

Manfaat Kesehatan dari Transisi Energi Berkeadilan dan Penghentian Bertahap Batubara di Indonesia

Lauri Myllyvirta
Jamie Kelly
Erika Uusivuori
Katherine Hasan
Vera Tattari

Tentang CREA

Centre for Research on Energy and Clean Air (CREA) adalah sebuah organisasi penelitian independen yang berfokus pada pengungkapan tren, penyebab, dan dampak kesehatan, serta solusi terhadap polusi udara. CREA menggunakan data ilmiah, penelitian, dan bukti-bukti untuk mendukung pemerintah, perusahaan-perusahaan, dan organisasi-organisasi yang menggaungkan kampanye di dunia dalam upaya untuk mengarah kepada energi bersih dan udara bersih, dengan keyakinan bahwa penelitian dan komunikasi yang efektif adalah kunci dari suksesnya suatu kebijakan, keputusan investasi, dan upaya advokasi. CREA didirikan di Helsinki dan memiliki staff di beberapa negara di Asia dan Eropa.

Penulis

Lauri Myllyvirta
Jamie Kelly
Erika Uusivuori
Katherine Hasan
Vera Tattari

Kontributor

Raden Raditya Yudha Wiranegara
Deon Arinaldo

Ucapan terima kasih

Kami berterima kasih atas segala dukungan, umpan balik, dan wawasan yang kami terima dari organisasi dan individu berikut: Raden Raditya Yudha Wiranegara dan Deon Arinaldo dari Institute for Essential Services Reform (IESR). Pandangan-pandangan yang disampaikan dalam laporan ini adalah sepenuhnya milik dari para penulis dan tidak boleh dikaitkan dengan organisasi maupun individu-individu yang disebutkan di atas.

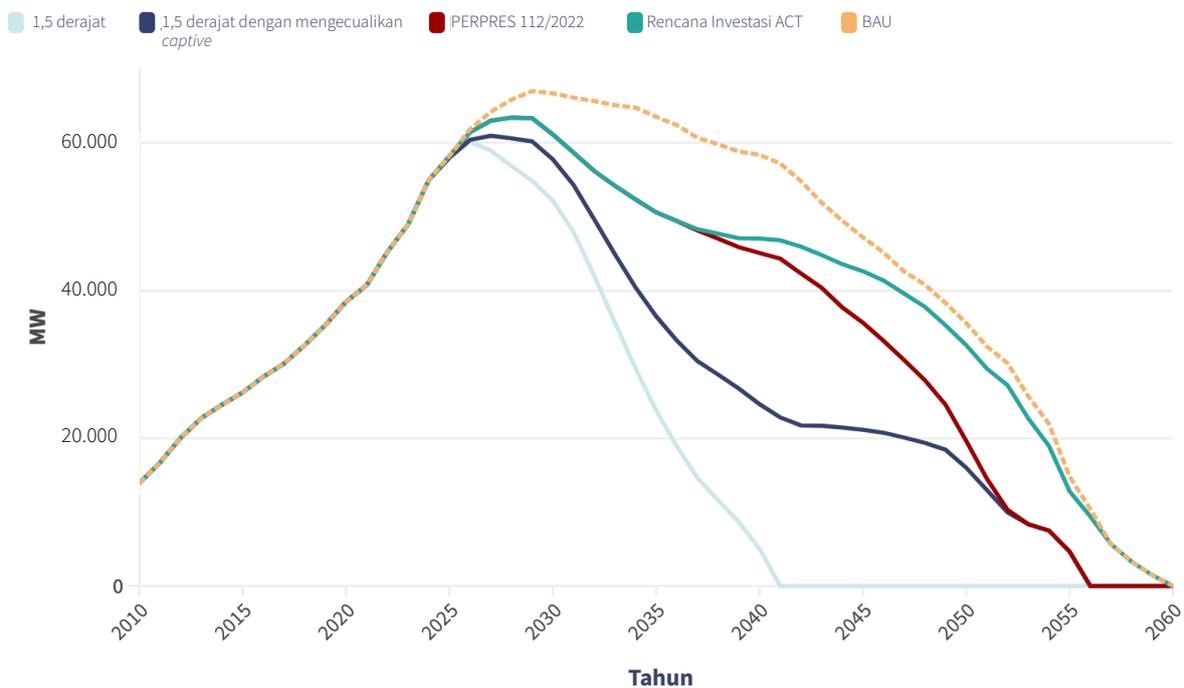
Manfaat Kesehatan dari Transisi Energi Berkeadilan dan Penghentian Bertahap Batubara di Indonesia

Temuan kunci

- Emisi polutan udara yang berasal dari pembangkit listrik batubara meningkat sebesar 110% di Indonesia selama satu dekade terakhir. Jika semua pembangkit listrik batubara yang direncanakan, termasuk pembangkit *captive*, selesai dibangun dan beroperasi, peningkatan lebih lanjut sebesar 70% diperkirakan akan terjadi pada tahun 2030 berdasarkan skenario kebijakan saat ini.
- Permodelan terperinci dari kualitas udara dan dampak kesehatan yang dilakukan untuk laporan ini mengindikasikan bahwa emisi polutan udara yang dihasilkan oleh pembangkit listrik batubara di Indonesia pada tahun 2022 turut bertanggung jawab atas 10.500 kematian akibat polusi udara (CI 95%: 6.500–16.400) dan biaya kesehatan sebesar US\$7,4 miliar (Rp109,9 triliun; CI 95%: US\$4,6–11,5 miliar, Rp67,6–170,3 triliun).
- Kebijakan-kebijakan yang berlaku saat ini akan meningkatkan kapasitas pembangkit listrik batubara Indonesia yang sekarang sebesar 45 GW menjadi 63 GW sebelum mencapai puncaknya pada tahun 2028. Hal ini akan mengakibatkan angka kematian yang terkait dengan polusi udara dari pembangkit listrik batubara meningkat menjadi 16.600 per tahun (CI 95%: 10.300–25.900) dan biaya kesehatan menjadi US\$11,8 miliar per tahun (Rp175,2 triliun; CI 95%: US\$7,2–18,2 miliar, Rp106,9–270,3 triliun).
- Di bawah kebijakan-kebijakan yang berlaku saat ini, dampak kesehatan kumulatif dari tahun 2024 hingga berakhirnya masa operasi semua pembangkit listrik batubara akan mengakibatkan 303.000 kematian terkait polusi udara (CI 95%: 189.000–468.000) dan biaya kesehatan sebesar US\$210 miliar (Rp3,2 kuadriliun; CI 95%: US\$130–330 miliar, Rp2,0–4,9 kuadriliun).
- Penghentian penggunaan batubara secara lebih cepat pada tahun 2040, sejalan dengan target Persetujuan Paris sebesar 1,5 derajat Celcius, akan menghindarkan total kumulatif sebanyak 182.000 kematian terkait polusi udara (CI 95%: 114.000–280.000) dan biaya kesehatan sebesar US\$130 miliar (Rp1.900 triliun; CI 95%: US\$80–200 miliar, Rp1.200–2.900 triliun) dari tahun 2024 hingga akhir masa pakai semua pembangkit listrik.
- Pemasangan pengendali polusi udara yang wajib dilakukan akan menghindarkan 8.300 kematian terkait polusi udara pada tahun 2035 dalam skenario kebijakan saat ini (CI 95%: 5.200–12.600) dan biaya kesehatan sebesar US\$5,8 miliar (Rp86,5 triliun; CI 95%: US\$3,6–8,9 miliar, Rp54,1–131,5 triliun).
- Biaya kesehatan kumulatif yang dihindari akan mencapai US\$90 miliar (Rp1,3 kuadriliun; CI 95% CI: US\$60–140 miliar, Rp0,8–2,0 kuadriliun), yang menghasilkan manfaat ekonomi bersih sebesar US\$70 miliar (Rp290 triliun) bagi masyarakat setelah memperhitungkan biaya investasi dan operasi dari pengendali polusi udara, menjadikan investasi tersebut sangat menguntungkan dari sudut pandang sosial.

- Karena bertanggung jawab atas seperlima dari keseluruhan dampak kesehatan pembangkit listrik tenaga batubara di Indonesia, penting untuk memasukkan pembangkit listrik batubara *captive* ke dalam *Energy Transition Mechanism* (ETM) dan *Just Energy Transition Partnership* (JETP) untuk membuat kemajuan yang berarti. Mengecualikan pembangkit ini dari kebijakan penghentian batubara tahun 2040 dapat menimbulkan beban kesehatan tambahan sebanyak 27.000 kematian terkait polusi udara (CI 95%: 16.000–42.000) dan biaya kesehatan sebesar US\$20 miliar (Rp330 triliun; CI 95%: US\$10–30 miliar, Rp200–520 triliun).
- Kami juga mengkaji dampak dari pembakaran bersama (*co-firing*) biomassa, baik yang ada saat ini maupun yang tengah direncanakan, terhadap polusi udara yang berasal dari pembangkit listrik batubara. Meningkatkan porsi *co-firing* hingga minimal 20% pada semua pembangkit listrik PLN (Perusahaan Listrik Negara, badan usaha milik negara penyedia listrik)—yang merupakan tantangan signifikan dalam hal ketersediaan biomassa dan juga dari segi teknis—hanya akan mengurangi emisi polutan udara dari pembangkit listrik batubara di Indonesia sebesar 1,5-2,4%, tergantung dari jenis polutannya.
- Pengurangan polusi udara dari pembangkit listrik batubara hanya dapat dicapai secara efektif melalui pemasangan teknologi pengendalian emisi yang tepat. Analisis CREA menunjukkan bahwa memasang pengendali polusi udara di semua pembangkit listrik batubara yang beroperasi setelah tahun 2035 akan mengurangi emisi SO_x sebesar 73%, NO_x sebesar 64%, debu sebesar 86%, dan merkuri sebesar 71%. Pembakaran bersama (*co-firing*) amonia justru dapat berdampak pada semakin buruknya kualitas udara akibat dari adanya gas amonia yang terlepas ke udara.

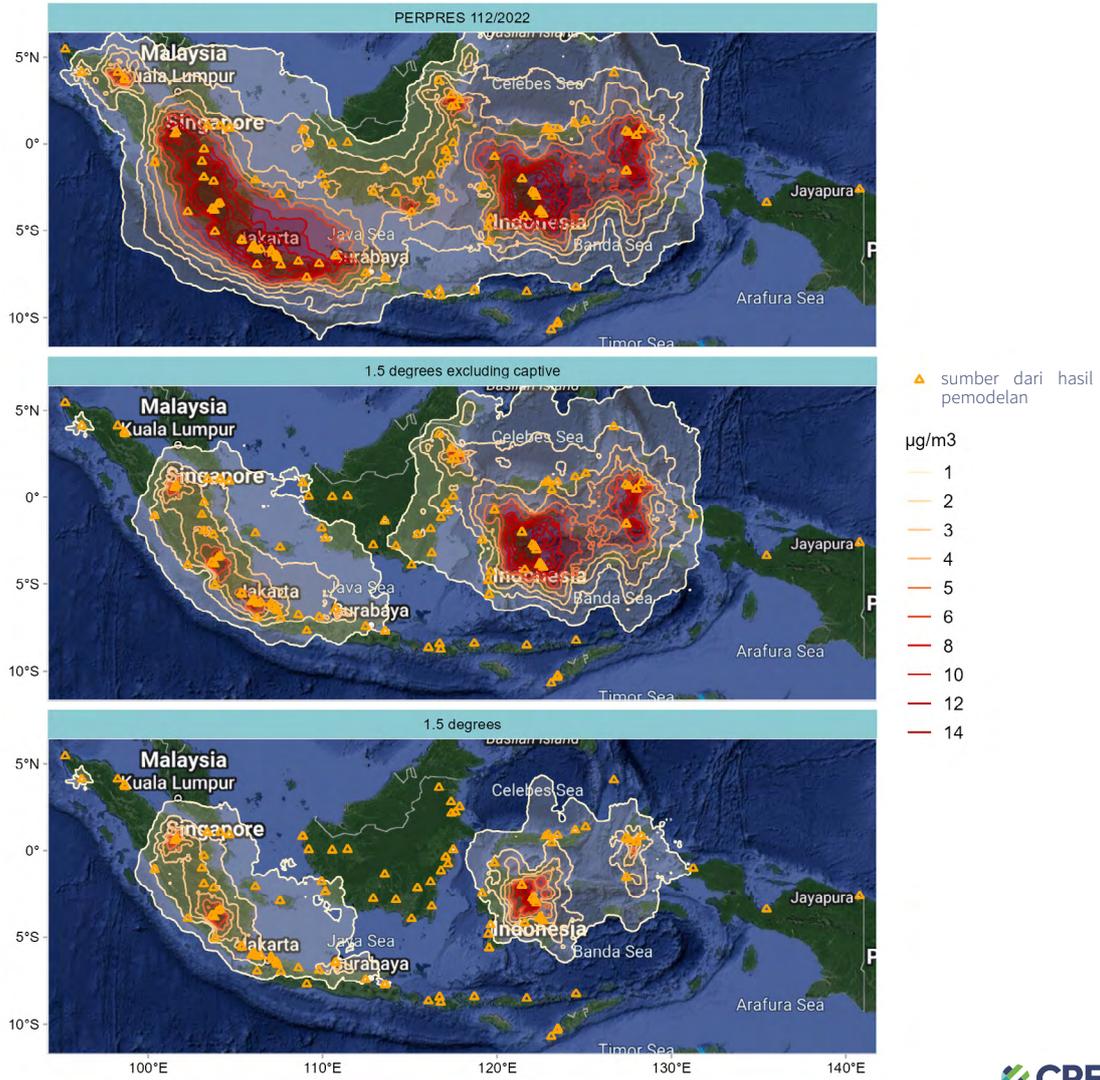
Kapasitas pembangkit listrik batubara yang beroperasi berdasarkan skenario



TK 1. Kapasitas pembangkit listrik batubara yang beroperasi berdasarkan skenario

Konsentrasi PM_{2.5} rata-rata tahunan dari seluruh pembangkit listrik batubara di Indonesia

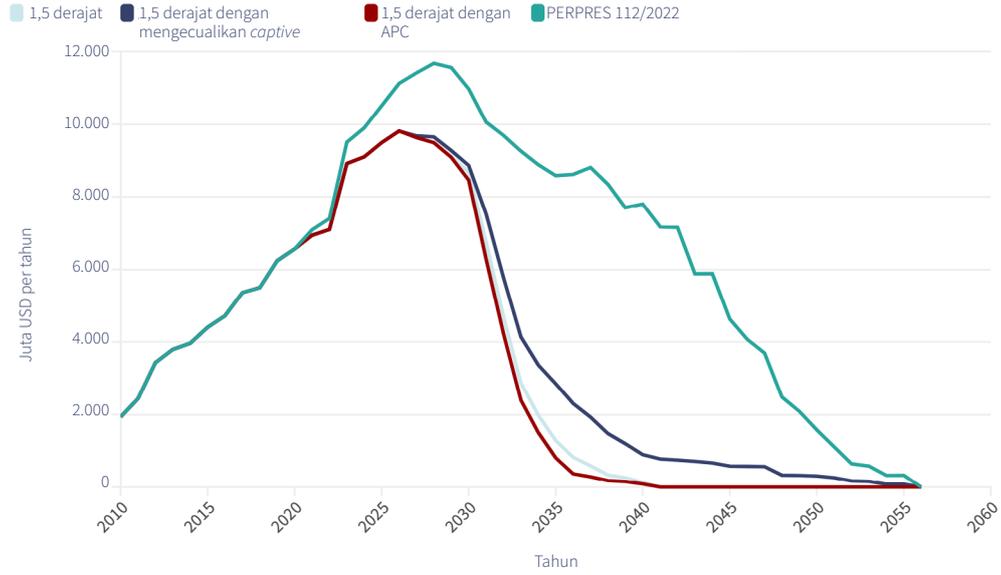
berdasarkan skenario, pada tahun 2035



TK 2. Konsentrasi PM_{2.5} rata-rata tahunan dari seluruh pembangkit listrik batubara di Indonesia

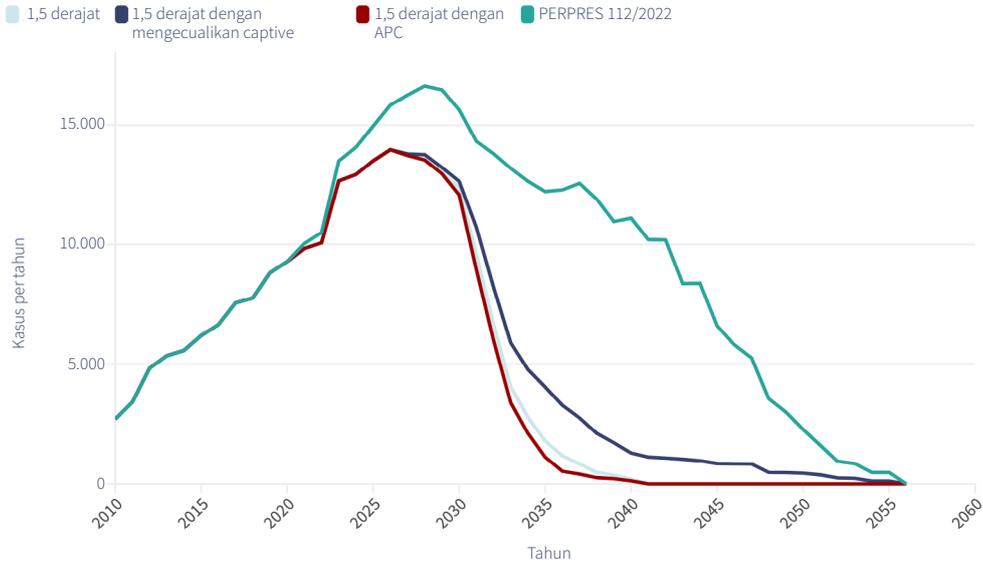


Biaya kesehatan terkait polusi udara berdasarkan skenario



TK 3. Biaya tahunan terkait polusi udara berdasarkan skenario

Kematian terkait polusi udara berdasarkan skenario



TK 4. Kematian tahunan terkait polusi udara berdasarkan skenario

Daftar isi

Temuan kunci	ii
Daftar isi	vi
Daftar singkatan	vii
Ringkasan eksekutif	1
Latar belakang dan metodologi	2
Dampak dari emisi pembangkit listrik tenaga batubara saat ini	2
Dampak pada masa depan menurut jalur pengakhiran operasional PLTU batubara yang berbeda-beda	3
Manfaat pengakhiran operasional PLTU batubara berbasis kesehatan	4
Pendahuluan	6
Kondisi dari pembangkitan listrik dengan tenaga batubara	8
Upaya nasional dan dukungan internasional	10
Pengendalian polusi dan kebijakan mengenai emisi	11
Metodologi	13
Inventarisasi emisi	14
Pemodelan atmosferis	16
Penilaian terhadap dampak kesehatan dan ekonomi	18
Biaya pengendalian polusi udara	21
Evaluasi berbagai linimasa penghentian bertahap	22
Implikasi terhadap polusi udara	24
Dampak kesehatan dan implikasi biaya	29
Dampak tahunan	29
Dampak kumulatif	31
Manfaat dari memprioritaskan pembangkit listrik dengan dampak kesehatan terburuk	33
Evaluasi penerapan pengendalian polusi udara	36
Evaluasi penerapan <i>co-firing</i>	40
Kesimpulan	43
Daftar pustaka	45
Lampiran	52



Daftar singkatan

1,5 derajat	Target ambang batas sebesar 1,5°C di atas level pra-industri yang disepakati dalam Perjanjian Paris 2015
ACT	<i>Accelerating Coal Transition</i> (Mempercepat Transisi Batubara)
ADB	Asian Development Bank
AMDAL	Analisis Mengenai Dampak Lingkungan
APC	<i>Air Pollution Control</i> (Pengendalian Polusi Udara)
AQLI	<i>Air Quality Life Index</i>
ASEAN	Association of Southeast Asian Nations
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i> (Penangkapan dan Penyimpanan Karbon)
CEMS	<i>Continuous Emission Monitoring System</i> (Sistem Pemantauan Emisi Berkelanjutan)
CI	<i>Confidence Interval</i> (Interval Kepercayaan)
CIF	<i>Climate Investment Funds</i> (Dana Investasi Iklim)
CO	Karbon Monoksida
CO ₂	Karbon Dioksida
CSR	<i>Corporate Social Responsibility</i>
EEA	European Environment Agency
ESDM	Energi dan Sumber Daya Mineral
ETM	<i>Energy Transition Mechanism</i> (Mekanisme Transisi Energi)
EU	European Union
FGC	<i>Flue Gas Concentration</i> (Konsentrasi Gas Buang)
FOLU	<i>Forestry and Other Land Use</i> (Kehutanan dan Penggunaan Lahan Lainnya)
GCPT	<i>Global Coal Plant Tracker</i> (Pelacak Pembangkit Listrik Batubara Global)
GEM	<i>Global Energy Monitor</i> (Monitor Energi Global)
GRK	Gas Rumah Kaca
GW	Gigawatt
GtCO ₂ -eq	Gigaton ekuivalen karbon dioksida
H ₂ O ₂	Hidrogen Peroksida
IEA	International Energy Agency
IEEFA	Institute for Energy Economics and Financial Analysis
IESR	Institute for Essential Services Reform
IHME	Institute for Health Metrics and Evaluation
int. US\$	Dolar internasional, setara dengan daya beli sebesar US\$1
IPP	<i>Independent Power Producer</i> (Produsen Listrik Swasta)
JETP	<i>Just Energy Transition Partnership</i> (Kemitraan Transisi Energi Berkeadilan)
LCCP	<i>Low Carbon Scenario Compatible with Paris Agreement</i> (Skenario Rendah Karbon yang Sejalan dengan Persetujuan Paris)

LHK	Lingkungan Hidup dan Kehutanan
LHV	<i>Lower Heating Value</i> (Nilai Kalor Bawah)
LTS-LCCR 2050	<i>Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050</i> (Strategi Jangka Panjang untuk Rendah Karbon dan Ketahanan Iklim 2050)
$\mu\text{g}/\text{Nm}^3$	Mikrogram per meter kubik normal (pada 101.325 kPa, 273.15 K)
mg/Nm^3	Milligram per meter kubik normal (pada 101.325 kPa, 273.15 K)
MtCO ₂ -eq	Juta ton ekuivalen karbon dioksida
MW	Megawatt
NDC	<i>Nationally Determined Contribution</i>
NH ₃	Amonia
Nm^3/GJ	Meter kubik normal per GigaJoule (pada 101.325 kPa, 273.15 K)
NO ₂	Nitrogen Dioksida
NO _x	Nitrogen Oksida
O ₃	Ozon, pada permukaan tanah (<i>ground-level</i>)
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
PDB	Produk Domestik Bruto
PERPRES	Peraturan Presiden
PLN	Perusahaan Listrik Negara
PLTU	Pembangkit Listrik Tenaga Uap
PM	<i>Particulate Matter</i> (bahan partikulat)
PM2.5	Bahan partikulat dengan ukuran diameter partikel 2.5 mikron atau lebih kecil
PM10	Bahan partikulat dengan ukuran diameter partikel 10 mikron atau lebih kecil
PNB Paritas Daya Beli	Pendapatan Nasional Bruto dalam Paritas Daya Beli
PPA	<i>Power Purchase Agreement</i> (Perjanjian Jual Beli Listrik)
PRTR	<i>Pollutant Release and Transfer Register</i>
RUPTL	Rencana Umum Usaha Penyediaan Tenaga Listrik
SO ₂	Sulfur Dioksida
UGD	Unit Gawat Darurat
UNEP	United Nations Environment Programme
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
WRF	Weather Research Forecasting



Ringkasan

Eksekutif

Ringkasan Eksekutif

Latar belakang dan metodologi

Indonesia bergantung pada tenaga batubara untuk 62,5% dari pembangkitan listriknya (PLN, 2022). Ketergantungan ini membawa dampak yang signifikan terhadap kualitas udara dan kesehatan masyarakat di tanah air, serta berkontribusi besar terhadap pertumbuhan emisi gas rumah kaca selama beberapa dekade terakhir. Penghentian batubara secara bertahap dan jalur nir emisi yang saat ini sedang dipersiapkan merupakan peluang besar untuk membersihkan sistem ketenagalistrikan Indonesia. Studi ini mengkaji kualitas udara saat ini dan dampak kesehatannya, serta biaya ekonomi eksternal terkait pembangkit listrik tenaga batubara di Indonesia. Selain itu, kajian ini juga mencakup dampak dari berbagai jalur kebijakan pada masa yang akan datang. Kami menghadirkan jalur penghentian bertahap berbasis kesehatan pertama yang dirancang untuk memaksimalkan manfaat kesehatan masyarakat dari penghentian operasional pembangkit listrik tenaga batubara.

Dengan menggunakan pendekatan jalur dampak, studi ini menghitung dampak kesehatan dari emisi polutan udara yang dihasilkan oleh pembangkitan listrik menggunakan tenaga batubara di Indonesia. Pendekatan ini adalah cara yang paling umum digunakan untuk mengkaji dampak kesehatan dari sumber-sumber pencemar udara. Pendekatan yang dilakukan termasuk menelusuri rantai penyebab dari emisi, hingga dispersi atmosferis dan transformasi kimia, paparan populasi, dampak kesehatan yang dihasilkan, serta biaya ekonomi dari dampak kesehatan tersebut. Dampak-dampak tersebut dihitung untuk jalur yang dimaksudkan oleh kebijakan yang berlaku saat ini, untuk jalur yang selaras dengan 1,5 derajat bagi pembangkit listrik utilitas, serta untuk jalur yang selaras dengan 1,5 derajat bagi pembangkit *captive* maupun pembangkit utilitas. Studi ini juga menghitung dampak dari pengendalian emisi pencemar udara yang lebih ketat serta tingkat *co-firing* biomassa yang berbeda-beda.

Analisis dilakukan dengan cara mengembangkan inventarisasi emisi pembangkit listrik satu per satu, memperkirakan dispersi polusi pada level pembangkit melalui pemodelan atmosferis, menghitung dampak kesehatan akibat adanya perubahan konsentrasi ambien, serta menilai dampak kesehatan dalam istilah moneter menggunakan biaya ekonomi per kasus dengan keluaran (*outcome*) kesehatan yang berbeda-beda, yang dikompilasi dari berbagai literatur dan kemudian ditransfer ke tingkat pendapatan dan PDB per kapita Indonesia.

Inventarisasi emisi didasarkan pada pengungkapan yang sejauh mungkin oleh operator pembangkit, dengan data spesifik pembangkit listrik yang dikumpulkan untuk sebanyak mungkin pembangkit listrik dan kemudian digeneralisasikan ke pembangkit lain dengan jenis yang sama. Kami berasumsi bahwa semua pembangkit listrik memenuhi standar emisi nasional, sehingga hal ini dapat memberikan perkiraan dampak secara konservatif. Dampak kesehatan dan ekonomi di masa depan diproyeksikan dengan mempertimbangkan pertumbuhan populasi, pertumbuhan ekonomi, dan proyeksi perubahan demografis.

Dampak dari emisi pembangkit listrik tenaga batubara saat ini

Berdasarkan estimasi dari *Air Quality Life Index* (AQLI), 91% penduduk Indonesia terpapar tingkat polusi udara yang lebih buruk dibanding yang disyaratkan pada pedoman WHO. Di provinsi dengan tingkat pencemaran tertinggi, yaitu Jawa Barat, polusi udara mengurangi harapan hidup 48 juta penduduknya hingga 4,1 tahun. Sebanding dengan itu, penduduk di wilayah Metropolitan Jakarta, Jabodetabek, terpapar polusi partikulat tingkat tinggi, dan harapan hidup mereka 5,5 hingga 6,4 tahun lebih singkat daripada mereka yang tinggal di wilayah yang memenuhi pedoman WHO (AQLI, 2022).

Berdasarkan sebuah studi tahun 2015 yang dilakukan oleh Atmospheric Chemistry Modeling Group dari Harvard University dan Greenpeace Asia Tenggara, polusi udara yang diemisikan oleh pembangkit listrik tenaga batubara (PLTU batubara) diperkirakan bertanggung jawab atas 6.500 kematian dini setiap tahun pada tahun 2011 (Koplitz dkk., 2017). Untuk setiap penambahan baru pembangkit listrik sebesar 1.000 MW, rata-rata 600 orang dewasa dan anak-anak Indonesia akan terkena dampak parah penyakit pernapasan akut dan kronis akibat terpapar partikel halus dan polutan gas (Greenpeace Indonesia, 2015).

Emisi polutan udara dari pembangkit listrik batubara di Indonesia telah meningkat sekitar 110% selama satu dekade terakhir. Di bawah kebijakan yang berlaku saat ini, emisi tersebut diperkirakan akan meningkat lebih lanjut sebesar 70% pada tahun 2030. Pada tahun 2022, emisi dari pembangkit listrik batubara bertanggung jawab atas 10.500 kematian (CI 95%: 6.500–16.400) dan biaya kesehatan sebesar US\$7,4 miliar (Rp109,9 triliun; CI 95%: US\$4,6–11,5 miliar, Rp67,6–170,3 triliun). Namun, di bawah kebijakan saat ini, kematian yang terkait dengan emisi dari pembangkit listrik batubara diperkirakan akan meningkat menjadi 16.600 per tahun (10.300–25.900), sedangkan biaya kesehatan akan meningkat menjadi US\$11,8 miliar per tahun pada akhir dekade (Rp175,2 triliun; CI 95%: US\$7,2–18,2 miliar, Rp106,9–270,3 triliun).

Dampak pada masa depan menurut jalur pengakhiran operasional PLTU batubara yang berbeda-beda

Setelah mengevaluasi kualitas udara dan dampak kesehatan dari semua PLTU batubara di Indonesia, kami memproyeksikan emisi dan dampak kesehatan pada masa mendatang untuk jalur yang berbeda-beda. Jalur “kebijakan saat ini” kami dasarkan pada PERPRES 112/2022, yang mewajibkan semua pembangkit listrik PLN dan IPP (*Independent Power Producer*) serta pembangkit listrik *captive* baru untuk mengakhiri operasionalnya pada tahun 2050. Selain itu, kami berasumsi bahwa semua pembangkit listrik *captive* yang ada akan berakhir masa operasionalnya setelah beroperasi selama 30 tahun, sedangkan standar emisi untuk semua pembangkit tetap tidak berubah pada tingkat saat ini. Berdasarkan skenario ini, mulai dari tahun 2024 hingga akhir masa pakai semua pembangkit listrik tenaga batubara di Indonesia, emisi dari pembangkit listrik tenaga batubara akan menyebabkan jumlah kumulatif 303.000 kematian terkait polusi udara (CI 95%: 189.000–468.000) dan biaya kesehatan sebesar US\$210 miliar (Rp3,2 kuadriliun; CI 95%: US\$130–330 miliar, Rp2–4,9 kuadriliun).

Sebagai alternatif, kami mengevaluasi jalur 1,5 derajat, selaras dengan tujuan dari Persetujuan Paris dan rekomendasi dari International Energy Agency untuk penghentian bertahap pembangkit listrik batubara pada tahun 2040. Dibandingkan dengan kebijakan saat ini, penghentian batubara yang lebih cepat ini akan menghindarkan total kumulatif 182.000 kematian terkait polusi udara (CI 95%: 114.000–280.000) dan biaya kesehatan sebesar US\$130 miliar (Rp1.900 triliun; CI 95%: US\$80–200 miliar, Rp1.200–2.900 triliun), dari tahun 2024 hingga akhir masa pakai semua pembangkit listrik.

Standar emisi polutan udara untuk pembangkit listrik tenaga batubara Indonesia saat ini berada jauh di belakang praktik-praktik internasional terbaik dan teknologi terbaik yang tersedia. Hal ini terlihat jelas dari perbandingan dengan Cina, Korea Selatan, dan Uni Eropa. Oleh karena itu, kami memodelkan sebuah jalur di mana semua pembangkit listrik yang diharapkan untuk beroperasi setelah tahun 2035 diwajibkan untuk memasang perangkat pengendali emisi yang efisien pada tahun 2030. Di jalur ini, sebanyak 8.300 kematian tahunan terkait polusi udara (CI 95%: 5.200–12.600) serta biaya kesehatan sebesar US\$5,8 miliar (Rp86,5 triliun; CI 95%: US\$3,6–8,9 miliar, Rp54,1–131,5 triliun) dapat dihindari pada tahun 2035 dalam skenario kebijakan saat ini. Biaya kesehatan yang dihindari secara kumulatif akan mencapai US\$90 miliar (Rp1,3 kuadriliun; CI 95%: US\$60–140 miliar, Rp0,8–2,0 kuadriliun), menghasilkan manfaat ekonomi bersih sebesar US\$70 miliar (Rp290 triliun) kepada masyarakat setelah memperhitungkan biaya investasi dan pengoperasian pengendali polusi udara, sehingga membuat investasi ini sangat menguntungkan dari sudut pandang sosial.

Dari perspektif gas rumah kaca dan kesehatan masyarakat, penting untuk memasukkan pembangkit listrik *captive* ke dalam kebijakan penghentian penggunaan batu bara di Indonesia karena pembangkit ini bertanggung jawab atas sekitar 20% dari total dampak kesehatan dari pembangkit listrik tenaga batubara di negara ini. Pengecualian pembangkit listrik *captive* dari kebijakan penghentian batubara tahun 2040 dapat menimbulkan beban kesehatan tambahan sebanyak 2.700 kematian terkait polusi udara (CI 95%: 16.000–42.000) dan biaya kesehatan sebesar US\$20 miliar (Rp330 triliun; CI 95%: US\$10–30 miliar, Rp200–520 triliun). Bahkan saat penghentian bertahap batubara dimulai, beberapa pembangkit listrik diperkirakan akan tetap beroperasi hingga atau setelah tahun 2030-an. Berinvestasi dalam pengendalian polusi udara yang lebih baik di pembangkit listrik tersebut akan memberikan manfaat kesehatan dan ekonomi yang besar.

Rencana PLN untuk memenuhi target energi terbarukan yang ditetapkan untuk tahun 2025 dan 2030 sangat bergantung pada *co-firing* biomassa. Hasil evaluasi kami menunjukkan bahwa dampak *co-firing* terhadap emisi polutan udara dan

dampak kesehatan dari pembangkit listrik tenaga batubara tidak seberapa. Meningkatkan porsi *co-firing* ini menjadi minimal 20% di semua pembangkit listrik PLN akan mengurangi emisi sebesar 1,5 hingga 2,4%, tergantung pada polutannya. Sebaliknya, pengharusan penggunaan teknologi pengendali emisi yang efisien pada semua pembangkit listrik yang beroperasi setelah 2035 akan mengurangi emisi SO_x sekitar 73%, NO_x sebesar 64%, debu sebesar 86%, dan merkuri sebesar 71%.

Ada juga rencana tentatif untuk melakukan *co-firing* amonia di beberapa pembangkit listrik tenaga batubara. Namun, selain tidak praktis dan tidak ekonomis, gagasan tersebut juga kemungkinan dapat memperburuk dampak pada kualitas udara akibat adanya emisi amonia yang tidak sengaja terlepas dari proses pengangkutan dan penanganan amonia, serta dari pembangkit listrik itu sendiri.

Manfaat pengakhiran operasional PLTU batubara berbasis kesehatan

Pembangkit listrik yang terletak di dekat daerah padat penduduk memiliki biaya kesehatan masyarakat tertinggi. Dampak terhadap populasi diperparah oleh beberapa faktor, termasuk pola angin yang tidak menguntungkan dan tindakan pengendalian emisi yang buruk. Contoh nyata dari korelasi ini dapat dilihat pada pembangkit listrik PLN Muara Karang dan Lontar yang berlokasi di Jakarta dan Tangerang, serta pembangkit listrik batubara *captive* yang terletak di Bekasi, Karawang, Purwakarta, dan Bandung.

Manfaat kesehatan dan efektivitas biaya dari penghentian bertahap batubara dapat dimaksimalkan dengan memprioritaskan pembangkit dengan dampak kesehatan tertinggi dalam urutan pengakhiran operasional. Jika kita mengikuti logika sederhana dengan mengakhiri operasional pembangkit listrik tertua terlebih dahulu, jumlah kematian terkait polusi udara dalam skenario kebijakan saat ini akan menjadi 36.000 kasus lebih tinggi. Sejalan dengan hal tersebut, biaya kesehatan akan meningkat sebesar US\$24 miliar (Rp360 triliun)—sebesar 12%. Di bawah skenario 1,5 derajat, menerapkan jadwal pengakhiran operasional berbasis usia akan menimbulkan beban biaya tambahan terkait polusi udara kumulatif sebesar US\$12 miliar (Rp180 triliun).



Pendahuluan

Pendahuluan

Indonesia merupakan ekonomi berkembang terbesar di Asia Tenggara—dengan jumlah penduduk terbesar keempat di dunia dan tingkat pertumbuhan PDB rata-rata yang terjaga di level 5,3% pada periode 2011-2019 sebelum pandemi COVID-19 melanda pada tahun 2020 (World Bank Open Data, 2023a). Konsumsi energi akhir tumbuh pada tingkat rata-rata 3% selama periode yang sama. Indonesia mengalami penurunan konsumsi energi pada tahun 2020 dan 2021 akibat dari pandemi, tetapi pulih dengan cepat pada tahun 2022 seiring dengan dimulainya kembali kegiatan ekonomi (Kementerian ESDM, 2023a).

Dengan mengeksport 494 juta ton batubara, atau setara dengan 70% produksi nasional, Indonesia berkontribusi terhadap 21% ekspor batubara global berdasarkan nilai moneter (Kementerian ESDM, 2023b; Workman, 2022). Sumber daya dan cadangan batubara Indonesia yang utama terdiri dari batubara dengan kualitas menengah yang tersebar di Kalimantan Timur dan batubara dengan kualitas rendah di Sumatera bagian Tengah dan Selatan (IESR, 2019).

Meskipun terdapat cadangan minyak dan gas bumi yang dapat diambil (*recoverable*) sebesar 25 miliar barel minyak ekuivalen, Indonesia masih diperhadapkan pada tantangan dalam mempertahankan tingkat produksi dalam negeri dan memenuhi permintaan yang meningkat. Indonesia telah menjadi net importir minyak bumi dan diproyeksikan akan menjadi net importir gas alam pada tahun 2030 (McKinsey & Company, 2020). Selama ini Indonesia mengandalkan bahan bakar fosil untuk memenuhi kebutuhan energi nasional, dimana batubara, minyak, dan gas menyumbang hampir 88% dari pasokan energi primer nasional pada tahun 2022—masing-masing sebesar 42%, 32%, dan 14%. Energi terbarukan, dengan porsi sebesar 12%, masih belum dimanfaatkan secara luas (Kementerian ESDM, 2023a).

Karena laju urbanisasi meningkat secara signifikan seiring dengan pertumbuhan ekonomi—mencapai 57% pada tahun 2021 (World Bank Open Data, 2023b), wilayah-wilayah metropolitan utama di Indonesia diperhadapkan pada konsekuensi lingkungan negatif yang didorong oleh pola konsumsi perkotaan. Konsumsi energi yang lebih tinggi untuk listrik, transportasi, dan memasak di daerah perkotaan secara langsung akan menyebabkan adanya pelepasan polusi dalam jumlah yang lebih banyak ke udara, air, dan tanah karena adanya ketergantungan yang tinggi pada bahan bakar fosil dan biomassa. Indonesia juga termasuk di antara negara-negara yang paling rentan terhadap dampak perubahan iklim, berada dalam kelompok risiko sepertiga teratas (48 dari 191) dalam INFORM Risk Index 2023, terutama karena adanya risiko paparan yang tinggi terhadap banjir, gempa bumi, dan kekeringan (European Commission, 2023).

Untuk menyatakan komitmen nasionalnya dalam mengatasi perubahan iklim, Indonesia meratifikasi Persetujuan Paris pada tahun 2016 melalui dokumen Kontribusi yang Ditetapkan Secara Nasional (*Nationally Determined Contribution/ NDC*) yang dijanjikan untuk tahun 2020–2030. Dalam komitmen terbaru yang diperkuat, yang dipublikasikan pada tahun 2022, Indonesia menyerahkan dokumen *Enhanced NDC* kepada Sekretariat United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), di mana target penurunan emisi ditingkatkan dari 29% menjadi 31,89% tanpa syarat dengan upaya sendiri dari negara, dan dari 41% menjadi 43,20% bersyarat dengan dukungan internasional (UNFCCC, 2022).

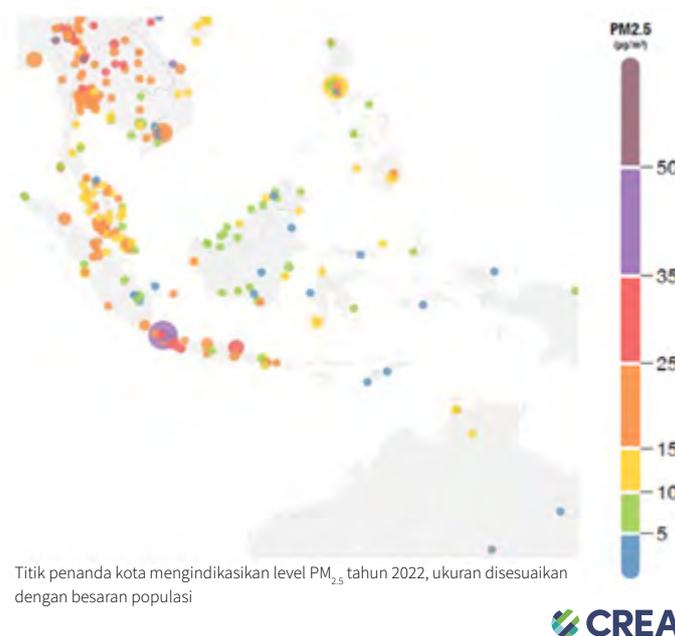
Enhanced NDC tersebut dimaksudkan untuk diselaraskan dengan Strategi Jangka Panjang untuk Rendah Karbon dan Ketahanan Iklim 2050 (*Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050/LTS-LCCR 2050*) (UNFCCC, 2021) untuk membantu negara bertransisi menuju NDC Kedua dan mewujudkan *Net Zero Emission* (Emisi Nir Bersih) pada tahun 2060 atau lebih cepat. LTS-LCCR 2050 didesain untuk memperkuat Visi Seratus Tahun Indonesia, "Visi Indonesia 2045" (Kementerian PPN/Bappenas, 2019), di mana target yang ambisius untuk pembangunan sumber daya manusia, ekonomi berkelanjutan, pemerataan pembangunan, dan konsolidasi ketahanan nasional dan tata kelola ditetapkan.

Di bawah skenario rendah karbon yang selaras dengan Persetujuan Paris (*Low Carbon Scenario Compatible with Paris Agreement/LCCP*), skenario yang termasuk dalam LTS-LCCR 2050 ditetapkan untuk sejalan dengan target 1,5 derajat dan emisi nasional diproyeksikan untuk mencapai puncaknya pada tahun 2030 sebesar 1,24 GtCO₂-eq. Setelah 2030, emisi diperkirakan akan turun secara bertahap dengan laju sekitar 30,7 MtCO₂-eq per tahun, untuk mencapai 0,54 GtCO₂-eq pada tahun 2050 atau setara dengan 1,61 ton CO₂-eq per kapita. Untuk mencapai target tersebut, Indonesia harus mencapai *net sink* di sektor Kehutanan dan Penggunaan Lahan Lainnya (*Forestry and Other Land Uses/FOLU*) pada tahun 2030, dengan berfokus juga kepada pengembangan dan transformasi di sektor energi. Khusus mengenai pembangkitan

listrik, skenario LCCP memproyeksikan peralihan dari batubara, peningkatan kontribusi energi terbarukan, dan integrasi pembangkit listrik *co-firing* biomassa yang terhubung dengan CCS.

Strategi transisi yang konkret sangatlah penting, tidak hanya untuk memitigasi risiko iklim, tetapi yang lebih penting adalah untuk mengantisipasi konsekuensi dari pembangunan dan pertumbuhan industri. Polusi udara yang terkait dengan pembangkitan energi berdampak sangat buruk pada kesehatan. Polusi udara secara tidak proporsional berdampak pada negara-negara berpenghasilan rendah dan menengah, dengan negara-negara di Asia Tenggara dan Pasifik Barat menghadapi beban terbesar, menurut WHO (WHO, 2021). Indonesia menghadapi isu polusi dan degradasi lingkungan yang semakin berkembang karena kegiatan ekonomi telah meningkat secara signifikan selama satu dekade terakhir.

Air Quality Life Index (AQLI) memperkirakan bahwa 91% dari populasi di Indonesia terpapar oleh polusi udara yang tingkatannya melebihi pedoman dari WHO. Polusi udara di Jawa Barat (provinsi dengan polusi udara tertinggi) mengurangi angka harapan hidup dari 48 juta penduduknya sebesar 4,1 tahun. Penduduk Wilayah Metropolitan Jakarta, Jabodetabek, terpapar oleh polusi partikulat tingkat tinggi, dan angka harapan hidup mereka adalah 5,5 hingga 6,4 tahun lebih singkat dari mereka yang tinggal di wilayah yang memenuhi pedoman WHO (AQLI, 2022).



Gambar 1. Peta Distribusi Konsentrasi $PM_{2.5}$ di Indonesia (IQAir, 2022)

Distribusi tingkat pencemaran $PM_{2.5}$ di kota-kota besar di Indonesia digambarkan dalam laporan Kualitas Udara Dunia IQAir 2022, di mana Indonesia menempati peringkat terburuk di kawasan Asia Tenggara, dan Jakarta terbukti memiliki rata-rata konsentrasi $PM_{2.5}$ tahunan terburuk, yaitu sebesar $36,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (IQAir, 2022). Tercatat bahwa sebagian besar wilayah di pulau Jawa, yang menjadi tempat tinggal 56% penduduk Indonesia, menunjukkan paparan tahunan yang melebihi tiga hingga tujuh kali lipat dari pedoman WHO untuk ambang batas konsentrasi $PM_{2.5}$ tahunan sebesar $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (BPS, 2023).

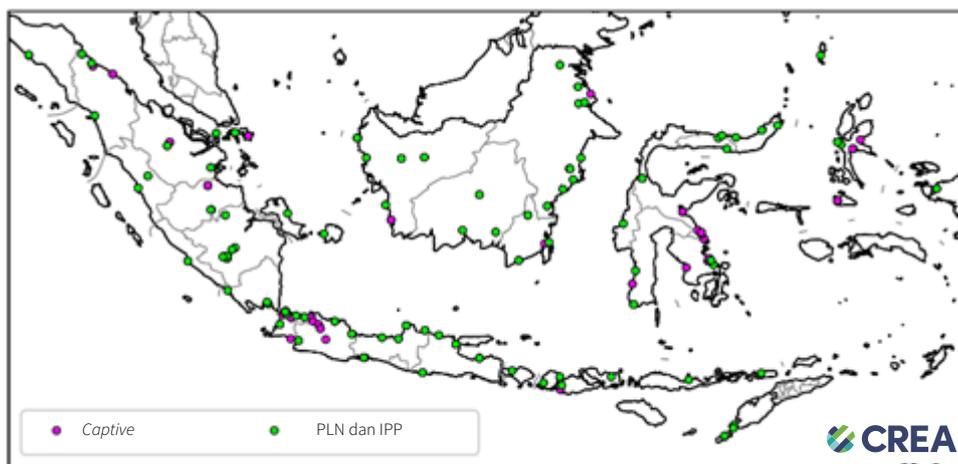
Pembangkit listrik tenaga batubara adalah salah satu sumber utama emisi polutan udara, dan penyebab signifikan dari pertumbuhan emisi. Berdasarkan sebuah studi yang dilakukan oleh Atmospheric Chemistry Modeling Group dari Harvard University dan Greenpeace Asia Tenggara pada tahun 2015, polusi udara yang diemisikan oleh PLTU batubara diperkirakan bertanggung jawab atas 6.500 kematian dini per tahun pada 2011 (Koplitz dkk., 2017). Untuk setiap penambahan baru pembangkit listrik 1.000 MW, rata-rata 600 orang dewasa dan anak-anak Indonesia akan terkena dampak serius dari penyakit pernapasan akut dan kronis akibat terpapar partikel halus dan gas polutan (Greenpeace Indonesia, 2015).

Sebuah komentar yang dirilis oleh Satya Widya Yudha, anggota Dewan Energi Nasional, menyoroti dampak polusi udara akibat dari kebakaran hutan dan degradasi lahan gambut, pembangkit listrik batubara, dan emisi kendaraan, serta menekankan perlunya reformasi hukum untuk mengurangi kerugian yang diderita manusia akibat dari pencemaran udara, yaitu meningkatnya kasus infeksi saluran pernafasan atas dan kematian dini (NBR, 2018). Indonesia harus memprioritaskan pengadopsian solusi efisiensi energi dan energi bersih yang mutakhir untuk menghindari risiko ini, caranya adalah dengan menghapus secara bertahap PLTU batubara tertua dan penghasil emisi terbesar.

Kondisi dari pembangkitan listrik dengan tenaga batubara

Di Indonesia, produksi dan distribusi listrik ditangani oleh pemerintah pusat melalui badan usaha milik negara yaitu PT Perusahaan Listrik Negara (PLN) dan anak perusahaannya, dengan Independent Power Producers (IPP) atau Produsen Listrik Swasta bertanggung jawab atas pembangkitan listrik dengan porsi yang cukup signifikan. Total kapasitas terpasang di tanah air adalah sebesar 69.040 MW, di mana PLN mengoperasikan 6.314 unit dengan total kapasitas gabungan sebesar 44.940 MW, atau sekitar 65%. Sisanya, yaitu sebesar 24.100 MW (35%) dioperasikan oleh IPP, berdasarkan Laporan Statistik PLN 2022 (PLN, 2022).

Indonesia selama ini bergantung kepada bahan bakar fosil, khususnya batubara, untuk pembangkitan listrik. Batubara adalah sumber bahan bakar utama untuk pembangkit listrik, porsinya mencapai 62,5% pada tahun 2022, diikuti oleh gas alam dengan porsi 22,2%, minyak dengan porsi 5,6%, dan sisanya sebesar 9,7% adalah dari energi terbarukan (PLN, 2022). Gambar 2 di bawah ini memberikan gambaran lokasi PLTU batubara yang tersebar di wilayah Indonesia, menunjukkan pembangkit listrik PLN dan IPP untuk pasokan listrik nasional, dan pembangkit *captive* yang didedikasikan untuk kawasan industri padat energi yang berlokasi di Jawa Timur, Jawa Tengah, Sumatera Utara, Sulawesi, dan Maluku.

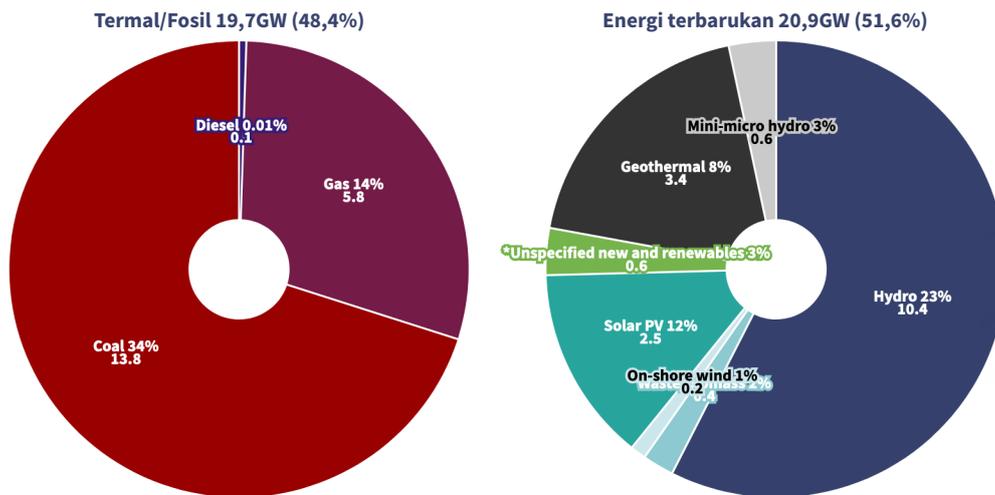


Gambar 2. Distribusi kapasitas pembangkit listrik batubara di Indonesia (CREA, 2023; GEM, 2022)

Pada bulan Oktober 2021, PLN merilis rencana usaha 10 tahunannya, yaitu Rencana Umum Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021–2030. Dokumen tersebut menggarisbawahi rencana perusahaan untuk menambah total kapasitas pembangkitan listrik sebesar 40.575 MW hingga tahun 2030, di mana 51,6% dari kapasitas tersebut akan bersumber dari energi terbarukan dan 48,5% akan berasal dari bahan bakar fosil (Kementerian ESDM, 2021; OECD, 2021). Rincian pembagiannya diilustrasikan dalam Gambar 3.

Total penambahan kapasitas daya, 2021-2030

Total: 40,57 GW



Sumber: RUPTL 2021-2030. Kategori ini termasuk listrik yang dihasilkan dari sumber energi baru dan terbarukan untuk menyuplai kebutuhan *baseload* dan *peak load*. RUPTL mengindikasikan bahwa pembangkit listrik *baseload* di dalam kategori ini dapat mencakup pembangkit listrik hibrida antara energi terbarukan dan gas yang biaya pembangkitan listriknya lebih murah daripada proyek-proyek batubara.



Gambar 3. Porsi dari penambahan kapasitas daya tambahan berdasarkan RUPTL 2021-2030 (OECD, 2021)

Terlepas dari komitmen untuk mencapai 23% porsi energi terbarukan dalam bauran energi pada tahun 2025, RUPTL 2021–2030 masih menunjukkan ketergantungan yang tinggi pada bahan bakar fosil, khususnya batubara, untuk dekade berikutnya. Hingga Januari 2023, terdapat 88 PLTU batubara yang beroperasi di tanah air yang memiliki total kapasitas terpasang 40,6 GW. Kapasitas tambahan sebesar 18,9 GW masih dalam tahap konstruksi, 4,7 GW dalam tahap pra-izin dan izin, dan 2,8 GW telah diumumkan (GEM, 2022). Dalam dua dekade terakhir, Indonesia telah mempertahankan penambahan kapasitas yang stabil untuk mengimbangi proyeksi pertumbuhan permintaan. Penambahan ini dimungkinkan melalui serangkaian program perluasan kapasitas untuk PLTU batubara yang dilacak dengan cepat, dengan tujuan untuk menambah kapasitas sebesar 42,5 GW pada tahun 2024 (Antara News, 2019).

Realisasi pertumbuhan permintaan terus-menerus dilebih-lebihkan, sehingga mengakibatkan adanya kelebihan kapasitas. Dua dari jaringan listrik terbesar di negara ini, yaitu Jawa-Bali dan Sumatera, diharapkan memiliki cadangan margin masing-masing hingga 60% dan 56% pada tahun 2030, menurut prakiraan PLN. Pada intinya, jaringan nasional akan menghadapi kelebihan pasokan selama dekade berikutnya (IEEFA, 2021a).

Dokumen perencanaan telah mengindikasikan bahwa PLN akan mengakhiri operasional armada PLTU batubara-nya, sehingga sejalan dengan komitmen pemerintah untuk mencapai target netral karbon pada tahun 2060. Mulai tahun 2030, proses penghentian operasional PLTU batubara tersebut akan dilakukan secara bertahap sesuai dengan *Power Purchase Agreement* (PPA) dan pertimbangan siklus hidup ekonomi. Rencana tersebut mengusulkan bahwa tahap pertama dari penghentian PLTU batubara adalah sebesar 1,1 GW unit-unit subkritis yang secara memadai telah mencapai akhir masa pakainya sesuai rancangan. Unit-unit yang berada di Muara Karang, Tanjung Priok, Tambak Lorok, dan Gresik tersebut telah beroperasi selama 50–60 tahun, dan dipertimbangkan untuk berhenti beroperasi pada tahun 2030 di dalam RUPTL 2021-2030 (Kementerian ESDM, 2021). Namun, PLN dapat memutuskan untuk memperpanjang umur operasional pembangkitnya hingga 20 tahun melalui *refurbishment*, *retrofit*, atau perpanjangan masa pakai PLTU batubara tertentu yang masih dianggap sebagai aset, sebagaimana dikutip dalam RUPTL 2021-23 (ESDM, 2021, hal. V- 66). Hal ini akan mengganggu upaya pencapaian target penurunan emisi.

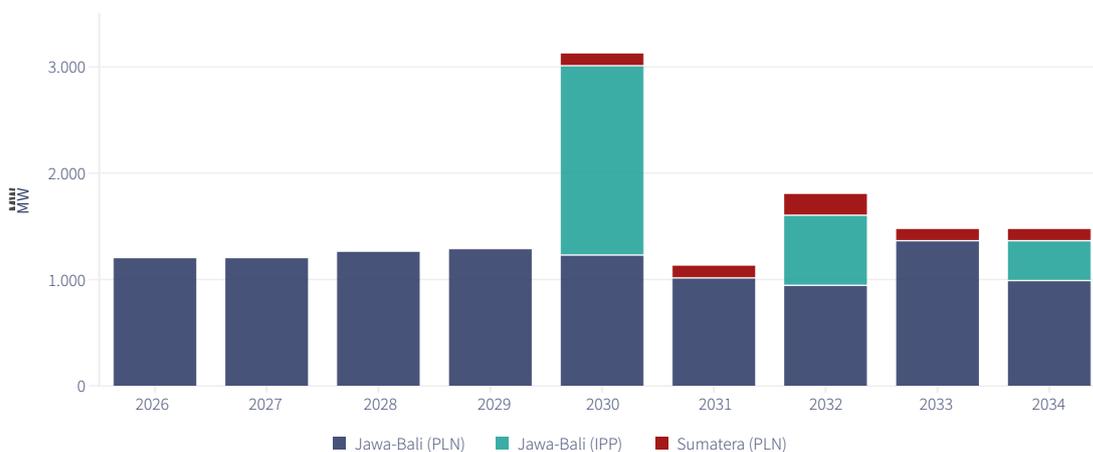
Upaya nasional dan dukungan internasional

Berdasarkan tren konsumsi listrik secara historis, jelas bahwa negara harus mengurangi atau menunda penambahan kapasitas dan mengejar pengakhiran operasional secara dini dari PLTU batubara lama yang kurang efisien, sementara pertumbuhan beban terus berlanjut. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral mulai bekerjasama dengan PLN untuk mengembangkan rencana pengakhiran operasional PLTU batubara secara bertahap, yang dirancang untuk memenuhi peta jalan *Net Zero Emission* 2060 Indonesia. Sebagai rencana awal, PLN telah mengumumkan target untuk mengakhiri operasional 1 GW PLTU batubara sebelum tahun 2030 dan menerapkan pengakhiran operasional secara bertahap hingga tahun 2055 ketika PLTU batubara terakhir yang telah beroperasi secara kontinyu diharapkan untuk berhenti beroperasi (Fiscal Policy Agency, 2022).

Pada bulan Oktober 2022, Peraturan Presiden No. 112 tahun 2022 mengenai Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik telah dikeluarkan. Peraturan tersebut memperlihatkan komitmen negara untuk memprioritaskan pembangkit listrik energi baru dan terbarukan serta untuk bertransisi menjauh dari bahan bakar fosil. Di dalam peraturan tersebut dirinci bahwa Indonesia tidak akan mengizinkan pembangunan PLTU batubara tambahan setelah diterbitkannya peraturan dan menetapkan tahun 2050 sebagai batas maksimum tahun operasional. PLTU batubara baru yang diizinkan hanyalah yang telah tercantum dalam RUPTL dan Proyek Strategis Nasional Indonesia oleh karena adanya pertimbangan bahwa hal itu diharapkan akan berkontribusi pada penciptaan lapangan kerja dan pertumbuhan ekonomi. Peraturan ini juga mencakup bahwa pengecualian dapat berlaku untuk pengoperasian pembangkit listrik tenaga batubara yang mampu memenuhi komitmen untuk mengurangi emisi gas rumah kaca paling sedikit 35% dalam kurun waktu 10 tahun sejak dimulainya operasi melalui penerapan teknologi, penyeimbangan karbon, dan/atau bauran energi terbarukan. *Baseline* dari emisi yang dimaksud adalah emisi rata-rata PLTU di Indonesia pada tahun 2021 (Kementerian ESDM, 2022a).

Pemerintah Indonesia dan Asian Development Bank (ADB) secara resmi memperkenalkan *Energy Transition Mechanism* (ETM) *Country Platform* yang ditujukan untuk mengejar target *Net Zero Emission* negara pada tahun 2060 (Kementerian ESDM, 2022b) pada KTT G20 yang berlangsung pada bulan November 2022. Untuk mencapai hal ini dan untuk mengurangi emisi karbon Indonesia sebesar 32% pada tahun 2030, negara bertujuan untuk mempercepat penghentian 33 pembangkit listrik batubara yang memiliki jumlah total kapasitas sebesar 16,8 GW. ETM *Country Platform* menargetkan percepatan pengembangan teknologi energi terbarukan dan rendah emisi, dan pada akhirnya akan mengerahkan 700 GW pembangkit energi terbarukan. Total investasi yang diperlukan akan mencapai US\$1 triliun (Rp15 kuadriliun) pada tahun 2060 dengan dukungan dari mitra-mitra internasional seperti ADB, Islamic Development Bank, dan World Bank (ADB, 2022; Kementerian ESDM, 2022b). Rencana pengakhiran operasional awal telah dikembangkan oleh Indonesia di bawah inisiatif ADB ETM, mencantumkan pembangkit listrik prioritas yang paling cocok untuk dihentikan operasionalnya sebelum dan setelah tahun 2030. Kapasitas tahunan yang tercantum dalam rencana awal ini diilustrasikan pada Gambar 4 di bawah ini.

Pengakhiran Operasional (MW), 2035-2035 berdasarkan jaringan



Gambar 4. Rencana Pengakhiran Operasional PLTU batubara untuk Jawa-Bali (PLN), Jawa-Bali (IPP), dan Sumatera (PLN) yang dikembangkan di bawah inisiatif ADB ETM (Fiscal Policy Agency, 2022)

Pada acara KTT G20 yang sama, Amerika Serikat, Uni Eropa, Kanada, Jepang, dan Inggris mengumumkan *Just Energy Transition Partnership* (JETP) dengan Indonesia untuk mendukung negara secara finansial dalam mencapai target iklim dan transisi energinya, serta untuk tetap sejalan dengan target 1,5 derajat. Target-target tersebut akan dicapai melalui pendanaan publik dan swasta sebesar US\$20 miliar selama tiga hingga lima tahun (European Commission, 2022a).

Kemitraan ini dimaksudkan untuk membantu Indonesia mencapai *Net Zero Emission* pada tahun 2060 atau lebih cepat dengan cara mempercepat dekarbonisasi sektor energi Indonesia. Hal ini melibatkan pengakhiran operasional secara dini beberapa PLTU batubara sekaligus juga meningkatkan pangsa energi terbarukan. Kesepakatan yang dibangun mengharuskan negara untuk membatasi emisi sektor ketenagalistrikan sebesar 290 juta ton (CO₂) pada tahun 2030, turun dari nilai dasar untuk tahun 2030 sebesar 357 juta ton (CO₂) (European Commission, 2022b). Porsi kontribusi energi terbarukan dalam sektor ketenagalistrikan akan ditingkatkan dari 23% menjadi 34% pada tahun 2030. Kesepakatan tersebut juga mencakup target untuk mencapai *net-zero emission* di sektor ketenagalistrikan pada tahun 2050. Selain itu, pengakhiran operasional secara dini dari PLTU batubara akan diprioritaskan di samping menghentikan pula *pipeline* PLTU batubara *on-grid* yang telah direncanakan dan tercantum dalam RUPTL (Ember, 2023).

Wujud lain dari dukungan internasional bagi transisi energi di Indonesia adalah program *Climate Investment Funds* (CIF) *Accelerating Coal Transition* (ACT), sebuah inisiatif untuk membantu negara-negara yang bergantung pada batubara untuk mengurangi ketergantungan mereka pada tenaga batubara dan berada di jalur yang tepat untuk memenuhi komitmen global yang dibuat dalam komitmen Perjanjian Paris 2016 (CIF, 2023). Rencana dari ACT yang dikembangkan bersama ADB dan World Bank terdiri dari tiga elemen kunci: pengakhiran operasional PLTU batubara yang dipercepat; tata kelola, transisi berkeadilan dan perubahan tujuan; serta memperbesar skala energi terbarukan dan penyimpanan.

Pengendalian polusi dan kebijakan mengenai emisi

Polutan udara yang diemisikan oleh PLTU batubara yang menjadi keprihatinan terbesar adalah partikel halus PM_{2,5}, sulfur dioksida (SO₂), nitrogen oksida (NO_x), merkuri, dan logam-logam berat lainnya. Karena standar emisi polutan udara yang relatif longgar, sebagian besar PLTU batubara di Indonesia tidak memiliki teknologi pengendalian polutan udara untuk SO₂ dan NO_x. Polutan-polutan ini memberikan kontribusi yang signifikan terhadap timbulnya polusi PM_{2,5} melalui pembentukan dan pelepasan sulfat dan aerosol nitrat (bentuk dari PM_{2,5}) ke atmosfer.

Dalam beberapa tahun terakhir, banyak PLTU batubara baru yang dibangun untuk memenuhi kebutuhan listrik Indonesia yang semakin meningkat (GEM, 2023). Porsi PLTU batubara dalam total pembangkit listrik telah meningkat secara substansial di kawasan Asia Tenggara, khususnya di Indonesia, hampir dua kali lipat dari sekitar 25% pada tahun 1995 menjadi 52% pada tahun 2014, dan mencapai 67% pada tahun 2022 (Kementerian ESDM, 2023b). Indonesia juga memiliki porsi pembangkit listrik tenaga batubara tertinggi dalam bauran energinya di antara negara-negara ASEAN (ERIA, 2017).

Seperti yang disoroti oleh Economic Research Institute for ASEAN and East Asia (ERIA), batubara dapat dianggap sebagai salah satu sumber bahan bakar termurah untuk pembangkit listrik dari segi biaya langsung, namun memiliki biaya kesehatan masyarakat yang cukup besar. Kendati peningkatan standar emisi pada umumnya akan berujung pada kenaikan tarif listrik, hal ini akan menjadi hasil yang paling diinginkan dan berkelanjutan bagi negara untuk memungkinkan pemasangan yang tepat dan pengoperasian peralatan Pengendalian Polusi Udara (*Air Pollution Control/ APC*) yang berkelanjutan di semua PLTU batubara yang beroperasi.

Ketika standar emisi mulai diberlakukan, negara bertanggung jawab untuk memastikan pengelolaan APC secara tepat dan membuka catatan pemantauannya kepada publik. Akses yang terbuka ke catatan-catatan ini berfungsi sebagai bukti kepatuhan terhadap peraturan, sekaligus untuk mendapatkan dukungan publik, terutama dari masyarakat yang tinggal dekat dengan PLTU batubara. ERIA menyoroti bahwa sistem pemantauan harus sangat transparan, dengan pemantauan yang dilaksanakan di tingkat pembangkit listrik dan daerah setempat.

Indonesia telah menerapkan dua peraturan kunci mengenai pengendalian emisi dari PLTU batubara, yaitu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 21 tahun 2008 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Pembangkit Tenaga Listrik Termal, dan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal (Kementerian LHK, 2023).

Kebijakan kedua memperkenalkan standar untuk PLTU batubara “baru” yang lebih selaras dengan standar-standar yang diberlakukan di negara-negara konsumen utama batubara lainnya. Namun, PLTU batubara yang sudah mengantongi izin dan sedang dalam proses pembangunan tidak dianggap sebagai PLTU batubara yang “baru” oleh pemerintah ketika memberlakukan standar ini, sehingga memungkinkan mereka untuk mengikuti standar longgar untuk pembangkit listrik “yang sudah ada”. PLTU batubara dengan kapasitas 25 MW atau lebih, serta PLTU batubara dengan kapasitas kurang dari 25 MW yang beroperasi secara kontinyu dan menggunakan batubara dengan kandungan sulfur lebih besar dari 2% diwajibkan untuk mengukur emisinya menggunakan Sistem Pemantauan Emisi Berkelanjutan (*Continuous Emission Monitoring System/CEMS*). Ringkasan dari kadar polutan maksimal di PLTU batubara dipaparkan dalam Tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Ringkasan Batas Emisi Maksimum PLTU Batubara di Indonesia

Kebijakan	Tahun Operasi	SO ₂ (mg/Nm ³)	NO _x (NO ₂) (mg/Nm ³)	PM (mg/Nm ³)	Opasitas	Merkuri (mg/Nm ³)
Permen LHK No 21 Tahun 2008 (sebelumnya)	Sebelum 01 Des. 2008	750	850	150	20%	
	Setelah 01 Des. 2008	750	750	100	20%	
Permen LHK No. P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 (berlaku saat ini)	Sebelum 23 April 2019	550	550	100		0,03
	Setelah 23 April 2019	200	200	50		0,03

Sebuah proyek tiga tahun bernama “*Transparent Pollution Control in Indonesia*” yang diimplementasikan dari Maret 2021 hingga Februari 2024 bertujuan untuk mendukung Indonesia dalam mencapai tujuan internasional dari transisi energi. Indonesia mendapatkan dukungan pendanaan dari Uni Eropa untuk meningkatkan pemantauan pencemaran industri, melalui penerapan Pollutant Release and Transfer Register (PRTR). Proyek ini juga bertujuan untuk membangun jaringan advokasi sipil yang lebih kuat di Indonesia, untuk terlibat dengan pemangku kepentingan nasional dan mendorong adanya respon yang cepat (EEAS, 2021; Simon, 2023).

Nexus3 Foundation menyoroti adanya kebutuhan mendesak untuk mengendalikan polusi udara, mengutip Gugatan Warga pada tahun 2019 yang diajukan oleh 32 warga yang ditujukan kepada Presiden Joko Widodo, Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan, Menteri Kesehatan, Menteri Dalam Negeri, serta Gubernur Jawa Barat dan Gubernur Banten. Polusi udara di Jakarta terutama berkaitan dengan adanya enam PLTU batubara yang terletak di tiga provinsi terdekat, emisi dari jutaan kendaraan, dan aktivitas industri. Tingginya tingkat pencemaran yang terjadi merupakan akibat dari tidak dilaksanakannya pengujian emisi dan kurangnya upaya di tingkat nasional dan daerah untuk mengurangi pelepasan polutan (Nexus3 Foundation, 2021).



Metodologi

Metodologi

Studi ini menghitung dampak kesehatan dari emisi polutan udara yang berasal dari PLTU batubara di Indonesia dengan menggunakan pendekatan jalur dampak. Pendekatan ini adalah cara yang paling umum digunakan untuk mempelajari dampak kesehatan dari sumber pencemar udara, dengan menelusuri rantai penyebab dari emisi hingga dispersi atmosferis dan transformasi kimia, paparan populasi, dampak kesehatan yang dihasilkan, serta biaya ekonomi dari dampak kesehatan tersebut. Dampak dihitung untuk berbagai jalur masa depan, mulai dari jalur yang dimaksud di dalam peraturan yang berlaku saat ini, serta jalur yang selaras dengan target 1,5 derajat untuk pembangkit listrik utilitas, dan jalur yang selaras dengan target 1,5 derajat baik untuk pembangkit listrik utilitas maupun untuk pembangkit listrik *captive*. Studi ini juga menghitung dampak jangka panjang dari pengharusan penerapan pengendalian emisi polutan udara yang lebih ketat dan tingkat pembakaran bersama (*co-firing*) biomassa yang berbeda-beda.

Analisis yang dilakukan dalam studi ini dilakukan dengan:

- (1) Mengembangkan inventarisasi emisi pembangkit listrik satu per satu;
- (2) Memperkirakan penyebaran polusi dari PLTU batubara melalui pemodelan atmosferis;
- (3) Menghitung dampak kesehatan dari polusi udara akibat perubahan konsentrasi ambien; dan
- (4) Menilai dampak kesehatan secara moneter dengan menggunakan metode biaya penyakit.

Analisis dilakukan dalam *grid* (kisi) spasial dengan resolusi 5x5 km, dengan dampak kesehatan yang dihitung untuk setiap sel kisi. Semua himpunan data dikumpulkan atau diinterpolasi ke resolusi tersebut sesuai dengan kebutuhan.

Inventarisasi emisi

CREA mengkompilasi inventarisasi emisi di tingkat pembangkit listrik dari semua PLTU batubara yang beroperasi di Indonesia untuk digunakan sebagai input pemodelan kualitas udara. Inventarisasi mencakup informasi spesifik pembangkit mengenai teknologi pembakaran dan pembangkitan, kapasitas dan lokasi pembangkit listrik, serta konsentrasi gas buang polutan. Hal ini juga termasuk informasi mengenai cerobong, yaitu tinggi dan diameter cerobong, kecepatan pelepasan gas buang, dan suhu. Karakteristik cerobong digunakan untuk memodelkan tinggi pelepasan asap cerobong dan kenaikan termal polutan.

Kompilasi data pertama dari PLTU batubara yang sudah ada, sedang dibangun, dan yang direncanakan diambil dari *Global Energy Monitor* (GEM) *Global Coal Plant Tracker* (GCPT) (GEM, 2023). Informasi dasar yang diambil mencakup titik koordinat pembangkit listrik, kapasitas pembangkit, tahun mulai beroperasi, dan status (beroperasi, sedang dibangun, diizinkan, pra-izin, dan diumumkan). Inventarisasi awal ini kemudian diverifikasi silang dan dilengkapi dengan informasi yang dikompilasi dari mitra-mitra lokal. Pengumpulan data lebih lanjut dilakukan untuk mendapatkan data yang tersedia mengenai data emisi spesifik pembangkit listrik yang berasal dari laporan resmi, laporan operator sukarela, dokumen Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL), standar emisi nasional, dan peraturan terkait lainnya.

Karena volume emisi PLTU batubara tidak diungkapkan secara terbuka di Indonesia, laju massa emisi (E) dari polutan udara utama (SO_2 , NO_x , PM) dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$E = \frac{CAP \times CF}{EFF} \times SFGV \times FGC$$

di mana CAP adalah kapasitas pembangkit listrik bruto dari unit pembangkit (MW), EFF adalah efisiensi termal (*gross*, berdasarkan Nilai Kalor Bawah (*Lower Heating Value* (LHV) dalam MJ/kg), CF adalah faktor kapasitas, SFGV adalah volume spesifik gas buang dari batubara (Nm^3/GJ), dan FGC adalah konsentrasi gas buang dari polutan (mg/Nm^3).

Emisi merkuri dihitung sebagai berikut:

$$E = \frac{CAP \times CF}{EFF} \times \frac{1}{CAL} \times C_{Hg} \times (1 - C)$$

di mana CAL adalah nilai kalor dari batubara, C_{Hg} adalah kandungan merkuri dalam batubara, dan CE adalah efisiensi pengendalian merkuri.

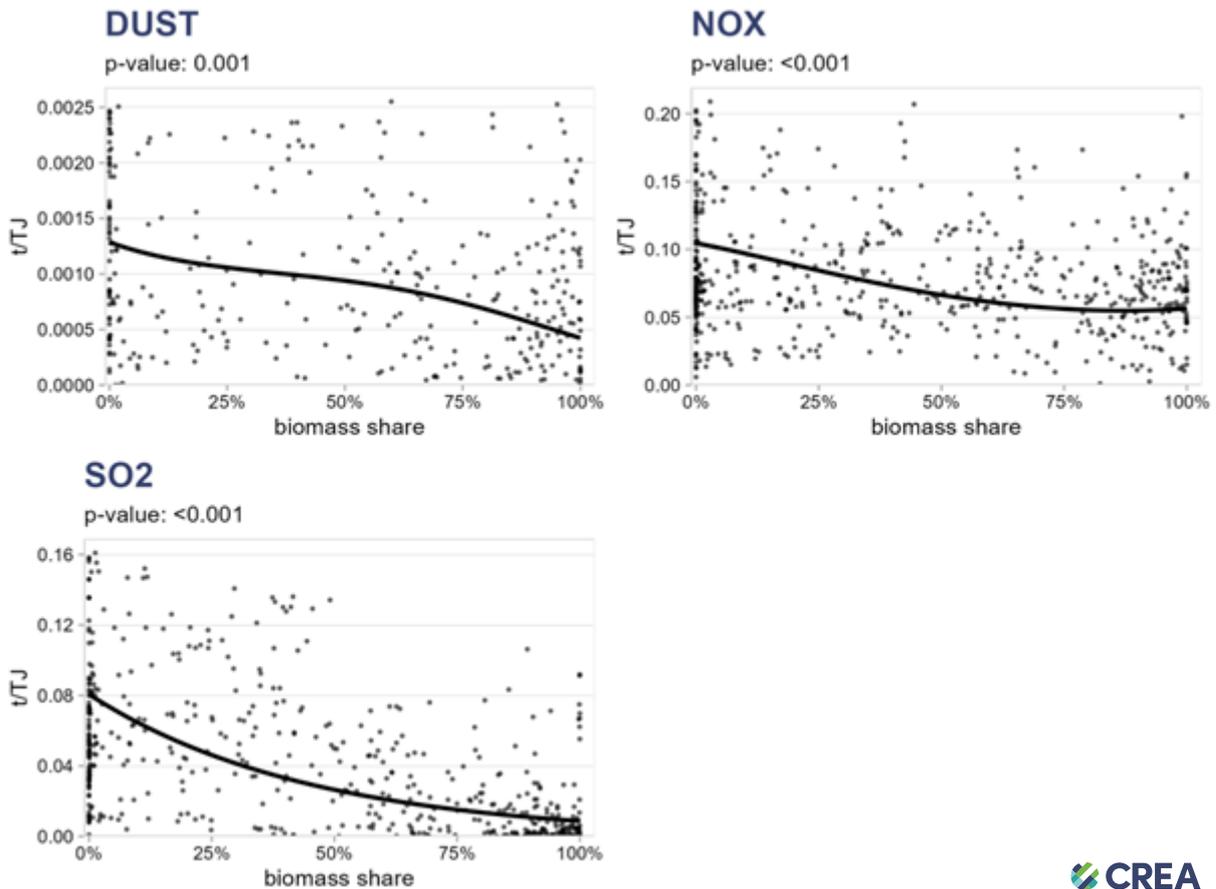
- Informasi mengenai FGC dikumpulkan dari berbagai sumber, termasuk situs web operator pembangkit listrik, CSR dan pelaporan keuangan mereka, dan juga data dari AMDAL. Kami juga mengambil data dari studi akademik yang memiliki data khusus untuk pembangkit listrik. Informasi tersebut kemudian digeneralisasikan ke pembangkit listrik lain, menghasilkan kategori terpisah untuk pembangkit kecil (<100 MW), pembangkit baru (mulai beroperasi sejak 2015), untuk SO_2 dan NO_x , serta pembangkit yang dilengkapi dengan perangkat kontrol emisi untuk polutan-polutan ini.
- Pada kondisi di mana efisiensi termal dari pembangkit listrik tidak tersedia, digunakan asumsi efisiensi kotor sebesar 44% untuk pembangkit ultra-superkritis, 42% untuk pembangkit superkritis, 38% untuk pembangkit subkritis yang dibangun sejak 2010, dan 35% untuk pembangkit yang dibangun lebih awal. Ini adalah asumsi yang digeneralisasikan dari data yang tersedia untuk berbagai jenis pembangkit listrik. Untuk unit kecil dengan kapasitas kurang dari 100 MW, digunakan asumsi efisiensi kotor sebesar 30%.
- Volume gas buang spesifik sebesar 379 Nm^3/GJ (dikoreksi pada 7% oksigen) digunakan dalam perhitungan, dihitung sebagai rata-rata sampel batubara Indonesia di USGS World Coal Quality Inventory (USGS, 2019).
- Kapasitas PLTU batubara dan listrik yang dihasilkan dalam skenario kebijakan yang berlaku saat ini dan skenario 1,5 derajat diambil dari simulasi GCAM (Cui dkk., 2022). Pembangkit listrik *captive* diasumsikan beroperasi pada tingkat utilisasi 80%, sedangkan pembangkit listrik utilitas mengikuti tingkat utilisasi yang diproyeksikan oleh GCAM.
- Kandungan merkuri dalam batubara yang digunakan sebagai sumber bahan bakar di 47 PLTU batubara di Indonesia diperoleh dari survei emisi merkuri nasional dari PLTU batubara di Indonesia (BCRC-SEA, 2017). Efisiensi pengendalian merkuri didasarkan pada nilai spesifik terhadap tipe batubara dan teknologi pengendalian polutan udara dalam UNEP (2017) *Mercury Toolkit*.
- Efek dari pembakaran bersama (*co-firing*) biomassa terhadap emisi diproyeksikan menggunakan hubungan yang diturunkan dari data emisi EU (EEA, 2023). Data tersebut berisi input bahan bakar tahunan dan emisi polutan udara untuk ratusan pabrik pembakaran besar, yang memungkinkan kami mengukur efek dari variasi proporsi biomassa dan batubara dari tahun ke tahun di fasilitas yang sama (Gambar 5).
- Kami mengasumsikan penerapan CCS mengurangi emisi SO_2 , NO_x , dan PM masing-masing sebesar 85%, 29%, dan 6%, berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh European Environment Agency (EEA, 2011).

Dalam kondisi di mana informasi mengenai nilai emisi pembangkit listrik kurang memadai atau tidak tersedia, informasi tersebut digeneralisasikan menggunakan nilai rata-rata untuk proyek dengan kapasitas dan teknologi pembakaran yang serupa. Kami mengasumsikan bahwa pembangkit listrik tersebut mematuhi standar emisi negara dan mengoperasikan perangkat kontrol emisi mereka secara penuh. Informasi mengenai kontrol emisi yang terpasang juga dikumpulkan dari dokumen-dokumen utama ini, serta dari basis data S&P (2020) World Electric Power Plants.

Untuk menilai siklus hidup emisi dari pembangkit yang saat ini sedang dibangun namun tanggal operasinya belum diketahui, diasumsikan bahwa pembangkit tersebut akan beroperasi pada tahun 2025. Sedangkan untuk proyek yang belum mulai dibangun dan tanggal operasinya belum diketahui, diasumsikan bahwa pembangkit listrik tersebut akan beroperasi pada tahun 2028. Untuk proyek-proyek yang tertunda, yaitu pembangkit listrik yang sedang dibangun dan

memiliki tanggal operasi yang ditargetkan di masa lalu, diasumsikan bahwa pembangkit listrik tersebut beroperasi pada tahun 2023. Begitu pula untuk proyek-proyek baru yang belum mulai dibangun, diasumsikan bahwa proyek tersebut saat ini sudah memperoleh izin dan akan beroperasi paling cepat pada tahun 2026, proyek yang dalam tahap "pra-izin" diasumsikan beroperasi pada tahun 2027, dan proyek yang telah "diumumkan" diasumsikan beroperasi pada tahun 2028.

Dalam skenario *Air Pollution Control (APC)*, pembangkit listrik yang diretrofit diasumsikan memenuhi tingkat referensi dari *EU Best Available Technology* yang lebih longgar, yaitu: 130 mg/Nm³ untuk SO₂, 150 mg/Nm³ untuk NO_x dan 10 mg/Nm³ untuk PM¹ (European Commission, 2021). Untuk merkuri, kontrol spesifik merkuri dengan efisiensi kontrol sebesar 75% diasumsikan, berdasarkan UNEP's (2017) *Mercury Toolkit*.



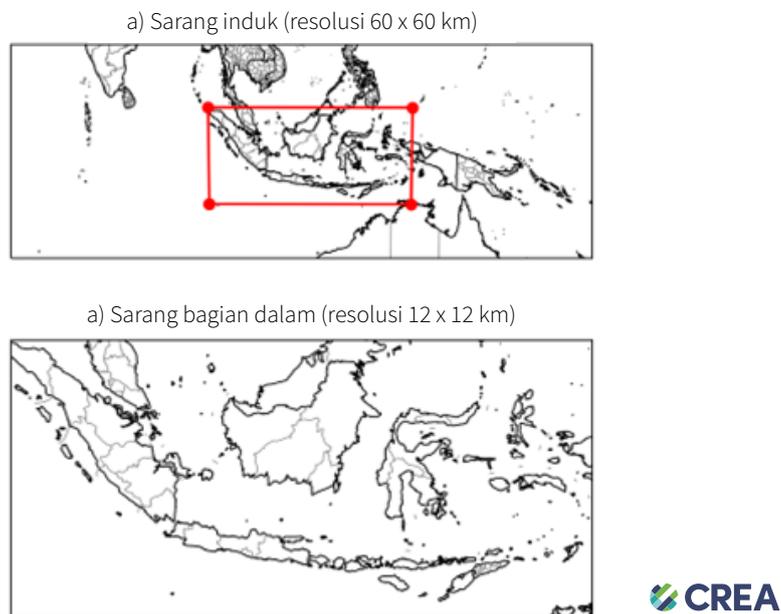
Gambar 5. Efek *co-firing* biomassa terhadap emisi dari polutan udara utama, diturunkan dari database European Union Industrial Reporting (EEA, 2023)

Pemodelan atmosferis

CREA menyimulasikan konsentrasi polutan udara menggunakan model dispersi udara CALPUFF versi 7 (Exponent, 2015). CALPUFF adalah model standar industri yang digunakan secara luas untuk dampak kualitas udara jarak jauh dari sumber titik. Model ini sudah dievaluasi secara ekstensif oleh Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (US Environmental Protection Agency), bersifat *open-source*, dan didokumentasikan sepenuhnya. CALPUFF menghitung transportasi atmosferis, dispersi, transformasi kimiawi, pengendapan polutan, serta konsentrasi permukaan tanah tambahan yang dihasilkan, dikaitkan dengan sumber emisi yang dikaji. Transformasi kimiawi dari NO menjadi NO₂, serta dari SO₂ and NO₂ menjadi PM_{2,5} dihitung dengan menggunakan modul kimia ISORROPIA di CALPUFF.

¹ Tingkatan untuk SO₂ dan NO_x diperoleh dari rata-rata tahunan yang lebih tinggi yaitu sebesar 300 MW dan boiler PC berbahan bakar batu bara yang lebih besar untuk pembangkit yang ada; dan level untuk PM adalah rata-rata tahunan yang lebih tinggi yaitu sebesar 300-1.000 MW untuk pembangkit yang ada.

Konsentrasi latar belakang oksidan (ozon, amonia, hidrogen peroksida) diambil dari simulasi menggunakan model atmosferis global Geos-Chem dengan *grid* bersarang untuk Asia Tenggara (Koplitz dkk., 2017). Data input meteorologi untuk tahun 2021 dihasilkan dari model Weather Research Forecasting (WRF) (Skamarock dkk., 2008), versi 4.2.2. WRF diatur dengan 33 level vertikal dan dua *grid* bersarang. Hal ini diilustrasikan dalam Gambar 6.



Gambar 6. Peta dari sarang induk dan sarang bagian dalam di pemodelan meteorologis WRF

Sarang induk memiliki resolusi grid 60 km dan membentang sekitar 12.000 km ke arah Timur-Barat dan 4.600 km ke arah Utara-Selatan. Sarang bagian dalam memiliki resolusi grid 12 km, membentang kira-kira 4.000 km di Timur-Barat dan 2.000 km di arah Utara-Selatan. Data pemanfaatan lahan diperoleh dari European Space Agency (2018), sedangkan data elevasi medan diperoleh dari himpunan data resolusi tinggi dari NASA *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (Farr dkk., 2007).

Domain induk dan *domain* bagian dalam menggunakan teknik bersarang dua arah yang memastikan interaksi dinamis di antara keduanya. Simulasi WRF menggunakan kondisi batas awal dan lateral dari himpunan data *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) milik National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (Saha dkk., 2014) dari National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), yang menghasilkan data meteorologi tiga dimensi per jam, yang mencakup tahun kalender penuh 2021. Untuk penilaian konsentrasi polutan rata-rata tahunan, emisi diasumsikan akan konstan sepanjang tahun.

Unit pembangkit listrik dimodelkan sebagai sumber titik apung, dengan mempertimbangkan tinggi cerobong dan kenaikan termal gumpalan asap dari cerobong. Hal ini memerlukan input data mengenai karakteristik cerobong, yaitu: tinggi cerobong, diameter dalam cerobong, kecepatan keluar gas buang, dan suhu. Informasi tentang karakteristik ini dikumpulkan secara manual dari berbagai sumber publik untuk sebanyak mungkin pembangkit listrik dan digeneralisasikan ke pembangkit lain dengan membangun model regresi linier yang memprediksi setiap karakteristik cerobong berdasarkan sifat-sifat dari pembangkit listrik terkait. Prediktor yang digunakan di dalam model adalah kapasitas pembangkit listrik, tahun mulai beroperasi, dan dalam kasus temperatur gas buang, adanya *scrubber* SO₂ yang menurunkan suhu.

Pembangkit listrik dikelompokkan ke dalam kluster-kluster, dengan unit dalam jarak 1 km satu sama lain dan dengan karakteristik cerobong yang serupa dikelompokkan bersama sebagai satu sumber titik, untuk membuat persyaratan komputasi lebih mudah dikelola. Hal ini menghasilkan total 145 kluster yang dimodelkan, seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 2. Simulasi model yang terpisah dilakukan untuk setiap kluster.

Penilaian terhadap dampak kesehatan dan ekonomi

Kami menggunakan kerangka kerja penilaian dampak kesehatan CREA yang terperinci dan dapat diterapkan secara global berdasarkan ilmu pengetahuan terkini untuk memperkirakan dampak polusi udara terhadap kesehatan masyarakat. Kerangka kerja ini mencakup serangkaian *outcome* (hasil/keluaran) kesehatan yang selengkap mungkin tanpa ada tumpang tindih yang terlihat dengan jelas. Penekanannya adalah pada *outcome* yang data kejadiannya tersedia di tingkat nasional dari himpunan data global dan *outcome* yang memiliki relevansi tinggi dengan biaya perawatan kesehatan dan produktivitas tenaga kerja. Titik akhir kesehatan ini dipilih dan diukur dengan cara yang memungkinkan valuasi ekonomi, disesuaikan dengan tingkat output ekonomi dan pendapatan di yurisdiksi yang berbeda-beda.

Untuk setiap *outcome* kesehatan yang dievaluasi, kami telah memilih sebuah hubungan konsentrasi-respons yang telah digunakan untuk mengukur beban kesehatan dari polusi udara di tingkat global dalam literatur *peer-review*. Hal ini menunjukkan bahwa bukti yang ada cukup matang untuk diterapkan di seluruh wilayah geografi dan tingkat paparan. Perhitungan dampak kesehatan mengikuti perhitungan epidemiologi standar:

$$\Delta cases = Pop \times \sum_{age} \left[Frac_{age} \times Incidence_{age} \times \frac{RR_{conc,age} - 1}{RR_{conc,age}} \right],$$

di mana *Pop* adalah jumlah penduduk di lokasi *grid*, *age* adalah kelompok umur yang dianalisis (dalam kasus fungsi respons-konsentrasi yang bergantung pada usia, segmen usia 5 tahun; dalam kasus lain, rentang usia total di mana fungsi tersebut berlaku), *Frac_{age}* adalah fraksi populasi dari kelompok usia yang dianalisis, *Incidence_{age}* adalah insiden dasar (*baseline*) dari kondisi kesehatan yang dianalisis, dan *conc* adalah konsentrasi polutan, dengan *conc_{base}* merujuk pada konsentrasi *baseline* (konsentrasi ambien saat ini). *RR_(conc,age)* adalah fungsi yang memberikan rasio risiko *outcome* kesehatan yang dianalisis pada konsentrasi tertentu untuk kelompok usia tertentu dibandingkan dengan udara bersih. Dalam kasus *log-linear*, fungsi respons-konsentrasi yang tidak spesifik untuk usia tertentu, fungsi *RR* menjadi:

$$RR(c) = [RR_0 \times c] - [c_0 \times \Delta c_0], \text{ ketika } c > c_0$$

Jika sebaliknya, maka $RR(c) = 1$, di mana *RR₀* merupakan rasio risiko yang ditemukan dalam penelitian epidemiologi, Δc_0 adalah perubahan konsentrasi yang dirujuk oleh *RR₀*, dan *c₀* adalah konsentrasi tidak berbahaya yang diasumsikan (secara umum, konsentrasi terendah yang ditemukan dalam data studi).

Data jumlah penduduk dan struktur umur penduduk diambil dari hasil *Global Burden of Disease* tahun 2019 (Global Burden of Disease, 2020) yang didistribusikan oleh Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME) (IHME, 2020). Distribusi spasial penduduk di tiap kota dan negara, seperti yang diproyeksikan untuk tahun 2020 adalah berdasarkan *Gridded Population of the World v4* dari Center for International Earth Science Information Network (CIESIN, 2018). Sesuai dengan pembaruan Pedoman Kualitas Udara WHO (WHO, 2021), yang sekarang memperhitungkan bahaya kesehatan dari NO₂ pada konsentrasi rendah, kami menggunakan fungsi risiko kematian untuk NO₂ berdasarkan temuan Huangfu dan Atkinson (2020), dan menyertakan dampak hingga 4,5 µg/m³, tingkat konsentrasi terendah dalam penelitian yang menemukan adanya peningkatan risiko kematian, ditabulasikan dalam Tabel 2.

Kematian orang dewasa diperkirakan menggunakan fungsi risiko yang dikembangkan oleh Burnett dkk. (2018), seperti yang diterapkan oleh Lelieveld dkk. (2019). Kematian anak usia di bawah 5 tahun akibat infeksi saluran pernapasan bawah yang terkait dengan polusi PM_{2.5} dinilai menggunakan fungsi risiko *Global Burden of Disease* untuk penyakit saluran pernapasan bawah (IHME, 2020). Untuk semua hasil kematian, data spesifik penyebab diambil dari hasil proyek *Global Burden of Disease* tahun 2019

Pemodelan dampak kesehatan memproyeksikan efek dari paparan polutan selama tahun studi. Beberapa dampak kesehatan dirasakan dengan segera, seperti semakin parahnya gejala penyakit asma dan hilangnya hari kerja, sedangkan dampak kronis lainnya mungkin memiliki latensi selama beberapa tahun. Hubungan konsentrasi-respons untuk kunjungan ke Unit Gawat Darurat (UGD) untuk penyakit asma dan absen kerja didasarkan pada studi yang mengevaluasi variasi harian dalam konsentrasi polutan dan outcome kesehatan. Hubungan ini berlaku untuk perubahan pada konsentrasi rata-rata tahunan. Nilai baseline konsentrasi rata-rata tahunan $PM_{2.5}$ dan NO_2 masing-masing diambil dari van Donkelaar dkk. (2021) dan Larkin dkk. (2017). Karena konsentrasi SO_2 yang tidak berbahaya sangat rendah dan fungsi risikonya linier dengan konsentrasi latar belakang, maka data tentang konsentrasi latar belakang SO_2 tidak diperlukan.

Untuk memahami dampak kesehatan di masa yang akan datang, studi ini memperhitungkan proyeksi perubahan jumlah penduduk, struktur umur penduduk, dan kematian menurut kelompok umur, berdasarkan UNDP (2019) *World Population Prospects Medium Variant*. Hal ini menjadi faktor dalam penurunan yang diharapkan pada *baseline* kematian bayi dan peningkatan kematian dini akibat penyakit kronis pada orang dewasa yang lebih tua sebagai bagian dari populasi dan transisi epidemiologi, serta perbaikan dalam perawatan kesehatan.

Pada tahun 2022, CREA menyediakan kajian mengenai dampak kesehatan bagi Institute for Essential Services Reform dan University of Maryland, yang memperkirakan adanya 8.700 kematian yang disebabkan oleh emisi dari pembangkit listrik tenaga batubara setiap tahun. Laporan ini menggabungkan pemodelan dispersi polutan udara yang jauh lebih rinci dan inventarisasi emisi yang disempurnakan, serta memperhitungkan dampak kesehatan dari paparan SO_2 dan NO_2 , di samping $PM_{2.5}$.

Tabel 2. Parameter input dan data yang digunakan untuk memperkirakan dampak kesehatan fisik

Kelompok Usia	Efek	Polutan	Fungsi konsentrasi-respons	Perubahan konsentrasi	Ambang batas non-risiko	Referensi	Data kejadian
1–18	Kasus asma baru	NO_2	1,26 (1,10 – 1,37)	10 ppb	2 ppb	Khreis dkk. (2017)	Achakulwisut dkk. (2019)
0–17	Kunjungan ke UGD karena asma	$PM_{2.5}$	1,025 (1,013 – 1,037)	10 $\mu g/m^3$	6 $\mu g/m^3$	Zheng dkk. (2015)	Anenberg dkk. (2018)
18–99	Kunjungan ke UGD karena asma	$PM_{2.5}$	1,023 (1,015 – 1,031)	10 $\mu g/m^3$	6 $\mu g/m^3$	Zheng dkk. (2015)	Anenberg dkk. (2018)
Bayi baru lahir	Kelahiran prematur	$PM_{2.5}$	1,15 (1,07 – 1,16)	10 $\mu g/m^3$	8.8 $\mu g/m^3$	Sapkota dkk. (2012)	Chawan Paiboon dkk. (2018)
20–65	Absen kerja	$PM_{2.5}$	1,046 (1,039 – 1,053)	10 $\mu g/m^3$	N/A	WHO (2013)	EEA (2014)
0–4	Kematian akibat infeksi saluran pernapasan bawah	$PM_{2.5}$	IHME (2020)		5,8 $\mu g/m^3$	IHME (2020)	IHME (2020)

Kelompok Usia	Efek	Polutan	Fungsi konsentrasi-respons	Perubahan konsentrasi	Ambang batas non-risiko	Referensi	Data kejadian
25–99	Kematian akibat penyakit tidak menular, dibagi berdasarkan penyebab, dan akibat infeksi saluran pernapasan bawah	PM _{2.5}	Burnett dkk. (2018)		2,4 µg/m ³	Burnett dkk. (2018)	IHME (2020)
25–99	Disabilitas yang disebabkan oleh diabetes, stroke, dan penyakit saluran pernapasan kronis	PM _{2.5}	IHME (2020)		2,4 µg/m ³	Burnett et al. (2018)	IHME (2020)
25–99	Kematian dini	NO ₂	1,02 (1,01 – 1,04)	10 µg/m ³	4,5 µg/m ³	Huangfu & Atkinson (2020); NRT dari Stieb dkk. (2021)	IHME (2020)
25–99	Kematian dini	SO ₂	1,02 (1,01– 1,03)	5 ppb	0,02 ppb	Krewski dkk. (2009)	IHME (2020)

Catatan: Nilai pada kolom "Fungsi konsentrasi-respons" mengacu pada rasio kemungkinan yang sesuai dengan peningkatan konsentrasi yang diberikan dalam kolom "Perubahan konsentrasi." Referensi literatur menunjukkan penggunaan fungsi respons-konsentrasi non-linear. Ambang batas tidak berbahaya mengacu pada konsentrasi di bawahnya yang dampak kesehatannya tidak dihitung, umumnya karena studi yang mendasari fungsi tersebut tidak menyertakan orang dengan tingkat paparan yang lebih rendah. Data mengenai hubungan konsentrasi-respons tidak ada untuk semua geografi, sehingga model risiko global diterapkan di semua kota. Data kejadian umumnya tidak tersedia di tingkat kota sehingga rata-rata nasional harus diterapkan.

Polusi udara meningkatkan risiko munculnya penyakit pernapasan dan kardiovaskular serta komplikasi yang terkait dengannya, yang secara signifikan akan menurunkan kualitas hidup dan produktivitas ekonomi orang yang terdampak, serta meningkatkan biaya perawatan kesehatan. Kerugian ekonomi akibat polusi udara dihitung menggunakan metode yang diuraikan dalam Myllyvirta (2020). Valuasi kematian diperbarui dengan nilai yang diturunkan oleh Viscusi dan Masterman (2017), yang didasarkan pada data pasar tenaga kerja dan memberikan perhatian khusus pada penerapannya di negara-negara berpenghasilan menengah dan rendah.

Proyek *Global Burden of Disease* telah mengukur tingkat disabilitas yang disebabkan oleh setiap penyakit menjadi "bobot disabilitas", yang dapat digunakan untuk membandingkan biaya berbagai penyakit. Biaya ekonomi dari disabilitas dan penurunan kualitas hidup yang disebabkan oleh penyakit dan disabilitas tersebut dinilai berdasarkan bobot disabilitas, digabungkan dengan penilaian ekonomi disabilitas yang digunakan oleh regulator lingkungan Inggris, *Department for Environment Food and Rural Affairs* (Birchby dkk., 2019), dan disesuaikan dengan PNB Paritas Daya Beli Indonesia. Kematian anak kecil diberi nilai dua kali lipat dari valuasi kematian orang dewasa, mengikuti rekomendasi dari OECD (2012).

Valuasi dari dampak kesehatan di masa depan didasarkan pada premis bahwa tingkat diskonto sosial jangka panjang sama dengan tingkat pertumbuhan PDB jangka panjang, dan kerugian ekonomi yang terkait dengan dampak kesehatan yang berbeda sebanding dengan PDB, menghasilkan nilai dampak kesehatan saat ini yang konstan dari waktu ke waktu.

Tabel 3. Parameter input dan data yang digunakan untuk memperkirakan biaya ekonomi dan dampak kesehatan

Outcome	Valuasi pada rata-rata PDB/PNB per kapita dunia, 2017 int. US\$	Valuasi di Indonesia		Referensi
		(US\$ saat ini)	(Rp saat ini)	
Absen kerja (hari cuti sakit)	85	22	335.300	EEA (2014)
Jumlah anak yang menderita penyakit asma akibat paparan polusi (prevalensi yang meningkat)	1.077	274	4.228.000	Brandt dkk. (2012)
Kematian	2.637.000	663.900	10.260.000.000	Viscusi & Masterman (2017)
Kematian anak usia di bawah 5 tahun	5.273.000	1.328.000	20.510.000.000	OECD (2012)
Kunjungan ke UGD karena asma	232	59	911.800	Brandt dkk. (2012)
Kelahiran prematur	107.700	27.370	422.800.000	Trasande dkk. (2016)
Tahun hidup dengan disabilitas	28.480	7.171	110.800.000	Birchby dkk. (2019)

Biaya pengendalian polusi udara

Biaya pemasangan dan pengoperasian pengendali polusi udara atau *Air Pollution Controls* (APC) dikompilasi dari berbagai sumber seperti yang dijabarkan di dalam Tabel A4 di lampiran. Kami mentransfer biaya ini ke tingkat biaya Indonesia, pertama-tama dengan mengubah biaya yang dilaporkan menjadi harga saat ini dalam dolar AS, dan kemudian menggunakan perkiraan lintas negara dari biaya relatif desulfurisasi gas buang (*flue gas desulfurization*/FGD) dan reduksi katalitik selektif (*selective catalytic reduction*/SCR) (Ferrari dkk., 2019) untuk menghitung rata-rata biaya yang ditransfer, yang ditunjukkan pada Tabel A4 di lampiran. Berhubung Ferrari dkk. tidak memperkirakan biaya pengendalian debu, kami menggunakan jumlah biaya FGD dan SCR sebagai indikator biaya relatif pengendalian debu, karena biaya relatif dari sistem pengendalian yang berbeda cenderung berkorelasi erat.

Tabel A5 di lampiran menunjukkan perkiraan biaya rata-rata dari berbagai teknologi APC di Indonesia. Kami menggunakan data ini untuk memproyeksikan biaya tambahan untuk memenuhi standar emisi yang lebih ketat yang diasumsikan dalam skenario APC, dibandingkan dengan biaya APC saat ini yang harus ditanggung oleh pembangkit listrik untuk memenuhi standar nasional yang berlaku. Hal ini berarti bahwa pembangkit yang ada sudah memiliki pengendali bahan partikulat untuk beroperasi. Studi ini mengasumsikan dimasukkannya investasi dalam sistem kontrol debu yang dibangun kembali untuk memenuhi standar yang lebih ketat, tanpa peningkatan biaya pengoperasian. Kontrol SO₂ dan NO_x perlu ditambahkan, dengan modal penuh dan biaya operasional dimasukkan sebagai biaya tambahan.

Berbeda dengan pembangkit listrik yang sudah ada, pembangkit listrik baru di Indonesia telah diwajibkan untuk memasang FGD dan SNCR serta pengendalian debu untuk memenuhi standar emisi nasional. Kami berasumsi bahwa modal tambahan dan biaya operasional dari FGD dengan kinerja yang lebih tinggi dan pengendalian debu adalah 50% dari biaya penuh yang dipaparkan pada Tabel A5, suatu asumsi konservatif. Untuk kontrol NO_x, kami berasumsi bahwa pembangkit listrik telah memasang SCR, bukan SNCR, dan membebaskan selisihnya sebagai biaya tambahan. Untuk proyeksi ke depan, kami berasumsi bahwa peningkatan biaya teknologi APC sama dengan tingkat pertumbuhan PDB rata-rata jangka panjang.

The background image shows an industrial facility with several tall smokestacks emitting thick, dark plumes of smoke that rise into the sky. The sky is a mix of blue and orange, suggesting a sunset or sunrise. In the foreground, there are several overlapping geometric shapes: a large dark blue triangle on the left, a green triangle in the center, and a teal triangle at the bottom left. The title text is overlaid on these shapes in white.

Evaluasi berbagai linimasa penghentian bertahap

CREA telah mengembangkan dan memodelkan tiga jalur skenario yang berbeda berdasarkan jadwal pengakhiran operasional PLTU batubara yang berlaku untuk penyedia listrik nasional yaitu PLN dan IPP, jadwal pengakhiran operasional PLTU batubara yang berlaku untuk pembangkit listrik *captive*, penerapan *co-firing* dalam operasi PLTU batubara, dan pemasangan teknologi pengendalian polusi udara (*Air Pollution Control/APC*). Ringkasan skenario yang diperhitungkan dalam studi ini ditabulasikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Matriks skenario jalur Indonesia menuju Transisi Energi Berkeadilan

Skenario	Jadwal Pengakhiran Operasional PLN & IPP	Jadwal Pengakhiran Operasional Pembangkit Listrik <i>Captive</i>	<i>Co-firing</i> Biomassa	<i>Retrofit Air Pollution Control (APC)</i>
PERPRES 112/2022 disebut sebagai 'kebijakan saat ini' di dalam studi ini	14 GW pembangkit listrik milik PLN & IPP akan berakhir operasionalnya pada 2035 , sedangkan pembangkit lainnya akan berakhir operasionalnya pada 2050	Semua pembangkit listrik <i>captive</i> akan berakhir operasionalnya setelah beroperasi selama 30 tahun	Peningkatan porsi <i>co-firing</i> secara bertahap, mencapai 20% di pembangkit listrik PLN pada tahun 2030	APC dipasang untuk mengikuti batasan emisi nasional saat ini hingga akhir masa pakai
1,5 derajat, dengan mengecualikan pembangkit listrik <i>captive</i>	Jadwal pengakhiran operasional selaras dengan jalur optimal dari IESR-UMD	Jadwal pengakhiran operasional selaras dengan jalur optimal dari IESR-UMD	<i>Co-firing</i> dipertahankan pada tingkat komitmen saat ini, yaitu 5% di sebagian besar pembangkit listrik PLN	APC dipasang untuk mengikuti batasan emisi nasional saat ini hingga akhir masa pakai
1,5 derajat				

Perlu dicatat bahwa studi ini mempertimbangkan jadwal pengakhiran operasional yang ditetapkan dalam Peraturan Presiden (PERPRES) No. 112 Tahun 2022 sebagai skenario *baseline*. Berdasarkan skenario **PERPRES No. 112/2022**, total kapasitas PLTU batubara PLN dan IPP sebesar 14 GW akan diakhiri operasionalnya pada tahun 2035, sementara pembangkit lainnya akan berhenti beroperasi pada tahun 2050. Pembangkit listrik *captive* diasumsikan akan berakhir operasionalnya setelah 30 tahun beroperasi. Selain itu, *co-firing* biomassa akan meningkat menjadi minimal 20% pada tahun 2030 di pembangkit listrik PLN untuk berkontribusi terhadap target energi terbarukan sebesar 34% pada tahun 2030 yang ditetapkan dalam JETP. Teknologi APC dipasang dan mengikuti batasan emisi saat ini hingga akhir masa pakai pembangkit listrik.

Jalur untuk mengakhiri operasional pembangkit listrik tenaga batubara Indonesia dalam rangka memenuhi komitmen global untuk membatasi kenaikan suhu rata-rata global hingga 1,5 derajat pada tahun 2030 diturunkan dari laporan "*Financing Indonesia's Coal Phase-out*" oleh IESR dan University of Maryland (Cui dkk., 2022). **Skenario 1,5 derajat** yang dikembangkan dalam studi ini memaksimalkan manfaat kesehatan dari penghentian penggunaan batu bara. Berdasarkan pertimbangan ini, pembangkit dengan biaya kesehatan tertinggi per unit daya listrik yang dihasilkan akan diakhiri operasionalnya terlebih dahulu dalam setiap jaringan listrik.

Skenario 1,5 derajat yang mengecualikan pembangkit listrik *captive* mengasumsikan bahwa pembangkit listrik *captive* akan berakhir operasionalnya setelah 30 tahun beroperasi. Dengan dimasukkannya pembangkit listrik *captive*, skenario mengasumsikan bahwa pengakhiran operasional pembangkit tersebut selaras dengan jalur optimal IESR-UMD. Jalur ini menunjukkan bahwa pembangkitan listrik dari PLTU batubara Indonesia akan berkurang sebesar 11% pada tahun 2030, lebih dari 90% pada tahun 2040, dan akan sepenuhnya dihentikan pada tahun 2045. Dalam jumlah mutlak, 18 pembangkit akan berakhir operasionalnya pada akhir dekade ini, 39 di antara tahun 2031 dan 2040. Sisanya, yaitu 15 dari 72 pembangkit batubara *non-captive*, akan dioperasikan pada tingkat utilisasi rendah setelah tahun 2040, dan akan berhenti beroperasi pada tahun 2045.

Implikasi terhadap polusi udara

Pembangkit listrik berbasis batubara mengeluarkan polutan dalam jumlah besar, yaitu SO_x , NO_x , dan PM, serta logam berat. Studi ini memperkirakan bahwa semua pembangkit listrik batubara yang beroperasi di Indonesia mengeluarkan 399 kiloton (kt) SO_x , 349 kt NO_x , dan 73 kt PM pada tahun 2022. Selain itu, diperkirakan sebanyak 7,100 kg merkuri juga diemisikan pada periode yang sama. Emisi yang berasal dari pembangkit listrik ini tidak hanya mempengaruhi penduduk di sekitar pembangkit, tetapi polutan yang dihasilkan juga terbawa oleh angin dan kondisi atmosfer lainnya ke lokasi yang lebih jauh, sehingga mengakibatkan adanya konsekuensi secara nasional.

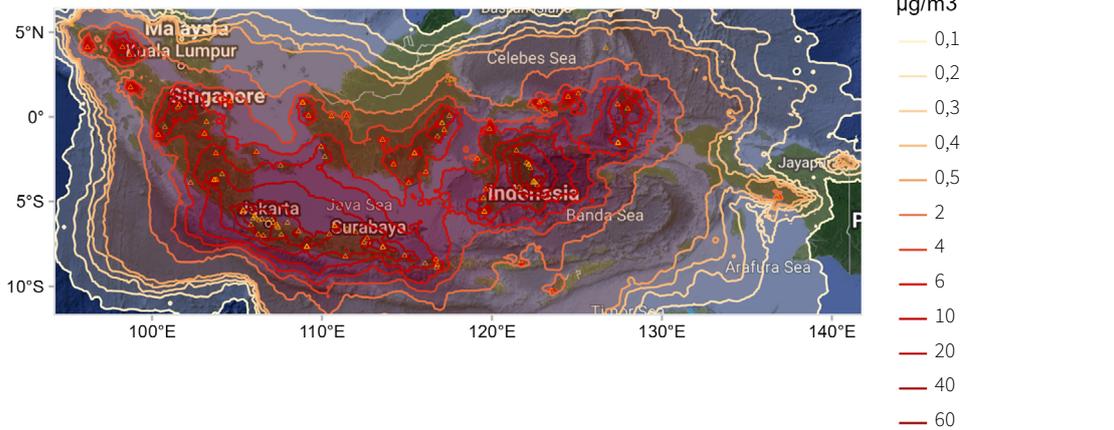
Gambar 7 menunjukkan konsentrasi maksimum NO_2 , SO_2 , dan $PM_{2.5}$ selama kurun waktu 1 jam dan 24 jam yang dikaitkan dengan tenaga batubara pada tahun 2022, dan hasilnya menunjukkan adanya tingkat konsentrasi yang tinggi dari semua polutan di seluruh Indonesia. Kami memilih plot maksimum antara 1 jam dan 24 jam untuk setiap polutan berdasarkan ukuran yang digunakan dalam Pedoman Kualitas Udara WHO 2005 yang menjadi dasar standar nasional Indonesia.

Hotspot utama pencemaran PLTU batubara di Indonesia adalah di wilayah Banten, Sulawesi Tengah, Jawa Tengah, Riau, Maluku, dan Maluku Utara. Emisi di Banten didominasi oleh pembangkit listrik PLN yang lebih dari setengahnya relatif tua (mulai beroperasi sebelum 2010). Di semua provinsi yang terdaftar di luar Jawa, pembangkit listrik *captive* yang dioperasikan setelah tahun 2010 mendominasi emisi. Di Jawa Tengah, pembangkit listrik IPP yang relatif baru menjadi sumber utama pencemaran.

Gambar 8, 9, dan 10 memvisualisasikan konsentrasi rata-rata tahunan dari setiap jenis polutan pada tahun 2035 berdasarkan skenario. Skenario-skenario yang dimaksud adalah skenario PERPRES 112/2022, skenario 1,5 derajat dengan mengecualikan pembangkit *captive*, dan skenario 1,5 derajat. Pada tahun 2035, akan ada peningkatan besar dalam kualitas udara dengan mengikuti jalur pengakhiran operasional tenaga batubara yang selaras dengan target 1,5 derajat, seperti yang ditunjukkan oleh gambar bawah. Selain itu, untuk semua polutan, terdapat perubahan besar dalam kualitas udara antara skenario 1,5 derajat yang mencakup pengakhiran operasional pembangkit listrik *captive* dan skenario 1,5 derajat yang tidak mencakup pengakhiran operasional pembangkit listrik *captive*, seperti yang ditunjukkan pada gambar tengah dan bawah berturut-turut, khususnya di Indonesia Timur di mana sebagian besar armada pembangkit listrik *captive* berada.

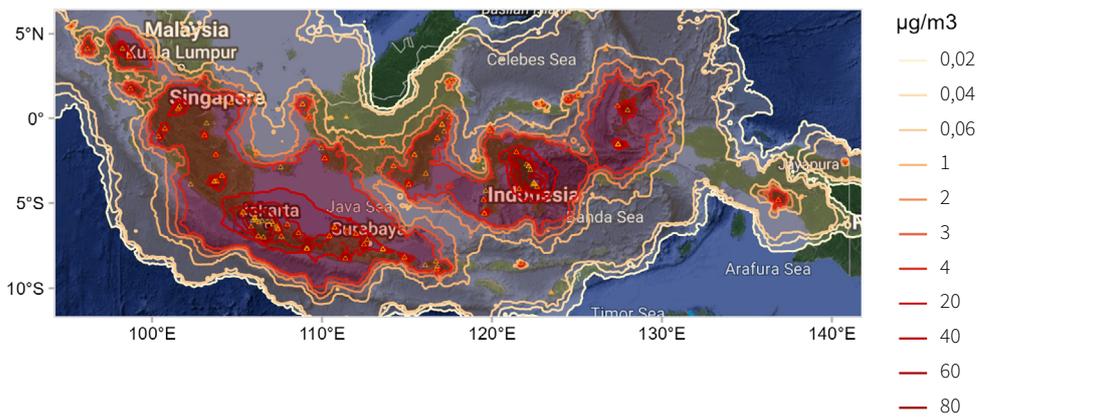
Konsentrasi maksimum NO₂ dalam waktu satu jam dari semua PLTU batubara di Indonesia

pada 2022



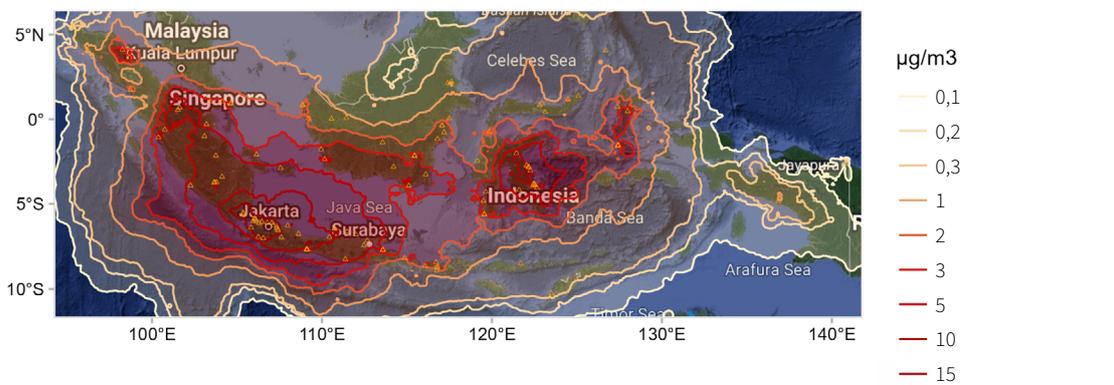
Konsentrasi maksimum SO₂ dalam waktu 24 jam dari semua PLTU batubara di Indonesia

pada 2022



Konsentrasi maksimum PM_{2,5} dalam waktu 24 jam dari semua PLTU batubara di Indonesia

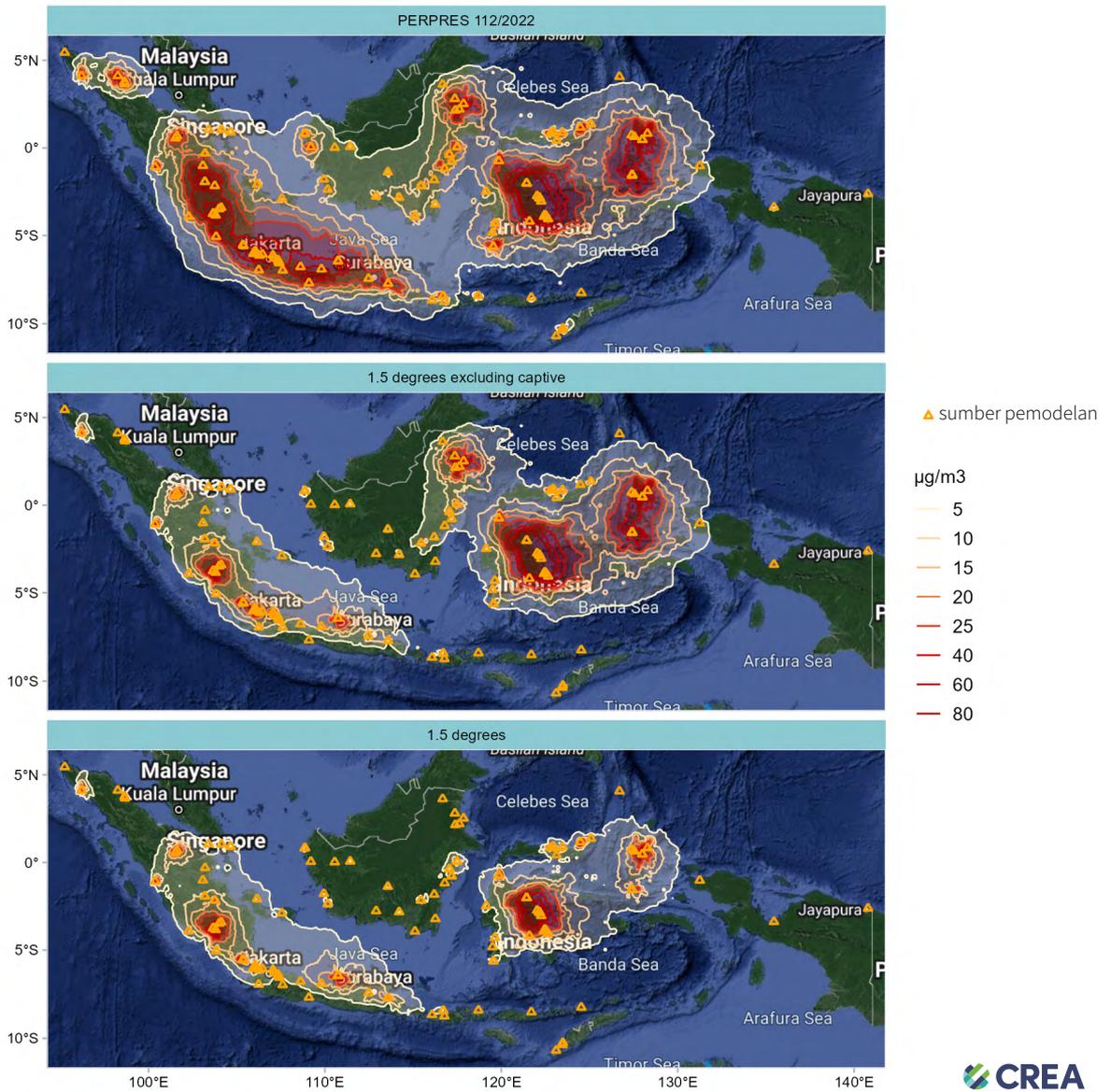
pada 2022



Gambar 7. Konsentrasi maksimum dalam kurun waktu 1 jam dan 24 jam dari semua PLTU batubara di Indonesia berdasarkan polutan pada tahun 2022

Konsentrasi NO₂ rata-rata tahunan dari semua PLTU batubara di Indonesia

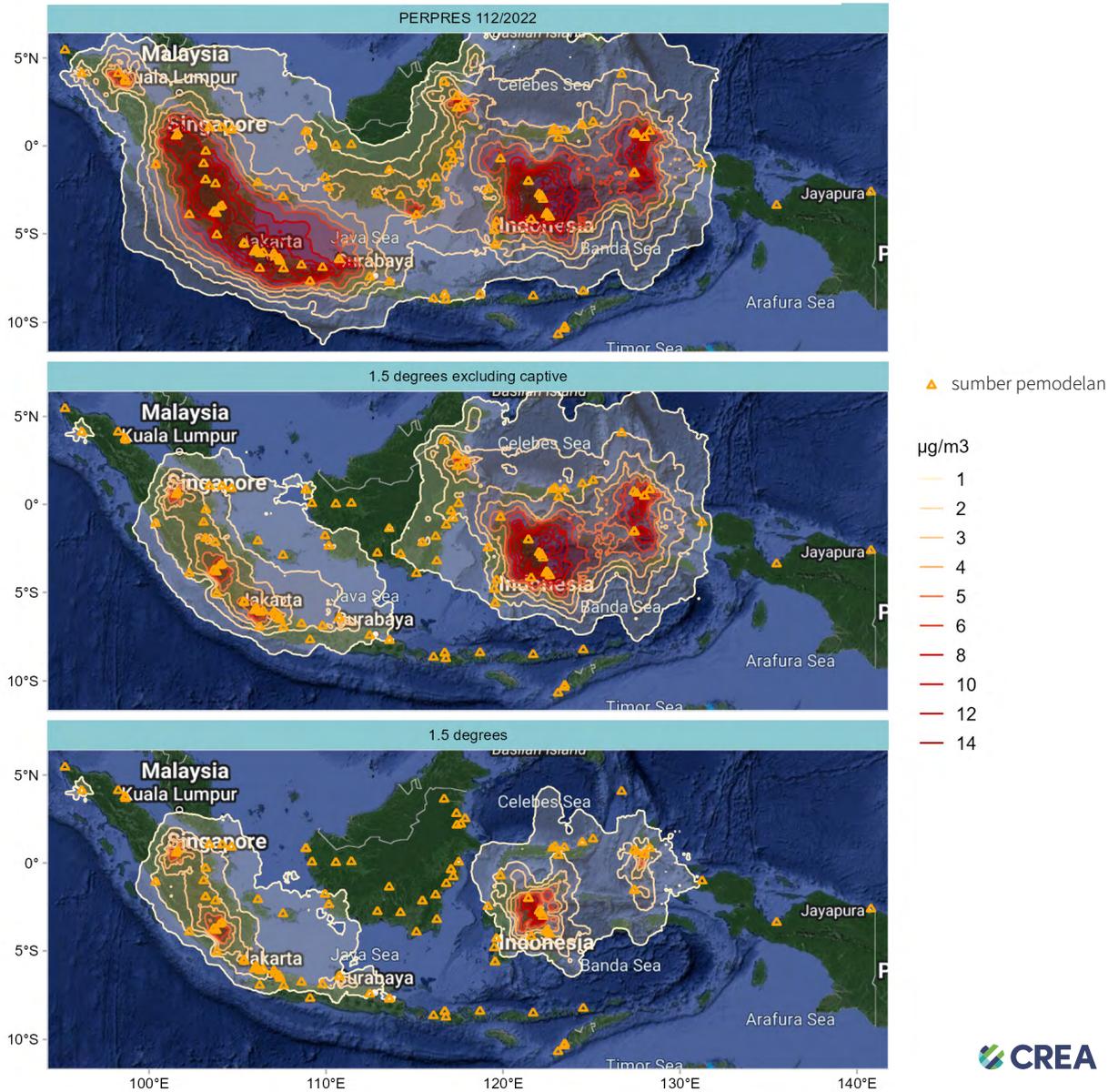
berdasarkan skenario tahun 2035



Gambar 8. Visualisasi sebaran PLTU batubara dan rata-rata konsentrasi NO₂ di Indonesia berdasarkan skenario tahun 2035

Konsentrasi PM_{2.5} rata-rata tahunan dari semua PLTU batubara di Indonesia

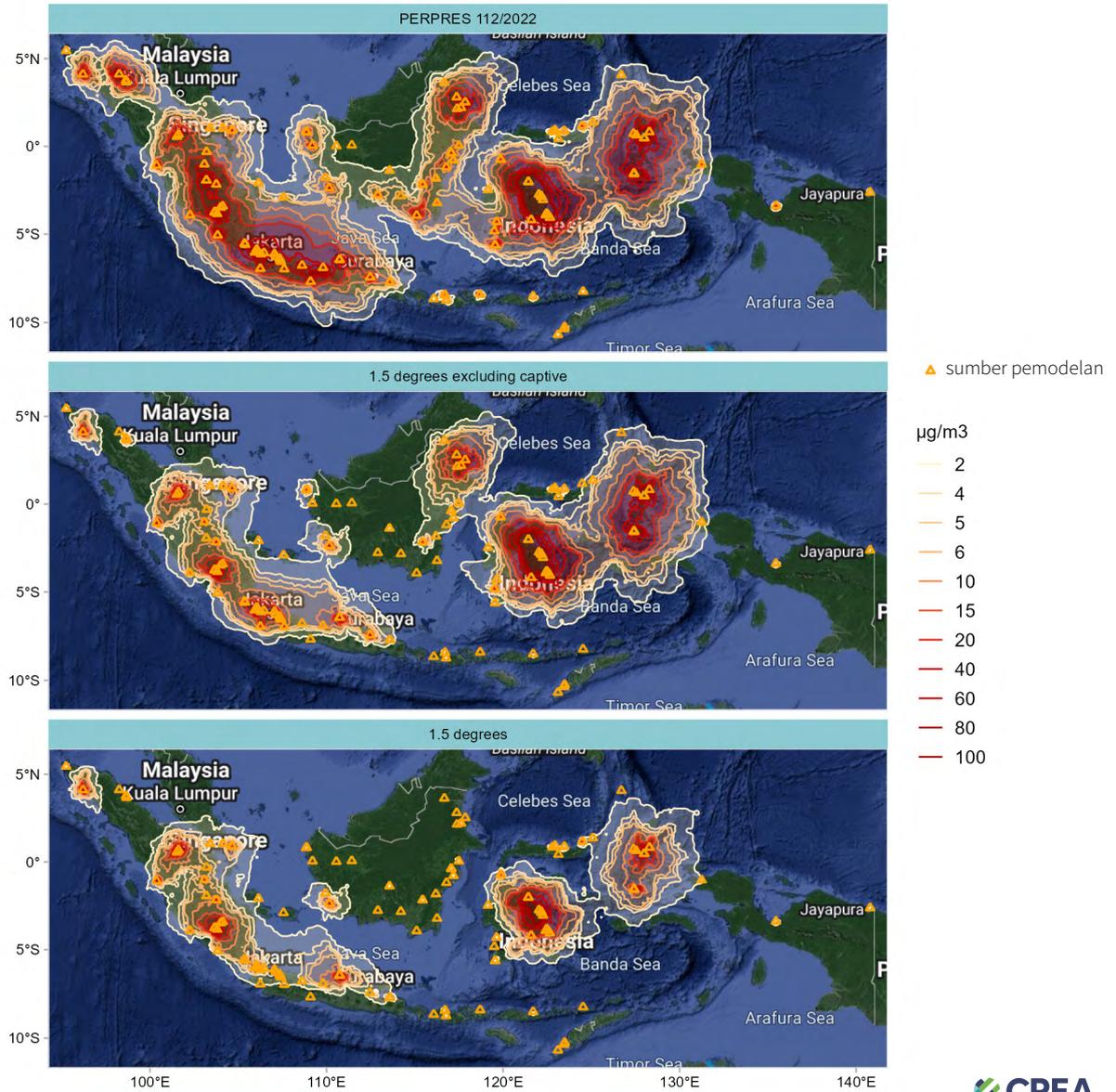
berdasarkan skenario tahun 2035



Gambar 9. Visualisasi sebaran PLTU batubara dan rata-rata konsentrasi PM_{2.5} di Indonesia berdasarkan skenario tahun 2035

Konsentrasi SO₂ rata-rata tahunan dari semua PLTU batubara di Indonesia

berdasarkan skenario tahun 2035



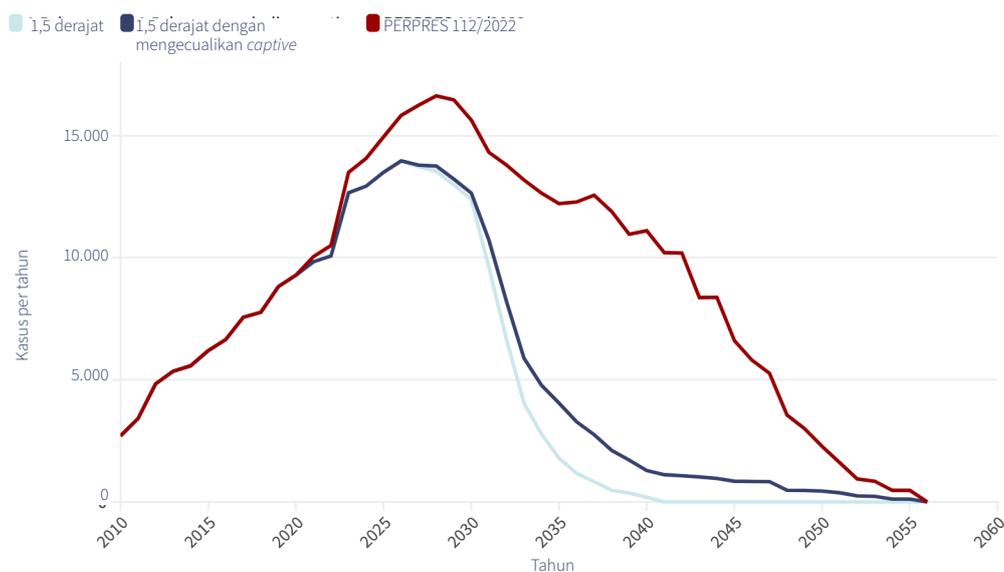
Gambar 10. Visualisasi sebaran PLTU batubara dan rata-rata konsentrasi SO₂ di Indonesia berdasarkan skenario tahun 2035

Dampak kesehatan dan implikasi biaya

Dampak tahunan

Berdasarkan langkah yang diambil menurut kebijakan saat ini, yaitu PERPRES No. 112/2022, polusi udara dari PLTU batubara menyebabkan sekitar 10.500 (95% CI: 6.500–16.400) kematian pada tahun 2022 (seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 11) dan biaya kesehatan yang mencapai US\$7,4 miliar (Rp109,9 triliun; CI 95%: US\$4,6–11,5 miliar, Rp67,6–170,3 triliun). Angka kematian terkait polusi udara kian meningkat, dan diperkirakan akan mencapai puncaknya pada tahun 2028, dengan hampir 16.600 kematian setiap tahunnya—peningkatan hampir 60% hanya dalam kurun waktu enam tahun.

Kematian terkait polusi udara berdasarkan skenario



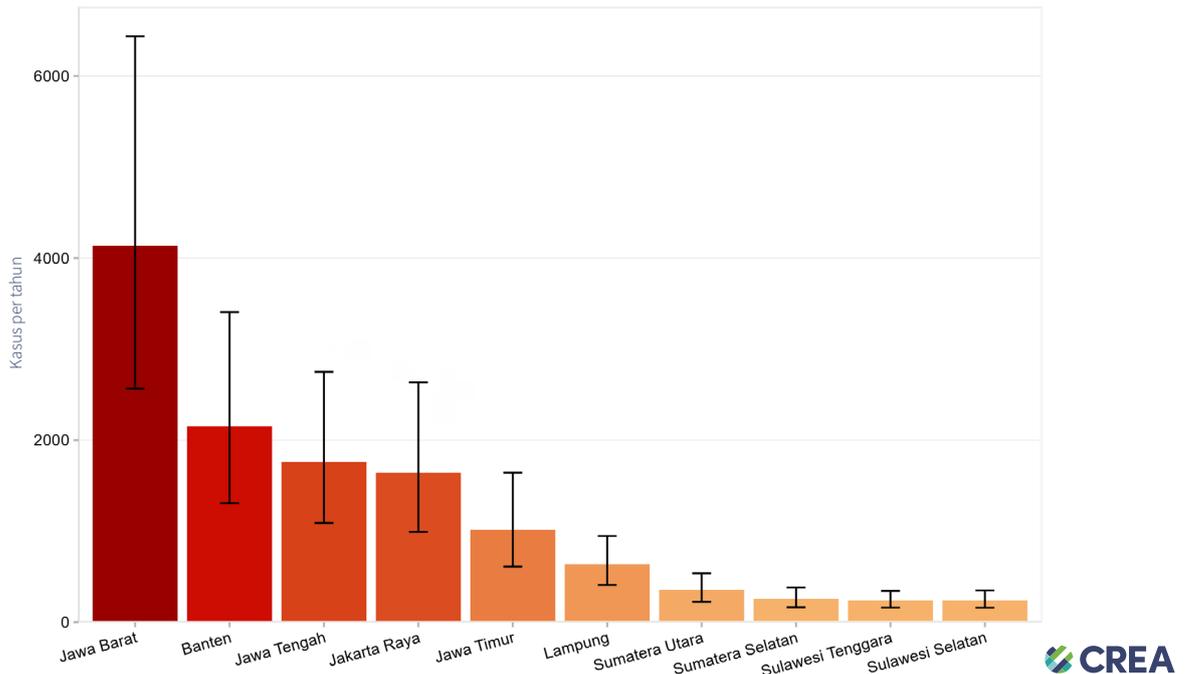
Gambar 11. Kematian terkait polusi udara dari tahun ke tahun berdasarkan skenario

Sejalan dengan lambatnya penghentian bertahap pembangkit listrik, angka kematian diperkirakan akan berkurang secara perlahan setelah mencapai puncaknya pada akhir tahun 2020-an. Polusi udara akan terus membebani masyarakat setelah tahun 2050 jika Indonesia terus melanjutkan kebijakan yang berlaku saat ini. Dengan peluang untuk mempercepat penghentian penggunaan batu bara pada tahun 2040, negara seharusnya memprioritaskan pembatalan pembangkit listrik tenaga batubara yang direncanakan tetapi belum dibangun dan mengganti kebutuhan kapasitas batubara dengan sumber terbarukan. Langkah-langkah ini akan memulai upaya nasional dalam Transisi Berkeadilan. Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 11, angka kematian dan biaya terkait polusi udara akan mencapai puncaknya lebih awal pada tahun 2026, diikuti dengan penurunan secara cepat hingga mencapai nol baik untuk angka kematian maupun biaya ekonomi pada tahun 2041 di bawah skenario 1,5 derajat.

Besarnya angka kematian terkait polusi udara dari pembangkit listrik batubara di tingkat provinsi diilustrasikan pada Gambar 12. Jawa Barat adalah provinsi yang paling terkena dampak emisi PLTU batubara dengan angka kematian tahunan lebih dari 4.000 (CI 95%: 2.566–6.438). Jawa Barat kemudian disusul oleh Banten dengan 2.000 (CI 95%: 1.308–3,406) kematian per tahun, dan Jawa Tengah dengan 1.700 (CI 95%: 1.090–2.749) kematian per tahun.

Provinsi yang paling terdampak emisi PLTU batubara

10 provinsi teratas: Kematian akibat polusi udara terkait polusi PLTU batubara yang terjadi di tiap provinsi

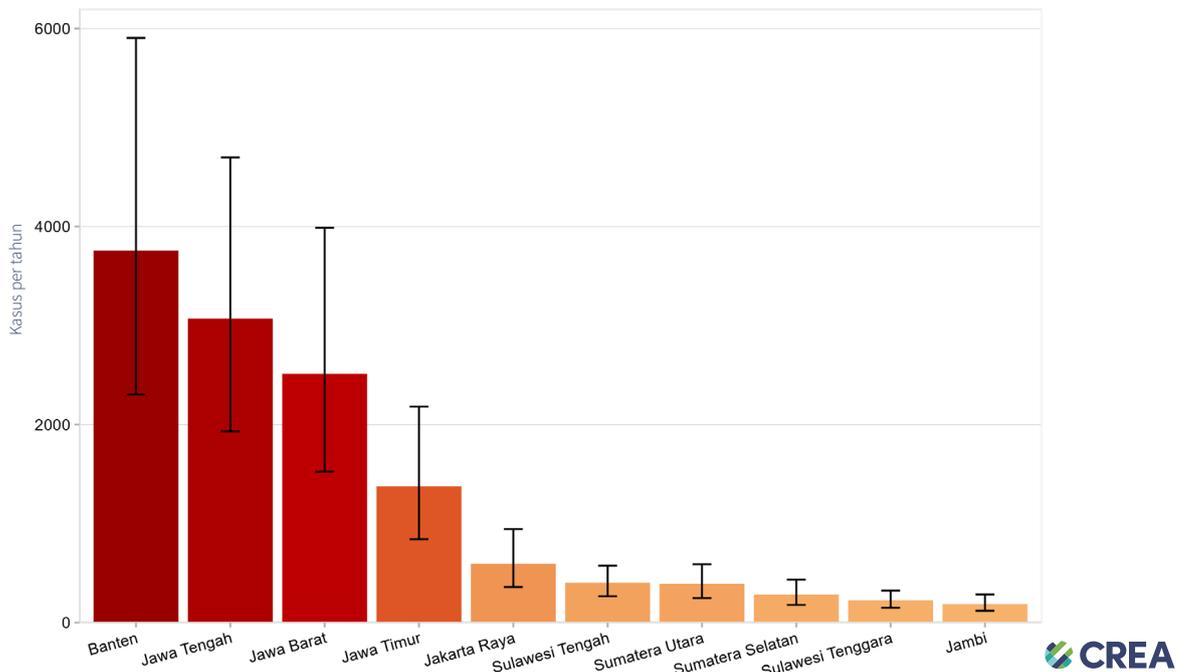


Gambar 12. Sepuluh peringkat teratas provinsi yang paling terdampak emisi PLTU batubara

Gambar 13 menunjukkan perkiraan angka kematian akibat polusi udara yang dikaitkan dengan provinsi tempat pembangkit listrik tenaga batubara berada. Provinsi-provinsi yang emisinya menjadi penyebab kematian tahunan terbesar adalah Banten, Jawa Tengah, dan Jawa Barat. PLTU batubara di Banten dapat dikaitkan dengan sekitar 3.800 kematian, sementara emisi polutan udara dari PLTU batubara yang terletak di Jawa Tengah dan Jawa Barat masing-masing menyebabkan sekitar 3.000 dan 2.500 kematian per tahun. Provinsi-provinsi besar yang terletak di pulau Jawa ini memiliki kapasitas terbesar dan jumlah pembangkit listrik tenaga batubara terbanyak di Indonesia.

Provinsi yang bertanggung jawab atas jumlah korban kesehatan terbesar

10 provinsi teratas: Kematian akibat polusi udara terkait PLTU Batubara di tiap provinsi

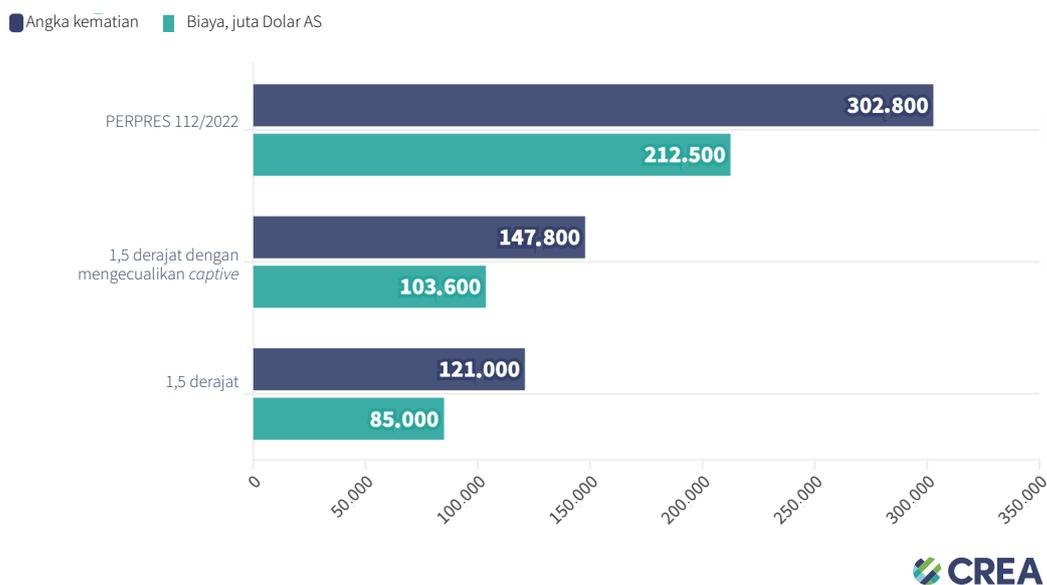


Gambar 13. Sepuluh provinsi teratas yang bertanggung jawab terhadap angka kematian terbesar per tahun

Dampak kumulatif

Seperti yang ditampilkan pada Gambar 14, kematian kumulatif akan mencapai hampir 303.000 dari tahun 2024 dan seterusnya hingga akhir masa pakai semua pembangkit listrik (CI 95%: 188.700–49.000) di bawah kebijakan yang berlaku saat ini. Seluruh biaya kesehatan akan berjumlah US\$212 miliar (Rp3,2 kuadriliun; CI 95%: US\$132,5–327,9 miliar, Rp2,0–4,9 kuadriliun). Skenario 1,5 derajat yang mengecualikan pembangkit listrik *captive* akan menyebabkan kematian dan biaya kesehatan yang jauh lebih rendah, dengan kematian kumulatif berkurang setengahnya menjadi 148.000 (CI 95%: 91.400–231.000). Beban ekonomi bagi masyarakat juga berkurang setengahnya menjadi US\$104 miliar (Rp1,5 kuadriliun; CI 95%: US\$63,7–161,2 miliar, Rp0,9–2,4 kuadriliun). Jika pembangkit listrik *captive* dihentikan operasionalnya lebih awal pada tahun 2040, manfaat nasional yang lebih besar dapat dicapai. Kurang lebih 180.000 kematian terkait polusi udara dan US\$127 miliar (Rp1,9 triliun) biaya kesehatan akan dapat dihindarkan.

Angka kematian kumulatif dan biaya kesehatan berdasarkan skenario



Gambar 14. Angka kematian kumulatif dan biaya kesehatan mulai tahun 2024 dan seterusnya berdasarkan skenario

Polusi udara memiliki dampak yang sangat besar pada bayi yang baru lahir, menyebabkan berat badan lahir rendah, kelahiran prematur, dan asma. Pada orang dewasa, dampak kesehatan termasuk diabetes, stroke, dan penyakit paru obstruktif kronis. Hal ini menimbulkan peningkatan angka ketidakhadiran kerja karena pekerja perlu mengambil cuti sakit atau merawat orang lain yang sedang sakit, dan ini akan menjadi beban bagi ekonomi.

Dampak kesehatan kumulatif diperkirakan cukup signifikan di bawah kebijakan saat ini. Sebagian besar akan dapat dihindari melalui penyesuaian yang lebih baik dengan target 1,5 derajat. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5, skenario 1,5 derajat dapat menghindari lebih dari setengah jumlah hari cuti sakit, kasus baru asma pada anak, total kasus anak yang menderita asma akibat paparan polusi, kunjungan ke UGD karena asma, kelahiran dengan berat badan rendah, dan kelahiran prematur dibandingkan dengan skenario PERPRES 112/2022. Misalnya, jumlah anak yang menderita asma akibat paparan polusi akan berkurang dari 240.323 menjadi 107.494. Sementara, skenario 1,5 derajat yang mengecualikan PLTU batubara *captive* dari asumsi pengakhiran operasional akan tetap dapat menurunkan jumlah kasus tersebut secara signifikan menjadi 120.091, kurang dari setengah dari jumlah kasus yang diperkirakan dalam skenario PERPRES 112/2022.

Demikian pula halnya dengan perhitungan tahun hidup yang hilang akibat paparan NO_2 dan SO_2 , di mana angka tersebut berkurang secara signifikan dalam skenario 1,5 derajat dibandingkan dengan skenario PERPRES 112/2022. Perbaikan yang paling signifikan adalah pada tahun hidup hilang akibat paparan SO_2 , karena skenario 1,5 derajat akan mengurangi tahun hidup yang hilang sebesar 59%. Pengurangan angka tahun hidup yang hilang karena paparan NO_2 juga akan signifikan; yaitu 58%. Pengecualian pembangkit listrik *captive* dari skenario 1,5 derajat akan menghasilkan pengurangan sekitar 10% lebih kecil.

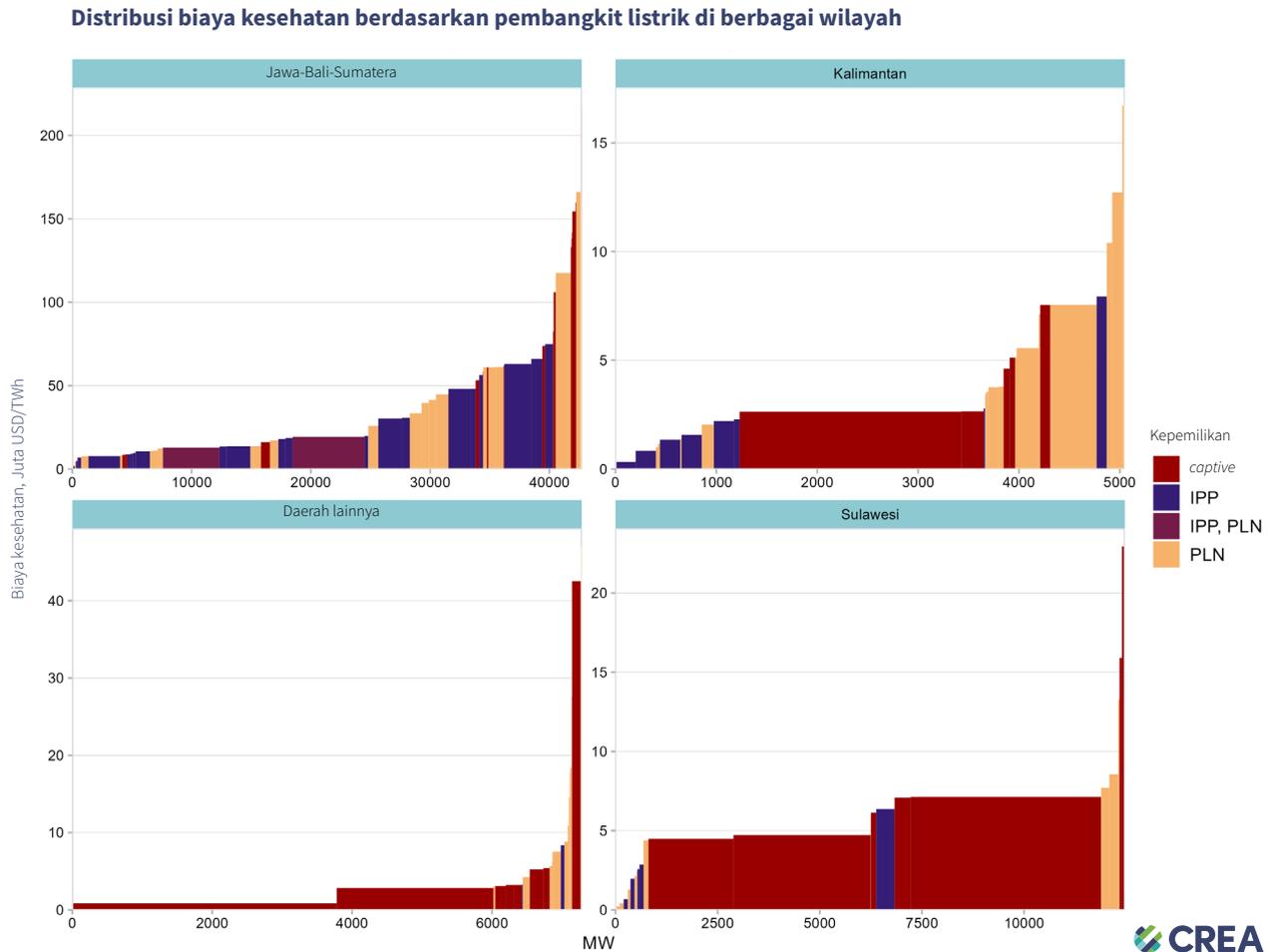
Dalam hal tahun-tahun hidup dengan disabilitas, skenario-skenario yang selaras dengan target 1,5 derajat—termasuk pengakhiran operasional pembangkit listrik *captive* yang dioptimalkan—akan mengurangi tahun-tahun tersebut sebanyak 60–70%. Tahun-tahun hidup dengan penyakit paru obstruktif kronis, diabetes, atau stroke akan berkurang lebih dari setengahnya dalam skenario 1,5 derajat yang mengecualikan pembangkit *captive*, tetapi pengurangannya akan lebih tinggi lagi dalam skenario 1,5 derajat.

Tabel 5. Perkiraan nilai tengah dari dampak kesehatan kumulatif berdasarkan skenario

<i>Outcome</i>	1,5 derajat	1,5 derajat dengan mengecualikan pembangkit <i>captive</i>	PERPRES 112/2022
Jumlah hari cuti sakit			
Ketidakhadiran kerja	48.831.083	55.968.109	114.352.550
Jumlah kasus			
Kasus baru asma pada anak	70.689	82.869	146.902
Total kasus asma pada anak	302.495	354.636	628.652
Kunjungan ke UGD karena asma	107.494	120.091	240.323
Kelahiran dengan berat badan rendah	34.273	38.396	73.539
Kelahiran prematur	50.514	55.753	107.180
Tahun-tahun hidup yang hilang			
Semua penyebab yang berasal dari paparan NO ₂	645.845	795.756	1.521.544
Semua penyebab yang berasal dari paparan SO ₂	403.125	501.943	974.158
Tahun-tahun hidup dengan disabilitas			
Penyakit paru obstruktif kronis	41.169	48.772	103.933
Diabetes	27.341	40.479	82.491
Stroke	87.160	101.923	217.926

Manfaat dari memprioritaskan pembangkit listrik dengan dampak kesehatan terburuk

Terdapat variasi yang luas dalam dampak kesehatan per unit listrik yang dihasilkan antara berbagai PLTU batubara di Indonesia karena adanya perbedaan lokasi pembangkit dan intensitas emisi pembangkit. Gambar 15 menggambarkan varian distribusi biaya kesehatan di wilayah Jawa-Bali-Sumatra, Kalimantan, Sulawesi, dan lain-lain berdasarkan kategori kepemilikan PLTU batubara yaitu PLN, IPP, gabungan PLN dan IPP, dan *captive*. Di seluruh Jawa-Bali-Sumatera, dampaknya hampir secara eksklusif dikaitkan dengan PLN dan IPP. Di wilayah lainnya, khususnya Sulawesi dan wilayah lainnya, pembangkit listrik *captive* menjadi kontributor utama polusi udara dari pembangkit listrik tenaga batubara. Untuk Kalimantan, kontribusi yang cukup besar terlihat baik itu dari pembangkit listrik *captive* maupun milik PLN.



Gambar 15. Distribusi biaya kesehatan berdasarkan pembangkit listrik di berbagai wilayah

Pembangkit listrik dengan biaya kesehatan tertinggi adalah yang terletak di atau dekat dengan daerah padat penduduk, dengan kondisi meteorologi yang menyebabkan paparan tinggi populasi terhadap emisi pembangkit listrik, misalnya karena arah dari angin permukaan yang bertiup dari arah tertentu dalam waktu lama (*prevailing wind*), serta kinerja kontrol emisi yang buruk. Contoh nyatanya adalah pembangkit listrik PLN Muara Karang dan Lontar yang berlokasi di Jakarta dan Tangerang, serta PLTU batubara *captive* yang berlokasi di Bekasi, Karawang, Purwakarta, dan Bandung. Daftar lengkap PLTU batubara disajikan pada Tabel 6, di mana pembangkit listrik batubara tersebut diurutkan dari biaya kesehatan tertinggi hingga terendah per unit listrik yang dihasilkan di setiap wilayah.

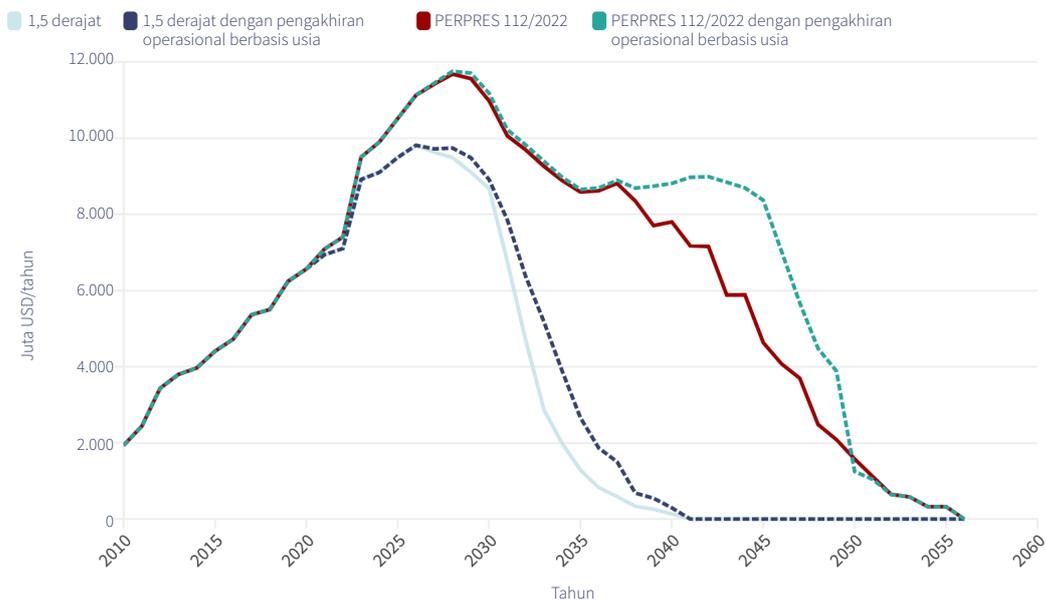
Tabel 6. PLTU batubara dengan perkiraan biaya kesehatan tertinggi per unit listrik yang dihasilkan di tiap wilayah jaringan, dipisahkan menjadi pembangkit listrik utilitas dan *captive*

PLTU Batubara	Provinsi	Wilayah	Pemilik	Kapasitas dalam MW
Muara Karang	Jakarta Raya	Jawa-Bali-Sumatra	PLN	400
Lontar	Banten	Jawa-Bali-Sumatra	PLN	1.260
Cirebon	Jawa Barat	Jawa-Bali-Sumatra	IPP	660
Jawa-1 / Cirebon-2	Jawa Barat	Jawa-Bali-Sumatra	IPP	924
Cilacap	Jawa Tengah	Jawa-Bali-Sumatra	IPP	2.260
Atambua	Nusa Tenggara Timur	Lainnya	PLN	24
Ekspansi Parit Baru	Kalimantan Barat	Kalimantan	PLN	100
Pantai Kura-Kura	Kalimantan Barat	Kalimantan	PLN	55
Embalut	Kalimantan Timur	Kalimantan	IPP	100
Asam-Asam	Kalimantan Selatan	Kalimantan	PLN	460
Sumbawa Barat	Nusa Tenggara Barat	Lainnya	PLN	14
Rote Ndao	Nusa Tenggara Timur	Lainnya	PLN	6
Bima	Nusa Tenggara Barat	Lainnya	PLN	20
Alor	Nusa Tenggara Timur	Lainnya	PLN	6
Ropa	Nusa Tenggara Timur	Lainnya	PLN	14
Nii Tanasa	Sulawesi Tenggara	Sulawesi	PLN	30
Punagaya	Sulawesi Selatan	Sulawesi	PLN	220
Sulsel Barru	Sulawesi Selatan	Sulawesi	PLN	200
Jeneponto	Sulawesi Selatan	Sulawesi	IPP	450
Talud	Sulawesi Utara	Sulawesi	PLN	6
Stasiun Daya FAJAR	Jawa Barat	Jawa-Bali-Sumatra	<i>captive</i>	55
Stasiun Daya Pindo-Deli-li	Jawa Barat	Jawa-Bali-Sumatra	<i>captive</i>	50
Stasiun Daya Cikarang Babelan	Jawa Barat	Jawa-Bali-Sumatra	<i>captive</i>	280
Stasiun Daya NA Indo Bharat Rayon	Jawa Barat	Jawa-Bali-Sumatra	<i>captive</i>	36,6
Stasiun Daya Bandung Indosyntec	Jawa Barat	Jawa-Bali-Sumatra	<i>captive</i>	30
Stasiun Daya Bengkayang	Kalimantan Barat	Kalimantan	<i>captive</i>	100
Stasiun Daya Kalimantan Cement Works	Kalimantan Selatan	Kalimantan	<i>captive</i>	55
Stasiun Daya Tabalong Wisesa	Kalimantan Selatan	Kalimantan	<i>captive</i>	60
Stasiun Daya Ketapang Smelter	Kalimantan Barat	Kalimantan	<i>captive</i>	220

PLTU Batubara	Provinsi	Wilayah	Pemilik	Kapasitas dalam MW
Stasiun Daya Adaro Aluminum Smelter	Kalimantan Timur	Kalimantan	<i>captive</i>	2.200
Stasiun Daya Batu Hijau	Nusa Tenggara Barat	Lainnya	<i>captive</i>	124
Stasiun Daya Halmahera Timur	Maluku Utara	Lainnya	<i>captive</i>	90
Stasiun Daya Pelabuhan Amamapare	Papua	Lainnya	<i>captive</i>	195
Stasiun Daya MSP Pulau Obi	Maluku Utara	Lainnya	<i>captive</i>	114
Stasiun Daya <i>Captive</i> Xinxing Ductile Iron Pipes Co.	Maluku Utara	Lainnya	<i>captive</i>	114
Stasiun Daya Pabrik Semen Tonasa	Sulawesi Selatan	Sulawesi	<i>captive</i>	70
Stasiun Daya Pomalaa Nickel	Sulawesi Tenggara	Sulawesi	<i>captive</i>	60
Delong Nickel	Sulawesi Tengah	Sulawesi	<i>captive</i>	4.665
Stasiun Daya <i>captive</i> Qingdao Zhongsheng	Sulawesi Tengah	Sulawesi	<i>captive</i>	390
Stasiun Daya Wanxiang Nickel Indonesia	Sulawesi Tengah	Sulawesi	<i>captive</i>	130

Jalur pengakhiran operasional yang dikembangkan dalam skenario 1,5 derajat memprioritaskan pembangkit listrik dengan dampak kesehatan tertinggi. Hal ini akan sangat meningkatkan manfaat kesehatan dan efektivitas biaya dari penghentian penggunaan batubara. Jika logika untuk menghentikan pembangkit listrik tertua terlebih dahulu diterapkan, jumlah kematian terkait polusi udara dalam skenario kebijakan saat ini akan meningkat sebanyak 36.000 kasus. Tren biaya kesehatan ditunjukkan pada Gambar 16, di mana garis putus-putus menunjukkan biaya yang lebih tinggi yang dapat dikaitkan dengan pengakhiran operasional berbasis usia, baik dalam skenario 1,5 derajat maupun skenario PERPRES 112/2022. Biaya kesehatan kumulatif akan meningkat sebesar US\$12 miliar (Rp180 triliun) lebih tinggi dari jadwal pengakhiran operasional berbasis kesehatan yang dioptimalkan yang dikembangkan untuk skenario 1,5 derajat, dan sebesar US\$24 miliar (Rp 360 triliun) lebih tinggi dari skenario PERPRES 112/2022.

Biaya terkait polusi udara berdasarkan skenario



Gambar 16. Biaya terkait polusi udara berdasarkan skenario dengan pengakhiran operasional berbasis usia



Evaluasi penerapan

pengendalian polusi udara

Evaluasi penerapan pengendalian polusi udara

Berbeda dengan *co-firing* yang hanya memberikan manfaat kecil, pengendalian polusi udara dapat berdampak besar pada ekonomi, kesehatan masyarakat, ketahanan, keberlanjutan, dan yang terpenting, kualitas udara Indonesia dan penduduknya. Tindakan nyata yang lebih lanjut diperlukan untuk mempertahankan momentum yang dimulai dalam proyek *Transparent Pollution Control* (EEAS, 2021) dan menyelaraskan upaya nasional dan dukungan internasional dengan sebaik-baiknya untuk kepentingan seluruh rakyat Indonesia.

Negara perlu menerapkan perencanaan nasional yang lebih kuat dan dapat ditindaklanjuti untuk mengatasi masalah polusi udara yang sedang berlangsung dengan lebih baik dengan cara beralih dari penggunaan batubara sebagai sumber energi. Seperti yang dilaporkan oleh IQAir, penduduk di banyak kota besar di Jawa dan daerah metropolitan lain yang sangat tercemar di Indonesia terpapar ke tingkat yang tidak sehat, jauh di atas ambang batas WHO sepanjang tahun (IQAir, 2023). Sementara tindakan pembatasan segera pada pembangkit energi batubara di tingkat nasional akan membawa pengurangan yang signifikan dalam emisi pembangkit listrik tenaga batubara, pertimbangan untuk pemasangan teknologi pengendalian polusi udara yang tepat sangatlah penting selama beberapa dekade mendatang. Antara saat ini dan tahun 2030, arah tren kapasitas pembangkit listrik dan dampak kesehatan terkait diperkirakan masih akan naik sebelum mencapai puncaknya dan menurun.

Berdasarkan pertimbangan ini, kami memasukkan analisis tambahan dalam tiga skenario utama yang telah disajikan pada bab sebelumnya. Kami menghitung dampak kesehatan dan ekonomi dari skenario PERPRES 112/2022 saat ini dengan teknologi pengendalian pencemaran udara dan skenario 1,5 derajat dengan penerapan pengendalian pencemaran udara. Tabulasi asumsi disajikan pada Tabel 7. Dalam skenario di mana pengendalian pencemaran udara diterapkan, pembangkit listrik batubara yang baru diasumsikan dilengkapi dengan teknologi pengendalian pencemaran udara yang efisien pada tahun 2026, sedangkan pembangkit listrik yang ada pada tahun 2030. Asumsi ini tidak berlaku bagi pembangkit yang ada yang dijadwalkan akan berakhir operasionalnya pada tahun 2035.

Tabel 7. Matriks skenario dari asumsi APC dalam dua skenario utama - PERPRES 112/2022 dan 1,5 derajat

Skenario	Jadwal Pengakhiran Operasional PLN & IPP	Jadwal Pengakhiran Operasional Pembangkit Listrik <i>Captive</i>	<i>Co-firing</i> Biomassa	Retrofit dengan <i>Air Pollution Control</i> (APC)
PERPRES 112/2022 - dirujuk sebagai 'kebijakan yang berlaku saat ini' dalam studi ini	14 GW pembangkit listrik PLN & IPP akan berakhir operasionalnya pada tahun 2035, sedangkan sisanya akan berakhir operasionalnya pada tahun 2050	Semua pembangkit listrik <i>captive</i> akan berakhir operasionalnya setelah beroperasi selama 30 tahun	Peningkatan porsi <i>co-firing</i> secara bertahap, mencapai 20% di pembangkit listrik PLN pada tahun 2030	APC dipasang untuk memenuhi batas emisi nasional saat ini hingga akhir masa pakai
PERPRES 112/2022, dengan APC				Pembangkit listrik baru diharuskan untuk memasang pengendali SO ₂ , NO _x , dan debu yang efisien pada tahun 2026 dan pembangkit listrik yang sudah ada pada tahun 2030, kecuali jika mereka akan berakhir masa operasionalnya pada tahun 2035

Skenario	Jadwal Pengakhiran Operasional PLN & IPP	Jadwal Pengakhiran Operasional Pembangkit Listrik <i>Captive</i>	<i>Co-firing</i> Biomassa	Retrofit dengan <i>Air Pollution Control</i> (APC)
1,5 derajat	Jadwal pengakhiran operasional selaras dengan jalur optimal IESR-UMD	Jadwal pengakhiran operasional selaras dengan jalur optimal IESR-UMD	Porsi <i>co-firing</i> dipertahankan pada tingkat komitmen saat ini, yaitu 5% pada sebagian besar pembangkit listrik PLN	APC dipasang untuk memenuhi batas emisi nasional saat ini hingga akhir masa pakai
1,5 derajat, dengan APC				Pembangkit listrik baru diharuskan untuk memasang pengendali SO₂, NO_x, dan debu yang efisien pada tahun 2026 dan pembangkit listrik yang sudah ada pada tahun 2030, kecuali jika mereka akan berakhir masa operasionalnya pada tahun 2035

Kami mengacu pada dokumen *European Union Best Available Technique Reference* (BREF) sebagai tolok ukur untuk pengendalian polusi udara yang efisien (European Commission, 2017). Dokumen ini menetapkan kisaran tingkat emisi yang konsisten dengan penggunaan teknik pengendalian polusi udara terbaik yang tersedia. Kami menerapkan rentang yang lebih tinggi (lebih lunak), yang merupakan tingkat yang harus dipenuhi oleh semua pembangkit listrik di Uni Eropa secara hukum. Oleh karena itu, ada banyak pengalaman dalam me-retrofit PLTU batubara yang ada untuk memenuhi standar. Dalam kasus Uni Eropa, pembangkit listrik yang ada umumnya jauh lebih tua daripada yang ada di Indonesia.

Tabel 8. Biaya pemasangan Pengendalian Polusi Udara (*Air Pollution Control/APC*) dalam skenario “kebijakan saat ini dengan APC”

Deskripsi	Nilai		Unit	
Retrofit kapasitas dengan APC	43.440		MW	
Pembangunan kapasitas baru dengan APC	5.450		MW	
Total biaya investasi	6.936	102.997	juta dolar AS	miliar rupiah
Total biaya operasi, per tahun (2035)	684	10.150	juta dolar AS	miliar rupiah
Total biaya operasi, dari tahun pemasangan hingga akhir masa pakai	13.569	201.491	juta dolar AS	miliar rupiah
Biaya kesehatan yang dihindari pada tahun 2035	5.828	86.546	juta dolar AS	miliar rupiah
Total biaya kesehatan yang dihindari, dari tahun pemasangan hingga akhir masa pakai	90.441	1.343.037	juta dolar AS	miliar rupiah
Keuntungan ekonomi bersih	69.937	1.038.549	juta dolar AS	miliar rupiah

Kurang lebih 8.000 kematian pada tahun 2035 saja dapat dihindari jika skenario kebijakan saat ini mencakup pemasangan APC yang tepat, demikian juga dengan biaya kesehatan terkait polusi udara sebesar US\$5,8 miliar (Rp86,5 triliun). Secara kumulatif, total sebanyak 129.000 kematian dan biaya kesehatan sebesar US\$90 miliar (Rp1,3 kuadriliun) dapat dihindari jika pembangkit listrik tenaga batubara diharuskan untuk memasang pengendali debu, NO_x, dan SO₂ yang efisien.

Memasang APC sangat menguntungkan dari sudut pandang masyarakat secara keseluruhan. Biaya kesehatan yang dihemat lebih besar daripada biaya implementasi pengendalian polusi udara. Kami memproyeksikan adanya penghematan ekonomi bersih kepada masyarakat sebesar US\$70 miliar (Rp1,1 kuadriliun) dalam skenario kebijakan yang berlaku saat ini dengan pemasangan APC, jika dibandingkan dengan kebijakan yang berlaku saat ini tetapi tanpa perbaikan dalam hal persyaratan pemasangan APC. Analisis tersebut telah memperhitungkan biaya investasi dan operasional APC. Rincian lebih lanjut tentang biaya untuk teknologi APC yang dipertimbangkan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel A4 dan A5 di Lampiran.

Dibandingkan dengan dampak yang lebih signifikan yang akan dihasilkan dari penghentian batubara yang tertunda dalam skenario PERPRES 112/2022, kematian dan biaya yang terhindarkan antara skenario 1,5 derajat dan skenario 1,5 derajat dengan pemasangan APC relatif kecil. Hal ini terutama disebabkan oleh fakta bahwa sebagian besar pembangkit listrik tenaga batubara diasumsikan akan berhenti beroperasi pada tahun 2035 di jalur 1,5 derajat, dan oleh karena itu tidak perlu meningkatkan APC mereka lebih lanjut berdasarkan asumsi kami. Selain itu, analisis kami menunjukkan bahwa investasi yang diperlukan dan biaya pengoperasian APC tetap rendah, dan pemasangan APC yang lebih baik akan menguntungkan dari perspektif biaya-manfaat. Skenario 1,5 derajat dengan APC sejauh ini memiliki angka kematian terkait polusi udara serta biaya dan dampak kesehatan lainnya yang paling rendah. Tabulasi dampak dan biaya kesehatan disajikan pada Tabel A1 dan A2 di Lampiran.

Tabel 9. Angka kematian dan biaya pada tahun 2035 berdasarkan skenario

2035		
Skenario	Angka kematian	Biaya, juta dolar AS
PERPRES 112/2022	12.216	8.586
PERPRES 112/2022 dengan APC	3.931	2.758
1,5 derajat	1.792	1.285
1,5 derajat dengan APC	1.119	808

Tabel 10. Angka kematian dan biaya kumulatif dari tahun 2024 dan seterusnya pada berbagai skenario

Kumulatif		
Skenario	Angka kematian	Biaya, juta dolar AS
PERPRES 112/2022	302.800	212.500
PERPRES 112/2022 dengan APC	174.200	112.100
1,5 derajat	121.000	85.000
1,5 derajat dengan APC	115.800	81.400



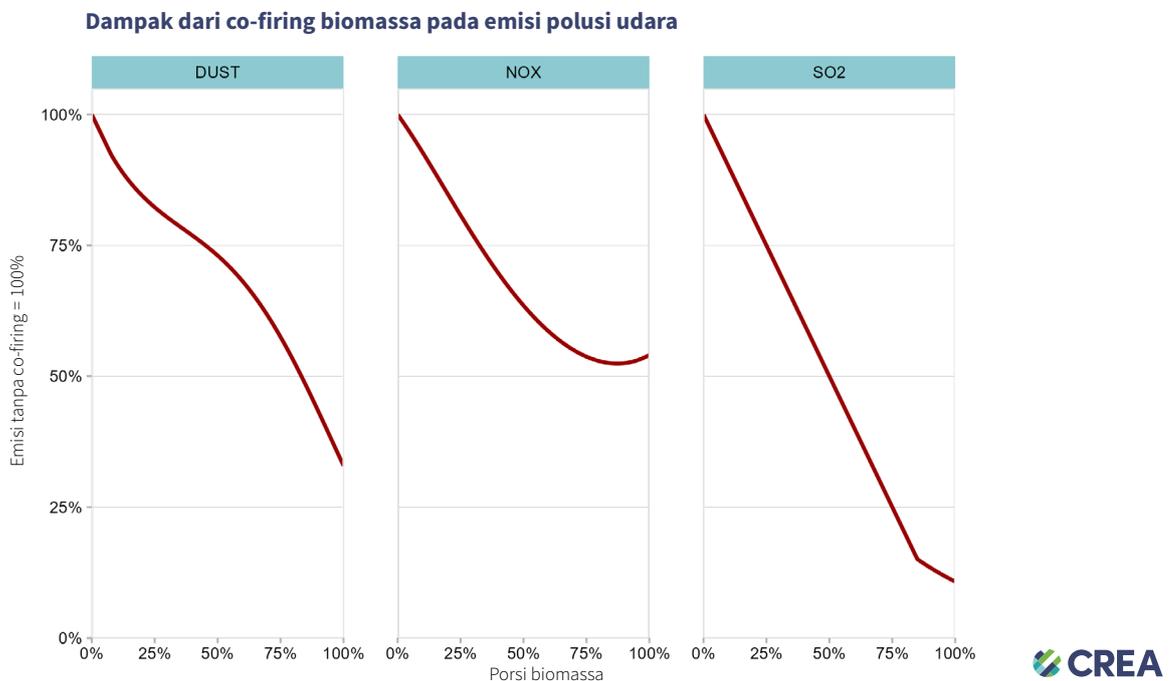
Evaluasi penerapan

co-firing

Evaluasi penerapan *co-firing*

Meskipun pembakaran bersama (*co-firing*) biomassa dapat mengurangi emisi polutan udara sampai tingkat tertentu, ini bukanlah solusi bagi tantangan polusi udara di Indonesia. Kami memproyeksikan bahwa meningkatkan porsi *co-firing* hingga minimal 20% di semua pembangkit listrik PLN—tantangan utama dalam hal ketersediaan biomassa dan kemungkinan juga menjadi tantangan teknis—akan berdampak kecil hingga bahkan hampir tidak berdampak pada emisi polutan udara dari pembangkit listrik batubara.

Gambar 17 di bawah menunjukkan pengaruh porsi biomassa yang berbeda-beda terhadap emisi PM, NO_x, dan SO₂. Walaupun emisi polutan menunjukkan penurunan yang nyata pada porsi biomassa yang lebih tinggi, target PLN saat ini untuk porsi biomassa sebesar 10% hanya akan menghasilkan pengurangan emisi partikulat sebesar 9%, NO_x sekitar 7%, dan SO₂ sebesar 10% pada pembangkit listrik di mana hal itu diterapkan. Efek pada emisi diturunkan dari banyak himpunan data yang terdiri dari ratusan pabrik pembakaran, membuatnya mewakili efek agregat, bahkan dengan mempertimbangkan variasi antara masing-masing pembangkit.



Gambar 17. Korelasi antara porsi biomassa dan emisi untuk debu, NO_x, dan SO₂

Analisis CREA menunjukkan bahwa pengurangan total emisi pembangkit listrik batubara di Indonesia dari hasil *co-firing* yang dapat diharapkan hanya sekitar 1,5–2,4%, tergantung pada polutannya, jika *co-firing* hanya terbatas pada pembangkit listrik PLN. Sebaliknya, mensyaratkan pemasangan teknologi pengendalian emisi yang efisien di semua pembangkit listrik yang beroperasi setelah tahun 2035 akan secara efektif mengurangi emisi SO_x sekitar 73%, NO_x sebesar 64%, debu sebesar 86%, dan merkuri sebesar 71%.

Sebagai bagian dari program *Green Booster* PLN, *co-firing* biomassa diharapkan mencapai sekitar 3.6% dari 23% porsi energi terbarukan pada tahun 2023 sebagaimana yang didefinisikan di dalam RUPTL 2021-2030 (OECD, 2021). PLN memperkirakan rata-rata 10,2 juta ton biomassa akan pasok setiap tahunnya untuk menggantikan 12% penggunaan batu bara (PLN, 2023). Pada tahun 2022, PLN mampu merealisasikan 0,455 juta ton pasokan biomassa, mulai dari serbuk gergaji (90%), serpihan kayu (3%), cangkang sawit (5%), dan bahan baku biomassa lainnya (2%). Target pasokan akan meningkat menjadi 2,2 juta ton pada tahun 2023, 2,83 juta ton pada tahun 2024, dan akan mencapai 10,2 juta ton pada tahun 2025 (IESR, 2022b).

Indonesian Biomass Energy Society (Masyarakat Energi Biomassa Indonesia) menyatakan bahwa pencapaian PLN dalam menerapkan *co-firing* biomassa di 36 PLTU batubara cukup menggembirakan. Namun, sumber pasokan biomassa jangka panjangnya patut dipertanyakan. Selain itu, harga bahan baku biomassa dunia, khususnya *pellet* kayu, semakin tinggi. Pasar untuk ekspor maupun penggunaan domestik non-energi menjadi semakin menarik bagi pemasok domestik. Saat ini, harga jual bahan baku untuk *co-firing* dibatasi pada US\$70 (Rp1 juta) per ton, sementara harganya bisa mencapai US\$240 (Rp3,6 juta) per ton jika dijual ke Jepang atau Korea (MEBI, 2023; IESR, 2022b).

PLN mengklaim bahwa *co-firing* biomassa akan mengurangi hingga 11 juta ton CO₂ dan gas rumah kaca lainnya (PLN, 2023). Namun, PLN belum mempertimbangkan dampak yang tidak terhitung terhadap emisi, yang mungkin timbul karena hambatan teknis dan ekonomi yang terkait dengan rantai pasokan bahan baku biomassa. Penerapan *co-firing* biomassa tidak akan mengurangi emisi GRK secara substansial jika batubara tetap menjadi sumber bahan bakar utama armada pembangkit listrik tenaga batubara Indonesia.

Selain itu, di samping risiko keuangan yang terkait dengan penghematan bahan bakar yang buruk dan kendala operasional, terdapat juga risiko penurunan nilai aset. Sebagaimana yang dicatat oleh Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA), Indonesia harus mengambil langkah yang bijaksana untuk memastikan kelayakan adopsi *co-firing*, terutama mengingat dominasi *boiler* batubara bubuk di armada pembangkit listrik batubara PLN, yang memiliki rentang toleransi yang sangat sempit dalam sifat bahan bakar (IEEFA, 2021b). Untuk memenuhi ekuivalensi ekonomi dari batubara, opsi untuk sumber bahan baku dibatasi oleh jarak, yaitu 360 km untuk Jawa, 300 km untuk Sumatera, Kalimantan, dan Sulawesi, serta 187 km untuk Maluku dan Papua. Meskipun biaya transportasi dibatasi hingga 11% dari harga yang dibatasi, risiko pasokan mungkin lebih besar daripada yang diantisipasi. IESR juga mencatat bahwa biaya aktual yang diperlukan untuk menerapkan *co-firing* biomassa kemungkinan besar akan menjadi lebih tinggi karena biaya yang terkait dengan pengotoran boiler dan kebutuhan peningkatan dan/atau penyesuaian peralatan tidak dimasukkan (IESR, 2022b).

Sementara *co-firing* biomassa sudah diimplementasikan di banyak pembangkit listrik PLN, ada juga keinginan untuk menerapkan *co-firing* amonia di masa depan. Ada banyak kendala untuk memperoleh amonia ini—di atas semua itu, biaya dan manfaat emisi gas rumah kaca yang patut dipertanyakan bahkan pada kondisi yang terbaik (Kennedy dkk., 2023; Bloomberg NEF, 2022). Selain itu, penelitian CREA baru-baru ini menemukan bahwa *co-firing* amonia di pembangkit listrik tenaga batubara dapat menyebabkan adanya emisi amonia yang tidak sengaja terlepas yang sangat signifikan, baik dari kapal yang mengangkut amonia maupun dari cerobong pembangkit listrik (Myllyvirta dan Kelly, 2023). Amonia bereaksi dengan SO₂ dan NO₂ di atmosfer membentuk aerosol PM_{2.5}. Oleh karena itu, *co-firing* amonia sebenarnya dapat membuat dampak kualitas udara dari PLTU batubara menjadi lebih buruk daripada saat ini.

Dalam studi ini, CREA mengasumsikan dua variasi skema *co-firing* biomassa; (1) peningkatan bertahap porsi *co-firing*, mencapai 20% di pembangkit listrik PLN pada tahun 2030 untuk skenario PERPRES 112/2022, (2) 5% porsi *co-firing* biomassa yang dicapai saat ini untuk sebagian besar PLTU batubara PLN dipertahankan dan tidak ditingkatkan untuk skenario 1,5 derajat. Pertimbangan semacam itu telah dibuat berdasarkan kesimpulan bahwa *co-firing* biomassa bukanlah strategi efektif yang akan memberikan kontribusi jangka panjang yang berarti bagi target Indonesia untuk mewujudkan komitmen iklim dan mencapai transisi yang inklusif dan berkeadilan (Prasetyo dkk., 2023).

Kesimpulan

Indonesia telah mulai meletakkan dasar untuk pengakhiran operasional PLTU batubara sebagaimana ditetapkan dalam Peraturan Presiden No. 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik. Dengan komitmen pemerintah pusat untuk menyelesaikan peta jalan dalam waktu enam bulan sejak pembentukan Sekretariat JETP pada Februari 2023, Indonesia kini memasuki masa kritis di mana komitmen harus diubah menjadi tindakan untuk berada di jalur yang selaras dengan jalur 1,5 derajat. Peta jalan yang sangat diantisipasi dan yang dirinci dalam Rencana dan Kebijakan Investasi Komprehensif (*Comprehensive Investment Plan and Policy/ CIPP*) ini menandai permulaan dari mobilisasi investasi energi bersih di Indonesia.

Dalam analisis ini, CREA mengambil kesempatan untuk melakukan penilaian pertama terhadap konsekuensi dari linimasa penghentian bertahap batubara yang telah ditetapkan, keberadaan sistem Pengendalian Pencemaran Udara dalam operasi pembangkit listrik tenaga batubara, dan penerapan *co-firing* biomassa sebagai bagian dari strategi transisi hijau PLN. CREA telah mengembangkan penilaian dampak kesehatan yang komprehensif, yang menguraikan implikasi dari keputusan Indonesia dalam rencana pembangkitan listrik menggunakan tenaga batubara. Jalur-jalur skenario dibangun berdasarkan data terbaik yang tersedia, berpusat pada tujuan untuk Transisi Energi Berkeadilan yang memprioritaskan kehidupan dan mata pencaharian masyarakat yang terkena dampak sepanjang perjalanannya. Indonesia akan dapat meminimalkan dampak kesehatan terhadap penduduk yang terkena dampak dengan memprioritaskan pengakhiran operasional secara dini pembangkit listrik tenaga batubara dan menerapkan energi terbarukan daripada mengejar solusi yang memperpanjang masa operasi pembangkit listrik tenaga batubara, khususnya *co-firing* dengan biomassa dan amonia.

Sementara beban polusi udara dari pembangkit listrik batubara saat ini terhadap kesehatan masyarakat Indonesia dan perekonomian diabaikan dan kurang diperhitungkan, CREA memproyeksikan bahwa perluasan yang direncanakan hingga tahun 2030 akan meningkatkan beban yang ada secara tajam. Analisis menunjukkan adanya peningkatan emisi polutan udara yang signifikan, yaitu sebesar 110% selama satu dekade terakhir, hanya dari pembangkit listrik tenaga batubara. CREA memperkirakan bahwa emisi pembangkit listrik batubara di Indonesia pada tahun 2022 bertanggung jawab atas 10.500 kematian akibat polusi udara dan beban ekonomi sebesar US\$7,4 miliar (Rp109,9 triliun) dari dampak kesehatan terkait. Di bawah penerapan kebijakan saat ini pada tahun 2030 dan pengoperasian penuh semua PLTU batubara yang direncanakan saat ini, masyarakat Indonesia akan terpapar emisi polutan udara 70% lebih tinggi. Seiring dengan peningkatan kapasitas pembangkit listrik batubara Indonesia dari 45 GW saat ini menjadi 63 GW sebelum mencapai puncaknya pada tahun 2028, angka kematian per tahun terkait polusi udara dari pembangkit listrik batubara akan meningkat menjadi 16,600 per tahun dan beban ekonomi kesehatan akan mencapai US\$11.8 miliar (Rp175,2 triliun) per tahun.

Pembatalan proyek pembangkit listrik tenaga batubara baru dan percepatan jadwal pengakhiran operasional pembangkit yang ada akan menghindarkan biaya ekonomi yang signifikan, yang dapat menutup biaya investasi yang diperlukan untuk menerapkan energi bersih dan terbarukan. Penghapusan bertahap batubara yang lebih cepat pada tahun 2040, sejalan dengan target 1,5 derajat dari Perjanjian Paris, akan menghindarkan total kumulatif 182.000 kematian terkait polusi udara dan meringankan beban ekonomi kesehatan sebesar US\$130 miliar (Rp1,9 kuadriliun) hingga tahun 2060. Seperti yang disoroti oleh IESR dan UMD, investasi untuk energi terbarukan dan efisiensi energi harus mencapai total investasi US\$135 miliar (Rp2 kuadriliun) pada tahun 2030, tambahan sebesar US\$455 miliar (Rp6,8 kuadriliun) pada tahun 2040, dan tambahan sebesar US\$633 miliar (Rp9,4 kuadriliun) pada tahun 2050 untuk memfasilitasi jalur pengakhiran operasional yang selaras dengan komitmen 1,5 derajat (Cui dkk., 2022).

Jadwal pengakhiran operasional yang dibuat oleh Indonesia untuk penghentian penggunaan batubara secara bertahap harus mencakup evaluasi dampak kesehatan di tingkat pembangkit secara nasional untuk jumlah listrik yang dihasilkan oleh pembangkit tersebut. Dasar pertimbangan ini adalah untuk memastikan transisi energi yang merata dan memitigasi dampaknya terhadap masyarakat yang tinggal di dekat pembangkit listrik yang terkena dampak secara langsung, dan seluruh warga negara Indonesia. CREA telah menghasilkan daftar pembangkit listrik yang harus diprioritaskan, diurutkan dari yang memiliki biaya kesehatan tertinggi karena berlokasi di atau dekat daerah padat penduduk, dengan kondisi meteorologi sekitar yang meningkatkan paparan, dan untuk pembangkit yang diasumsikan

dioperasikan dengan pengendalian emisi yang buruk. Contoh nyata dari unit tersebut di antaranya adalah pembangkit listrik Muara Karang dan Lontar milik PLN yang terletak di Jakarta dan Tangerang, serta beberapa pembangkit listrik batubara *captive* yang berlokasi di Bekasi, Karawang, Purwakarta, dan Bandung.

Inklusi penuh armada besar pembangkit listrik *captive* dalam kebijakan penghapusan bertahap batubara di Indonesia sangat penting baik dari perspektif gas rumah kaca maupun kesehatan masyarakat. Pembangkit listrik *captive* bertanggung jawab atas sekitar 20% dari total dampak kesehatan yang ditimbulkan oleh pembangkit listrik batubara di Indonesia. Setiap celah untuk ambiguitas di dalam kerangka peraturan dapat mengecualikan pembangkit listrik *captive* dari kebijakan penghentian bertahap batubara tahun 2040. CREA memperkirakan adanya beban kesehatan tahunan tambahan sebesar 27.000 kematian terkait polusi udara dan biaya kesehatan sebesar US\$20 miliar (Rp300 triliun) ditimbulkan oleh pembangkit listrik *captive* saja.

Bahkan ketika pembangkit listrik batubara mulai berakhir masa operasionalnya, berinvestasi di pengendalian polusi udara yang lebih baik di pembangkit listrik yang berencana untuk beroperasi hingga dan setelah tahun 2030 akan memberikan manfaat kesehatan dan ekonomi yang besar. Menurut analisis kami, negara dapat menghindari 8.300 kematian dan biaya kesehatan sebesar US\$5,8 miliar (Rp86 triliun) pada tahun 2035 dengan pemasangan APC yang tepat. Dengan mempertimbangkan biaya investasi dan biaya operasional yang terkait dengan fasilitas APC, negara masih akan memperoleh keuntungan ekonomi bersih sebesar US\$70 miliar (Rp1 kuadriliun) dengan memitigasi risiko kesehatan masyarakat dari emisi pembangkit listrik tenaga batubara.

Daftar pustaka

- Achakulwisut, P., Brauer, M., Hystad, P. and Anenberg, S. C. (2019). Global, National, and Urban Burdens of Paediatric Asthma Incidence Attributable to Ambient NO₂ Pollution: Estimates from Global Datasets. *Lancet*, 3 (4): E166-E178. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30046-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30046-4)
- Anenberg, S. C., Henze, D. K., Tinney, V., Kinney, P. L., Raich, W., Fann, N., Malley, C. S., Roman, H., Lamsal, L., Duncan, B., Martin, R. V., van Donkelaar, A., Brauer, M., Doherty, R., Jonson, J. E., Davila, Y., Sudo, K. and Kuylenstiernam J. C. I. (2018). Estimates of the Global Burden of Ambient PM_{2.5}, Ozone, and NO₂ on Asthma Incidence and Emergency Room Visits. *Environmental Health Perspectives*, 126 (10). <https://doi.org/10.1289/EHP3766>
- Antara News. (2019). Empat capaian terbesar sektor energi era Jokowi. *Antaranews.com*. (Published on October 17, 2019). <https://www.antaranews.com/berita/1117904/empat-capaian-terbesar-sektor-energi-era-jokowi>
- Air Quality Life Index (AQLI). (2022). Indonesia. (Published on June 13, 2022). <https://aqli.epic.uchicago.edu/country-spotlight/indonesia/>
- Asian Development Bank (ADB). (2022). DB and Indonesia Partners Sign Landmark MOU on Early Retirement Plan for First Coal Power Plant Under Energy Transition Mechanism. News Release. (Published on 14 November, 2022). <https://www.adb.org/news/adb-and-indonesia-partners-sign-landmark-mou-early-retirement-plan-first-coal-power-plant>
- Basel and Stockholm Conventions Regional Centre for Southeast Asia (BCRC-SEA). (2017). Final Report on Mercury Emissions from Coal-Fired Power Plants in Indonesia. (Published in December 2017). <https://www.unep.org/globalmercurypartnership/resources/report/mercury-emissions-coal-fired-power-plants-indonesia>
- Birchby, D., Stedman, J., Whiting, S. and Vedrenne, M. (2019). Air Quality Damage Cost Update 2019. 2019. Ricardo/ED59323/Issue Number 2.0. https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat09/1902271109_Damage_cost_update_2018_FINAL_Issue_2_publication.pdf
- Bloomberg New Energy Finance (BloombergNEF). (2022). Japan's Costly Ammonia Coal Co-Firing Strategy. https://assets.bbhub.io/professional/sites/24/BNEF-Japans-Costly-Ammonia-Coal-Co-Firing-Strategy_FINAL.pdf
- Brandt, S.J., Perez, L., Künzli, N., Lurmann, F. and McConnell, R. (2012). Costs of childhood asthma due to traffic-related pollution in two California communities. *European Respiratory Journal*, Aug. 2012, 40(2): 363-370. <https://doi.org/10.1183/09031936.00157811>
- Burnett, R., Chen, H., Szyszkwicz, M., Fann, N., Hubbell, B., et al. (2018). Global Estimates of Mortality Associated with Long-Term Exposure to Outdoor Fine Particulate Matter. *Proceeding of the National Academies of Science*, 115 (38): 9592-9597). <https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115>
- Central Bureau of Statistics. Badan Pusat Statistik (BPS). (2023). Total Population by Province in Indonesia (Thousand People), 2020-2022. <https://sulut.bps.go.id/indicator/12/958/1/jumlah-penduduk-menurut-provinsi-di-indonesia.html>
- Center for International Earth Science Information Network (CIESIN). (2018). Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density Adjusted to Match 2015 Revision UN WPP Country Totals, Revision 11. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), 2018. <https://doi.org/10.7927/H4F47M65>
- Climate Investment Funds (CIF). (2023). Accelerating Coal Transition. Coal-To-Clean-Transition. [Last accessed 15 May, 2023] <https://www.cif.org/topics/accelerating-coal-transition>

- Cropper, M., Guttikunda, S., Jawahar, P., Lazri, Z., Malik, K., Song, X. and Yao, X. (2019). Applying Benefit-Cost Analysis to Air Pollution Control in the Indian Power Sector. *Journal of Benefit-Cost Analysis*, 10(S1): 185-205. <https://doi.org/10.1017/bca.2018.27>
- Cui, R., Tumiwa, F., Zhao, A., Arinaldo, D., Wiranegara, R., Cui, D., Dahl, C., Myllyvirta, L., Squire, C., Simamora, P. and Hultman, N. (2022). "Financing Indonesia's coal phase-out: A just and accelerated retirement pathway to net zero." Center for Global Sustainability, University of Maryland, College Park, USA; Institute for Essential Services Reform, Jakarta. (Published in August 2022). <https://cgs.umd.edu/research-impact/publications/financing-indonesias-coal-phase-out-just-and-accelerated-retirement>
- Economic Research Institute for ASEAN and East Asia (ERIA). (2017). ERIA Research Project FY2016 No. 02 - Improving emission regulation for coal-fired power plants in ASEAN. <https://www.eria.org/research/improving-emission-regulation-for-coal-fired-power-plants-in-asean/>
- Ember. (2023). JETP: a reflection of Indonesia's commitment to transform its power sector. <https://ember-climate.org/insights/commentary/jetp-indonesia/>
- European Environment Agency (EEA). (2011). Air pollution impacts from carbon capture and storage (CCS). <https://www.eea.europa.eu/publications/carbon-capture-and-storage/file>
- European Environment Agency (EEA). (2014). Costs of Air Pollution from European Industrial Facilities 2008–2012 — an updated assessment. EEA Technical report. No. 20/2014. <https://www.eea.europa.eu/publications/costs-of-air-pollution-2008-2012>
- European Environment Agency (EEA). (2023). Industrial Reporting under the Industrial Emissions Directive 2010/75/EU and European Pollutant Release and Transfer Register Regulation (EC) No 166/2006. Database ver. 8.0. <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/industrial-reporting-under-the-industrial-7>
- European Commission - European IPPC Bureau. (2017, December). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (EIPPCB). https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/JRC_107769_LCPBref_2017.pdf
- European Commission. (2021). Commission Implementing Decision (EU) 2021/2326 of 30 November 2021 establishing best available techniques (BAT) conclusions, under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council, for large combustion plants (notified under document C (2021) 8580) (Text with EEA relevance). Official Journal of the European Union. L 469/1. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32021D2326>
- European Commission. (2022a). The EU and International Partners launch ground-breaking Just Energy Transition Partnership with Indonesia. Press release. 15 November 2022. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_6926
- European Commission. (2022b). Joint Statement by the Government of the Republic of Indonesia and International Partners Group members on the Indonesia Just Energy Transition Plan. Statement. 15 November 2022. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/statement_22_6892
- European Commission. (2023). Country Risk Profile. DRMKC - INFORM. <https://drmkc.jrc.ec.europa.eu/inform-index/INFORM-Risk/Country-Risk-Profile>
- European External Action Service (EEAS). (2021). Delegation of the European Union to Indonesia and Brunei Darussalam. Transparent pollution control for Indonesia: "We want to see blue skies again". (Published on April 14, 2021). <https://www.eeas.europa.eu/delegations/indonesia/transparent-pollution-control-indonesia-%E2%80%9Cwe->

want-see-blue-skies-again%E2%80%9D%E2%80%A8%E2%80%A8_en?s=168

- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D. and Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics* 4(2), RG2004. <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>
- Ferrari, N., Mancuso, L. Burnard, K. and Consonni, F. (2019). Effects of plant location on cost of CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 90. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102783>.
- Fiscal Policy Agency, Ministry of Finance, Republic of Indonesia. (2022). CIF Accelerating Coal Transition (ACT): Indonesia Country Investment Plan (IP). DRAFT FOR PUBLIC CONSULTATION by the Government of Indonesia. Ministry of Finance, Republic of Indonesia. (Published on October 3, 2022). https://fiskal.kemenkeu.go.id/docs/CIF-INDONESIA_ACT_IP-Proposal.pdf
- Global Burden of Disease (2020). Global Burden of 87 Risk Factors in 204 Countries and Territories, 1990–2019: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet*, 396 (10258): P1223-1249. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2)
- Global Energy Monitor (GEM). (2022). Dashboard. (Published on February 8, 2022). <https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/dashboard/>
- Global Energy Monitor (GEM). (2023). Global Coal Plant Tracker. <https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/>
- Greenpeace Indonesia. (2015). Human Cost of Coal Power. <https://www.greenpeace.org/static/planet4-indonesia-stateless/2019/02/676f10e5-676f10e5-full-report-human-cost-of-coal-power.pdf>
- Huangfu, P. and Atkinson, R. (2020). Long-Term Exposure to NO₂ and O₃ and All-Cause and Respiratory Mortality: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environment International*, 144, 2020, 105998. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105998>
- International Energy Agency (IEA). (2022). Age and technology of existing coal power fleet in Indonesia and FIDs – Charts – Data & statistics. (Published on October 26, 2022). <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/age-and-technology-of-existing-coal-power-fleet-in-indonesia-and-fids>
- Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA). (2021a). Indonesia wants to go greener but PLN is stuck with excess capacity from coal-fired power plants. (Published on November 1, 2021). <https://ieefa.org/resources/indonesia-wants-go-greener-pln-stuck-excess-capacity-coal-fired-power-plants>
- Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA). (2021b). Indonesia's biomass cofiring bet: Beware of implementation risks. (Published on February 8, 2021). <https://ieefa.org/resources/indonesias-biomass-cofiring-bet-beware-implementation-risks>
- Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA). (2018). Decision Time at Poland's PGE; Why a High-Risk, Fossil-Heavy Strategy Doesn't Add Up. (Published in June, 2018). https://ieefa.org/wp-content/uploads/2018/06/Decision-Time-at-Polands-PGE_June-2018.pdf
- Institute for Essential Services Reform (IESR). (2022a). Financing Indonesia's coal phase-out. (Published in August 2022). <https://iesr.or.id/en/pustaka/financing-indonesias-coal-phase-out>
- Institute for Essential Services Reform (IESR). (2022b). Indonesia Energy Transition Outlook 2023: Tracking Progress of Energy Transition in Indonesia: Pursuing Energy Security in the Time of Transition. (Published in December, 2022).

https://iesr.or.id/wp-content/uploads/2022/12/Indonesia-Energy-Transition-Outlook_2023.pdf

Institute for Essential Services Reform (IESR). (2019). Coal exports by country 2021. Medium-quality coal with calorific value of 5,100-6,100 kcal/kg, low-quality coal with calorific value < 5,100 kcal/kg. Indonesia's Coal Dynamics: Toward A Just Energy Transition. https://iesr.or.id/wp-content/uploads/2019/08/Indonesias-Coal-Dynamics_Toward-a-Just-Energy-Transition.pdf

Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME) (2020). GBD Results. <http://ghdx.healthdata.org/gbd-results-tool>

IQAir. (2023). Air Quality in Indonesia. <https://www.iqair.com/indonesia>

IQAir. (2022). World Air Quality. IQAir. <https://www.iqair.com/world-air-quality-report>

Kementerian PPN/Bappenas. (2019). Visi Indonesia 2045. Ringkasan Eksekutif. https://perpustakaan.bappenas.go.id/e-library/file_upload/koleksi/migrasi-data-publikasi/file/Policy_Paper/Ringkasan%20Eksekutif%20Visi%20Indonesia%202045_Final.pdf

Kennedy, S., Tao, J. and Lee, J. (2023). Japan's toxic narrative on ammonia. Transition Zero. (Published on April 13, 2023). <https://www.transitionzero.org/insights/japans-toxic-narrative-on-ammonia-cofiring>

Khreis, H., Kelly, C., Tate, J., Parslow, R., Lucas, K. and Nieuwenhuijsen, M. (2017). Exposure to Traffic-Related Air Pollution and Risk of Development of Childhood Asthma: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environmental International*, 100: 1-31. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.11.012>

Kopitz, S., Jacob, D., Sulprizio, M., Myllyvirta, L. and Reid, C. (2017). Burden of Disease from Rising Coal-Fired Power Plant Emissions in Southeast Asia. *Environmental Science & Technology*. 2017 51 (3), 1467-147. <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.6b03731>

Larkin, A., Geddes, J. A., Martin, R. V., Xiao, Q., Liu, Y., Marshall, J. D., Brauer, M. and Hystad, P. (2017). Global Land Use Regression Model for Nitrogen Dioxide Air Pollution. *Environmental Science & Technology*, 51 (12): 6957-6964. <https://dx.doi.org/10.1021/acs.est.7b01148>

Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Burnett, R., Haines, A. and Ramanathan, V. (2019). Effects of Fossil Fuel and Total Anthropogenic Emission Removal on Public Health and Climate. *Proceedings of the National Academies of Science*, 116 (15): 7192-7197. <https://doi.org/10.1073/pnas.1819989116>

McKinsey & Company. (2020). Ten ways to boost Indonesia's energy sector in a postpandemic world. (Published on December 16, 2020). <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/ten-ways-to-boost-indonesias-energy-sector-in-a-postpandemic-world>

Masyarakat Energi Biomassa Indonesia - Indonesian Biomass Energy Society (MEBI). (2023). Perkembangan Cofiring Biomassa pada PLTU. (Published on February 7, 2023). <https://mebi.or.id/news/perkembangan-cofiring-biomassa-pada-pltu/>

Ministry of Energy and Mineral Resources (MEMR). (2021). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030. Keputusan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. Nomor: 188.K/HK.02/MEM.L/2021. https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/38622-ruptl-pln-2021-2030.pdf

Ministry of Energy and Mineral Resources (MEMR). (2022a). Perpres 112 Tahun 2022 Diteken, era Pembangkit Listrik Rendah Emisi Dimulai. (Published on 23 September, 2022.) <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/perpres-112-tahun-2022-diteken-era-pembangkit-listrik-rendah-emisi-dimulai>

- Ministry of Energy and Mineral Resources (MEMR). (2022b). ETM Country Platform, Upaya Akselerasi Transisi Energi. Republic of Indonesia. Siaran Pers, 460.Pers/04/SJI/2022. (Published on November 16, 2022). <https://www.esdm.go.id/en/media-center/news-archives/etm-country-platform-upaya-akselerasi-transisi-energi>
- Ministry of Energy and Mineral Resources (MEMR). (2023a). Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2022. <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-handbook-of-energy-and-economic-statistics-of-indonesia-2022.pdf>
- Ministry of Energy and Mineral Resources. (MEMR). (2023b). Capaian Kinerja ESDM 2022 Dan Target 2023. Online Drive ESDM. <https://drive.esdm.go.id/wl/?id=0wkgH9GoznLHQm5AZNfCf76VygsJ1dy>
- Ministry of Environment and Forestry. (2023). WebGIS SISPEK. PORTAL DIREKTORAT PENGENDALIAN PENCEMARAN UDARA DITJEN PPKL KLHK. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (Accessed on May 29, 2023). <https://ditppu.menlhk.go.id/sispek/display>
- Myllyvirta, L. and Kelly, J. (2023). Air quality implications of coal-ammonia co-firing. https://energyandcleanair.org/wp/wp-content/uploads/2023/05/CREA_Air-quality-implications-of-coal-ammonia-co-firing_Briefing_2023_EN_FINAL.pdf
- Myllyvirta, L. (2020). Quantifying the Economic Costs of Air Pollution from Fossil Fuels. Centre for Research on Energy and Clean Air. 2020. <https://energyandcleanair.org/publications/costs-of-air-pollution-from-fossil-fuels/>
- National Bureau of Asian Research (NBR). (2018). Air pollution in Indonesia. (2018, August 12). <https://www.nbr.org/publication/air-pollution-in-indonesia/>
- Nexus3 Foundation. (2021). NGOs: Governments Need New Tools To Control Air Pollution Urgently. (Published on June 29, 2021). <https://www.nexus3foundation.org/2021/06/29/ngos-governments-need-new-tools-to-control-air-pollution-urgently/>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2012). Mortality Risk Valuation in Environment, Health and Transport Policies. <https://doi.org/10.1787/9789264130807-en>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2021). RUPTL 2021-30: PLN steps up ambitions to accelerate clean energy investments in Indonesia. (Published on November 16, 2021) <https://www.oecd.org/environment/cc/cefim/indonesia/RUPTL-2021-30-PLN-steps-up-ambitions-to-accelerate-clean-energy-investments-in-Indonesia.pdf>
- Punyawadee, V., Pothisuwan, R., Winichaikule, N., and Satienperakul, K. (2008). Costs and Benefits of Flue Gas Desulfurization for Pollution Control at the Mae Moh Power Plant, Thailand. ASEAN Economic Bulletin, 25(1), 99–112. <http://www.jstor.org/stable/41231498>
- Perusahaan Listrik Negara (PLN). (2022). Statistik 2021. Listrik untuk Kehidupan yang Lebih Baik - PT PLN (Persero). (Published in June, 2022). <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2022/08/Statistik-PLN-2021-29-7-22-Final.pdf>
- Perusahaan Listrik Negara (PLN). (2023). Peluang & Tantangan Pengadaan Biomassa sebagai Energi Primer Pembangkit Listrik yang Berkelanjutan. MEBI – Masyarakat Energi Biomassa Indonesia. (Published on February 23, 2023). https://mebi.or.id/wp-content/uploads/2023/02/Paparan-Webinar-IPB-PLN-EPI_20230225.pdf
- Prasetyo, A., Suarez, I., Parapat, J. and Amali, Z. (2023). Ambiguities versus ambition: A review of Indonesia's energy transition policy. Centre for Research on Energy and Clean Air; Trend Asia. (Published on April 3, 2023). <https://energyandcleanair.org/publication/ambiguities-versus-ambition-a-review-of-indonesias-energy-transition-policy/>

- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y., Chuang, H., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Peña Mendez, M., van den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M. and Becker, E. (2014). The NCEP Climate Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, Vol. 27 (6): 2185-2208. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>
- Sapkota, A., Chelikowsky, A., Nachman, K., Cohen, A. and Ritz, B. (2012). Exposure to Particulate Matter and Adverse Birth Outcomes: A Comprehensive Review and Meta-Analysis. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 5: 369-381. <https://doi.org/10.1007/s11869-010-0106-3>
- Simon, J. (2023). Despite billions to get off coal, why is Indonesia still building new coal plants? Npr, climate. (Published on February 5, 2023). <https://www.npr.org/2023/02/05/1152823939/despite-billions-to-get-off-coal-why-is-indonesia-still-building-new-coal-plants>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D., Duda, M. G. and Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). University Corporation for Atmospheric Research. <https://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes:500>
- Srinivasan S., Roshna N., Guttikunda S., Kanudia A., Saif S. and Asundi J.(2018). Benefit Cost Analysis of Emission Standards for Coal-based Thermal Power Plants in India. (CSTEP-Report-2018-06). <https://shaktifoundation.in/wp-content/uploads/2018/07/Benefit-cost-analysis-of-emission-standards-for-coal-based-thermal-power-plants-in-India-1.pdf>
- Sun, J., Schreifels, J., Wang, J., Fu, J. and Wang, S. (2014). Cost estimate of multi-pollutant abatement from the power sector in the Yangtze River Delta region of China. *Energy Policy*, Volume 69, 2014. Pages 478-488. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.02.007>.
- Trasande, L., Malecha, P. and Attina, T. (2016). Particulate Matter Exposure and Preterm Birth: Estimates of U.S. Attributable Burden and Economic Costs. *Environmental Health Perspectives*, 124 (12). <https://doi.org/10.1289/ehp.1510810>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2017). Toolkit for Identification and Quantification of Mercury Releases. UN Environment Chemicals Branch, Geneva, Switzerland. <https://www.unep.org/globalmercurypartnership/resources/tool/mercury-inventory-toolkit>
- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2022). Form EIA-860, Annual Electric Generator Report. (Published on September 22, 2022). Table 9.4. https://www.eia.gov/electricity/annual/html/epa_09_04.html
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2017). IPM Model – Updates to Cost and Performance for APC Technologies SNCR Cost Development Methodology. (Published in January, 2017). https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-05/documents/attachment_5-4_sncr_cost_development_methodology.pdf
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2019). Selective Catalytic Reduction. https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-12/documents/scrcostmanualchapter7thedition_2016revisions2017.pdf
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2003). Air Pollution Control Technology Fact Sheet. <https://www3.epa.gov/ttnatc1/dir1/fwespwpi.pdf>
- U.S. Geological Survey (USGS). (2019). World Coal Quality Inventory. U.S. Department of the Interior. <https://www.usgs.gov/centers/geology%2C-energy-%26amp%3Bamp%3B-minerals-science-center/science/world-coal-quality-inventory>
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2021). Indonesia Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Indonesia_LTS-LCCR_2021.pdf

- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2022). Enhanced Nationally Determined Contribution of the Republic of Indonesia. (Published on September 23, 2022). https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-09/23.09.2022_Enhanced%20NDC%20Indonesia.pdf
- Van Donkelaar, A., Hammer, M. S., Bindle, L., Brauer, M., Brook, J. R., Garay, M. J., Hsu, N. C., Kalashnikova, O. V., Kahn, R. A., Lee, C., Levy, R. C., Lyapustin, A., Sayer, A. M. and Martin, R. V. (2021). Monthly Global Estimates of Fine Particulate Matter and Their Uncertainty. *Environmental Science & Technology*, 55 (22): 15287-15300. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c05309>
- Workman, D. (2022). Coal exports by country 2021. World's Top Exports — Trade metrics that inspire global thinking. <https://www.worldstopexports.com/coal-exports-country/>
- World Bank Open Data. (2023a). GDP growth (annual %) – Indonesia. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG?end=2021&locations=ID&start=1961&view=chart>
- World Bank Open Data. (2023b). Urban population (% of total population) – Indonesia. <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS?locations=ID>
- World Health Organization (WHO). (2021). WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>
- Zhang, C. and Liu, M. (2014). Cost and Benefit Analysis of Desulfurization System in Power Plant. *TELKOMNIKA*, Vol.12, No.1, March 2014, pp. 33-46. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v12i1.1259>

Lampiran

Tabel L1. Kematian kumulatif dan total biaya kesehatan untuk setiap skenario

Skenario	Jumlah Kematian*	Biaya, miliar dolar AS	Biaya, triliun rupiah
1,5 derajat dengan APC	115.800 (71.600 – 180.700)	81,4 (50,0 – 126,5)	1.208,2 (742,6 – 1.877,8)
1,5 derajat	121.000 (74.940 – 188.400)	85,0 (52,3 – 131,9)	1.262,6 (777,3 – 1.985,8)
1,5 derajat, mengecualikan <i>captive</i>	147.800 (91.400 – 231.000)	103,6 (63,7 – 161,2)	1.539,1 (946,0 – 2.394,1)
PERPRES 112/2022 dengan APC	174.200 (107.200 – 273.600)	122,1 (74,7 – 191,1)	1.813,2 (1.110,0 – 2.837,5)
PERPRES 112/2022	302.800 (189.000 – 468.000)	212,5 (131,5 – 327,9)	3.156,2 (1.953,5 – 4.868,8)

*interval kepercayaan 95% dalam tanda kurung

Tabel L2. Dampak kesehatan kumulatif berdasarkan skenario

Outcome	Nilai	Skenario				
		1,5 derajat dengan APC	1,5 derajat	1,5 derajat, mengecualikan <i>captive</i>	PERPRES 112/2022	PERPRES 112/2022 dengan APC
Absen kerja (hari cuti sakit)	tengah	46.791.822	48.831.083	55.968.109	114.352.550	67.204.753
	rendah	39.819.025	41.554.40	47.627.885	97.312.027	57.190.074
	tinggi	56.713.477	156.054.396	64.247.163	131.268.092	77.145.981
Kasus asma baru pada anak	tengah	68.857	70.689	82.869	146.901	101.438
	rendah	15.826	16.248	19.048	33.765	23.316
	tinggi	150.010	154.004	180.534	320.036	220.992
Jumlah anak yang menderita asma akibat paparan polusi	tengah	294.650	302.495	354.636	628.652	434.079
	rendah	78.711	80.805	94.736	167.929	115.958
	tinggi	598.326	614.265	720.132	1.276.610	881.452
Kunjungan ke UGD karena asma	tengah	103.638	107.494	120.091	240.323	146.453
	rendah	62.304	64.635	72.263	145.096	88.209
	tinggi	144.532	149.898	167.411	334.555	204.080
Kelahiran dengan berat rendah	tengah	32.997	34.273	38.396	73.539	45.590
	rendah	10.267	10.664	11.947	22.882	88.209
	tinggi	57.103	59.310	66.446	127.261	204.080

Outcome	Nilai	Skenario				
		1,5 derajat dengan APC	1,5 derajat	1,5 derajat, mengecualikan <i>captive</i>	PERPRES 112/2022	PERPRES 112/2022 dengan APC
Kelahiran prematur	tengah	48.841	50.514	55.753	107.180	67.458
	rendah	23.729	24.542	27.086	52.072	32.774
	tinggi	51.844	53.621	59.181	113.770	71.607
Tahun-tahun hidup yang hilang						
Semua penyebab dari paparan NO ₂	tengah	628.415	645.845	795.756	1.521.544	997.891
	rendah	268.147	275.579	295.555	649.202	425.799
	tinggi	1.445.900	1.486.038	1.593.681	3.501.181	2.296.049
Semua penyebab dari paparan SO ₂	tengah	393.978	403.125	501.943	974.158	567.595
	rendah	233.632	239.054	242.012	577.673	336.588
	tinggi	593.450	607.235	614.736	1.467.413	854.973
Tahun-tahun hidup dengan disabilitas						
Penyakit paru obstruktif kronis	tengah	39.202	41.169	48.772	103.933	58.159
	rendah	14.243	14.957	14.515	37.759	21.131
	tinggi	73.000	76.663	74.394	193.546	108.302
Diabetes	tengah	24.407	27.341	40.479	82.491	37.501
	rendah	4.638	4.963	4.789	13.375	7.022
	tinggi	56.578	63.993	60.287	205.985	89.059
Stroke	tengah	83.273	87.160	101.923	217.926	123.320
	rendah	26.850	28.104	27.326	70.272	39.763
	tinggi	170.836	178.807	173.866	447.049	854.973

Tabel L3. Sepuluh (10) provinsi yang paling terdampak oleh emisi PLTU batubara dan 10 provinsi yang paling bertanggung jawab atas jumlah kematian per tahun terbanyak

Provinsi	Kematian di provinsi	Kematian yang disebabkan oleh provinsi
Jawa Barat	4.135 (2.566 – 6.438)	2.510 (1.524 – 3.987)
Banten	2.153 (1.308 – 3.406)	3.755 (2.304 – 5.905)
Jawa Tengah	1.761 (1.090 – 2.749)	3.069 (1.932 – 4.698)
Jakarta Raya	1.643 (991 – 2.634)	593 (360 – 944)
Jawa Timur	1.013 (611 – 1.642)	1.374 (842 – 2.180)
Lampung	636 (408 – 947)	90 (52 – 151)
Sumatera Utara	356 (224 – 537)	390 (246 – 588)
Sumatera Selatan	254 (163 – 380)	283 (179 – 434)
Sulawesi Tenggara	241 (159 – 344)	226 (149 – 323)
Sulawesi Selatan	241 (158 – 349)	73 (48 – 107)
Jambi	107 (69 – 159)	187 (119 – 284)

Tabel L4. Informasi biaya yang disusun untuk berbagai teknologi pengendalian polutan udara

Negara	Polutan yang Dikendalikan	Teknologi Pengendalian	Biaya modal, asli,	Biaya modal, ditransfer ke Indonesia		Biaya O&M, asli,	Biaya O&M, ditransfer ke Indonesia		Referensi
			US\$/kW (2022)	US\$/kW (2022)	Rp/W (2022)	US\$/MWh (2022)	US\$/kW (2022)	Rp/W (2022)	
Amerika Serikat	NO _x	SCR	148	130	2.193				EPA (2019)
Amerika Serikat	NO _x	SNCR	26	23	380	1,2	1,0	17,4	EPA (2017)
Amerika Serikat	PM	ESP	26	18	380	0,3	0,2	4,2	EPA (2003)
India	SO ₂	FGD	101	62	1.505	1,4	1,0	21,5	Cropper dkk. (2019)
India	SO ₂	FGD	75	51	1.119				Srinivasan dkk. (2018)
India	SO ₂	FGD	53	36	784				Srinivasan dkk. (2018)
Cina	SO ₂	FGD	51	32	760	2.2	1.5	32.2	Zhang & Liu (2014)
Cina	SO ₂	FGD	37	21	544	1.5	1.0	21.8	Sun dkk. (2014)
Amerika Serikat	SO ₂	FGD	253	133	3.764	2.6	1.7	39.1	EIA (2022)
Thailand	SO ₂	FGD	49	36	729	0.5	0.5	7.7	Punyawadee dkk. (2008)
Polandia	SO ₂	FGD	203	109	3.021				IEEFA (2018)
Polandia	SO ₂	FGD	209	112	3.104				IEEFA (2018)
Indonesia	SO ₂	FGD	87	71	1.299				Ferrari dkk. (2019)
Indonesia	NO _x	SCR	63	51	933				Ferrari dkk. (2019)

Tabel L5. Perkiraan total biaya pengendalian polutan udara untuk Indonesia

Teknologi Pengendalian	Polutan yang Dikendalikan	Biaya modal, US\$/kW (2022)	Biaya modal, Rp/W (2022)	Biaya O&M, US\$/MWh (2022)	Biaya O&M, Rp/kWh (2022)
FGD (batu kapur)	SO ₂	66	977	1,15	17,06
SCR	NO _x	55	819	0,83	12,34
SNCR	NO _x	23	3.345	0,83	12,34
ESP	PM	18	275	0,21	3,06
Total biaya tambahan untuk memenuhi standar yang lebih ketat bagi pembangkit listrik yang baru dibangun					
	semua	73	1.081	0,57	8,46
Total biaya tambahan untuk <i>retrofit</i>					
	semua	148	2.201	1,98	29,40

