

Informasi Tambahan

untuk analisis CREA, “Angka kematian akibat polusi udara di Indonesia melonjak sebesar 42% pada bulan September di tengah keengganan pemerintah menetapkan karhutla sebagai bencana nasional”

Metodologi

Apa yang diestimasi

Laporan ringkas ini mengestimasi jumlah kematian akibat **paparan jangka pendek** terhadap debu partikulat halus (PM2.5) ambien di Indonesia selama bulan Agustus 2026, yang dipisahkan menurut komponen karhutla dan non-karhutla di tingkat provinsi.

Data ini mencerminkan **kasus kematian akut**: fungsi konsentrasi-respons jangka pendek yang digunakan mencatat tingkat kematian yang terjadi dalam rentang jeda dua hingga tiga hari pasca paparan. Landasan perhitungannya mengacu pada kematian non-kecelakaan (alami), yaitu mengecualikan kematian akibat kecelakaan maupun tindak kekerasan.

Angka-angka ini harus dibedakan dari beban kesehatan kronis akibat asap kebakaran, di mana paparan musiman yang berulang diperkirakan memicu 33.000–44.000 kematian per tahun (Hein et al. 2022; Kiely et al. 2020). Hal ini berarti dalam jangka panjang, paparan polusi udara selama bulan Agustus akan berdampak pada jumlah kematian yang jauh lebih tinggi sebagai efek yang tertunda (*delayed effect*).

Pemisahan ini mengikuti konvensi yang ditetapkan oleh Johnston et al. (2012): penggunaan fungsi jangka pendek untuk mengukur paparan episodik dan fungsi jangka panjang untuk paparan kronis.

Paparan

Kami menggunakan data PM_{2.5} permukaan harian dari produk global Tracking Air Pollution (TAP) dengan resolusi 0,1° (~11 km), yang merupakan gabungan dari pemantauan di darat, kedalaman optik aerosol satelit, dan pemodelan transportasi kimia (Geng et al. 2021). TAP menerbitkan total PM_{2.5} dan saluran karhutla lanskap dari analisis yang sama pada grid yang sama.

Setelah divalidasi terhadap monitor darat Indonesia, TAP memprediksi PM_{2.5} lebih rendah sekitar setengahnya di seluruh provinsi yang dilanda karhutla (median -53%) di bulan Agustus 2026. SILAM, model kimia-transport independen yang dibangun berdasarkan inventaris emisi karhutla yang berbeda, juga meleset ke arah yang sama dengan margin serupa (-61%).

Kami mengoreksi peta yang dipublikasikan menggunakan faktor perkalian yang disesuaikan dengan regresi tertimbang geografis pada 186 monitor kelas referensi di 118 kota dalam kurun waktu 30 hari terakhir. Kami mengadopsi *bandwidth* adaptif yang mencakup lima instrumen terdekat — dan *taper* yang mengembalikan bidang yang dipublikasikan lebih dari 250 km dari monitor manapun. Saluran karhutla dan non-karhutla disesuaikan secara terpisah, sehingga rasio karhutla/non-karhutla diukur dan bukan diteruskan dari TAP.

Data observasi PM_{2.5} permukaan tanah diakses melalui kompilasi data yang bersumber dari jaringan pemantauan Kementerian Lingkungan Hidup, Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), serta Dinas Lingkungan Hidup tingkat provinsi.

Permukaan konsentrasi yang telah dikoreksi kemudian dibobot dengan grid dari Gridded Population of the World v4.11 (tahun 2020, resolusi 1 km), dengan setiap provinsi diskalakan agar jumlahnya sesuai dengan menggunakan estimasi penduduk pertengahan tahun 2025 dari Badan Pusat Statistik (BPS), yaitu 284 juta jiwa secara nasional.

Fungsi konsentrasi-respons

Partikel api karhutla dan partikel non-karhutla diasumsikan memiliki tingkat toksisitas yang berbeda. Dua koefisien digunakan, masing-masing diterapkan pada metrik paparan yang digunakan untuk menghasilkan estimasi.

Diterapkan pada	Hasil	RR per 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Metrik paparan	Sumber
Karhutla (api)	Semua penyebab	1.017 (1.013–1.020)	Rata-rata 3 hari, lag 0–2	Chen et al.. (2021) <i>Angka-angka Asia Tenggara</i>
	Kardiovaskular	1.011 (1.005–1.017)	Rata-rata 3 hari, lag 0–2	Chen et al. (2021) <i>Angka-angka Asia Tenggara</i>
	Pernapasan	1.016 (1.008–1.023)	Rata-rata 3 hari, lag 0–2	Chen et al.. (2021) <i>Angka-angka Asia Tenggara</i>
Non-karhutla (non-api)	Alami	1,0068 (1,0059–1,0077)	Rata-rata 2 hari, lag 0–1	WHO HRAPIE-2 (2025) / Liu et al. (2019)
	Kardiovaskular	1,0055 (1,0045–1,0066)	Rata-rata 2 hari, lag 0–1	Liu et al.. (2019)
	Pernapasan	1,0074 (1,0053–1,0095)	Rata-rata 2 hari, lag 0–1	Liu et al.. (2019)

Perhitungan

Untuk setiap *grid cell* g dan hari d :

- $E(g,d) = \beta_{\text{api}} \cdot MA_3(C_{\text{api}}) + \beta_{\text{non-api}} \cdot MA_2(C_{\text{non-api}})$
- $\beta = \ln(RR)/10$
- $AF(g,d) = 1 - \exp(-E(g,d))$

Fraksi yang dapat diatribusikan tertimbang populasi provinsi dan dikalikan dengan jumlah kematian dasar tahunan absolut provinsi tersebut:

- $Kematian(\text{prov},d) = AF_{\text{prov}}(d) \cdot Kematian\ Dasar(\text{prov}) / 365$

Angka kematian dasar

Angka kematian di tingkat provinsi diambil dari Studi Beban Penyakit Global 2023 (GBD 2025): jumlah kematian, semua umur, kedua jenis kelamin, subnasional Indonesia. Hasil utama adalah mortalitas alami (non-eksternal), dihitung sebagai semua penyebab dikurangi cedera, yang sesuai dengan apa yang diukur oleh fungsi konsentrasi-respons. Mortalitas pernapasan adalah gabungan dari penyakit pernapasan kronis dan infeksi saluran pernapasan bawah. Interval kepercayaan 95% mencerminkan tingkat ketidakpastian dalam koefisien konsentrasi-respons untuk paparan kebakaran maupun non-kebakaran yang telah dipublikasikan.

Perbandingan dengan penelitian sebelumnya

Crippa et al. (2016) memperkirakan 11.880 kematian berlebih di seluruh Indonesia, Malaysia, dan Singapura selama September–Oktober 2015 — sekitar 195 per hari — menggunakan metode jangka pendek yang sama. Studi ini mencatat sekitar 120 kasus per hari pada Agustus dan melonjak hingga 177 kasus per hari pada September untuk wilayah Indonesia saja.

Pengakuan data

Data paparan dari produk global Tracking Air Pollution (TAP), Universitas Tsinghua, digunakan berdasarkan lisensi penelitian non-komersialnya. Data mortalitas dari the Institute for Health Metrics and Evaluation (GBD 2023). Pengukuran *ground measurements* diambil dari *air quality tracker* CREA Indonesia, yang mengkompilasi data dari 171 stasiun pemantau darat di Indonesia: jaringan nasional Kementerian Lingkungan Hidup (133), Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (26), serta Dinas Lingkungan Hidup Provinsi (12).

Referensi

Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University (2018). Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4.11): Population Count, UN WPP-Adjusted. NASA SEDAC.

Chen G, Guo Y, Yue X, et al. (2021). Mortality risk attributable to wildfire-related PM_{2.5} pollution: a global time series study in 749 locations. *The Lancet Planetary Health* 5:e579–e587.

Crippa P, Castruccio S, Archer-Nicholls S, et al. (2016). Population exposure to hazardous air quality due to the 2015 fires in Equatorial Asia. *Scientific Reports* 6:37074.

Geng G, Xiao Q, Liu S, et al. (2021). Tracking air pollution in China: near real-time PM_{2.5} retrievals from multisource data fusion. *Environmental Science & Technology* 55:12106–12115.

GADM Global Administrative Areas (2022). GADM database of Global Administrative Areas, version 4.1.

Global Burden of Disease Collaborative Network (2025). Global Burden of Disease Study 2023 (GBD 2023) Results. Seattle: Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME). <https://vizhub.healthdata.org/gbd-results/> Cited in text as GBD 2023.

Hein L, Spadaro JV, Ostro B, et al. (2022). The health impacts of Indonesian peatland fires. *Environmental Health* 21:62.

Johnston FH, Henderson SB, Chen Y, et al. (2012). Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. *Environmental Health Perspectives* 120:695–701.

Kiely L, Spracklen DV, Wiedinmyer C, et al. (2019). New estimate of particulate emissions from Indonesian peat fires in 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19:11105–11121.

Kiely L, Spracklen DV, Wiedinmyer C, et al. (2020). Air quality and health impacts of vegetation and peat fires in Equatorial Asia during 2004–2015. *Environmental Research Letters* 15:094054.

Liu C, Chen R, Sera F, et al. (2019). Ambient particulate air pollution and daily mortality in 652 cities. *New England Journal of Medicine* 381:705–715.

Sofiev M, Vira J, Kouznetsov R, et al. (2015). Construction of the SILAM Eulerian atmospheric dispersion model based on the advection algorithm of Michael Galperin. *Geoscientific Model Development* 8:3497–3522.

World Health Organization Regional Office for Europe (2025). Health risks of air pollution in Europe: HRAPIE-2 project — updated guidance on concentration–response functions. Copenhagen: WHO. Cited in text as WHO HRAPIE-2.

Lampiran

Tabel A1. Angka kematian akibat PM2.5 di Indonesia pada Agustus 2026

Provinsi	Angka kematian	— karhutla	— non-karhutla	Persentase – karhutla	Kematian per 100.000	— karhutla per 100.000
Jawa Barat	518	38	480	7%	1.01	0.07
Jawa Tengah	421	41	380	10%	1.07	0.10
Jawa Timur	352	64	287	18%	0.82	0.15
Kalimantan Barat	334	331	4	99%	5.69	5.63
Sumatra Selatan	266	167	99	63%	3.02	1.90
Kalimantan Tengah	172	169	3	98%	6.00	5.90
Riau	154	121	34	78%	2.33	1.83
Sumatra Utara	151	41	110	27%	0.96	0.26
Jakarta	144	9	135	6%	1.29	0.08
Banten	139	9	130	7%	1.11	0.07
Kalimantan Selatan	137	128	10	93%	3.31	3.07
Lampung	132	47	85	36%	1.37	0.49
Sumatra Barat	112	93	19	83%	1.88	1.56
Jambi	92	67	26	72%	2.50	1.80
Sulawesi Selatan	81	16	65	20%	0.83	0.16
Kalimantan Timur	60	51	10	84%	1.48	1.25
Nusa Tenggara Barat	60	49	10	83%	1.07	0.89
Papua	56	47	8	85%	1.04	0.89
Yogyakarta	45	5	41	10%	1.17	0.12
Bali	43	36	7	85%	0.92	0.78
Aceh	41	6	35	15%	0.75	0.11
Bengkulu	39	15	25	37%	1.85	0.69
Nusa Tenggara Timur	36	20	16	56%	0.64	0.35
Kepulauan Riau	24	16	8	65%	0.99	0.65
Sulawesi Tengah	21	12	9	58%	0.67	0.39
Kepulauan Bangka-Belitung	19	11	8	57%	1.24	0.70
Maluku	16	13	2	85%	0.77	0.65
Sulawesi Tenggara	14	5	9	35%	0.51	0.18
Sulawesi Utara	14	8	5	62%	0.48	0.30
Sulawesi Barat	10	5	5	47%	0.68	0.32
Kalimantan Utara	10	7	2	74%	1.27	0.95
Papua Barat	9	8	2	84%	0.71	0.60
Maluku Utara	8	6	1	85%	0.55	0.46
Gorontalo	5	2	3	43%	0.43	0.18
INDONESIA	3,735	1,662	2,073	45%	1.30	0.58

Tabel A2. Angka kematian akibat PM2.5 di Indonesia pada September 2026

Provinsi	Angka kematian	— karhutla	— non-karhutla	Persentase — karhutla	Kematian per 100.000	—karhutla per 100.000
Kalimantan Barat	554	549	5	99%	9.44	9.35
Jawa Barat	470	61	409	13%	0.92	0.12
Sumatra Selatan	449	388	60	87%	5.09	4.40
Kalimantan Tengah	405	401	4	99%	14.12	13.98
Jawa Tengah	401	66	336	16%	1.02	0.17
Kalimantan Selatan	395	389	6	99%	9.51	9.38
East Jawa	375	103	272	27%	0.87	0.24
Riau	289	266	22	92%	4.37	4.03
Sumatra Barat	282	269	13	96%	4.74	4.53
Jambi	208	192	16	92%	5.61	5.18
Lampung	189	132	57	70%	1.96	1.37
Sumatra Utara	179	96	83	53%	1.14	0.61
Jakarta	143	18	125	13%	1.28	0.16
Banten	140	16	125	11%	1.12	0.12
Kalimantan Timur	116	109	7	94%	2.87	2.69
Sulawesi Selatan	112	63	48	57%	1.15	0.65
Papua	72	65	7	90%	1.35	1.21
Bengkulu	63	46	17	73%	2.97	2.18
Nusa Tenggara Barat	53	42	11	80%	0.95	0.76
Aceh	48	18	30	38%	0.88	0.33
Kepulauan Riau	45	40	5	89%	1.84	1.64
Yogyakarta	43	8	35	18%	1.10	0.20
Sulawesi Tengah	35	27	8	77%	1.11	0.85
Nusa Tenggara Timur	35	21	13	61%	0.62	0.38
Bali	33	25	8	76%	0.71	0.54
Sulawesi Utara	31	29	3	92%	1.10	1.01
Kepulauan Bangka-Belitung	30	24	6	80%	1.91	1.53
Maluku	25	23	2	93%	1.23	1.15
Sulawesi Tenggara	21	16	6	74%	0.76	0.56
Papua Barat	20	18	2	91%	1.54	1.39
Sulawesi Barat	16	11	5	70%	1.07	0.75
Kalimantan Utara	14	12	2	85%	1.79	1.51
Gorontalo	10	9	1	90%	0.82	0.74
Maluku Utara	10	9	1	87%	0.72	0.62
INDONESIA	5,310	3,560	1,750	67%	1.85	1.24