan tersebut, terlepas dari lokasinya yang berada di daerah terpencil dengan populasi yang jauh lebih sedikit. Selain penurunan kualitas udara, ekspansi fisik industri nikel yang sangat masif juga menelan korban jiwa dan merusak lingkungan secara luas.

Tambang terbuka (open-cast) untuk mengambil endapan laterit dangkal telah memicu **pembukaan hutan skala besar**, memusnahkan 5.331 hektar hutan tropis, dan melepas 2 juta ton emisi karbon secara langsung (IWGIA, 2026). Masyarakat pesisir menghadapi banjir bandang di hilir, bioakumulasi logam berat, serta hancurnya mata pencaharian tradisional di perikanan dan pertanian akibat **rusaknya tatanan hidrologi lokal** (CRI, 2024).

Data kesehatan masyarakat di sekitar kawasan pengolahan menunjukkan bahwa kasus **penyakit pernapasan melonjak drastis dari 434 kasus pada 2020 menjadi 10.579 kasus pada 2023**. Selain itu, uji patologi klinis menemukan **konsentrasi arsenik dan merkuri pada darah warga** yang berada pada tingkat sangat berbahaya (Mongabay, 2025c).

Tak hanya itu, **lemahnya pengawasan keselamatan kerja** berulang kali memicu kecelakaan fatal. Salah satunya adalah tanah longsor besar pada Maret 2025 di kawasan IMIP yang menimbun empat pekerja di bawah tumpukan limbah nikel yang tidak stabil. Peristiwa ini menambah panjang daftar kecelakaan industri yang telah menelan sedikitnya 40 korban jiwa di kompleks tersebut sejak 2015 (Mongabay, 2025b; TuK Indonesia, 2025).

Celah regulasi dalam transisi energi Indonesia

Komitmen iklim internasional Indonesia — terutama dokumen investasi Just Energy Transition Partnership (JETP) — sebagian besar berfokus pada pembangkit listrik yang terhubung ke jaringan dan dikelola oleh PT Perusahaan Listrik Negara Persero (PLN). Namun, pertumbuhan pesat PLTU captive industri di luar jaringan menciptakan kontradiksi kebijakan yang serius.

Di saat ekspansi PLTU PLN mulai melambat seturut komitmen dekarbonisasi publik, kapasitas PLTU captive yang menyokong kawasan industri justru melonjak dua kali lipat hanya dalam dua tahun, naik dari 10,4 GW pada 2023 menjadi 19,3 GW pada 2025. Didorong utamanya oleh hilirisasi nikel di Sulawesi dan Maluku Utara, PLTU captive menyumbang sekitar 80% dari seluruh penambahan PLTU baru di Indonesia. Hal ini mendorong total kapasitas captive yang beroperasi, dibangun, dan direncanakan mencapai angka fantastis: 31 GW (CREA & GEM, 2026).

Pertumbuhan eksplosif ini dilindungi oleh celah regulasi dalam Peraturan Presiden Nomor 112/2022 tentang Percepatan Energi Terbarukan (Perpres 112/2022), yang secara eksplisit mengecualikan pembangkit listrik industri yang mendukung Proyek Strategis Nasional (PSN) dari mandat pensiun dini dan larangan pembangunan PLTU baru. Alih-alih menutup celah tersebut, revisi yang diusulkan terhadap Perpres 112/2022 justru berisiko melemahkan komitmen dekarbonisasi dengan membuka ruang hukum baru bagi pembangunan PLTU captive (The Jakarta Post, 2025).

Dengan mengisolasi PLTU captive dari target dekarbonisasi dan mekanisme nilai ekonomi karbon, kebijakan nasional secara tidak langsung melanggengkan ketergantungan pada bahan bakar fosil off-grid. Pemodelan CREA memproyeksikan bahwa mengecualikan unit captive dari target pensiun dini nasional akan mengakibatkan 27.000 kematian tambahan akibat polusi udara dan menimbulkan beban ekonomi kumulatif sebesar USD 20 miliar (CREA & IESR, 2023).

Proyeksi tersebut bahkan merupakan batas minimal. Kerugian kesehatan dan finansial riil diperkirakan jauh lebih tinggi seiring berlanjutnya ekspansi industri PSN tanpa peta jalan dekarbonisasi tingkat aset yang jelas. Kondisi ini makin diperparah oleh Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) 2024–2060 yang memproyeksikan tambahan kapasitas PLTU captive lebih dari 20 GW hingga tahun 2031 (Ember, 2025).

Celah tata kelola ini memungkinkan industri berat terus mengoperasikan jaringan pembakaran batu bara secara masif atas nama pertumbuhan ekonomi dan pasokan mineral kritis. Dampaknya, keberhasilan dekarbonisasi di sektor ketenagalistrikan perkotaan akan menjadi terlemahkan, sementara beban emisi industri nasional teralih ke daerah pesisir yang luput dari pemantauan.

Menjembatani jurang transparansi pemantauan kualitas udara untuk akuntabilitas dan tata kelola

Dari sudut pandang tata kelola, fasilitas nikel industri secara hukum diwajibkan untuk mematuhi struktur kepatuhan yang ketat. Operator harus melaporkan data emisi langsung ke Sistem Informasi Industri Nasional (SIINas) dan memasang sistem pemantauan emisi terus menerus, CEMS pada semua cerobong peleburan dan pembangkit listrik. Sesuai mandat Kementerian Lingkungan Hidup, data ini harus terhubung langsung ke platform digital nasional SISPEK (Nexus3 Foundation, 2022). Selain itu, proyek industri skala besar wajib menyusun Dokumen Evaluasi Lingkungan (AMDAL).

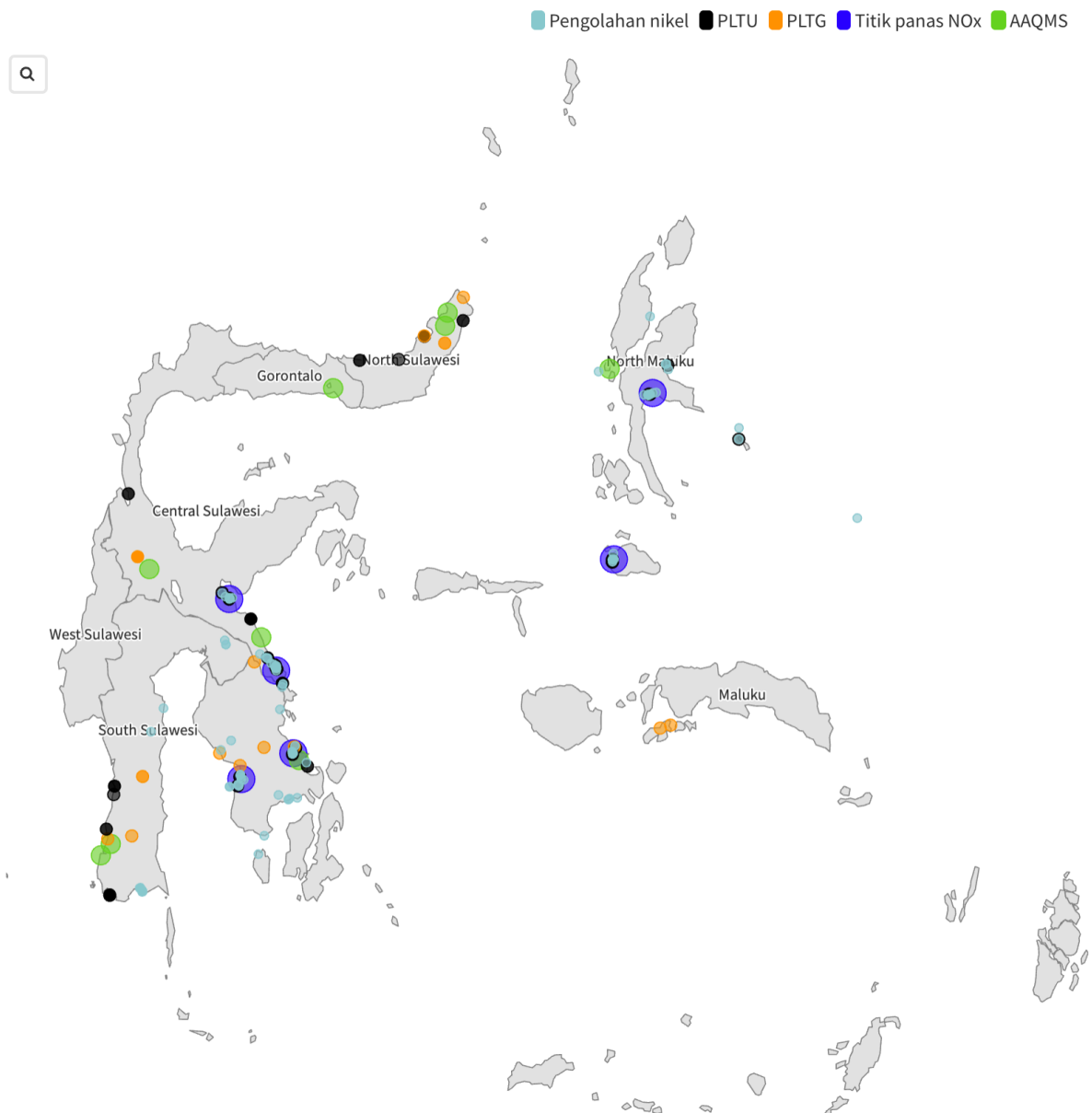
Namun, terdapat jurang transparansi dan penegakan hukum yang sangat dalam. Akses publik terhadap dokumen AMDAL maupun data telemetri CEMS real-time sangat dibatasi, sehingga menutup ruang pengawasan independen oleh masyarakat sipil. Perlindungan regulasi terhadap industri ini kian diperparah oleh ketiadaan infrastruktur pemantauan pembanding di lapangan.

Sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 16, jaringan stasiun pemantau kualitas udara ambien, AAQMS resmi milik pemerintah sangat minim di Sulawesi dan Maluku Utara. Akibatnya, kompleks industri bernilai gigawatt beroperasi tanpa pengawasan stasiun pemantau darat publik, sehingga penjejakan kerusakan lingkungan tidak dapat dilakukan, dan mungkin hanya dapat bergantung pada verifikasi satelit.

Jaringan AAQMS di Sulawesi dan Maluku Utara yang saat ini hanya berjumlah sembilan stasiun menciptakan celah tata kelola yang krusial. Meskipun penempatan stasiun di pusat-pusat kota besar—seperti Makassar, Manado, Gorontalo, dan Ternate—dapat dipahami demi perlindungan kesehatan warga kota, kebijakan ini membuat sumber risiko lingkungan terbesar sama sekali tidak terpantau.

Peta tersebut dengan jelas memperlihatkan bahwa konsentrasi infrastruktur industri berat terbesar — termasuk hub pengolahan nikel dan PLTU captive — **berada jauh di luar kota-kota provinsi tersebut**. Meski berpopulasi lebih kecil, masyarakat pesisir yang tinggal berdekatan dengan kawasan industri berat ini menghadapi paparan emisi beracun yang parah dan akumulatif. Mereka berhak mendapatkan perlindungan nasional yang setara. Hal ini menuntut perluasan jaringan pemantauan kualitas udara ambien ke kawasan industri, penegakan standar kualitas udara yang ketat, serta kewajiban AMDAL berkala untuk setiap rencana ekspansi industri.

Distribusi pusat pengolahan nikel dan infrastruktur pembangkit listrik berbasis fosil di Sulawesi dan Maluku Utara, dan titik panas NOx yang teridentifikasi serta stasiun pemantauan kualitas udara ambien



Sumber: Pengumpulan data lokasi industri nikel, dipublikasikan dalam studi CREA & CELIOS 2024., Dataset Earthwise Institute Indonesia Power Summary, Global Energy Monitor, Global Coal Plant Tracker & Global Oil and Gas Plant Tracker rilis Jan 2026 • **PLTU**, pembangkit listrik berbasis batubara; **PLTG**, pembangkit listrik berbasis gas; **AAQMS**, Ambient Air Quality Monitoring System

Gambar 16 — Ketimpangan spasial antara pusat pengolahan nikel dan stasiun pemantau kualitas udara ambien di Sulawesi dan Maluku Utara

Rekomendasi kebijakan

Pemetaan menyeluruh terhadap titik panas NO_x di seluruh Indonesia mengungkap krisis kualitas udara yang berkembang pesat, menunjukkan emisi industri tidak lagi sekadar masalah perkotaan. Dari kompleks PLTU masif dan tanur semen bersuhu tinggi di Jawa, fasilitas biomassa captive serta industri pulp dan kertas di Sumatra, hingga pusat pengolahan nikel berbasis batu bara di Sulawesi dan Maluku Utara, sebuah pola pencemaran lokal telah terbentuk.

Titik-titik panas di wilayah terpencil ini kerap menyamai atau bahkan melampaui jumlah emisi perkotaan terbesar di Indonesia, sehingga membebankan dampak yang belum pernah terjadi sebelumnya kepada masyarakat lokal di daerah terpencil yang memiliki akses terbatas atau bahkan tidak ada sama sekali untuk pemantauan kualitas udara ambien.

Tata kelola kualitas udara di Indonesia harus beralih dari pemantauan kepatuhan yang pasif menuju intervensi yang tegas:

- **Tetapkan dan tegakkan standar kualitas udara ambien serta batasan emisi yang ketat.** Penegakan pilar mendasar ini harus diprioritaskan dibandingkan tindakan sekunder. Krisis polusi Jakarta tahun 2023 telah menunjukkan keterbatasan dari solusi yang bersifat reaktif, seperti penutupan unit 1–4 PLTU Suralaya, inspeksi pabrik secara acak, atau kebijakan bekerja dari rumah (*work-from-home*) (Kontan.co.id, 2023; Kompas, 2023; CREA, 2023). Meningkatnya polusi udara di berbagai titik panas menyingkap celah regulasi yang nyata, yang hanya dapat diatasi dengan mewajibkan penerapan teknologi pengendalian polusi udara yang efektif serta menegakkan kepatuhan secara konsisten di seluruh sektor.
- **Terapkan penilaian dampak kesehatan dalam perencanaan energi dan industri.** Lembaga regulator harus mengintegrasikan eksternalitas sosial polusi udara yang sebenarnya — termasuk biaya pelayanan kesehatan, penurunan produktivitas tenaga kerja, dan degradasi lingkungan — ke dalam pemodelan energi dan makroekonomi nasional. Memperhitungkan dampak-dampak ini akan membuktikan secara jelas bahwa target-target ambisius yang selaras dengan iklim dan kesehatan memberikan nilai ekonomi yang jauh lebih besar bagi Indonesia.

- **Integrasikan data pemantauan ke dalam penyusunan inventarisasi emisi nasional sebagaimana diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2026 tentang Perencanaan Perlindungan dan Pengelolaan Kualitas Udara.** Manfaatkan data cerobong CEMS (*Continuous Emission Monitoring System*), pemantauan kualitas udara ambien, serta data berbasis satelit untuk menegakkan kepatuhan dan menjalankan perencanaan kualitas udara yang tepat. Data pemantauan cerobong terus menerus dari CEMS yang dikelola oleh Kementerian Lingkungan Hidup dapat mendeteksi ketidakpatuhan, yang memicu sanksi denda dan surat teguran otomatis, maupun inspeksi ke lokasi secara langsung. Kerangka kerja yang baru ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2026 tentang inventarisasi emisi tingkat provinsi dan rencana pengelolaan kualitas udara dapat melengkapi penegakan hukum serta memandu intervensi kebijakan udara bersih, sekaligus mengungkap sumber-sumber titik dan sektor penyumbang utama yang selama ini masih minim pengawasan.
- **Bangun dasbor emisi *real-time* yang dapat diakses publik.** Buka data pemantauan cerobong dan informasi kualitas udara ambien kepada publik melalui platform yang mudah diakses untuk menghilangkan ketergantungan pada pelaporan mandiri oleh perusahaan (*corporate self-reporting*). Keterbukaan data secara gamblang akan menegaskan bahwa penegakan regulasi berlaku aktif — tidak hanya di kota-kota besar, tetapi juga di wilayah terpencil dekat kawasan industri utama, sehingga membangun kepercayaan publik dan memberdayakan masyarakat sipil untuk bertindak sebagai pengawas independen.
- **Hubungkan sistem pemantauan dengan sistem respons peringatan dini yang baru diberlakukan.** Ketika prakiraan tingkat polusi udara mencapai ambang batas darurat, instansi terkait dapat menerapkan langkah-langkah perlindungan hingga kualitas udara kembali ke batas aman. Sistem yang terintegrasi ini memungkinkan penyesuaian respons darurat secara cepat, sekaligus memberikan peringatan dini bagi publik untuk mengambil tindakan perlindungan diri.

Referensi

Asia Pacific Resources International Holdings Ltd (APRIL). (2026, June). *2025 Sustainability report*. <https://www.aprilasia.com/en/sustainability/sustainability-report>

Asia Pulp & Paper (APP). (2025, Agustus 1). *Sustainability report PT APP Purinusa Ekapersada 2024*. APP Group Bio Link. <https://link.app.co.id/app-sr-2024/>

Aulia, S. A. (2024). Air pollution threatens health and climate change in Jakarta. *Human Error and Safety*, 1(1), 36–46. <https://doi.org/10.61511/hes.v1i1.2024.648>

Barrios, N., Gonzalez, M. E., Zabib, N., Marquez, R., & Pal, L. (2026). Achieving net-zero carbon in the pulp and paper industry: Tackling scope 1, 2, and 3 emission hotspots. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 29, 200318. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2026.200318>

Beirle, S., Borger, C., Jost, A., & Wagner, T. (2023). *Improved catalog of NO_x point source emissions (Version 2)*. *Earth System Science Data*, 15(7), 3051–3073. <https://doi.org/10.5194/essd-15-3051-2023>

Center of Economic and Law Studies (CELIOS), Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA), & Trend Asia. (2025, November 5). *Press release toxic 20: Unmasking Indonesia's most toxic coal fired power plants*. Toxic20. <https://toxic20.org/press-release-toxic-20-unmasking-indonesias-most-toxic-coal-fired-power-plants/>

Center of Economic and Law Studies (CELIOS), Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA), & Trend Asia. (2026, July 6). *Toxic 20*. Toxic20. <https://toxic20.org/>

Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA). (2020, Agustus 11). *Transboundary air pollution in the Jakarta, Banten, and West Java provinces*. https://energyandcleanair.org/wp/wp-content/uploads/2020/08/Jakarta-Transboundary-Pollution_FINALEnglish.pdf

Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA) & Institute for Essential Services Reform (IESR). (2023, July 18). *Health benefits of just energy transition and coal phase-out in Indonesia*. <https://energyandcleanair.org/publication/health-benefits-of-just-energy-transition-and-coal-phase-out-in-indonesia/>

Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA). (2023a, August 25). *Work from home (WFH) and other gimmicks cannot clear Jakarta's air*. <https://energyandcleanair.org/work-from-home-wfh-and-other-gimmicks-cannot-clear-jakartas-air/>

Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA). (2023b, September 12). *Air quality impacts of the Banten-Suralaya complex*.

<https://energyandcleanair.org/publication/air-quality-impacts-of-the-banten-suralaya-complex/>

Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA) & Global Energy Monitor (GEM). (2026, Februari 10). Out of sight, out of control: 31 GW of captive coal is jeopardizing Indonesia's economic and emissions goals – Centre for research on energy and clean air.

<https://energyandcleanair.org/publication/31-gw-of-captive-coal-is-jeopardizing-indonesias-economic-and-emissions-goals/>

Chu, Y., Holladay, J. S., Qiu, Y., Tian, X., & Zhou, M. (2023). Air pollution and mortality impacts of coal mining: Evidence from coalmine accidents in China. *Journal of Environmental Economics and Management*, 121, 102846. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2023.102846>

Climate Rights International (CRI). (2024, Januari). *Nickel unearthed: The human and climate costs of Indonesia's nickel industry*. <https://cri.org/reports/nickel-unearthed/>

Climate TRACE. (n.d.). *Indonesia greenhouse gas emissions inventory*. Diakses pada July 2026, from [https://climatetrace.org/explore#admin=Indonesia%20\(IDN\):126:IDN:country&gas=co2e&year=2025&timeframe=100§or=&asset=](https://climatetrace.org/explore#admin=Indonesia%20(IDN):126:IDN:country&gas=co2e&year=2025&timeframe=100§or=&asset=)

Climateworks Centre. (2025, Desember 4). *Decarbonising Indonesia's high-value industrial sites through place-based action*.

<https://climateworkscentre.org/resource/decarbonising-indonesias-high-value-industrial-sites-through-place-based-action/>

CNN Indonesia. (2025, Oktober 9). *PLTU Jawa unit 9 dan 10 Suralaya resmi beroperasi*.

<https://www.cnnindonesia.com/ekonomi/20251009012508-85-1282525/pltu-jawa-unit-9-dan-10-suralaya-resmi-beroperasi>

De Vries, W. (2021). *Impacts of nitrogen emissions on ecosystems and human health: A mini review*. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 21, 100249.

<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2021.100249>

Dialogue Earth. (2021, April 14). *Pollution and foreign debt: Indonesia's unhealthy addiction to coal*.

<https://dialogue.earth/en/energy/pollution-and-foreign-debt-indonesias-unhealthy-addiction-to-coal/>

Ember. (2025, Maret 13). *Captive coal expansion plan could undermine Indonesia's climate goals*.

<https://ember-energy.org/latest-insights/captive-coal-expansion-plan-could-undermine-indonesias-climate-goals/>

European Union Joint Research Centre (EU JRC). (n.d.). *EDGAR - The Emissions Database for Global Atmospheric Research*. Diakses pada July 2026, from <https://edgar.jrc.ec.europa.eu/>

Global Energy Monitor (GEM). (n.d.-a). *Global bioenergy power tracker*. Diakses pada July 2026, from <https://globalenergymonitor.org/projects/global-bioenergy-power-tracker>

Global Energy Monitor (GEM). (n.d.-b). *Global cement and concrete tracker*. Diakses pada July 2026, from <https://globalenergymonitor.org/projects/global-cement-concrete-tracker>

Global Energy Monitor (GEM). (n.d.-c). *Global chemicals inventory*. Diakses pada July 2026, from <https://globalenergymonitor.org/projects/global-chemicals-inventory>

Global Energy Monitor (GEM). (n.d.-d). *Global coal mine tracker*. Diakses pada July 2026, from <https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-mine-tracker>

Global Energy Monitor (GEM). (n.d.-e). *Global coal plant tracker*. Diakses pada July 2026, from <https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/>

Global Energy Monitor (GEM). (n.d.-f). *Global coal terminals tracker*. Diakses pada July 2026, from <https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-terminals-tracker>

Global Energy Monitor (GEM). (n.d.-g). *Global gas infrastructure tracker*. Diakses pada July 2026, from <https://globalenergymonitor.org/projects/global-gas-infrastructure-tracker>

Global Energy Monitor (GEM). (n.d.-h). *Global iron and steel tracker*. Diakses pada July 2026, from <https://globalenergymonitor.org/projects/global-iron-steel-tracker>

Global Energy Monitor (GEM). (n.d.-i). *Global oil and gas plant tracker*. Diakses pada July 2026, from <https://globalenergymonitor.org/projects/global-oil-gas-plant-tracker/>

Global Energy Monitor (GEM). (2025a, Oktober 21). *PT Halmahera Persada Lygend nickel smelter power station*.
https://www.gem.wiki/PT_Halmahera_Persada_Lygend_Nickel_Smelter_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2025b, Oktober 21). *Sulawesi Labota power station*.
https://www.gem.wiki/Sulawesi_Labota_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2025c, November 14). *Banten Suralaya power station*.
https://www.gem.wiki/Banten_Suralaya_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2025d, Desember 11). *Delong nickel phase III power station*.
https://www.gem.wiki/Delong_Nickel_Phase_III_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2025e, Desember 11). *Delong nickel phase IV power station*.

https://www.gem.wiki/Delong_Nickel_Phase_IV_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026a, Januari 7). *Weda Bay power station*.

https://www.gem.wiki/Weda_Bay_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026b, Februari 12). *Banten Serang power station*.

https://www.gem.wiki/Banten_Serang_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026c, July 24). *Bekasi power station*.

https://www.gem.wiki/Bekasi_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026d, July 24). *Cilegon KDL power station*.

https://www.gem.wiki/Cilegon_KDL_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026e, July 24). *Cilegon power station*.

https://www.gem.wiki/Cilegon_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026f, July 24). *Krakatau power station*.

https://www.gem.wiki/Krakatau_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026g, July 24). *Muara Karang power station*.

https://www.gem.wiki/Muara_Karang_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026h, July 24). *Tanjung Priok power station*.

https://www.gem.wiki/Tanjung_Priok_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026i, July 25). *Jababeka industrial estate power station*.

https://www.gem.wiki/Jababeka_Industrial_Estate_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026j, July 25). *Merak power station*.

https://www.gem.wiki/Merak_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026k, July 27). *KPC operation coal mine*.

https://www.gem.wiki/KPC_Operation_Coal_Mine

Global Energy Monitor (GEM). (2026l, July 27). *Krakatau Steel Cilegon plant*.

https://www.gem.wiki/Krakatau_Steel_Cilegon_plant

Global Energy Monitor (GEM). (2026m, July 27). *KS Posco Cilegon steel plant*.

https://www.gem.wiki/KS_Posco_Cilegon_steel_plant

Global Energy Monitor (GEM). (2026n, July 27). *Perawang mill power station*.

https://www.gem.wiki/Perawang_Mill_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026o, July 27). *Pomalaa nickel power station*.

https://www.gem.wiki/Pomalaa_Nickel_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026p, July 27). *PT Conch Cement Indonesia Serang cement plant*.

https://www.gem.wiki/PT_Conch_Cement_Indonesia_Serang_Cement_Plant

Global Energy Monitor (GEM). (2026q, July 27). *PT Semen Indonesia (Persero) Kabupaten Tuban cement plant*.

[https://www.gem.wiki/PT_Semen_Indonesia_\(Persero\)_Kabupaten_Tuban_Cement_Plant](https://www.gem.wiki/PT_Semen_Indonesia_(Persero)_Kabupaten_Tuban_Cement_Plant)

Global Energy Monitor (GEM). (2026r, July 27). *Sulawesi mining power station*.

https://www.gem.wiki/Sulawesi_Mining_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026s, July 27). *Tabalong Wisesa power station*.

https://www.gem.wiki/Tabalong_Wisesa_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026t, July 27). *Tanjung Awar-Awar power station*.

https://www.gem.wiki/Tanjung_Awar-Awar_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026u, July 27). *Tanjung Jati B power station*.

https://www.gem.wiki/Tanjung_Jati_B_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026v, July 27). *Tutupan coal mine*.

https://www.gem.wiki/Tutupan_Coal_Mine

Global Energy Monitor (GEM). (2026w, July 28). *Delong nickel phase I power station*.

https://www.gem.wiki/Delong_Nickel_Phase_I_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026x, July 28). *Delong nickel phase II power station*.

https://www.gem.wiki/Delong_Nickel_Phase_II_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026y, July 28). *Elynda Jaya coal mine*.

https://www.gem.wiki/Elynda_Jaya_Coal_Mine

Global Energy Monitor (GEM). (2026z, July 28). *Indramayu power station*.

https://www.gem.wiki/Indramayu_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026aa, July 28). *INEOS Cilegon chemical plant*.

https://www.gem.wiki/INEOS_Cilegon_Chemical_Plant

Global Energy Monitor (GEM). (2026ab, July 28). *Jinchuan Group WP&RKA power station.*

https://www.gem.wiki/Jinchuan_Group_WP%26RKA_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026ac, July 28). *Kaltim FTP2 power station.*

https://www.gem.wiki/Kaltim_FTP2_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026ad, July 28). *Kerinci mill power station.*

https://www.gem.wiki/Kerinci_Mill_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026ae, July 28). *LOTTE Chemical Cilegon chemical plant.*

https://www.gem.wiki/LOTTE_Chemical_Cilegon_Chemical_Plant

Global Energy Monitor (GEM). (2026af, July 28). *PT Kaltim Methanol Industri Bontang methanol plant.*

https://www.gem.wiki/PT_Kaltim_Methanol_Industri_Bontang_Methanol_Plant

Global Energy Monitor (GEM). (2026ag, July 28). *PT Pupuk Kalimantan Timur Bontang ammonia complex.*

https://www.gem.wiki/PT_Pupuk_Kaltimantan_Timur_Bontang_Amonia_Complex

Global Energy Monitor (GEM). (2026ah, July 28). *PT Semen Indonesia (Persero) Kabupaten Rembang cement plant.*

[https://www.gem.wiki/PT_Semen_Indonesia_\(Persero\)_Kabupaten_Rembang_Cement_Plant](https://www.gem.wiki/PT_Semen_Indonesia_(Persero)_Kabupaten_Rembang_Cement_Plant)

Global Energy Monitor (GEM). (2026ai, July 28). *PT Sun Fook Industries Serang cement plant.*

https://www.gem.wiki/PT_Sun_Fook_Industries_Serang_Cement_Plant

Global Energy Monitor (GEM). (2026aj, July 28). *Rembang power station.*

https://www.gem.wiki/Rembang_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026ak, July 28). *Sinar Mas OKI paper mill power station.*

https://www.gem.wiki/Sinar_Mas_OKI_Paper_Mill_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026al, July 28). *Tabalong power station.*

https://www.gem.wiki/Tabalong_power_station

Global Energy Monitor (GEM). (2026am, July 28). *TMR coal mine.*

https://www.gem.wiki/TMR_Coal_Mine

Global Energy Monitor (GEM). (2026an, July 28). *Wara coal mine.*

https://www.gem.wiki/Wara_Coal_Mine

Global Energy Monitor (GEM). (2026ao, July 28). *Xinxing ductile iron pipes power station.*

https://www.gem.wiki/Xinxing_Ductile_Iron_Pipes_power_station

Indonesia Business Post. (2025, Maret 10). *54 smelters in operation, 60 in the process of securing permits: BKPM.*

<https://indonesiabusinesspost.com/3878/policy/54-smelters-in-operation-60-in-the-process-of-securing-permits-bkpm>

Institute for Energy Economics & Financial Analysis (IEEFA). (2024, Oktober 24). *Indonesia's nickel companies: The need for renewable energy amid increasing production.*

<https://ieefa.org/resources/indonesias-nickel-companies-need-renewable-energy-amid-increasing-production>

International Work Group for Indigenous Affairs (IWGIA). (2026, Februari 9). *Nickel for electric vehicles threatens key forests and the last nomadic tribes in Indonesia.*

<https://www.iwgia.org/en/news/debates-2025-nickel-for-electric-vehicles-in-indonesia>

Jaringan Dokumentasi dan Informasi Hukum Badan Pemeriksa Keuangan (JDIH BPK). (2021, Februari 2). *Peraturan Pemerintah (PP) No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.* Database Peraturan.

<https://peraturan.bpk.go.id/Details/161852/pp-no-22-tahun-2021>

Kompas. (2025, June 8). *Indonesian nickel under pressure from global trade and environmental pollution.*

<https://www.kompas.id/artikel/en-nikel-indonesia-dalam-tekanan-perdagangan-global-dan-isu-lingkungan>

Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL). (2024, Februari). *Industry decarbonization roadmaps for Indonesia: Opportunities and challenges to net-zero emissions.*

<https://eta.lbl.gov/publications/industry-decarbonization-roadmaps>

Ministry of Environment (MOE) - Kementerian Lingkungan Hidup (KLH). (2026, June 4). *Permen LH No. 5 tentang Perencanaan Perlindungan Dan Pengelolaan Mutu Udara.* PPEPD.

<https://ppepd.kemenlh.go.id/publikasi/permen-lh-no-5-tentang-perencanaan-perlindungan-dan-pengelolaan-mutu-udara>

Mongabay. (2025a, Februari 6). *Disease surges in Indonesia community on frontline of world energy transition.*

<https://news.mongabay.com/2025/02/disease-surges-in-indonesia-community-on-frontline-of-world-energy-transition/>

Mongabay. (2025b, Mei 1). *Landslide deaths again highlight safety failures in Indonesia's nickel industry.*

<https://news.mongabay.com/2025/05/landslide-deaths-again-highlight-safety-failures-in-indonesias-nickel-industry/>

Mongabay. (2025c, July 9). *Indonesia tests shows blood mercury rising at ground zero of world energy transition.*

<https://news.mongabay.com/2025/07/indonesia-tests-shows-blood-mercury-rising-at-ground-zero-of-world-energy-transition/>

Mongabay. (2025d, Desember 10). *Boom in burning waste for fuel could put human health and environment at risk.*

<https://news.mongabay.com/2025/12/boom-in-burning-waste-for-fuel-puts-human-health-and-environment-at-risk/>

Nexus3 Foundation. (2022, Desember). *Deskstudy assessment: Pollutants release and transfer register (PRTR) implementations potential in Indonesia.*

<https://www.nexus3foundation.org/publikasi/deskstudy-assessment-prtr-implementations-potential-in-indonesia/?nocache=1777361162>

Pacific Northwest National Laboratory (PNNL). (n.d.). *Community Earth-atmosphere Data System (CEDS) for historical surface fluxes.* Diakses pada July 2026, from

<https://www.pnnl.gov/projects/ceds>

Petromindo. (2026, Januari 20). *Vale Indonesia updates on progress of Sulawesi HPAL projects.*

<https://www.petromindo.com/news/article/vale-indonesia-updates-on-progress-of-sulawesi-hpal-projects>

Purnama, M., Prayitno, S. B., Muskananfolo, M. R., & Suryanti, S. (2025). Existing condition of gastropods community in coastal areas affected by nickel overburden in Pomalaa district, Southeast Sulawesi province, Indonesia. *BIOTROPIA*, 32(1), 69–86.

<https://doi.org/10.11598/btb.2025.32.1.2416>

Soomro, M., Tam, V. W., & Jorge Evangelista, A. C. (2023). Production of cement and its environmental impact. In V. W. Tam & A. C. Jorge Evangelista (Eds.), *Recycled Concrete* (pp. 11–46). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85210-4.00010-2>

Syuhada, G., Akbar, A., Hardiawan, D., Pun, V., Darmawan, A., Heryati, S. H., Siregar, A. Y., Kusuma, R. R., Driejana, R., Ingole, V., Kass, D., & Mehta, S. (2023). Impacts of air pollution on health and cost of illness in Jakarta, Indonesia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4), 2916. <https://doi.org/10.3390/ijerph20042916>

Tempo. (2025, July 8). *Pramono targetkan RDF Rorotan mulai beroperasi bulan depan.*

<https://www.tempo.co/politik/pramono-targetkan-rdf-rorotan-mulai-beroperasi-bulan-depan-1935477>

The Jakarta Post. (2025, Desember 13). *Analysis: Proposed renewable rule change spark concerns of coal expansion - Academia - The Jakarta post.*

<https://www.thejakartapost.com/opinion/2025/12/13/analysis-proposed-renewable-rule-change-s-park-concerns-of-coal-expansion>

TuK Indonesia. (2025, April 17). *IMIP workers buried in nickel tailing: NGOs, trade unions demand legal accountability.*

<https://www.tuk.or.id/en/2025/04/imip-workers-buried-in-nickel-tailing-ngos-trade-unions-demand-legal-accountability/>

Udara Jakarta. (n.d.). *Lokasi SPKU*. Diakses pada July 2026, from

<https://udara.jakarta.go.id/lokasi-spku>

World Health Organization (WHO). (2021a, September 22). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.*

<https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

World Health Organization (WHO). (2021b, September 22). *What are the WHO air quality guidelines?*

<https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>

World Population Review. (2026, July 24). *Jakarta population 2026.*

<https://worldpopulationreview.com/cities/indonesia/jakarta>

Yang, S., Li, M., Guo, C., Requia, W. J., Sakhvidi, M. J., Lin, K., Zhu, Q., Chen, Z., Cao, P., Yang, L., Luo, D., & Yang, J. (2025). Associations of long-term exposure to nitrogen oxides with all-cause and cause-specific mortality. *Nature Communications*, 16(1), 1–11.

<https://doi.org/10.1038/s41467-025-56963-y>

Zhang, R., Wang, G., Guo, S., Zamora, M. L., Ying, Q., Lin, Y., Wang, Y., & Hu, M. (2015). Formation of urban fine particulate matter. *Chemical Reviews*, 115(10), 3803–3855.

<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00067>

Lampiran

Tabel A1. Dua puluh sembilan titik panas NO_x yang teridentifikasi di Indonesia

#	Lokasi	Koordinat	Pemancar utama	Emisi NO _x rata-rata (kt/tahun)
1	Suralaya / Cilegon, Banten	-5,8885°, 106,0318°	Banten Suralaya Complex (6.8 GW Coal + 1.4 GW Gas), Steel & Cement Kilns	37,5
2	Tanjung Jati B (Jepara), Jawa Tengah	-6,4421°, 110,7410°	PLTU Tanjung Jati B Coal Complex (4.64 GW)	28.4
3	Pelalawan & Siak, Riau	0,4406°, 101,8883°	RAPP Kerinci (535 MW Bio/Coal) & IKPP Perawang (755 MW Coal) Pulp Mills	22.1
4	North Jakarta, DKI Jakarta	-6,1215°, 106,8402°	Tanjung Priok (2.8 GW) & Muara Karang (2.1 GW) Gas Plants	20.5
5	Outer Bekasi, Jawa Barat	-6,2841°, 107,1705°	Jababeka (864 MW) & Bekasi (130 MW) Gas Plants, Industrial Boilers	18.2
6	Tuban, Jawa Timur	-6,7820°, 111,8901°	Tanjung Awar-Awar (700 MW) & Semen Indonesia Tuban (11.9 Mtpa)	16.5
7	Cilacap, Jawa Tengah	-7,6833°, 109,0333°	Karangandri Coal Complex & Pertamina RU IV Refinery	15.2
8	Morowali (IMIP), Sulawesi Tengah	-2,8862°, 122,1645°	Kompleks IMIP (Sulawesi Mining & Labota Captive Coal: 5,44 GW)	14.9
9	Pusat Kota dan Pelabuhan Surabaya, Jawa Timur	-7,2575°, 112,7521°	Gresik & Sidoarjo Power/Industrial Complexes, Port Shipping Fleets	14.8
10	Bontang, Kalimantan Timur	0,1333°, 117,5000°	PT Pupuk Kaltim Ammonia Complex & PT Kaltim Methanol Industri	13.7
11	Karawang Barat & Cikampek, Jawa Barat	-6,3612°, 107,4102°	Boiler Kawasan Industri, Sintesis Kimia, Otomotif Berat	12.4
12	Sangatta & Bengalon, Kalimantan Timur	0,8841°, 117,5512°	Armada Tambang Batubara Terbuka KPC & Pembangkit Listrik Kaltim FTP2 (200 MW)	11.5
13	Indramayu, Jawa Barat	-6,2680°, 107,9621°	Indramayu (990 MW)	11.1

#	Lokasi	Koordinat	Pemancar utama	Emisi NO _x rata-rata (kt/tahun)
14	OKI (Air Sugihan), Sumatera Selatan	-2,8510°, 105,1205°	Kompleks Pembangkit Listrik Tambahan dan Gasifikasi Bioenergi Pabrik Pulp APP OKI	10.4
15	Rembang, Jawa Tengah	-6,6432°, 111,4720°	Rembang (630 MW) & Semen Indonesia Cement Kiln (3 Mtpa)	9.8
16	Palembang, Sumatera Selatan	-2,9909°, 104,7565°	Pembangkit Listrik Tenaga Gas, Kilang Minyak, Terminal Batubara Sungai	9.6
17	Medan Raya, Sumatera Utara	3.5952°, 98.6722°	Pembangkit Bioenergi Pinggiran Kota, Pabrik Penggilingan Baja, Transportasi Berat	8.9
18	Daerah Pertambangan Muara Enim, Sumatera Selatan	-3,6521°, 103,7802°	Tambang Terbuka Bukit Asam, Pembangkit Batubara Mulut Tambang (Bukit Asam/Sumsel 8)	8.4
19	North Morowali, Sulawesi Tengah	-2,0146°, 121,4320°	Operasi Delong Fase III/IV & GNI (1,6 GW Batubara Mandiri)	8.1
20	Konawe, Sulawesi Tenggara	-3,8929°, 122,4308°	Pembangkit Listrik Tenaga Batu Bara Tertutup Virtue Dragon & Delong Fase I/II (2,37 GW)	7.8
21	Tabalong, Kalimantan Kalimantan	-2.1804°, 115.3812°	Tambang Adaro Tutupan/Wara, Tabalong (200 MW) & Tabalong Wisesa (60 MW)	7.2
22	Pesisir Semarang, Central Java	-6,9667°, 110,4167°	Tambak Lorok Power Station (Gas/Oil), Industrial Estates	6.5
23	Kutai Timur, Kalimantan Timur	0,5120°, 117,2104°	Konsesi Pertambangan Batubara TMR & Elynda Jaya, Armada Truk Pengangkut Diesel	5.6
24	Teluk Weda, Maluku Utara	0,4931°, 128,0469°	Kompleks IWIP (Pembangkit Listrik Tenaga Batu Bara Mandiri: 4,54 GW)	5.4
25	Koridor Pasir Mining, Kalimantan Timur	-1,8210°, 116,1205°	Kideco Jaya Pasir Coal Concession, Non-Road Heavy Diesel Fleets	4.9
26	Denpasar, Bali	-8,6705°, 115,2126°	Pesanggaran Gas/Diesel Power Plant, Urban Transit Corridor	4.2
27	Pulau Obi, Maluku Utara	-1,5319°, 127,4430°	Pembangkit Listrik Tenaga Batubara Harita/HP Lygend, Xinxing & Jinchuan (~2,0 GW)	4.2

#	Lokasi	Koordinat	Pemancar utama	Emisi NO _x rata-rata (kt/tahun)
28	Sumbawa Barat, Nusa Tenggara Barat	-8,7612°, 116,7801°	Batu Hijau Mine Captive Power Station (156 MW Coal/Diesel)	3.8
29	Pomalaa, Sulawesi Tenggara	-4.2069°, 121.6180°	Proyek Ekspansi Antam Ferronickel (60 MW Batubara) & Vale HPAL	3.1