

KAJIAN NASIONAL *COST OF INACTION* DALAM PENANGGULANGAN PENCEMARAN UDARA DI INDONESIA

ITB, IIASA, KemenKes dan UNEP





This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License.

For any commercial use please contact: permissions@iiasa.ac.at

Available at: [[link to publication](#)]

First published in June 2023.

The International Institute for Applied Systems Analysis and the United Nations Environment Programme have no responsibility for the persistence or accuracy of URLs for external or third-party internet web sites referred to in this publication and do not guarantee that any content on such web sites is, or will remain, accurate or appropriate.

The views or opinions expressed herein do not necessarily represent those of the International Institute for Applied Systems Analysis, its National and Regional Member Organizations, or the United Nations Environment Programme, or any other organizations supporting their work.

ACKNOWLEDGEMENTS

Authors:

Gregor Kiesewetter (*IIASA*); Zbigniew Klimont (*IIASA*); Muye Ru (*Earth Institute, Columbia University*); Jessica Slater (*IIASA*)

Reviewers:

Tom Bannister (*UNEP*); Nathan Borgford-Parnell (*Climate and Clean Air Coalition*); Savitri Garivait (*King Mongkut's University of Technology Thonburi*); Alin Halimatussadiyah (*Universitas Indonesia*); Ansa Heyl (*IIASA*); Rasheed Hussain (*WHO*); Maarten Kappelle (*UNEP*); Nguyen Thi Kim Oanh (*AIT*); Puji Lestari (*Bandung Institute of Technology*); Kaye Patdu (*UNEP*); Didin Agustian Permadi (*Bandung Institute of Technology*); Johan Kuylenstierna (*Stockholm Environment Institute*); Manop Udomkermongkol (*UNRCO Thailand*); Chou Mandarin (*Ministry of Environment of Cambodia*); Mushtaq Memon (*UNEP*); Daniel Mira-Salama (*World Bank*); Napak Tesprasith (*USAID*); Donald Simanjuntak (*Ministry of Health of Indonesia*); Ekbordin Winjikul (*AIT*)

Editing and design:

Jennifer Pangilinan (*AIT*); Ranjika Perera (*AIT*); Shayan Naveed (*AIT*); Pitiruedee Angkhananuchat (*AIT*)

ACRONYMS

AHRQ	Agency for Healthcare Research and Quality
ASEAN	Association of Southeast Asian Nations
BC	Black Carbon
CH ₄	Methane
CO ₂	Carbon Dioxide
CRFs	Concentration-response Functions
EANET	Acid Deposition Monitoring Network in East Asia
GAINS	Greenhouse Gas – Air Pollution Interactions and Synergies Model
GBD	Global Burden of Disease
GDP	Gross Domestic Product
GHG	Greenhouse Gas
GWP	Global Warming Potential
HFC	Hydrofluorocarbon
IEA	International Energy Agency
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis
LPG	Liquefied Petroleum Gas
NDC	Nationally Determined Contribution
NH ₃	Ammonia
NMVOC	Non-methane Volatile Organic Compound
NO _x	Nitrogen Oxides
NO ₂	Nitrogen Dioxide
NPS	New Policy Scenario
O ₃	Ozone
OC	Organic Carbon
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
PM	Particulate Matter
SCR	Selective Catalytic Reduction
SDGs	Sustainable Development Goals
SDS	Sustainable Development Scenario
SLCPs	Short Lived Climate Pollutants
SO ₂	Sulfur Dioxide
UN	United Nations
UNEP	United Nations Environment Programme
UNEP/CCAC	United Nations Environment Programme/Climate and Clean Air Coalition
VOLY	Value of a Life Year
VSL	Value of a Statistical Life
WHO	World Health Organization
YLLs	Years of Life Lost

TABLE OF CONTENTS

1. Pendahuluan	8
1.1 Latar Belakang	8
1.2 Sasaran	9
1.3 Pendekatan	9
1.4 Metodologi	10
1.5 Skenario	11
2. Hasil	13
2.1 Emisi dan konsentrasi ambien	13
2.1.1 Skenario kebijakan saat ini	13
2.1.2 Kebijakan Tambahan	14
2.2 Dampak kesehatan dan cost of inaction	16
2.3 Iklim dan co-benefit lainnya	19
3. Batasan	21
3.1 Skenario dan solusi	21
3.2 Ketersediaan/keandalan data	21
3.3 Konsentrasi PM_{2.5} yang dimodelkan	21
3.4 Biaya tindakan	21
3.5 Cakupan dampak yang dikaji	22
4. Kesimpulan dan rekomendasi	23
Lampiran	24
Lampiran 1. Metodologi dan sumber data	24
Ringkasan	24
Emissions and ambient PM _{2.5} concentrations	26
Validation of ambient PM _{2.5} concentrations	27
Concentration-response functions (CRFs)	28
Baseline Morbidity Rates	28
National data	28
Baseline rates of the related diseases: Default estimates	29
Unit Costs	29
National Data	29
Default estimates from international data	30
Annex 2. Emission scenarios	31
Current Policies	31
Strong Mitigation	32
Individual Measures	33
References	34

LIST OF BOXES

Kotak 1: Solusi Udara Bersih untuk ASEAN	9
kotak 2: Model GAINS	11

LIST OF FIGURES

Gambar 1.1 Gambar skema ancangan yang diusulkan untuk menghitung biaya tindakan versus biaya tidak adanya tindakan, berdasarkan perbandingan Kebijakan Saat Ini dan Kebijakan Tambahan	9
Gambar 1.2 12 solusi utama untuk mengatasi paparan partikel halus di ASEAN	12
Gambar 2.1 Tren emisi CO ₂ dan polutan udara dalam skenario Kebijakan Saat Ini untuk Indonesia	13
Gambar 2.2 Konsentrasi PM _{2.5} untuk Indonesia dimodelkan dengan model GAINS untuk tahun 2015 (atas) dan untuk tahun 2030 di bawah Kebijakan Saat Ini (bawah)	14
Gambar 2.3 Paparan populasi terhadap PM _{2.5} dimodelkan dengan model GAINS untuk 2015 dan 2030 dengan skenario yang berbeda	15
Gambar 2.4 Peningkatan yang diharapkan dalam konsentrasi PM _{2.5} rata-rata tertimbang populasi di Indonesia dari masing-masing dari 12 solusi pada tahun 2030, membedakan langkah-langkah yang sudah diterapkan (biru), undang-undang disahkan setelah 2015 tetapi belum diterapkan sepenuhnya (hijau), dan potensi lebih lanjut (kuning) .	15
Gambar 2.5 Beban kesehatan yang dimonetisasi dari paparan PM _{2.5} pada tahun 2030, yang membandingkan skenario Kebijakan Saat Ini dan implementasi yang efektif dari semua tindakan yang dinilai dalam studi ini untuk Indonesia (Kasus Mitigasi Optimis). Stacked Bars – Sumbu kiri: Beban dinyatakan dalam juta USD per tahun, Titik merah – Sumbu kanan: perbandingan terhadap PDB	17
Gambar 2.6 Beban morbiditas yang dimonetisasi dari paparan PM _{2.5} pada tahun 2030, membandingkan skenario Kebijakan Saat Ini, dan implementasi yang efektif dari semua tindakan (Skenario Mitigasi Optimis)	17
Gambar 2.7 Rangkuman kejadian dampak termasuk perkiraan untuk tahun 2015 dan skenario yang dianalisis. Kematian, kunjungan ruang gawat darurat, dan rawat inap ditampilkan di sumbu kiri, hari aktivitas terbatas (titik) menggunakan sumbu kanan	18
Gambar 2.8 Manfaat kesehatan yang dimonetisasi dari tindakan individu yang diterapkan pada tahun 2030 di atas kebijakan saat ini.	19
Gambar 2.9 Manfaat tambahan dari langkah-langkah individu untuk emisi GRK (CO ₂ + CH ₄) ketika diterapkan sepenuhnya pada tahun 2030 (kiri) dan 2050 (kanan)	20
Gambar 3 Alur informasi dalam model GAINS untuk menilai biaya kebijakan dan biaya terkait dampak untuk satu skenario (Kebijakan Saat Ini atau kasus Mitigasi). Bidang oranye menyoroti input data yang diperlukan dari mitra lokal.	30

LIST OF TABLES

Table 1. Morbiditas dan mortalitas yang disebabkan oleh PM _{2.5} ambien di Indonesia pada tahun 2015 dan 2030 berdasarkan undang-undang saat ini, dan biayanya. Untuk mortalitas, kematian dini dan YLL adalah indikator alternatif dan ditampilkan hanya untuk perbandingan.	16
Table 2. Deskripsi opsi mitigasi utama yang terkait dengan 12 solusi yang teridentifikasi	33

EXECUTIVE SUMMARY

Kajian ini memberikan perhitungan awal mengenai timbulnya biaya akibat tidak dilakukannya tindakan penanggulangan terhadap polusi udara di Indonesia. Kajian ini menghitung dan membandingkan potensi biaya kesehatan yang muncul di bawah skenario (1) tanpa tindakan lebih lanjut di luar kebijakan saat ini yang diambil, dan (2) skenario masa depan dengan penerapan 12 solusi kunci (key 12 solutions) hasil kajian UNEP/CACC (2023). Kajian ini juga menyoroti manfaat tambahan (co-benefit) pada aspek dampak perubahan iklim yang mungkin terjadi dan tidak terkuantifikasi jika tidak dilakukan tindakan lebih lanjut. Temuan utama dari kajian awal ini adalah sebagai berikut:

Dalam satu dekade terakhir, Indonesia telah menerapkan kebijakan yang efektif dalam meningkatkan kualitas udara. Namun, masih ada banyak tantangan yang perlu diatasi. Meskipun terdapat kemajuan dalam penanggulangannya, pencemaran udara tetap menjadi permasalahan yang signifikan di Indonesia. Walaupun undang-undang pengelolaan kualitas udara saat ini telah diterapkan, beban dampak kesehatan akibat paparan pencemar udara diproyeksikan tetap akan meningkat di masa depan. Hal ini disebabkan oleh adanya pertumbuhan ekonomi dan populasi, serta penuaan populasi (akibat semakin tingginya angka harapan hidup penduduk Indonesia). Menurut kajian ini diperkirakan pada tahun 2030 akan terjadi lebih dari 216 ribu kematian dini akibat paparan pencemar udara ambien, apabila tidak dilakukan tindakan lebih lanjut terhadap pencemaran udara.

Tindakan lebih lanjut dapat memberikan manfaat kesehatan yang signifikan bagi penduduk Indonesia. Penerapan kebijakan tambahan di luar undang-undang saat ini dapat menghindari lebih dari 132 ribu kematian dini, 32 ribu rawat inap, dan 18 ribu kunjungan ruang gawat darurat karena kualitas udara yang buruk setiap tahun pada tahun 2030 di Indonesia.

Biaya terkait kesehatan manusia akibat tidak adanya tindakan lebih lanjut terhadap polusi udara diperkirakan setara dengan sekitar 1,6% dari Produk Domestik Bruto (PDB) Indonesia pada tahun 2030. Kurangnya tindakan segera terhadap polusi udara dapat merugikan Indonesia sebesar 27 miliar USD per tahun pada tahun 2030, yang dihitung berdasarkan beberapa dampak mortalitas dan morbiditas dari polusi udara. Ini setara

dengan sekitar 1,6% PDB Indonesia tahun 2030. Cost of inaction (Biaya dari ketiadaan tindakan) aktual tersebut akan lebih tinggi jika semua biaya lain dan keuntungan yang hilang diperhitungkan.

Terdapat langkah-langkah yang terbukti dapat meningkatkan kualitas udara dan mencapai manfaat signifikan pada kesehatan yang dapat dicapai dalam waktu relative singkat. Telah teridentifikasi adanya 12 solusi utama yang dapat memberikan manfaat signifikan terhadap kualitas udara. Dari 12 solusi tersebut, kebijakan yang memiliki manfaat terbesar di Indonesia antara lain percepatan penggunaan kendaraan listrik dan perbaikan standar emisi untuk transportasi jalan raya, peningkatan kapasitas pembangkit listrik menggunakan energi terbarukan, perbaikan standar emisi untuk industri, dan peningkatan langkah-langkah lainnya. Implementasi kebijakan-kebijakan ini diharapkan dapat mencakup sekitar 75% dari potensi mitigasi dalam hal paparan pencemar udara dan manfaat yang dapat dimonetisasi.

Ke-12 solusi yang diusulkan juga menghasilkan pengurangan emisi GRK yang signifikan dan juga dapat memberikan banyak manfaat lainnya. Kajian ini menunjukkan bahwa penerapan 12 solusi untuk udara bersih dapat mengurangi emisi GRK dan dapat membantu Indonesia mencapai target terkait hal tersebut. Jika diterapkan, solusi ini juga dapat memberikan banyak manfaat tambahan lainnya yang mendukung pencapaian prioritas pembangunan lainnya yang terkait dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals - SDGs). Oleh karena itu, cost of inaction kemungkinan akan lebih tinggi dari angka yang diperkirakan dalam kajian ini.

Perhitungan cost of inaction dalam mengatasi pencemar udara memberikan bukti berguna untuk mendorong adanya tindakan nyata. Dengan didapatnya biaya yang tinggi akibat tidak adanya tindakan terhadap pencemaran udara, hasil kajian ini dapat digunakan sebagai motivasi untuk mengambil langkah-langkah yang diperlukan. Temuan awal yang disajikan pada dokumen ini dapat digunakan untuk mendukung para pembuat kebijakan dan pengambil keputusan di Indonesia dalam merancang dan menerapkan kebijakan dan tindakan yang efektif dalam mengatasi polusi udara. Selain itu, hasil kajian ini juga dapat memfasilitasi dialog lintas sektor pemerintah tentang manajemen kualitas udara yang efektif.

1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Polusi udara merupakan ancaman serius terhadap kesehatan dan kesejahteraan sekitar 660 juta penduduk yang tinggal di kawasan ASEAN. Indonesia juga tidak luput dari beban tersebut, dengan paparan partikel halus (PM2.5) yang diperkirakan menyebabkan kematian dini dalam setahun sekitar 107.000 (77.000-138.000) pada tahun 2019 (Murray et al., 2020). Selain itu, paparan PM2.5 juga bertanggung jawab atas tingginya beban penyakit, terutama akibat penyakit kardiovaskular dan pernapasan. Pencemaran udara juga memiliki dampak negatif terhadap ekosistem dengan adanya deposisi nitrogen dan sulfur yang dapat menyebabkan asidifikasi, eutrofikasi, dan penurunan keanekaragaman hayati.

Indonesia, sebagai negara dengan populasi terpadat keempat di dunia, diperkirakan memiliki lebih dari 276 juta penduduk dengan 57%nya tinggal di daerah perkotaan. Dalam strategi pembangunan nasional jangka panjangnya, Indonesia menetapkan tujuan untuk menjadi negara ekonomi maju (developed economy) pada tahun 2045, dengan target pertumbuhan PDB setidaknya 5% per tahun. Namun apabila tidak disertai dengan tindakan yang signifikan, pertumbuhan ekonomi yang sejalan dengan peningkatan populasi dan urbanisasi, berpotensi menyebabkan dampak negatif terhadap lingkungan, termasuk penurunan kualitas udara. Terdapat langkah-langkah yang telah diidentifikasi dapat mengurangi polusi udara dan dampaknya apabila diterapkan secara efektif. Langkah tersebut telah diterapkan selama beberapa tahun terakhir sebagai upaya untuk mengatasi masalah polusi udara di negara-negara ASEAN. Indonesia telah menyadari pentingnya mengambil tindakan yang kuat dalam mengurangi polusi udara dan telah mengeluarkan rencana strategis pertama untuk pengendalian polusi udara (2020-2024) pada tahun 2020. Selain itu, telah terdapat beberapa inisiatif pada sektor khusus, seperti penerapan standar emisi untuk kendaraan dan industri, yang mungkin telah berhasil dalam mengurangi paparan PM2.5 pada populasi selama 20 tahun terakhir (State of Global Air 2020). Namun demikian, apabila kebijakan dan undang-undang saat ini diterapkan secara efektif, adanya pertumbuhan penduduk; urbanisasi; dan pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan kemungkinan tetap akan dapat menyebabkan memburuknya kualitas udara di wilayah tersebut dan berdampak negatif terhadap kesehatan (UNEP/CCAC,

2023). Untuk membatasi berbagai dampak negatif dari polusi udara, perlu mempertimbangkan tambahan efektif yang tidak hanya mengeksplorasi implikasi dari kebijakan saat ini, tetapi juga melihat peluang-peluang untuk mitigasi lebih lanjut.

Mengatasi pencemaran udara juga dapat memberikan manfaat positif dalam mengurangi perubahan iklim. Beberapa pencemar, yang dikenal sebagai *Short-Lived Climate Pollutants* (SLCPs), memberikan kontribusi langsung terhadap perubahan iklim dan pencemaran udara. Pencemar udara dan gas rumah kaca sering berasal dari sumber yang sama. Oleh karena itu, mengadopsi rancangan yang terpadu terhadap polusi udara dan perubahan iklim dapat menghasilkan banyak manfaat bagi kesehatan dan lingkungan (Haines et al., 2017), serta membantu mencapai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) lainnya. Kajian UNEP-CCAC tentang Polusi Udara di Asia dan Pasifik (UNEP, 2019) dan Laporan *Clean Air dan Climate Solutions for ASEAN* (UNEP/CCAC, 2023) mengadopsi perspektif ini dan mengidentifikasi berbagai solusi yang dapat diterapkan dengan manfaat bagi kualitas udara, iklim, dan prioritas pembangunan lainnya. Kajian ini didasarkan pada analisis sebelumnya dan mempertimbangkan beberapa solusi spesifik yang dijelaskan dalam laporan (lihat Kotak 1).

Langkah-langkah mitigasi untuk mengatasi polusi udara sering kali dikaitkan dengan beban ekonomi yang tidak hanya dikenakan pada industri yang mencemari tetapi juga berdampak pada berbagai pemangku kepentingan mulai dari warga negara individu hingga bisnis dan pemerintah lokal. Oleh karena itu, biaya sering disebut sebagai argumen menentang legislasi yang lebih ketat. Namun, dampak polusi udara juga mengakibatkan biaya bagi masyarakat yang menghasilkan kerugian ekonomi, misalnya adanya biaya sistem perawatan kesehatan akibat peningkatan tingkat penyakit yang dapat dikaitkan atau kerugian ekonomi akibat penurunan jumlah tenaga kerja akibat kematian dan penyakit. Oleh karena itu, tidak bertindak terhadap polusi udara juga menimbulkan biaya, dan mengukur *cost of inaction* ini, sebagai penyeimbang terhadap biaya tindakan (yaitu, mengimplementasikan langkah-langkah mitigasi baru), dapat menjadi argumen penting dalam mendukung kebijakan pengendalian yang lebih ketat dan ambisius.

Kotak 1: Solusi Udara Bersih untuk ASEAN

Pada tahun 2023, *United Nations Environment Programme* (UNEP), *Association for Southeast Asian Nations* (ASEAN), dan *Climate and Clean Air Coalition* (CCAC) merilis laporan berjudul "*Clean Air and Climate Solutions for ASEAN*". Laporan ini mengidentifikasi 15 solusi—12 di antaranya tumpang tindih dengan solusi dalam penilaian *cost of inaction* ini—yang dipilih berdasarkan potensi mereka untuk memberikan pengurangan maksimum terhadap paparan PM2.5 pada populasi ASEAN. Bahkan, implementasi penuh dari solusi-solusi ini dapat mengurangi rata-rata konsentrasi PM2.5 perpopulasi

di seluruh wilayah ASEAN sebesar 50 hingga 70 persen pada tahun 2030. Selain itu, 15 solusi ini juga akan memberikan manfaat iklim penting melalui pengurangan polutan iklim berumur pendek (*short-lived climate pollutants/SLCPs*). Solusi-solusi ini melibatkan tindakan di berbagai sektor, mulai dari pengendalian proses industri konvensional hingga perubahan pola makan dan praktik pertanian. Selain itu, solusi-solusi ini akan mendapatkan momentum dan dengan demikian mengurangi *cost of inaction* dari upaya memperkuat tata kelola, meningkatkan pendanaan, dan meningkatkan kerjasama regional.

1.2. Sasaran

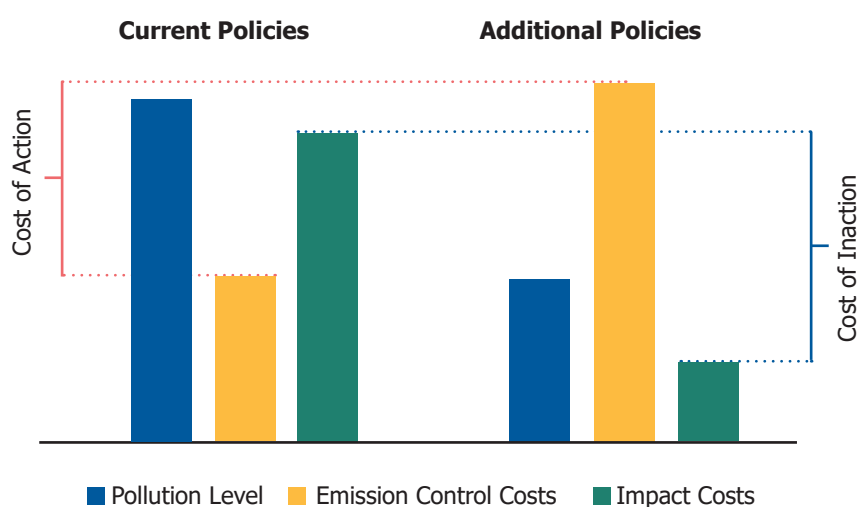
Melalui pengukuran biaya akibat tidak adanya tindakan dalam mengatasi polusi udara, kajian ini bertujuan untuk meningkatkan dasar bukti guna mendukung para pembuat kebijakan di Indonesia dalam mengambil tindakan lebih lanjut dan memberikan prioritas pada kebijakan yang ambisius dan langkah-langkah dengan biaya yang efektif untuk meningkatkan kualitas udara. Kajian ini memberikan gambaran awal tentang beberapa *cost of inaction* dalam mengatasi polusi udara di Indonesia, dengan mengukur dan memperkirakan manfaat kesehatan yang dapat dicapai melalui implementasi 12 solusi mitigasi yang spesifik. Selain itu, penilaian ini juga menyoroti beberapa manfaat lain yang dapat dicapai jika solusi-solusi ini diimplementasikan, misalnya saja dalam hal perubahan iklim. Dengan membandingkan dampak kesehatan yang diukur dari paparan polusi udara dalam skenario dasar yaitu dengan penerapan kebijakan saat ini, dengan skenario 'Mitigasi Optimis'

dengan implementasi 12 solusi ambisius, *cost of inaction* terhadap polusi udara diukur secara langsung. Oleh karena itu, penilaian ini memberikan indikasi awal tentang biaya di masa depan yang akan dialami oleh Indonesia jika tidak ada tindakan lebih lanjut yang diambil, dan menyoroti solusi-solusi khusus yang dapat dengan signifikan mengurangi biaya ini di masa depan. Pendekatan ini mengambil sudut pandang yang berbeda dibandingkan dengan penilaian mitigasi polusi udara yang umumnya berfokus pada manfaat dari tindakan daripada biaya akibat tidak bertindak. Oleh karena itu, tujuan dari kajian ini adalah untuk memberikan motivasi dan justifikasi yang kuat bagi tindakan lebih lanjut dan pengembangannya, prioritas dan implementasi langkah-langkah kebijakan dengan biaya yang efektif, progresif, dan terintegrasi dalam mengatasi pencemaran udara dengan manfaat bagi kesehatan dan iklim.

1.3. Pendekatan

'*Cost of inaction*' didefinisikan sebagai biaya kerusakan yang akan tetap ada tanpa intervensi kebijakan, atau sebaliknya, sebagai biaya kerusakan yang dapat dihindari dengan mengambil tindakan. Biaya ini terkait dengan dampak utama yang terkait dengan polusi udara dan total biaya kerusakan yang ditimbulkannya. Dampak yang dinilai dan dimonetisasi dapat mencakup biaya kesehatan langsung, jumlah hari kerja yang hilang, biaya kematian, penurunan hasil tanaman, dampak terhadap ekosistem, kerusakan material, dampak pada pariwisata, kebisingan, visibilitas, kecelakaan lalu lintas, dan kemacetan lalu lintas.

Gambar 1.1 menampilkan representasi konseptual yang disederhanakan dari pendekatan yang digunakan dalam penilaian ini. Prinsip utamanya adalah membandingkan dua skenario yang berbeda untuk tahun target tertentu: skenario Kebijakan Saat Ini, yang mewakili implikasi dari legislasi saat ini (dengan asumsi tidak ada tindakan kebijakan lebih lanjut), dibandingkan dengan skenario Kebijakan Tambahan alternatif di mana sekelompok langkah baru untuk mengendalikan polusi, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan mengatasi Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals/SDGs*) diterapkan.



Gambar 1.1 Gambar skema anggaran yang diusulkan untuk menghitung biaya tindakan versus biaya tidak adanya tindakan, berdasarkan perbandingan Kebijakan Saat Ini dan Kebijakan Tambahan

Konsep tersebut menggambarkan perbedaan antara 'Kasus Kebijakan Saat Ini' dan 'Kasus Kebijakan Tambahan' terkait tingkat pencemaran udara ambien, biaya implementasi undang-undang pengendalian pencemaran udara yang ada, dan tingkat biaya terkait polusi udara. Dalam Kasus Kebijakan Saat Ini, tingkat polusi udara ambien tertentu dikaitkan dengan batang hitam Pada Gambar 1.1. Selain itu, ada biaya yang terkait dengan implementasi undang-undang pengendalian pencemaran udara yang ada, yang ditunjukkan oleh batang oranye. Terdapat pula tingkat

biaya terkait polusi udara tertentu yang diungkapkan dalam bentuk moneter, yang direpresentasikan oleh batang biru. Dalam Kasus Kebijakan Tambahan, biaya pengendalian emisi lebih tinggi, sementara tingkat polusi udara dan biaya terkait lebih rendah. Dalam hal ini, biaya tindakan ditentukan sebagai selisih antara biaya pengendalian emisi dalam Kasus Kebijakan Saat Ini dan Kasus Kebijakan Tambahan. Sedangkan *cost of inaction* didefinisikan sebagai selisih antara biaya dampak atau keuntungan yang hilang dalam bentuk moneter jika tidak ada tindakan yang dilakukan.

1.4. Metodologi

Analisis dalam kajian ini menggunakan model Greenhouse gas – Air pollution Interactions and Synergies (GAINS) model yang dikembangkan di *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA) (lihat Kotak 2 dan Gambar 1 dalam Lampiran). GAINS adalah model kajian terintegrasi yang menghitung emisi berbagai polutan udara pada tingkat sektoral, konsentrasi ambien PM_{2.5}, dan mortalitas terkait. Untuk tujuan kajian ini, kerangka kerja model telah dikembangkan lebih lanjut dan diperluas untuk mencakup dampak kesehatan, dampak pada tenaga kerja, dan biaya yang ditimbulkan.

Kajian ini mengukur dampak kesehatan berupa mortalitas dan morbiditas akibat konsentrasi PM_{2.5}

ambien. Biaya dampak dikuantifikasi sebagai nilai moneter per tahun akibat adanya kematian (seperti yang diperkirakan dari studi *willingness-to-pay*) dan biaya sistem kesehatan akibat adanya morbiditas. Fungsi konsentrasi-respon untuk beberapa morbiditas dihasilkan dari studi meta-analisis; perhitungan mortalitas mengikuti metodologi *Global Burden of Disease*. Data input untuk perhitungan (seperti tingkat kejadian dasar, parameter biaya) dikumpulkan dari sumber lokal jika tersedia dan dilengkapi dengan data dari sumber internasional apabila tidak tersedia dari sumber lokal. Rincian metodologi dan sumber data dijelaskan dalam Lampiran.

Kotak 2 : Model GAINS

Model GAINS (Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies) mengeksplorasi strategi pengendalian emisi *multi-polutan* yang hemat biaya yang memenuhi tujuan perlindungan lingkungan terhadap dampak kualitas udara (terkait kesehatan manusia dan ekosistem) dan gas rumah kaca. GAINS menggabungkan data mengenai perkembangan ekonomi, struktur, potensi pengendalian dan biaya sumber emisi, pembentukan dan penyebaran polutan di atmosfer, serta penilaian dampak lingkungan akibat adanya polusi (<https://gains.iiasa.ac.at/models>).

Estimasi emisi dihitung menggunakan faktor emisi dari basis data GAINS yang telah melalui peer review dan mengkompilasi data nasional dan internasional terkait sumber dan teknologi pengendalian. Lebih dari 1000 tindakan pengendalian emisi direpresentasikan dalam model tersebut. Opsi mitigasi mencakup dampak terhadap emisi dari semua polutan udara utama (SO₂, NO_x,

PM [termasuk BC dan OC), NMVOC, NH₃) dan gas rumah kaca.

Model tersebut menghitung dispersi atmosfer dan pembentukan polutan sekunder untuk skenario yang ditentukan. Hal ini memungkinkan pengukuran konsentrasi PM_{2,5} dan perubahannya dari penerapan setiap tindakan/solusi dengan resolusi 0,1°×0,1° atau kira-kira 10x10km. Dengan melibatkan populasi dengan resolusi yang sama, distribusi paparan PM_{2,5} di udara ambien di populasi dihitung. Dengan menerapkan fungsi konsentrasi-respon dari literatur internasional, GAINS dapat menghitung mortalitas prematur akibat paparan jangka panjang terhadap PM_{2,5}, dan YLL (Years of Life Lost) yang terkait. Untuk analisis ini, model telah diperluas untuk mencakup dampak kesehatan lainnya, seperti morbiditas, kehilangan waktu kerja, biaya, dll. (lihat Gambar 1 di Lampiran). Rincian metodologi dijelaskan dalam Lampiran.

1.5. Skenario

Untuk menghitung *cost of inaction* penanggulangan polusi udara, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1.1, kajian ini secara langsung menghitung perbedaan dampak dan biaya akibat dampak kesehatan dari paparan polusi udara untuk dua skenario di masa depan. Skenario pertama, atau 'Kebijakan Saat Ini', mengasumsikan bahwa hanya menerapkan undang-undang dan kebijakan yang ada saat ini yang terkait dengan pengendalian pencemaran udara. Sementara itu, kebijakan tambahan atau skenario 'Mitigasi Optimis' secara langsung mengasumsikan penerapan yang ambisius 12 solusi untuk udara bersih, yang telah diidentifikasi dan dikembangkan dalam Studi *the Clean Air and Climate Solutions for ASEAN* (UNEP/CCAC, 2023), dan konsep yang diterapkan dalam Kajian UNEP-CCAC untuk Polusi Udara di Asia dan Pasifik (Amann et al., 2019; UNEP, 2019). Gambaran luas tentang skenario dasar untuk kawasan ASEAN disediakan dalam Lampiran.

Emisi di masa depan untuk kedua skenario bergantung pada perubahan dalam aktivitas yang sendiri merupakan hasil dari faktor-faktor sosiodemografi dan makroekonomi utama. Kedua skenario mengasumsikan bahwa Indonesia akan mengalami perkembangan ekonomi yang signifikan di masa depan, dengan PDB-nya tumbuh sekitar 95% hingga tahun 2030 dari 861 miliar dolar AS pada tahun 2015, mengikuti proyeksi yang dibuat dalam World Energy Outlook 2018 oleh International Energy Agency (IEA, 2018). Populasi Indonesia juga diasumsikan akan berubah di masa

depan, tumbuh dari 258 juta pada tahun 2015 menjadi 296 juta pada tahun 2030 dan 322 juta pada tahun 2050, mengikuti Proyeksi Populasi Dunia 2017 PBB (UN, 2017), pada Skenario Medium. Pada saat yang sama, populasi Indonesia diproyeksikan akan mengalami penuaan yang signifikan, yang memiliki pengaruh yang besar pada perhitungan dampak kesehatan yang dilakukan dalam penilaian ini.

Skenario **Kebijakan Saat Ini** yang digunakan sebagai *baseline* dalam kajian ini dan merupakan tolak ukur yang agak konservatif untuk pembangunan ke depan. Skenario ini hanya mempertimbangkan kebijakan yang telah dilaksanakan atau disepakati di Indonesia pada pertengahan tahun 2020. Informasi tentang kebijakan saat ini, nilai batas emisi dan standar baku mutu diambil dari Zhang (2016), Motokura et al. (2017), TransportPolicy.net¹, OECD (2019), EANET (2020), He et al. (2021), dan Lestari et al. (2022). Tren energi yang digunakan dalam skenario Kebijakan Saat Ini konsisten dengan skenario 'New Policies Scenario' (NPS) IEA, dan perkiraan penerapan kontrol polusi udara diperhitungkan berdasarkan undang-undang saat ini dengan asumsi tanpa ada tindakan lebih lanjut yang diambil. Beberapa studi di atas juga memberikan kajian dalam kemajuan implementasi kebijakan, untuk menciptakan estimasi dampak yang lebih realistis dari penerapan undang-undang yang ada dan kajian potensi mitigasi di masa depan; pengalaman yang dilaporkan tercermin dalam pendekatan pemodelan yang digunakan dalam kajian ini.

¹ <https://www.transportpolicy.net/standard/indonesia-fuels-diesel-and-gasoline/>

² Kajian UNEP/CCAC tentang Udara Bersih dan Iklim di ASEAN menyelidiki 15 solusi, namun beberapa di antaranya tidak secara langsung mempengaruhi tingkat polusi udara. Studi ini mencakup 12 larutan yang relevan untuk konsentrasi PM_{2,5}.

Sebaliknya, skenario **Mitigasi Optimis** (skenario kebijakan tambahan pada Gambar 1.1 di atas) mengasumsikan bahwa 12 solusi utama tambahan² yang dikembangkan di bawah Studi *the Clean Air and Climate Solutions for ASEAN* (UNEP/CCAC, 2023) diterapkan secara efektif dan semaksimal mungkin. Solusi-solusi ini bukanlah tindakan individu melainkan kumpulan tindakan yang berkaitan dengan teknologi atau sektor serupa (misalnya, untuk transportasi jalan raya, standar emisi yang diperkuat dan peningkatan populasi kendaraan listrik adalah salah satu solusi) (Gambar 1.2/Infografis³) dan telah dipilih berdasarkan potensi mereka untuk memberikan pengurangan maksimum paparan populasi terhadap PM_{2.5}. Solusi yang dipilih menggabungkan penerapan solusi teknologi untuk mengurangi emisi serta memanfaatkan potensi efisiensi energi, penggantian bahan bakar, energi terbarukan, dan elektrifikasi armada kendaraan seperti yang diidentifikasi dalam

Skenario Pembangunan Berkelanjutan (SDS) IEA. Selain itu, diet, dan karenanya produksi pertanian, konsisten dengan EAT Planetary Diet (Willett et al., 2019) dari *The Lancet*. Rincian lebih lanjut tentang solusi yang termasuk dalam kajian ini dapat ditemukan dalam Lampiran dan dalam laporan UNEP/CCAC (2023). Selain menghitung total dampak gabungan dari penerapan 12 solusi (Gambar 1.2), masing-masing solusi juga dihitung secara independen dalam kaitannya dengan dampaknya terhadap paparan PM_{2.5}. Hal ini dapat membantu mengidentifikasi solusi yang dapat memiliki dampak terbesar pada peningkatan kualitas udara. Seperti yang ditunjukkan nanti dalam kajian ini, beberapa langkah ini juga memberikan manfaat tambahan yang kuat termasuk pengurangan emisi gas rumah kaca dan berkontribusi pada pencapaian beberapa Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs).



* The future potential shown includes the potential scope for what accelerated electrification of vehicle fleet can achieve, i.e., most likely less than half of that could be achieved by electrification by 2030.

** Improvements to coal, oil and gas production and distribution, including through reducing leaks and utilizing captured gas.

Gambar 1.2 12 solusi utama untuk mengatasi paparan partikel halus di ASEAN

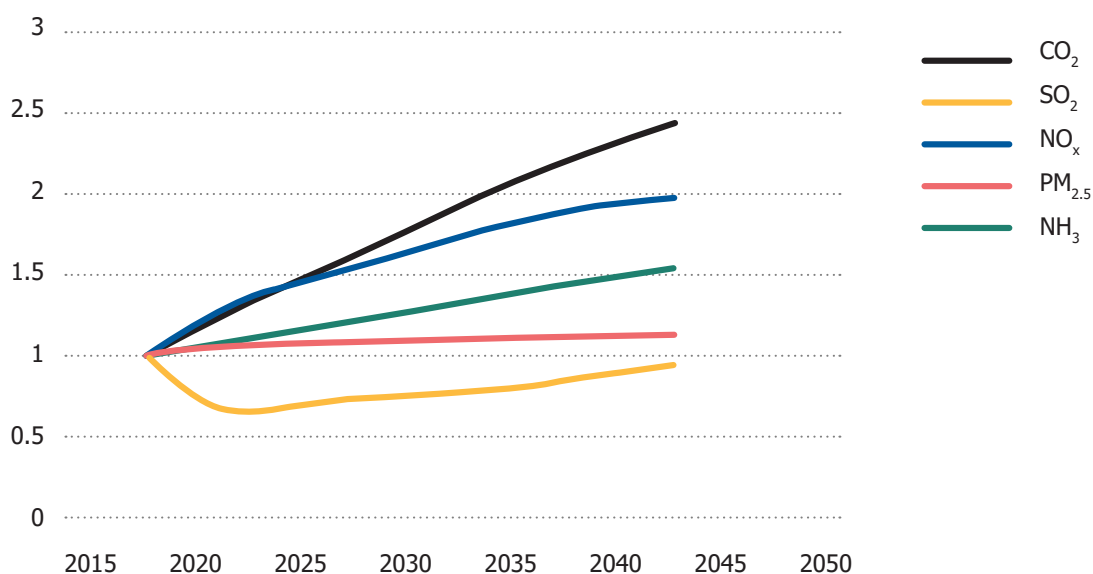
2. Hasil

Bagian ini menyajikan hasil- hasil yang didapat pada kajian ini. Bagian **Error! Reference source not found.** menyajikan hasil kuantifikasi emisi dan konsentrasi PM2.5 ambien dalam skenario Kebijakan Saat Ini dan skenario Mitigasi Optimis. Bagian **Error! Reference source not found.** menyajikan hasil

kuantifikasi dampak kesehatan dan biaya tidak adanya tindakan untuk tindakan individu yang terkandung dalam skenario Mitigasi Optimis, dan Bagian **Error! Reference source not found.** menyajikan hasil analisis co-benefit dari tindakan untuk mitigasi perubahan iklim.

2.1. Emisi dan konsentrasi ambien

2.1.1 Skenario kebijakan saat ini

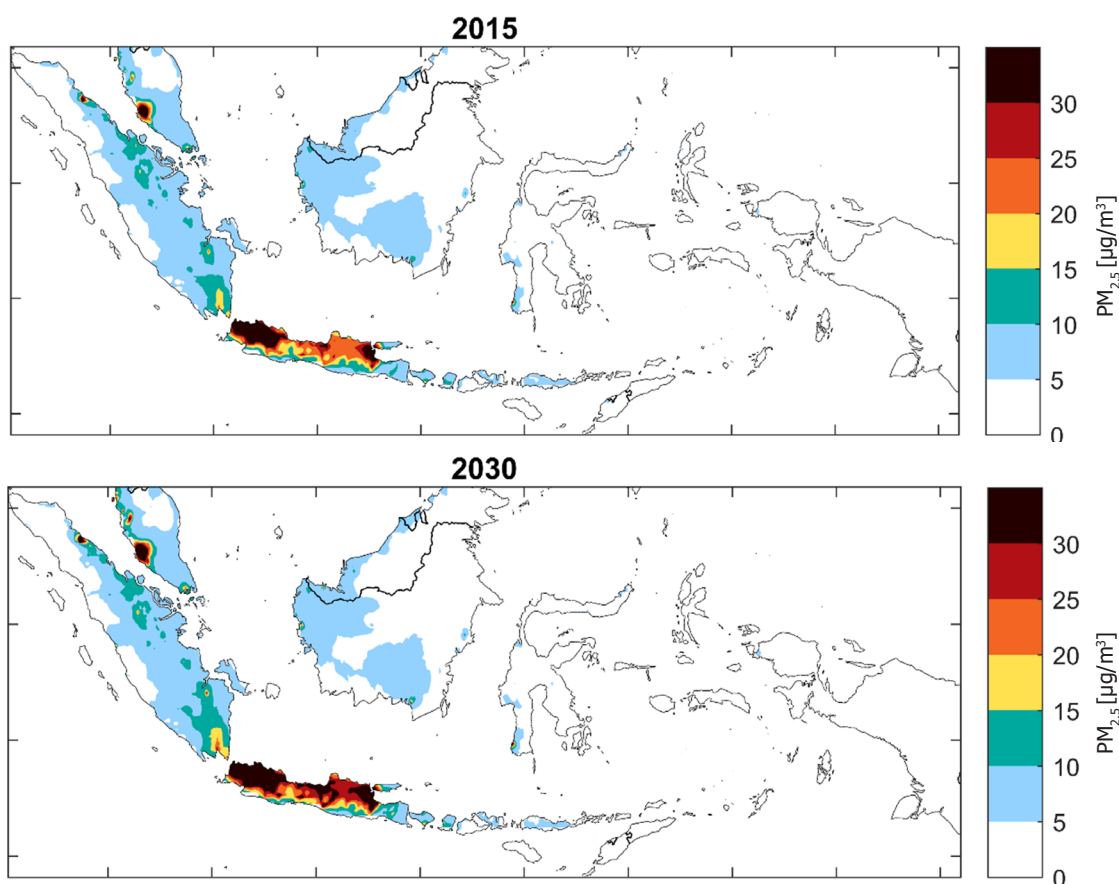


Gambar 2.1 Tren emisi CO₂ dan polutan udara dalam skenario Kebijakan Saat Ini untuk Indonesia

Dalam skenario Kebijakan Saat Ini, asumsi implementasi undang-undang yang ada dan yang baru diperkenalkan di sektor energi, industri, dan transportasi telah menunjukkan beberapa efek dalam memperlambat pertumbuhan emisi PM_{2.5} dan polutan prekursor utama PM (sulfur dioksida (SO₂), nitrogen oksida (NO_x), (Gambar 2.1). Prekursor ini tumbuh lebih lambat dari CO₂ yang menunjukkan adanya pemisahan bertahap antara pertumbuhan ekonomi dengan dampaknya terhadap emisi pencemar udara. Kontribusi dan pertumbuhan utama emisi CO₂ di Indonesia berasal dari sektor energi dan industri. Namun, kebijakan saat ini tidak cukup untuk mengimbangi peningkatan penggunaan bahan bakar dan kegiatan produksi, yang apabila dikombinasikan dengan asumsi pertumbuhan ekonomi Indonesia yang kuat mendorong peningkatan emisi CO₂ yang signifikan (Gambar 2.1). Tren penting lainnya dalam baseline melibatkan sektor perumahan. M-emaskan dan penerangan pada sektor perumahan menyumbang sekitar 30% dari PM_{2.5} pada tahun 2015. Dari hasil estimasi model GAINS, suksesnya kebijakan yang menghilangkan penggunaan minyak tanah untuk penerangan dan kecenderungan penggunaan bahan bakar bersih untuk memasak (dengan menyediakan akses di kedua perkotaan dan pedesaan) diperkirakan akan mengakibatkan penurunan emisi dari sektor ini

yang mengurangi pangsa masing-masing menjadi kurang dari 20% dan 10% pada tahun 2030 dan 2050, dan memberikan kontribusi yang hampir stabil terhadap keseluruhan emisi PM_{2.5} (Gambar 2.1).

Rerata konsentrasi PM_{2.5} tahunan di Indonesia hasil estimasi model GAINS untuk tahun 2015 adalah antara 5 dan 80 µg/m³ (Gambar 2.2, panel atas). Masalah polusi tidak terjadi secara merata di seluruh negeri, konsentrasi tertinggi dialami oleh Pulau Jawa yang berpenduduk paling padat. Wilayah sekitar ibu kota Jakarta di area Jawa Barat mengalami pencemaran udara paling parah, dengan konsentrasi rata-rata tahunan diperkirakan lebih tinggi dari 80µg/m³ di masing-masing lokasi, diikuti oleh wilayah Surabaya dan sekitarnya. Di luar Jawa, konsentrasi tertinggi terlihat di kota-kota besar seperti Medan, Makassar, Palembang, Bandar Lampung, Pontianak dan Banjarmasin. Di luar kota-kota besar, hanya Sumatera yang menghadapi peningkatan konsentrasi, sementara sebagian besar pulau terluar masih memiliki udara bersih bahkan di bawah baku mutu WHO 2021 sebesar 5 µg/m³, sejalan dengan kepadatan penduduk yang rendah di sana. Validasi terhadap data pemantauan yang tersedia disediakan dalam Lampiran.



Gambar 2.2 Konsentrasi PM_{2.5} untuk Indonesia dimodelkan dengan model GAINS untuk tahun 2015 (atas) dan untuk tahun 2030 di bawah Kebijakan Saat Ini (bawah)

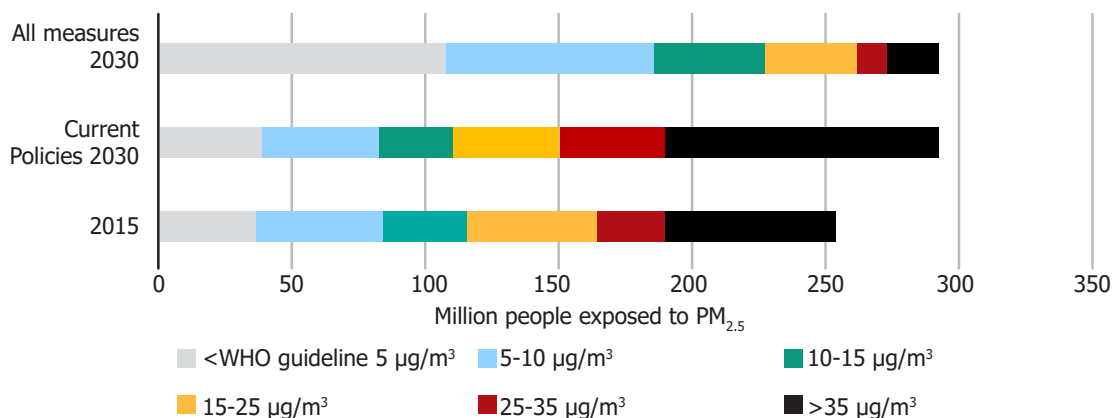
Walaupun dengan asumsi berhasilnya implementasi semua kebijakan dan peraturan yang ada sekarang ini, situasi di daerah berpenduduk padat, diperkirakan akan menjadi lebih buruk pada tahun 2030 dalam skenario Kebijakan Saat Ini (Gambar 2.2, panel bawah). Hal ini juga diilustrasikan pada Gambar 2.3 yang menunjukkan distribusi paparan populasi terhadap PM_{2.5}. Pada tahun 2015, 86% populasi terpapar pada tingkat PM_{2.5} di atas rekomendasi baku mutu kualitas udara dari WHO 2021 yaitu sebesar 5 µg/m³ dan 67% terpapar pencemar di atas baku mutu WHO tahun 2005 yaitu sebesar 10 µg/m³ (sekarang Target Interim 4), 30% dengan nilai paparan antara

target interim 1 dan 3 (15-35 µg/m³), dan 25% terpapar konsentrasi yang lebih tinggi dari 35 µg/m³. Dalam skenario Kebijakan Saat Ini, situasinya diperkirakan tidak akan membaik pada tahun 2030. Bahkan dengan asumsi implementasi yang efektif dari undang-undang saat ini, lebih dari 87% populasi masih dapat mengalami paparan konsentrasi di atas pedoman WHO tahun 2005. Jumlah penduduk yang terpapar dengan konsentrasi melebihi 15 µg/m³ akan meningkat dari 131 juta menjadi lebih dari 180 juta karena peningkatan konsentrasi di beberapa daerah (Gambar 2.2.) akibat urbanisasi yang terus berlanjut.

2.1.2 Kebijakan Tambahan

Seluruh tindakan yang dapat dilakukan terhadap peningkatan tingkat polusi udara dieksplorasi dalam skenario Mitigasi Optimis. Ini adalah skenario yang sangat ambisius, yang akan membutuhkan penetapan tujuan yang ambisius dan tindakan kebijakan yang kuat segera berdasar 12 solusi mitigasi yang diilustrasikan pada Gambar 1.2 dan tercantum dalam **Error! Reference source not found.** (Lampiran). Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.3, dengan menerapkan semua 12 solusi ini dalam skenario Mitigasi Optimis, maka pada tahun 2030 konsentrasi PM dibawah standar baku mutu WHO akan dinikmati oleh lebih dari 100 juta orang dan hanya 37% yang

akan terpapar ke tingkat baku mutu di atas 10 µg/m³. Skenario Kebijakan Saat Ini dan Mitigasi Optimis merupakan ujung ekstrem dari spektrum skenario yang mungkin terjadi antara *business as usual* dan mitigasi yang sangat ambisius. Dalam kisaran ini, skenario kebijakan yang lebih realistis akan menerapkan kebijakan pada tingkat tertentu untuk mengeksplorasi sebagian besar potensi seiring dengan menjaga agar biaya kebijakan tetap terbatas. Untuk mengidentifikasi mana dari 12 solusi yang memiliki dampak terbesar, dalam kajian ini akan dihitung potensi individu dari setiap solusi individu untuk meningkatkan kualitas udara.

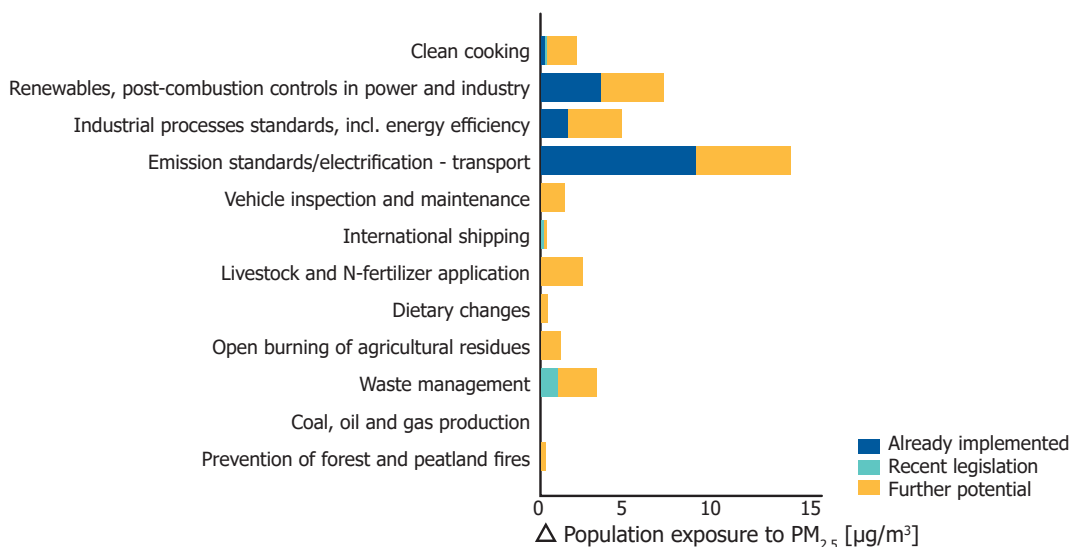


Gambar 2.3 Paparan populasi terhadap PM_{2.5} dimodelkan dengan model GAINS untuk 2015 dan 2030 dengan skenario yang berbeda

Gambar 2.4 menunjukkan kontribusi masing-masing dari 12 solusi untuk meningkatkan kualitas udara di Indonesia. Kontribusi ini diukur dalam hal penurunan konsentrasi rata-rata PM_{2.5} yang ditimbang dengan populasi pada tahun 2030. Asumsinya adalah bahwa semua solusi tersebut akan diimplementasikan secara penuh di Indonesia dan di seluruh kawasan ASEAN. Angka ini juga menunjukkan dampak paparan dari langkah-langkah yang telah dilaksanakan pada tahun 2015 (biru), dan telah berkontribusi terhadap peningkatan kualitas udara, dengan yang telah dimasukkan dalam undang-undang baru yang disahkan setelah tahun 2015 tetapi mungkin belum sepenuhnya dilaksanakan (hijau), berpotensi berkontribusi terhadap peningkatan kualitas udara di masa depan jika berhasil diterapkan. Potensi lebih lanjut (kuning) untuk setiap solusi karena itu akan datang dari penerapan tingkat ambisi tertinggi. Tujuan dari analisis ini adalah untuk menunjukkan kemajuan di bidang atau sektor mana yang telah dicapai dan di mana masih ada potensi terbesar untuk ambisi lebih lanjut melalui penerapan solusi.

Pengendalian emisi PM dan SO₂ dari pembangkit listrik dan industri telah berkontribusi terhadap peningkatan kualitas udara yang besar di Indonesia, diperkirakan

telah menghasilkan pengurangan sebesar 5 µg/m³ dalam konsentrasi PM_{2.5} yang ditimbang populasi dibandingkan dengan jika tidak ada kebijakan atau pengendalian yang diterapkan di daerah-daerah ini. Sementara itu, penerapan standar emisi yang lebih ketat untuk kendaraan juga telah secara efektif mengurangi konsentrasi polusi udara hingga hampir 9 µg/m³ (bagian bilah berwarna biru tua dan hijau). Meskipun berhasil di beberapa bidang, Gambar 2.4 menunjukkan adanya potensi besar untuk perbaikan lebih lanjut (kuning) yang menjadi fokus analisis yang disajikan di bagian akhir laporan ini. Area terbesar di mana ada potensi tambahan untuk meningkatkan kualitas udara berada di sektor transportasi (termasuk elektrifikasi transportasi jalan, standar ketat pada sisa kendaraan pembakaran internal dan penerapannya melalui pemeriksaan dan pemeliharaan rutin), tindakan lebih lanjut untuk mengendalikan sumber titik besar seperti listrik dan industri (termasuk transisi ke energi terbarukan dan peningkatan efisiensi), peningkatan pengelolaan limbah (penghapusan pembakaran limbah terbuka), serta praktik pertanian yang lebih baik yang meminimalkan kehilangan nitrogen.



Gambar 2.4 Peningkatan yang diharapkan dalam konsentrasi PM_{2.5} rata-rata tertimbang populasi di Indonesia dari masing-masing dari 12 solusi pada tahun 2030, membedakan langkah-langkah yang sudah diterapkan (biru), undang-undang disahkan setelah 2015 tetapi belum diterapkan sepenuhnya (hijau), dan potensi lebih lanjut (kuning).

2.2. Dampak kesehatan dan *cost of inaction*

Paparan PM2.5 menyebabkan dampak kesehatan yang cukup besar di Indonesia. Model GAINS memperkirakan bahwa pada tahun 2015, lebih dari 127.000 kematian dini disebabkan oleh PM2.5 ambien, sesuai dengan 2,2 juta tahun hidup yang hilang (YLLs). Dalam skenario Kebijakan Saat Ini, karena peningkatan konsentrasi PM2.5, serta penuaan populasi, beban kematian diproyeksikan meningkat menjadi 217.000 kematian dini dan 3,5 juta YLL pada tahun 2030.

Pada saat yang sama, PM2.5 juga berkontribusi terhadap beban morbiditas yang signifikan. Jumlah morbiditas dan mortalitas yang disebabkan oleh paparan PM2.5 yang diperkirakan pada tahun 2015 dan di bawah skenario Kebijakan Saat Ini pada tahun 2030 diberikan pada Tabel 1, bersama dengan nilai monetisasi dan biaya unit yang digunakan untuk perhitungan. Untuk mortalitas, baik jumlah kematian

dini dapat digunakan bersama dengan nilai statistik kehidupan (*value of a statistical life/ VSL*), atau jumlah tahun kehidupan yang hilang (*number of life years lost /YLL*) yang dikombinasikan dengan nilai statistik tahun kehidupan (*statistical life year/ VOLY*). Seperti yang biasanya terjadi, ditemukan bahwa pendekatan melalui angka kematian \times VSL memberikan biaya yang lebih tinggi daripada YLLs \times VOLY, yang mencerminkan beberapa kesulitan dalam mengaitkan nilai uang dengan kehidupan manusia. Untuk semua analisis lebih lanjut yang ditampilkan dalam laporan ini, digunakan pendekatan monetisasi YLL untuk menilai hilangnya nyawa manusia.

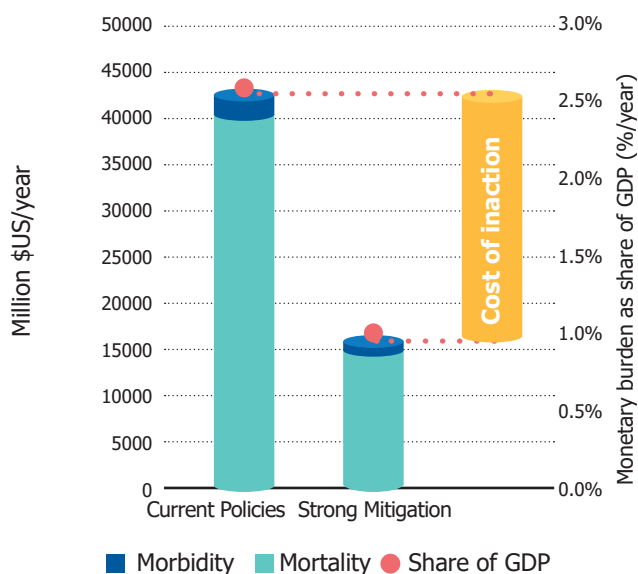
Biaya satuan, VSL, dan VOLY yang ditunjukkan pada Tabel 1 diambil dari kumpulan data yang tersedia secara internasional dan disesuaikan dengan PDB per kapita Indonesia.

Table 1. Morbiditas dan mortalitas yang disebabkan oleh PM2.5 ambien di Indonesia pada tahun 2015 dan 2030 berdasarkan undang-undang saat ini, dan biayanya. Untuk mortalitas, kematian dini dan YLL adalah indikator alternatif dan ditampilkan hanya untuk perbandingan.

Indikator	Kebijakan Saat Ini		Mitigasi yang kuat	Biaya satuan \$US 2015	Biaya - Kebijakan Saat Ini		Biaya – Mitigasi Optimis
	2015	2030	2030		2015	2030	2030
	Kasus - YLL/tahun				Ribuan \$US 2015/tahun		
<i>Mortalitas</i>							
Kematian dini	127,178	216,032	83,295	249,284	31,703,495	53,853,414	20,764,147
YLL	2,196,731	3,500,409	1,377,596	9,427	20,707,914	32,997,285	12,986,176
<i>Morbiditas</i>							
Asma (Kunjungan Ruang Darurat), semua umur	17,778	27,847	9,337	11	189	295	99
Penerimaan rumah sakit kardiovaskular, di bawah usia 65 tahun	8,656	13,301	4,174	1,152	9,976	15,329	4,810
Penerimaan rumah sakit kardiovaskular, setelah usia 65 tahun	4,980	12,716	4,225	1,152	5,739	14,655	4,869
Penerimaan rumah sakit pernapasan, semua usia	13,998	22,017	7,314	561	7,846	12,341	4,100
Hari aktivitas terbatas pernapasan, usia kerja	259,084,841	438,353,537	137,800,276	23	6,020,742	10,186,676	3,202,271

Gambar 2.5 menunjukkan total biaya akibat dampak morbiditas dan mortalitas akibat paparan polusi udara pada tahun 2030 dalam dua alternatif skenario masa depan yang dipertimbangkan dalam kajian ini. Dalam skenario Kebijakan Saat Ini, pada tahun 2030, biaya dampak kesehatan di Indonesia diperkirakan mencapai lebih dari 43 miliar USD per tahun, setara dengan 2,6% PDB Indonesia. Sebaliknya, dalam skenario Mitigasi Optimis, berkat keberhasilan 12 solusi udara bersih dalam mengurangi konsentrasi PM2.5, biaya ini diperkirakan turun menjadi sekitar

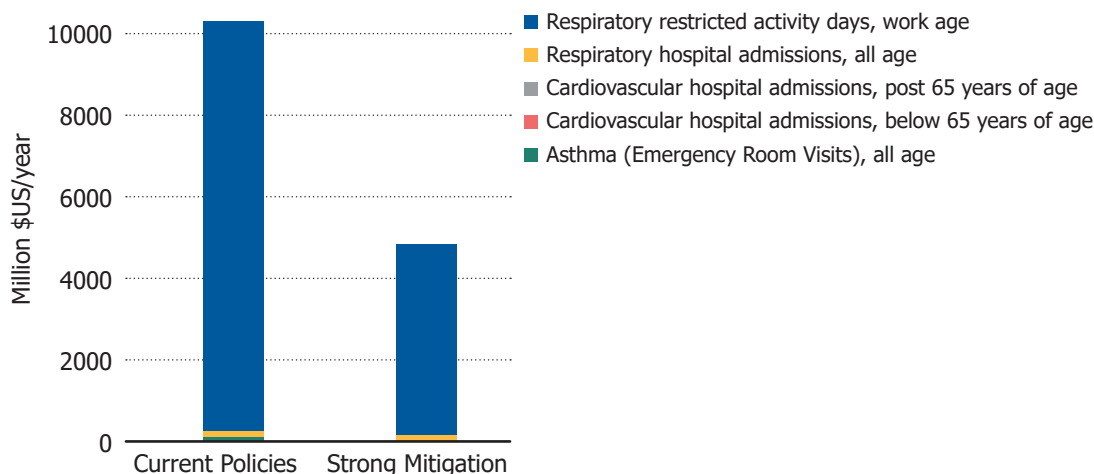
16,2 miliar USD per tahun, setara dengan sekitar 1% PDB pada tahun 2030. Oleh karena itu, ini berarti bahwa dengan tidak menerapkan 12 solusi udara bersih dan mengatasi polusi udara, cost of inaction di Indonesia diperkirakan mencapai 27 miliar USD per tahun, setara dengan sekitar 1,6% dari PDB pada tahun 2030. Biaya ini, yang terkait hanya pada beban kesehatan akibat paparan polusi udara, merupakan indikasi besarnya biaya yang dapat dihindari jika diambil tindakan terhadap polusi udara.



Gambar 2.5 Beban kesehatan yang dimonetisasi dari paparan PM2.5 pada tahun 2030, yang membandingkan skenario Kebijakan Saat Ini dan implementasi yang efektif dari semua tindakan yang dinilai dalam studi ini untuk Indonesia (Kasus Mitigasi Optimis). Stacked Bars – Sumbu kiri: Beban dinyatakan dalam juta USD per tahun, Titik merah – Sumbu kanan: perbandingan terhadap PDB

Sebagian besar beban ekonomi dikaitkan dengan kematian (ditampilkan di sini adalah estimasi monetisasi untuk YLL) yang mewakili sekitar 80% dari biaya. 20% sisanya didominasi (99%) oleh biaya

yang terkait dengan hari pembatasan aktivitas akibat gangguan pernapasan, sebagai contoh, kehilangan hari kerja (Gambar 2.6).

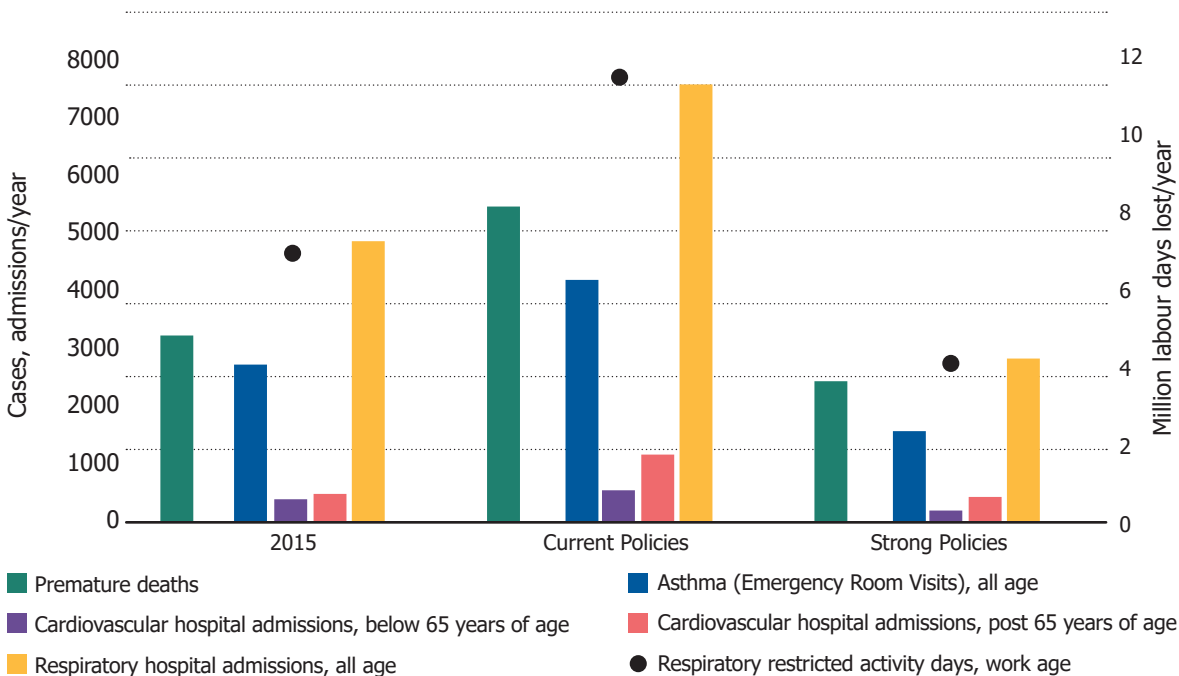


Gambar 2.6 Beban morbiditas yang dimonetisasi dari paparan PM2.5 pada tahun 2030, membandingkan skenario Kebijakan Saat Ini, dan implementasi yang efektif dari semua tindakan (Skenario Mitigasi Optimis)

Gambar 2.7 memberikan ringkasan kematian dini, rawat inap, dan hari kerja yang hilang karena PM2.5 ambien seperti yang diperkirakan untuk tahun 2015 dan perkembangan yang diharapkan menuju tahun 2030 dalam skenario Kebijakan Saat Ini serta dalam skenario Mitigasi Optimis di mana semua tindakan yang diusulkan diambil. Diperkirakan bahwa pada tahun 2015, sekitar 18.000 kunjungan ruang gawat darurat terkait asma, lebih dari 13 ribu rawat inap karena alasan kardiovaskular, 14.000 rawat inap terkait penyakit pernapasan, dan 259 juta mengalami hari dengan aktivitas terbatas karena gangguan pernapasan di antara populasi usia kerja dikaitkan dengan paparan terhadap PM2.5. Dalam skenario Kebijakan Saat Ini, dampak kesehatan ini diproyeksikan meningkat, sambil menerapkan semua 12 solusi dalam skenario Mitigasi Optimis yang ambisius dapat secara efektif mengurangi total rawat inap di rumah sakit sekitar 32 ribu serta mengurangi jumlah kunjungan ruang gawat darurat karena asma hingga 18 ribu dan menghindari 132 ribu kematian dini (Gambar 2.7).

Di luar analisis dampak kebijakan yang memperkenalkan 12 solusi secara keseluruhan (Gambar 2.5), kami juga mengukur manfaat kesehatan spesifik dalam bentuk uang dari penerapan masing-masing solusi yang termasuk dalam skenario Mitigasi Optimis. Manfaat kesehatan ini juga dapat dilihat sebagai biaya kelambanan untuk setiap solusi jika tidak diterapkan.

Hal ini berguna untuk memahami tindakan atau solusi mana yang memiliki manfaat kesehatan terbesar dan menghindari biaya, dan juga dapat dibandingkan dengan biaya penerapan setiap solusi jika data tersebut tersedia. Gambar 2.8 menunjukkan bahwa manfaat terbesar diharapkan dari elektrifikasi dan pengetatan standar emisi dalam transportasi jalan raya yang keuntungannya dimonetisasi diperkirakan sekitar 14,7 miliar USD, dengan inspeksi dan pemeliharaan kendaraan yang lebih ketat menambah lebih lanjut 3,5 miliar USD. Meningkatkan energi terbarukan dan menerapkan kontrol pasca pembakaran di sektor energi dan industri serta meningkatkan standar produksi industri dapat memberikan keuntungan sebesar 18,2 miliar USD. Jika digabungkan, tiga solusi pertanian untuk mengurangi pembakaran residu pertanian, perubahan pola makan, dan penerapan pupuk yang lebih efisien serta praktik pengelolaan ternak juga dapat memberikan manfaat senilai sekitar 10,3 miliar USD. Solusi yang meningkatkan pengelolaan sampah kota dapat menghasilkan keuntungan sebesar 5,9 miliar USD per tahun. Transisi lengkap ke memasak bersih dapat menghasilkan keuntungan sebesar 4,8 miliar USD per tahun hanya dari PM2.5 ambien.⁴ Selain itu, penegakan pencegahan kebakaran hutan yang lebih baik dapat menghasilkan manfaat kesehatan sebesar 0,5 miliar USD, selain manfaat dari kerusakan ekosistem yang dapat dihindari.

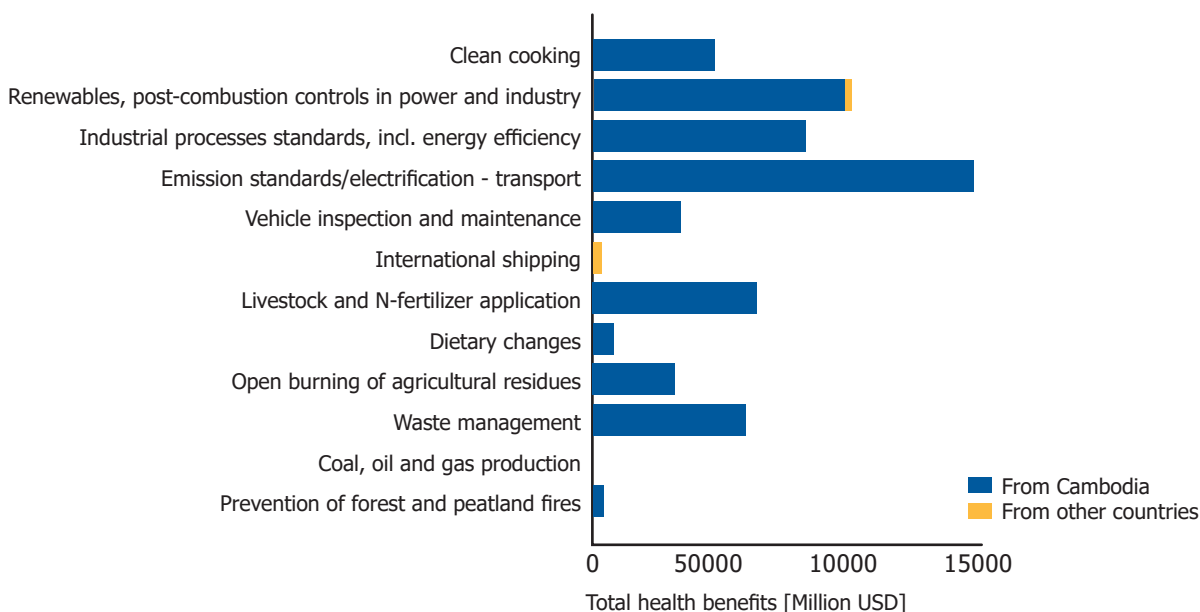


Gambar 2.7 Rangkuman kejadian dampak termasuk perkiraan untuk tahun 2015 dan skenario yang dianalisis. Kematian, kunjungan ruang gawat darurat, dan rawat inap ditampilkan di sumbu kiri, hari aktivitas terbatas (titik) menggunakan sumbu kanan

⁴ Perhatikan bahwa estimasi ini hanya mencakup monetisasi dampak kesehatan dari PM2.5 ambien. Manfaat tambahan akan diharapkan dari pengurangan polusi udara dalam ruangan dalam tindakan Memasak Bersih.

Gambar 2.8 membedakan manfaat yang diperoleh dari penerapan langkah-langkah di Indonesia (biru), dan di negara-negara ASEAN lainnya (kuning). Hal ini karena lokasi dan luas Indonesia, pengaruh arus masuk pencemar lintas batas serta manfaat yang dapat diperoleh melalui langkah-langkah penerapan negara

lain terbatas. Namun, kemungkinan besar pengaruh Indonesia terhadap negara-negara tetangga ASEAN lebih besar daripada sebaliknya, dan oleh karena itu negara-negara tetangga akan mendapat manfaat dari implementasi tindakan kualitas udara yang ambisius di Indonesia.



Gambar 2.8 Manfaat kesehatan yang dimonetisasi dari tindakan individu yang diterapkan pada tahun 2030 di atas kebijakan saat ini.

2.3. Iklim dan co-benefit lainnya

Kajian ini telah memperkirakan biaya yang akan dialami Indonesia di masa depan jika tidak ada tindakan lebih lanjut akibat meningkatnya beban kesehatan akibat polusi udara. Hal ini juga menunjukkan manfaat besar bagi kualitas udara dan kesehatan di Indonesia yang dapat diwujudkan melalui penerapan solusi udara bersih yang ambisius. Menerapkan 12 solusi udara bersih kemungkinan besar juga memiliki banyak manfaat tambahan selain mengurangi emisi dan konsentrasi polutan udara. Ini termasuk manfaat untuk perubahan iklim melalui pengurangan emisi GRK. Gambar 2.9 menunjukkan potensi masing-masing solusi udara bersih untuk mengurangi emisi GRK dan secara khusus membandingkan pengurangan konsentrasi PM2.5 dengan pengurangan emisi untuk CO2 dan CH4 (dikonversi menjadi emisi setara CO2 menggunakan GWP-100) dari penerapan setiap solusi.

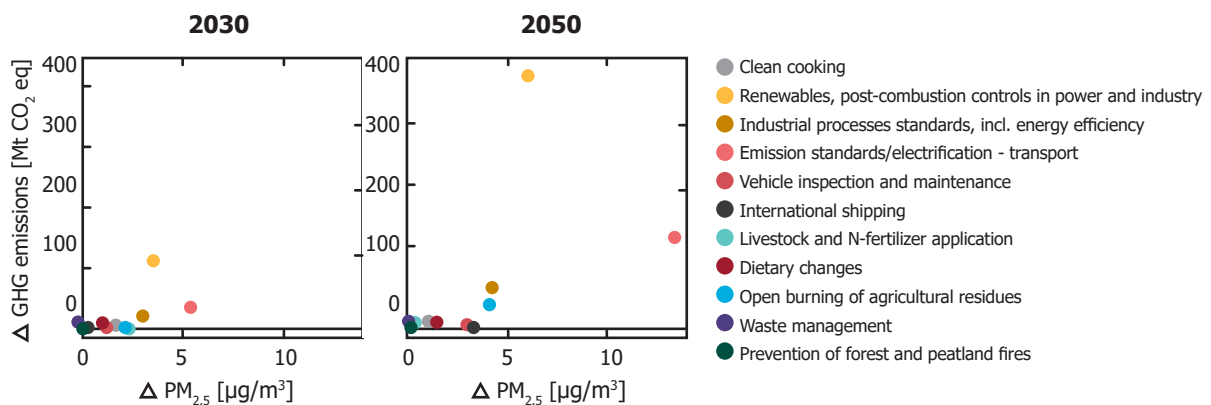
Pada tahun 2030, potensi penurunan emisi GRK terbesar adalah untuk solusi terkait sektor listrik, transportasi dan industri. Langkah yang memiliki potensi terbesar untuk mengurangi emisi GRK adalah memperkenalkan energi terbarukan di sektor ketenagalistrikan. Ini, dikombinasikan dengan kontrol emisi pasca-pembakaran yang ketat, diperkirakan akan mengurangi emisi GRK hingga lebih dari 100 Mt (CO2-eq.) pada tahun 2030 dan lebih dari 400 Mt

(CO2-eq) pada tahun 2050, sekaligus mengurangi paparan PM2.5 sebesar 4 µg/m3 pada tahun 2030 dan 6 µg/m3 pada tahun 2050. Selain itu, langkah yang memiliki potensi terbesar untuk mengurangi polusi udara juga memiliki manfaat tambahan iklim yang signifikan: penerapan standar emisi yang lebih ketat dan percepatan elektrifikasi di sektor transportasi jalan dapat secara bersamaan mengurangi emisi GRK sebesar 35 Mt (CO2-eq.) sebesar 2030 dan 150 Mt pada 2040, dan juga menurunkan paparan rata-rata populasi terhadap PM2.5 lebih dari 5 µg/m3 pada 2030 dan 13 µg/m3 pada 2050. Kemungkinan juga bahwa untuk transportasi jalan raya, manfaat yang sebanding dapat dicapai dengan kebijakan sisi permintaan, termasuk peningkatan angkutan umum, zona rendah emisi (bebas mobil), skema pembebanan kemacetan, pengembangan jalur sepeda baru dan insentif mobilitas aktif, dll. Kebijakan semacam itu pada saat yang sama dapat memiliki banyak manfaat tambahan lainnya seperti mengurangi kemacetan dan waktu yang dihabiskan dalam kemacetan lalu lintas, mengurangi jumlah kecelakaan di jalan raya, serta tambahan manfaat tambahan kesehatan dari perjalanan aktif.

Analisis yang disajikan dalam laporan ini berfokus terutama pada manfaat yang dapat dicapai dalam

waktu dekat, cakrawala waktu kebijakan kualitas udara tipikal. Kebijakan iklim menetapkan target jangka panjang dan masing-masing tindakan transformasi sering kali membutuhkan waktu lebih lama untuk diterapkan sepenuhnya. Gambar 2.9 menunjukkan manfaat tambahan kualitas udara dan iklim yang dapat dicapai dalam waktu dekat (pada tahun 2030) serta pada tahun 2050 untuk menyoroti manfaat tambahan dari perubahan transformatif dalam jangka panjang. Perspektif waktu yang lebih lama membantu untuk menghargai dengan lebih baik manfaat tambahan dari beberapa tindakan seperti elektrifikasi sektor transportasi, yang memiliki inersia lebih lama karena perputaran armada, dan penerapan energi terbarukan dalam skala besar di bidang listrik dan industri. Sebaliknya, kelambanan di sektor-sektor ini juga akan melupakan pengurangan gas rumah kaca yang substansial dan dengan demikian memiliki 'biaya kelambanan' dalam hal emisi, yang juga dapat dikaitkan dengan biaya moneter jika harga karbon diberlakukan.

Indonesia telah menetapkan target yang ambisius untuk mengurangi emisi gas rumah kaca di negara ini setidaknya 31% pada tahun 2030 dibandingkan dengan skenario baseline, sekaligus bertujuan untuk menjadi ekonomi yang berkembang sepenuhnya pada tahun 2045. Perubahan iklim dan polusi udara memiliki biaya ekonomi, dan kebijakan semacam itu seperti yang disorot di atas, tidak hanya dapat memberikan manfaat besar bagi kesehatan dan kesejahteraan penduduk, tetapi juga dalam membantu pembangunan ekonomi dan mencapai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan. Pada saat yang sama, beberapa kebijakan yang berkaitan dengan iklim atau pembangunan berkelanjutan seperti yang dirinci dalam Kontribusi yang Ditentukan Secara Nasional (NDC) atau Strategi Pembangunan Jangka Panjang Indonesia juga akan memiliki manfaat tambahan untuk polusi udara. Pengukuran manfaat kesehatan dan ekonomi tambahan ini dapat meningkatkan basis bukti dan memberikan motivasi lebih lanjut untuk bertindak.



Gambar 2.9 Manfaat tambahan dari langkah-langkah individu untuk emisi GRK (CO₂ + CH₄) ketika diterapkan sepenuhnya pada tahun 2030 (kiri) dan 2050 (kanan)

3. Batasan

3.1. Skenario dan solusi

Analisis yang disajikan dalam laporan ini mengandalkan skenario yang ada. Pengembangan skenario baru yang tepat dan sesuai untuk analisis dengan model GAINS tidak dapat dilakukan karena keterbatasan informasi yang tersedia. Namun, skenario yang ada saat ini telah mencerminkan berbagai intervensi sehubungan dengan dampak dan diharapkan mencakup ruang lingkup potensial kebijakan lokal. Tinjauan dan kajian keadaan kebijakan dan kemajuan dalam implementasinya (OECD, 2019; UNEP, 2015; EANET, 2020) menunjukkan bahwa asumsi tentang kebijakan yang dipertimbangkan dalam skenario Kebijakan Saat Ini sebagian besar lengkap dan konsisten dengan kerangka kerja legislatif yang ada di Indonesia untuk menangani kualitas udara dan perubahan iklim. Namun, beberapa kebijakan yang diputuskan baru-baru ini dipertimbangkan untuk diterapkan di tahun-tahun mendatang tidak termasuk

dalam kasus kebijakan saat ini (misalnya, standar bahan bakar transportasi^{5,6}), potensi pengurangannya ditangkap dalam perkiraan potensi mitigasi lebih lanjut dalam kajian. Hal yang sama berlaku untuk potensi dan dampak mitigasi kualitas udara yang diusulkan atau dievaluasi (lihat Greenstone dan Fan, 2019) karena masing-masing potensi mitigasi terwakili dengan baik dalam skenario Mitigasi Optimis.

Resolusi model temporal default adalah lima tahun dan meskipun analisis dapat dilakukan untuk satu atau beberapa tahun, rangkaian skenario yang tersedia tidak memiliki resolusi yang lebih baik. Kajian masing-masing bertujuan untuk menunjukkan manfaat (penilaian biaya ketidakberlanjutan) dalam perspektif jangka panjang, yang konsisten dengan respons khas untuk tindakan kebijakan.

3.2. Ketersediaan/keandalan data

Pada kajian ini, terdapat beberapa keterbatasan yang disebabkan oleh keterbatasan data, alat, dan juga sumber daya yang tersedia. Kualitas dan keterwakilan hasil dan kajian sangat bergantung pada data yang mendasari pada tingkat dasar mortalitas, morbiditas, dan skema pembiayaan. Meskipun set data default yang dihasilkan dari sumber internasional memiliki

kekuatan ilmiah, namun tidak selalu sepenuhnya mewakili keadaan lokal, dan data lokal jelas lebih disukai. Penilaian saat ini didasarkan pada kombinasi data lokal dan internasional. Khususnya, untuk biaya rawat inap dan biaya hari kerja, tidak ada data lokal yang tersedia.

3.3. Konsentrasi PM_{2,5} yang dimodelkan

GAINS mereproduksi konsentrasi PM_{2.5} ambien terukur di daerah dengan polusi rendah (di Indonesia) dengan baik, namun tampaknya memperkirakan konsentrasi yang terlalu tinggi di wilayah Jawa Barat sekitar Jakarta. Hal ini dapat mengakibatkan perkiraan dampak kesehatan dan biaya kerusakan yang terlalu

tinggi karena wilayah ini merupakan salah satu wilayah yang paling padat penduduknya di Indonesia. Jumlah kematian yang dapat dikaitkan dengan tingkat PM_{2,5} saat ini diperkirakan sedikit lebih tinggi daripada perkiraan Beban Penyakit Global sebesar 11%.

3.4. Biaya tindakan

Sementara penilaian ini berfokus pada biaya tidak bertindak, perkiraan biaya tindakan (termasuk kebijakan saat ini serta implementasi tindakan mitigasi lebih lanjut) belum dilakukan dalam penilaian ini dan memerlukan diskusi lebih lanjut dengan para ahli nasional untuk memvalidasi dan memperluas penilaian langkah-langkah tersebut.

Model GAINS secara rutin mengkuantifikasi biaya tahunan untuk penerapan langkah-langkah teknis ('*end of pipe*') pengendalian polusi udara. Sebuah

penilaian yang komprehensif juga harus mencakup biaya transformasi struktural seperti, misalnya, dekarbonisasi sektor energi, yang dikuantifikasi dalam model sistem energi, biasanya digunakan sebagai sumber skenario penggunaan energi dalam model GAINS. Biaya tambahan yang terkait dengan transformasi menuju ekonomi polusi rendah mungkin termasuk biaya penyediaan akses energi bersih untuk memasak, peningkatan pengelolaan limbah, transformasi sistem produksi pertanian, dan biaya

⁵ <https://www.transportpolicy.net/standard/indonesia-fuels-diesel-and-gasoline/>.

⁶ <https://www.reuters.com/business/energy/indonesia-bar-sale-gasoline-below-90-octane-2023-regulator-2022-10-26/>.

penegakan undang-undang yang dipertimbangkan. Perkiraan awal dalam GAINS, dengan hanya mempertimbangkan opsi mitigasi teknis dan dengan asumsi biaya internasional, menunjukkan biaya tahunan untuk tindakan tambahan (Kasus kebijakan Ketat vs Saat ini) dalam urutan 8-10 miliar USD, yang mewakili sekitar sepertiga dari perkiraan biaya kelambanan. Namun, seperti disebutkan sebelumnya, perkiraan ini tidak termasuk biaya transformasi menuju bagian yang lebih tinggi dari energi terbarukan, pola makan alternatif, dll.

Singkatnya, dalam hal estimasi biaya tindakan, ada beberapa batasan dalam model dan data:

- i. GAINS bergantung pada standar internasional untuk biaya dan tidak memasukkan faktor biaya lokal jika sesuai (walaupun, sebagian besar teknologi pengendalian polusi udara diperdagangkan secara internasional),
- ii. GAINS hanya mencakup biaya untuk tindakan teknis pengendalian polusi udara dan bukan biaya sistem untuk transisi energi, perubahan pola makan, biaya institusional, dll., dan
- iii. itu mengasumsikan implementasi penuh bahkan teknologi yang sangat mahal yang akan ditinggalkan dalam skenario hemat biaya.

3.5. Cakupan dampak yang dikaji

Kisaran kemungkinan biaya di sisi dampak, yang digunakan untuk menghitung cost of inaction, sangatlah besar. Di luar biaya mortalitas yang dimonetisasi dan biaya pasar untuk morbiditas, biaya tersebut dapat mencakup biaya ekonomi makro dan lingkungan lainnya seperti:

- Kerugian panen terkait dengan peningkatan ozon,
- Dampak ekosistem dari polusi udara (endapan Belerang dan Nitrogen),
- Dampak ekonomi makro dari hilangnya tenaga kerja.

Analisis dalam kajian ini terbatas pada biaya mortalitas dan morbiditas, dan hanya konsentrasi ambien PM_{2.5}. Hanya beberapa hasil morbiditas yang dipertimbangkan, sehingga dampak total melalui morbiditas kemungkinan besar diabaikan. Paparan polutan udara lain seperti NO₂ dan ozon (O₃) dikaitkan dengan dampak kesehatan dan ekosistem serta hilangnya panen karena peningkatan konsentrasi ozon. Pembentukan ozon dipengaruhi oleh emisi metana. Oleh karena itu, pengenalan langkah-langkah yang dianalisis dalam kajian ini dapat memberikan manfaat

tambahan. Namun, ini adalah urutan besarnya lebih kecil dari manfaat terkait pengurangan partikel dan tidak dilaporkan di sini.

Dampak pengendapan belerang dan nitrogen, seperti pengasaman dan eutrofikasi ekosistem, dapat menjadi signifikan. Selanjutnya, langkah-langkah yang dianalisis dalam kajian akan mengarah pada pengurangan emisi SO₂, NO_x, dan NH₃, yang akan berkontribusi untuk mengurangi pengendapan dan oleh karena itu, dalam jangka panjang, setidaknya pemulihan sebagian ekosistem. Namun, kurangnya kumpulan data yang konsisten tentang sensitivitas ekosistem di seluruh wilayah dan kajian biaya untuk dampak terkait membuat analisis semacam itu tidak mungkin dilakukan.

Terakhir, kajian dampak dan manfaat ekonomi makro dengan menggunakan model ekonomi makro melampaui sumber daya yang tersedia untuk studi ini. Kajian semacam itu akan memerlukan partisipasi tim pemodelan ekonomi yang memiliki alat dan data yang sesuai.

4. Kesimpulan dan rekomendasi

Indonesia menghadapi beban kesehatan yang signifikan akibat paparan konsentrasi PM2.5 di udara ambien, yang berdampak pada tingkat mortalitas dan morbiditas yang tinggi. Biaya dampak terkait dengan beban ini sangat besar. Oleh karena itu, penting untuk mengimplementasikan undang-undang yang telah disahkan secara efisien guna menghentikan atau memperlambat tren peningkatan emisi dan polusi udara. Namun, tanpa adanya kebijakan tambahan yang diperkenalkan, penurunan yang diharapkan tidak akan terjadi.

Kajian ini mengidentifikasi potensi mitigasi yang signifikan yang terdiri dari tindakan teknis dan non-teknis yang dapat memberikan manfaat penting dalam jangka panjang terkait iklim apabila dilaksanakan secara penuh.

Cost of inaction diestimasi berdasarkan dampak mortalitas dan morbiditas akibat polusi udara jika tidak ada tindakan lebih lanjut. Sebagian besar dari biaya ini terkait dengan kematian dini dan diperkirakan mencapai sekitar 27 miliar USD pada tahun 2030. Namun, dengan memperkenalkan kebijakan yang mendorong penerapan langkah-langkah mitigasi tambahan yang telah diidentifikasi dengan cepat, manfaat yang signifikan dapat dicapai dengan potensi biaya yang jauh lebih rendah, meskipun perkiraan biaya ini belum sepenuhnya disusun. Perkiraan awal biaya implementasi langkah-langkah teknis menunjukkan bahwa pada tahun 2030, biaya ini akan menjadi kurang dari sepertiga dari biaya kelambanan yang diperkirakan.

Kebijakan utama yang memberikan manfaat besar meliputi:

- Pembangkit dan industri: Transisi yang dipercepat ke pembangkit listrik dengan sumber energi terbarukan bersamaan dengan pengendalian emisi pencemar udara, elektrifikasi di industri, optimasi proses produksi yang hemat energi,
- Elektrifikasi armada kendaraan, kontrol emisi yang ketat kendaraan dengan mesin berbasis pembakaran yang tersisa, termasuk inspeksi dan perawatan rutin untuk menghilangkan kendaraan beremisi tinggi,
- Standar emisi yang lebih ketat untuk industri,
- Praktik pertanian yang lebih baik, termasuk pengurangan emisi dengan pengelolaan ternak dan dari aplikasi pupuk serta penegakan larangan pembakaran terbuka residu pertanian,
- Peralihan menyeluruh ke bahan bakar memasak bersih, idealnya langsung ke listrik,
- Pengelolaan limbah yang efisien, pencegahan pembakaran limbah secara terbuka

Tindakan lebih lanjut yang didorong oleh dampak kesehatan yang terjadi juga akan memberikan manfaat yang signifikan terkait iklim, termasuk pengurangan emisi gas rumah kaca. Manfaat ini akan semakin besar dalam jangka panjang dan berkontribusi pada pengurangan emisi CO₂ dan CH₄ pada tahun 2050. Beberapa langkah penting yang dapat memberikan manfaat jangka panjang ini adalah meningkatkan penggunaan energi terbarukan dalam sektor listrik, mendorong elektrifikasi transportasi, dan menerapkan kebijakan pengelolaan limbah.

Lampiran

Lampiran 1. Metodologi dan sumber data

Ringkasan

Perhitungan beban mortalitas dan morbiditas dalam kajian ini mengikuti kerangka kajian risiko komparatif. Hal ini berarti bahwa dari total beban penyakit (baik dalam bentuk kematian maupun kasus morbiditas), sebagian terkait dengan paparan terhadap PM2.5. Perhitungan ini membutuhkan informasi seperti konsentrasi PM2.5 ambien, data populasi pada resolusi grid yang sama, fungsi respons-konsentrasi untuk penyakit yang ditentukan, dan tingkat dasar (*baseline*) untuk penyakit tersebut. Selain itu, untuk kajian biaya dampak, perlu juga diperoleh biaya satuan yang terkait dengan hal yang sama.

Bagan arus informasi dan langkah perhitungan ditunjukkan dalam Gambar 3. Dalam analisis ini, model GAINS (*Greenhouse gas-Air Pollution Interactions and Synergies*) (Amann et al., 2011; tersedia secara online di <https://gains.iiasa.ac.at>) digunakan sebagai alat utama. GAINS, yang dikembangkan oleh *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA), menggabungkan data tentang pembangunan ekonomi, struktur, potensi pengendalian, biaya sumber emisi, pembentukan dan penyebaran polutan di atmosfer, serta kajian dampak lingkungan dari polusi (<http://gains.iiasa.ac.at>). Dalam penelitian ini, model GAINS digunakan untuk memperkirakan emisi PM2.5 dan polutan pendahulunya, menghitung konsentrasi PM2.5 ambien yang dihasilkan dari emisi tersebut (seperti yang dijelaskan lebih lanjut di Bagian 0), dan mengevaluasi dampak kesehatan seperti yang dijelaskan di bawah ini.

Dari konsentrasi PM2.5 ambien, dampak kesehatan dalam bentuk mortalitas dan morbiditas dihitung. Semua hasil ini tercantum dalam Kotak 1. Dalam analisis ini, model GAINS rutin menghitung dampak kesehatan berdasarkan kematian dini dan YLL

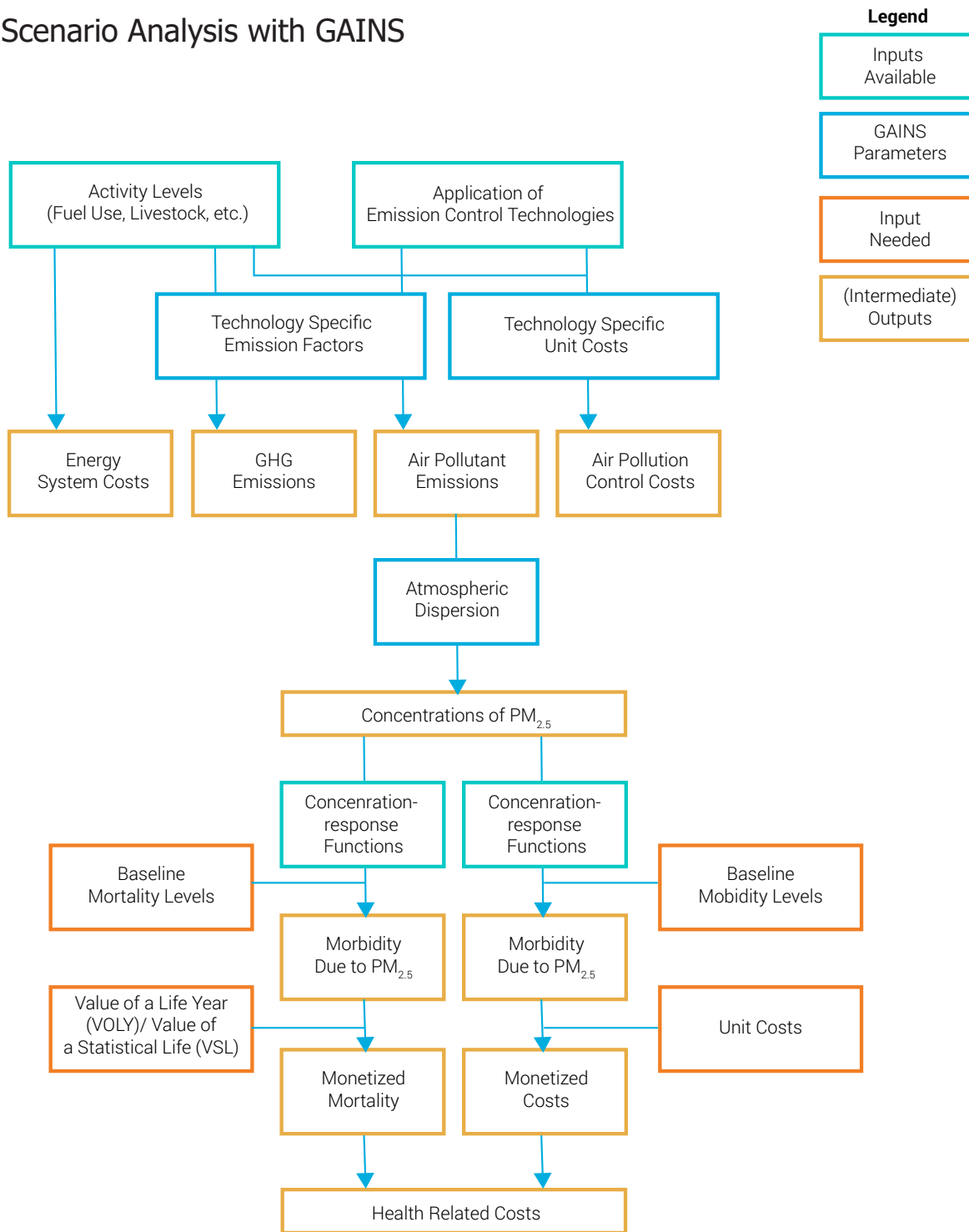
(*Years of Life Lost*) dari enam penyakit, mengikuti metodologi yang dikembangkan dalam kajian *Global Burden of Disease* (GBD) (Murray et al., 2020). Dalam penelitian ini, perhitungan dampak telah diperluas untuk mencakup morbiditas terkait penyakit kardiovaskular dan paru-paru. Untuk tujuan ini, hubungan konsentrasi-respons baru untuk beberapa titik akhir morbiditas telah dikembangkan dan saat ini sedang ditinjau dalam literatur ilmiah. Daftar lengkap titik akhir mortalitas dan morbiditas yang dikaji dalam analisis ini diberikan dalam Kotak 1, dan deskripsi fungsi respons-konsentrasi dapat ditemukan di Bagian **Error! Reference source not found.**

di mana RR_{nda} adalah risiko relatif untuk rata-rata tahunan tingkat n konsentrasi PM2.5, yang mana orang pop_n terpapar. RR dan dengan demikian juga PAF dapat spesifik untuk usia a ; untuk hasil di mana CRF tidak spesifik usia, indeks a dapat diturunkan dari Persamaan 1.

$$PAF_{da} = \frac{\sum_n pop_n \cdot (RR_{nda} - 1)}{\sum_n pop_n \cdot RR_{nda}} \quad 1$$

Untuk setiap hasil kesehatan d (mortalitas atau morbiditas spesifik penyakit), kami menghitung fraksi populasi yang dapat diatribusikan dari total beban berdasarkan distribusi paparan populasi terhadap PM2.5, di mana RR_{nda} adalah risiko relatif untuk rata-rata tahunan tingkat n konsentrasi PM2.5, yang mana orang pop_n terpapar. RR dan dengan demikian juga PAF dapat spesifik untuk usia a ; untuk hasil di mana CRF tidak spesifik usia, indeks a dapat diturunkan dari Persamaan 1.

Scenario Analysis with GAINS



Gambar 3. Alur informasi dalam model GAINS untuk menilai biaya kebijakan dan biaya terkait dampak untuk satu skenario (Kebijakan Saat Ini atau kasus Mitigasi). Bidang oranye menyoroti input data yang diperlukan dari mitra lokal.

Kasus c akibat kematian, rawat inap, kunjungan ruang gawat darurat atau hari aktivitas terbatas dihitung sebagai

$$c_{da} = PAF_{da} \cdot c_{BL,da} \quad 2$$

di mana $c_{BL,da}$ adalah jumlah kasus dasar untuk hasil tertentu d . Perhitungannya adalah usia tertentu untuk kematian. Angka kematian dasar pada kelompok usia

lima tahun diambil dari Alat Hasil GBD, yang mewakili hasil Beban Penyakit Global untuk tahun 2019 (Murray et al., 2020). Angka morbiditas dasar diturunkan dari kumpulan data yang tersedia secara internasional dan masukan nasional, seperti yang dijelaskan di Bagian **Error! Reference source not found.** Kami berasumsi bahwa tingkat kejadian tetap konstan di masa depan. Proyeksi populasi mengikuti UN World Population Prospects 2017 (UN, 2017).

Kotak 1: Titik akhir dipertimbangkan dalam kajian.

Penyebab kematian yang dipertimbangkan dalam kajian:

- Penyakit paru obstruktif kronis
- Penyakit jantung iskemik
- Stroke
- Kanker paru-paru
- Infeksi saluran pernapasan bawah akut
- Diabetes tipe 2

Indikator morbiditas yang dipertimbangkan dalam kajian:

- Kunjungan ruang gawat darurat terkait asma
- Rawat inap di rumah sakit kardiovaskular (sebelum/sesudah 65 tahun)
- Perawatan di Rumah Sakit Pernapasan
- Hari aktivitas terbatas pernapasan (usia kerja)

Dari kematian dini, tahun hidup yang hilang (YLL) dihitung dengan mengalikan jumlah kematian yang disebabkan dengan harapan hidup yang tersisa pada usia kematian. Perlu dicatat bahwa pendekatan ini memiliki sifat konservatif karena menggunakan meja kehidupan aktual negara yang sedang diteliti. Ancangan lain, seperti kajian *Global Burden of Disease*, menggunakan harapan hidup yang tersisa dari negara-negara dengan harapan hidup tertinggi yang tercatat untuk tujuan ini, seperti Jepang, yang menghasilkan perkiraan YLL yang lebih tinggi.

Perhitungan biaya terkait dampak bergantung pada biaya unit uc_d untuk setiap hasil d yang dikalikan dengan angka atribut $PM_{2.5}$ c_d untuk setiap hasil:

$$cost_d = c_d \cdot uc_d \quad 3$$

Untuk kajian kematian, baik nilai kehidupan statistik (VSL) atau nilai tahun kehidupan (VOLY) dapat digunakan. VSL perlu digabungkan dengan jumlah

kematian yang disebabkan, sedangkan VOLY digunakan bersamaan dengan jumlah tahun kehidupan yang hilang (YLL). Data biaya yang digunakan dalam kajian bergantung pada kombinasi input nasional dan estimasi standar dari kumpulan data internasional, seperti yang dijelaskan di Bagian 0.

Kuantifikasi dampak kesehatan dan biaya dampak melibatkan pengukuran yang bergantung pada definisi tindakan mitigasi seperti yang dijelaskan dalam laporan utama, Tabel 1. Meskipun model GAINS menggunakan hubungan linier antara emisi dan konsentrasi $PM_{2.5}$, fungsi risiko untuk kematian bersifat non-linier. Hal ini berarti bahwa ukuran efek suatu tindakan bergantung pada urutan tindakan yang diambil. Untuk menghindari kompleksitas ini, kami melakukan linearisasi hubungan antara konsentrasi $PM_{2.5}$ dan setiap hasil kesehatan berdasarkan konsentrasi dan tingkat dampak kesehatan yang dicapai dalam skenario Kebijakan Saat Ini dan skenario Mitigasi Optimis.

Emisi dan konsentrasi $PM_{2.5}$ ambien

GAINS menggunakan proyeksi aktivitas dari sumber eksternal (misalnya, proyeksi ekonomi makro, produksi dan penggunaan energi dari model energi dunia IEA (IEA, 2019), proyeksi penggunaan ternak dan pupuk dari Organisasi Pangan dan Pertanian PBB (lihat Alexandratos dan Bruinsma, 2012) sebagai faktor pendorong, dan menggabungkannya dengan informasi tentang tingkat penerapan portofolio tindakan pengendalian emisi yang signifikan. Informasi ini digunakan untuk menghitung emisi polutan udara (termasuk semua prekursor utama $PM_{2.5}$, seperti $PM_{2.5}$, primer, SO_2 , NO_x , NH_3 , NMVOC) dan gas rumah kaca. Faktor emisi yang terkait dengan teknologi digunakan,

dan karakteristik biaya digunakan untuk menghitung biaya dari tindakan pengurangan polusi udara.

Emisi dihitung pada tingkat sektoral terperinci berdasarkan data aktivitas, faktor emisi yang tidak terkendali, efisiensi penghilangan teknologi pengendalian emisi, dan sejauh mana teknologi (langkah) tersebut diterapkan:

$$E_{i,p} = \sum_k \sum_m A_{i,k} e f_{i,k,m,p} x_{i,k,m,p} \quad 4$$

where:

- i, k, m, p
 $E_{i,p}$ Wilayah sumber, jenis kegiatan, tindakan pengurangan, pencemar, masing-masing Emisi polutan p (untuk $SO_2, NO_x, NMVOC, NH_3, PM_{2.5}$) di wilayah sumber i. Emisi GRK (CO_2, CH_4, N_2O) juga dihitung.
- $A_{i,k}$ Tingkat aktivitas tipe k (misalnya, konsumsi batu bara di pembangkit listrik) di wilayah sumber i
- $ef_{i,k,m,p}$ Faktor emisi polutan p untuk aktivitas k di wilayah i setelah penerapan tindakan pengendalian m
- $x_{i,k,m,p}$ Pangsa aktivitas total tipe k di wilayah i yang menerapkan tindakan pengendalian m untuk polutan p.

Dalam hal wilayah sumber, GAINS memiliki cakupan global dengan wilayah sumber yang merupakan negara atau unit sub-nasional di sebagian besar wilayah Asia. Di Indonesia, GAINS membedakan empat wilayah: Jakarta, Jawa di luar Jakarta, Sumatera, Seluruh Indonesia.

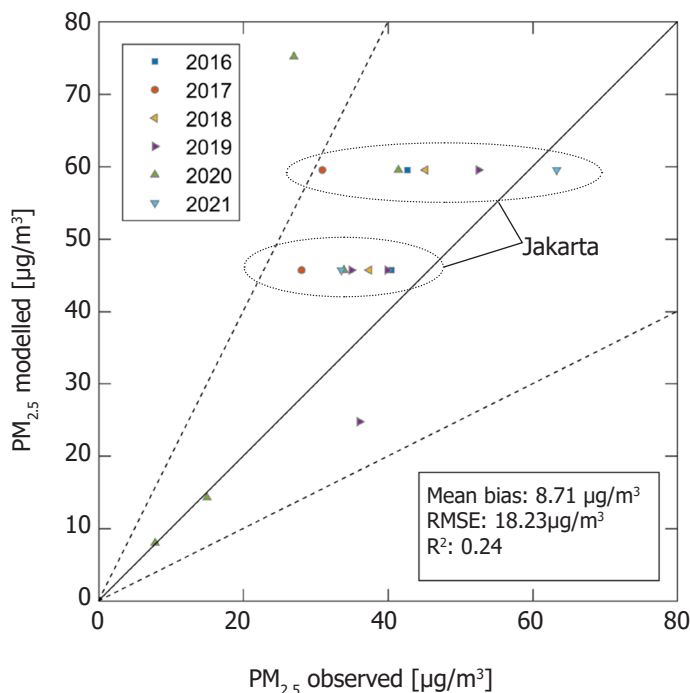
Kimia EMEP (Simpson et al. 2012) seperti yang dijelaskan dalam Informasi Tambahan untuk (Amann et al., 2020). Konsentrasi $PM_{2.5}$ dihitung pada kisi $0,1^\circ$ (kira-kira 10×10 km) sehingga sesuai dengan tingkat latar belakang perkotaan, bukan dengan titik polusi.

Untuk menghitung konsentrasi $PM_{2.5}$ ambien, GAINS menggunakan pendekatan linier Model Transportasi

Validasi konsentrasi $PM_{2.5}$ ambien

Gambar 4 menunjukkan perbandingan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang dimodelkan untuk tahun 2015 dengan data pemantauan tahun terakhir yang disediakan oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan stasiun Kedutaan Besar AS di Jakarta. Hanya stasiun dengan cakupan waktu >75% yang digunakan dalam perbandingan.

GAINS mereproduksi variasi konsentrasi dengan baik tetapi melebih-lebihkan total $PM_{2.5}$ di daerah yang lebih tercemar di Jawa Barat seperti Bandung. Selain itu, Jakarta tampaknya agak berlebihan. Ini mungkin karena masalah dalam distribusi geografis sumber emisi dalam model GAINS.



Gambar 4: Perbandingan konsentrasi $PM_{2.5}$ yang dimodelkan dengan GAINS tahun 2015 terhadap pengamatan dari tahun 2016 hingga 2021

Fungsi konsentrasi-respons

Fungsi konsentrasi-respons yang digunakan dalam proyek ini berasal dari meta-analisis studi epidemiologi baru-baru ini yang melampaui bukti yang tersedia untuk kajian sebelumnya. Titik akhir dipilih berdasarkan alat CarbonH (Spadaro et al., 2018).

Dokumentasi lengkap saat ini sedang ditinjau (Ru et al., diserahkan ke Environment International). Hasilnya adalah:

- Kunjungan ruang gawat darurat terkait asma
- Rawat inap di rumah sakit kardiovaskular (sebelum/ sesudah 65 tahun)
- Perawatan di Rumah Sakit Pernapasan
- Hari aktivitas terbatas pernapasan (usia kerja)

Selain titik akhir ini, CRF untuk rawat inap terkait asma, kejadian bronkitis pada anak-anak, dan kejadian demensia telah dikembangkan oleh Ru et al., tetapi ini tidak digunakan dalam kajian saat ini.

Ru et al. mengembangkan dua versi CRF menggunakan model regresi log-linier atau nonlinier agar sesuai dengan studi yang tersedia. Dalam kajian ini, kami menggunakan versi log-linear. Karena kuantifikasi manfaat dari tindakan individual memerlukan langkah linearisasi, CRF log-linear tampaknya lebih cocok.

Dalam CRF log-linear, risiko relatif dinyatakan sebagai

$$RR (PM) = \exp (\beta \cdot PM)$$

Dengan koefisien β yang diperoleh dari analisis regresi sebagai

Kunjungan ruang gawat darurat terkait asma	0.0034/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Penerimaan rumah sakit kardiovaskular (sebelum 65 tahun)	0.0009/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Penerimaan rumah sakit kardiovaskular (pasca 65 tahun)	0.0013/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Perawatan di Rumah Sakit Pernapasan	0.0013/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Hari aktivitas terbatas pernapasan (usia kerja)	0.0102/ $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Sementara CRF umumnya dikaitkan dengan dampak paparan jangka pendek terhadap $\text{PM}_{2.5r}$ dalam studi ini, mereka diterapkan pada konsentrasi rata-rata tahunan. Ru et al. melakukan perbandingan antara efek penggunaan rata-rata tahunan dan data deret waktu di Amerika Serikat. Mereka menemukan sedikit

overestimasi mulai dari 0,1% sampai 1,3% untuk hasil morbiditas yang berbeda. Namun, karena adanya banyak ketidakpastian lainnya, analisis ini tidak mempertimbangkan overestimasi yang disebutkan di atas. Ketidakpastian ini cenderung memiliki dampak yang lebih besar pada hasil.

Tingkat Morbiditas Dasar

Kekuatan hasil kajian sangat bergantung pada tingkat dasar untuk kejadian kematian dan morbiditas. Sementara perkiraan penyebab kematian yang spesifik berdasarkan kelompok usia dapat ditemukan di Alat Hasil Beban Global Penyakit (<https://vizhub.healthdata.org/gbd-results/>) dan konsisten dengan kajian GBD 2019 (Vos et al., 2020), tingkat dasar

untuk titik akhir morbiditas yang dipertimbangkan di sini hanya tersedia sebagian dari data nasional (lihat Bagian 0). Untuk titik akhir di mana data nasional tidak tersedia, tingkat default telah diestimasi berdasarkan kumpulan data internasional seperti yang dijelaskan dalam Bagian **Error! Reference source not found.**

Data nasional

Data rawat inap karena sakit pada tahun 2019-2021 telah tersedia untuk kajian ini oleh Kementerian Kesehatan. Ini telah digunakan untuk mengkalibrasi tingkat morbiditas dasar dalam kajian untuk hasil yang terkait dengan penerimaan rumah sakit kardiovaskular dan pernapasan. Kami hanya menggunakan data tahun 2019 untuk menghindari kemungkinan dampak sementara selama pandemi COVID-19.

Kunjungan ruang gawat darurat terkait asma diperkirakan berdasarkan tingkat masuk rumah sakit asma, diskalakan dengan rasio ERV terkait asma dengan rawat inap di rumah sakit dalam kumpulan data default.

Tingkat dasar dari penyakit terkait: Perkiraan default

Data mengenai tingkat morbiditas awal seringkali sulit diperoleh, oleh karena itu kita mengestimasi kumpulan data default dari sumber global. Titik akhir morbiditas yang dipertimbangkan di sini, seperti rawat inap dan kunjungan ke unit gawat darurat, merupakan hasil dari kombinasi prevalensi penyakit dan beberapa faktor lainnya. Faktor-faktor ini memengaruhi apakah individu dengan penyakit tersebut dirawat di rumah sakit atau pergi ke unit gawat darurat. Oleh karena itu, kami memperoleh data prevalensi dasar

spesifik negara berdasarkan tingkat prevalensi dasar penyakit tersebut di negara tersebut, dan kemudian menyesuaikannya dengan tingkat acuan dasar yang dilaporkan dalam sumber yang tersedia.

Kami menggunakan *Global Burden of Diseases 2019* (Global Burden of Disease Collaborative Network, 2021) untuk mendapatkan tingkat prevalensi dasar penyakit terkait dengan melakukan pemetaan sebagai berikut:

Titik akhir morbiditas	Penyakit terkait di GBD 2019
Kunjungan ruang gawat darurat asma (ERV) untuk semua populasi	Tingkat prevalensi asma (≥ 20)
Penerimaan rumah sakit asma untuk pasca-20	Tingkat prevalensi asma (≥ 20)
Penerimaan rumah sakit asma untuk di bawah-20	Tingkat prevalensi asma (< 20)
Penerimaan rumah sakit kardiovaskular untuk di bawah-65	Tingkat prevalensi penyakit kardiovaskular (< 70)
Penerimaan rumah sakit kardiovaskular untuk pasca-65	Tingkat prevalensi penyakit kardiovaskular (≥ 70)
Penerimaan rumah sakit pernapasan untuk populasi semua usia	Tingkat prevalensi penyakit pernapasan kronis, semua umur

Data khusus negara diperoleh untuk tahun 2015 untuk kedua jenis kelamin dari Alat Hasil GBD (<https://vizhub.healthdata.org/gbd-results/>).

Statistik langsung dari masing-masing titik akhir morbiditas diperoleh untuk Amerika Serikat dari Agency for Healthcare Research dan Quality's HCUPnet Online Database (AHRQ 2022) (<https://hcupnet.ahrq.gov/>) sebagai data tolok ukur. Kami kemudian menghitung faktor penskalaan antara penyakit terkait dan kasus morbiditas dan diterapkan di negara tersebut. Dengan

melakukan ini, kami memahami bahwa hasil kami didasarkan pada asumsi kuat bahwa hubungan antara hasil morbiditas dan penyakit terkait yang menyebabkan hasil adalah sama secara universal dan sama dengan hubungan yang diturunkan di Amerika Serikat. Kami menyadari bahwa negara lain mungkin memiliki ketersediaan yang berbeda untuk rawat inap dan ruang gawat darurat, terutama di daerah pedesaan.

Biaya Satuan

Seperti halnya data morbiditas dasar, biaya satuan yang digunakan dalam penelitian ini (lihat laporan utama, Tabel 2) sebagian diinformasikan oleh data nasional 0) dan dilengkapi dengan perkiraan default

dari data internasional untuk semua hasil di mana data nasional digunakan. tidak tersedia (Bagian **Error! Reference source not found.**).

Data Nasional

Biaya satuan untuk rawat inap untuk penyakit kardiovaskular dan pernapasan disediakan oleh Kementerian Kesehatan Indonesia, bersama dengan perkiraan nilai statistik kehidupan di Indonesia terkait (Robinson et al. 2019). Nilai satu tahun kehidupan

yang digunakan dalam analisis disesuaikan dengan rasio VSL dalam estimasi ini dibandingkan VSL dalam kumpulan data default kami. Semua biaya yang disediakan untuk tahun-tahun selain tahun 2015 disesuaikan dengan inflasi tahun 2015.

Estimasi default dari data internasional

Biaya satuan untuk setiap hasil morbiditas diperkirakan dari kumpulan data internasional. Secara khusus, kami memperoleh data biaya satuan untuk 54 negara dari alat CarBonH (Spadaro et al., 2018). Sebagian besar negara-negara ini berada di Eropa dan Asia Tengah. Kami juga memperoleh data biaya satuan dari HCUPNet (AHRQ 2022). Karena itu, kami memiliki kumpulan data biaya satuan dari 55 negara. Kami kemudian memperoleh data PDB per kapita dari Bank

Data Dunia (World Bank, 2021). Kami menjalankan regresi untuk biaya unit setiap titik akhir menggunakan logaritma PDB per kapita: di mana i menunjukkan titik

$$\ln(\text{Unit cost}_{ij}) = \beta_{0i} \ln(\text{GDP per capita}_j + \beta_{1i})$$

akhir morbiditas yang berbeda, dan j menunjukkan negara yang berbeda. Koefisien yang kami peroleh dari regresi adalah sebagai berikut:

Titik akhir	Intercept	Slope
Hari gejala asma anak-anak	6,06	0,65
Hari aktivitas terbatas	6,84	0,65
Penerimaan rumah sakit	10,81	0,78
VSL	17,09	0,65
VOLY	13,82	0,65

Kami menggunakan koefisien regresi untuk memperkirakan biaya satuan untuk negara lain untuk setiap titik akhir. Perkiraan biaya adalah per kasus morbiditas.

Lampiran 2. Skenario emisi

Kedua skenario yang dikembangkan (Kebijakan Saat Ini dan Mitigasi Optimis) mengacu pada asumsi sosial-ekonomi dalam skenario World Energy Outlook 2018 (IEA, 2018). Prospek ekonomi makro untuk kawasan ASEAN dalam studi tersebut memperkirakan pertumbuhan yang kuat dari masing-masing ekonomi. Skenario tersebut berbeda dalam hal peningkatan

efisiensi sektor energi dan pertanian yang dipertimbangkan, serta asumsi tentang penerapan teknologi/kebijakan pengendalian polusi udara. Hal ini berdampak pada emisi polutan udara dan gas rumah kaca, seperti yang dijelaskan dalam bagian berikut ini dan dalam kajian nasional.

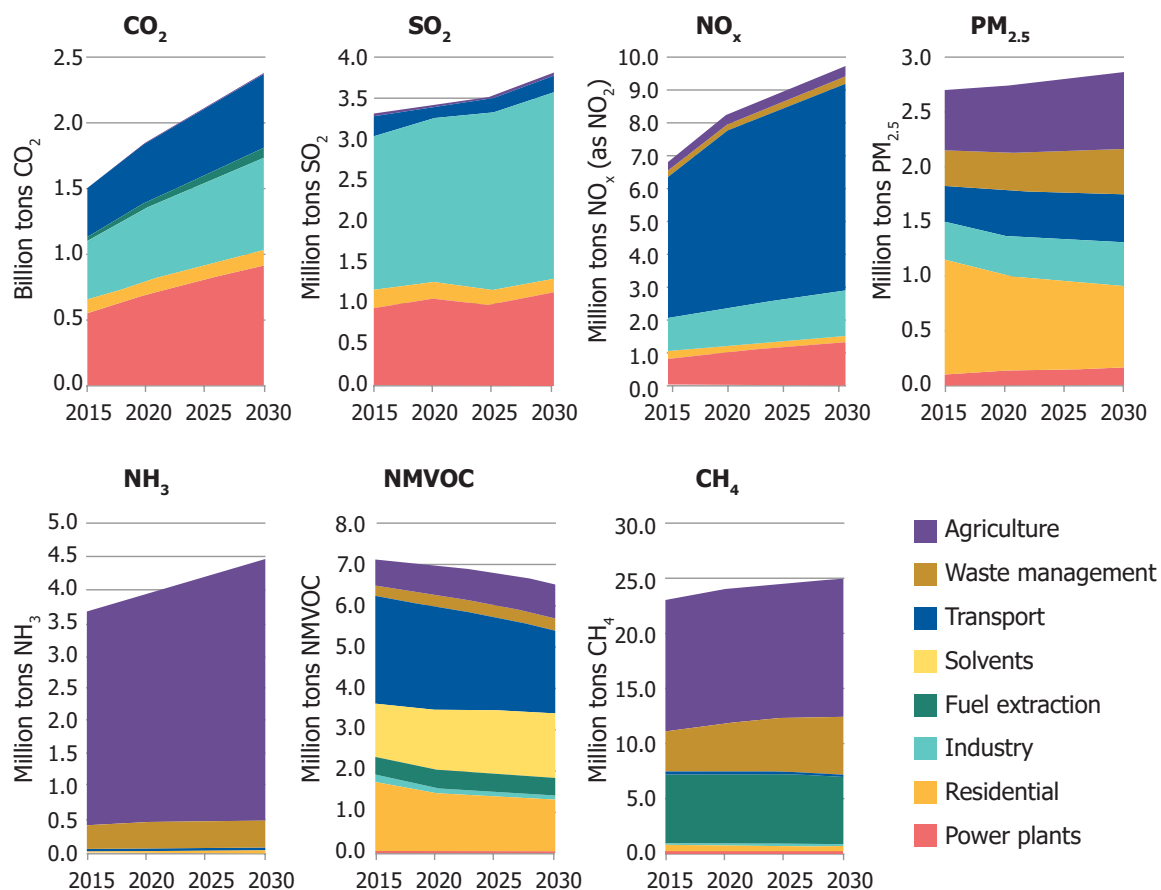
Kebijakan Saat Ini

Sebagai hasil dari pertumbuhan ekonomi yang kuat, pemodelan mengantisipasi peningkatan emisi CO₂ yang signifikan untuk tahun 2030 dalam skenario Kebijakan Saat Ini, yang merupakan dasar dalam kajian ini: peningkatan hampir 60% dari tahun 2015. Kontribusi utama dan pertumbuhan emisi CO₂ di kawasan ASEAN berasal dari sektor listrik, industri, dan transportasi (Gambar 3). Skenario ini diambil dari Skenario Kebijakan Baru Pandangan Energi Dunia (NPS) dan mencakup Kontribusi yang Ditentukan Secara Nasional (NDC) yang dilaporkan hingga 2018 (IEA, 2018).

Baseline (Kebijakan Saat Ini) juga mengasumsikan bahwa undang-undang yang ada dan yang baru diperkenalkan di sektor listrik, industri, dan transportasi (lihat Zhang, 2016; Motokura et al., 2017; He et al., 2021; Dieseln.net.com; TransportPolicy.net) diterapkan dengan efektif, dan telah memperlambat pertumbuhan

emisi prekursor PM utama. Faktanya, pertumbuhan emisi prekursor ini lebih lambat daripada CO₂, menunjukkan pemisahan bertahap antara pertumbuhan ekonomi dan emisi polutan udara. Namun, pada saat yang sama, undang-undang yang ada tidak cukup kuat untuk menyeimbangkan peningkatan penggunaan bahan bakar dan kegiatan produksi, yang menjelaskan pertumbuhan CO₂ yang relatif lebih cepat (Gambar 3).

Tren penting lainnya melibatkan memasak di rumah, suatu sektor yang menyumbang bagian signifikan dari PM_{2.5} primer. Untuk emisi PM_{2.5} primer, kecenderungan menuju bahan bakar bersih untuk memasak terlihat jelas melalui penurunan emisi di subsektor ini (Gambar 3); mempengaruhi juga tren untuk NMVOC. Ini adalah hasil dari kebijakan lama untuk menyediakan akses energi bersih baik bagi penduduk pedesaan maupun perkotaan di wilayah tersebut.



Gambar 3. Emisi sektoral CO₂, PM_{2.5} primer, prekursor utama PM_{2.5} ambien, dan CH₄ untuk kawasan ASEAN dalam skenario Kebijakan Saat Ini.

Mitigasi Optimis

Skenario ini mengidentifikasi potensi pengurangan lebih lanjut pada tahun 2030 (melebihi Kebijakan Saat Ini) dengan mempertimbangkan penerapan teknologi dengan emisi terendah yang terdapat dalam basis data model GAINS. Asumsinya adalah penerapan penuh dan efektif, dengan mempertimbangkan batas kelayakan teknis, serta dampak dari tindakan non-teknis yang terpilih. 'Langkah-langkah non-teknis' mengacu pada langkah-langkah yang menjelajahi potensi untuk: peningkatan efisiensi energi di berbagai sektor, peningkatan pangsa kendaraan listrik, akses yang lebih cepat ke energi bersih untuk memasak, pencapaian peningkatan yang signifikan dalam efisiensi penggunaan nitrogen di sektor pertanian, dan perubahan pola makan (misalnya, mengurangi konsumsi protein daging) dengan asumsi bahwa asupan kalori sejalan dengan Diet Planetary Lancet EAT (Willett et al., 2019).

Potensi efisiensi energi, penggantian bahan bakar, kendaraan listrik berasal dari kajian dan perbandingan skenario NPS Badan Energi Internasional (IEA) dan Skenario Pembangunan Berkelanjutan (SDS) di mana yang terakhir dirancang untuk mencapai pengurangan CO₂ yang konsisten dengan target Perjanjian Paris (IEA, 2018).

Sementara kebijakan yang diterapkan dalam Kebijakan Saat Ini telah membantu memperlambat pertumbuhan polusi udara (Gambar 3), perbandingan antara skenario Mitigasi Optimis dan Kebijakan Saat Ini menunjukkan adanya peluang signifikan untuk mengurangi emisi lebih lanjut (Gambar 4).

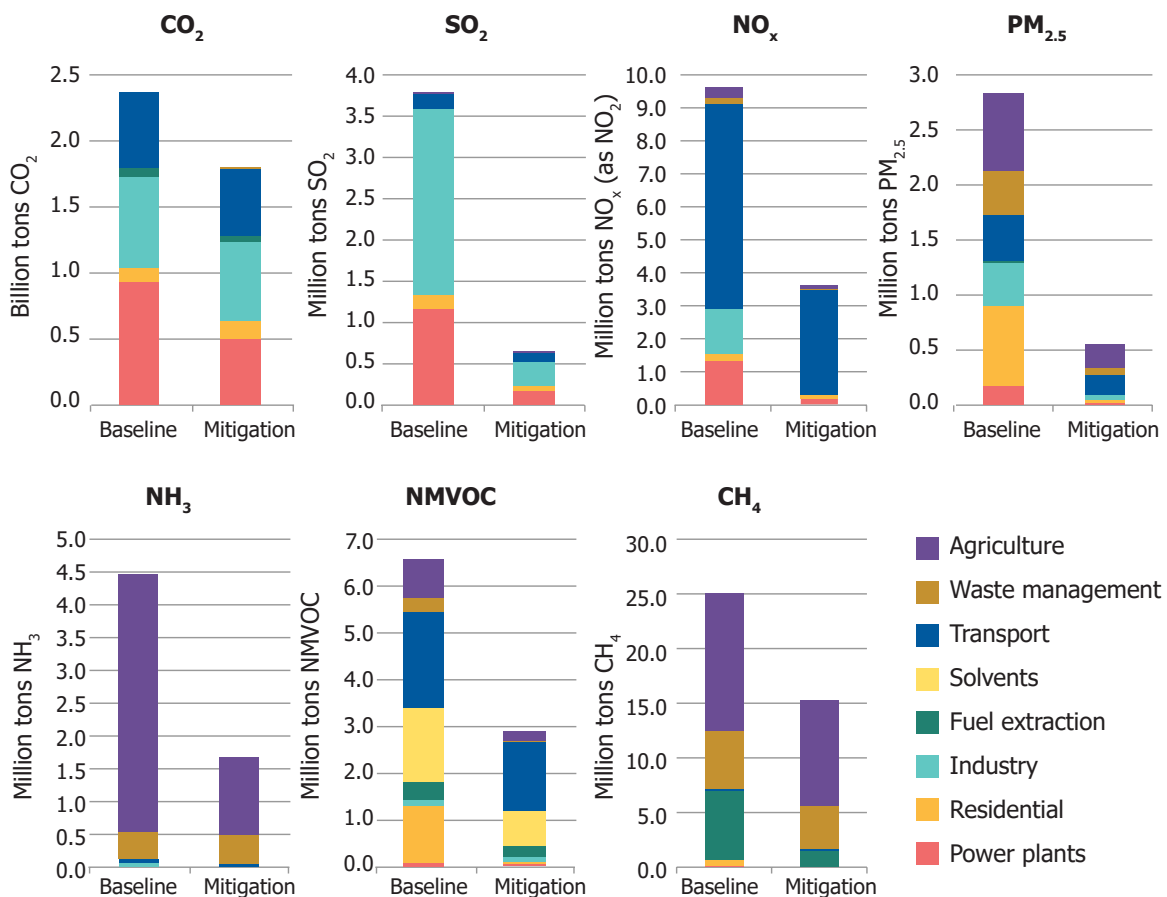


Fig 4. Sectoral emissions of CO₂, primary PM_{2.5}, key precursors of ambient PM_{2.5}, and CH₄ for the ASEAN region in the Current Policies (Baseline) and Strong Mitigation scenario estimated for 2030

Sementara emisi CO₂ menurun hampir 25% dengan mempertimbangkan upaya untuk meningkatkan efisiensi energi dan potensi penggantian bahan bakar, emisi polutan udara diperkirakan menurun dari 55% (NMVOC) menjadi 84% (SO₂), dan emisi metana menurun hingga 40%. Mencapai pengurangan tersebut akan memerlukan tindakan kebijakan tambahan yang

merangsang pengenalan tindakan lebih lanjut yang dikembangkan untuk kasus Mitigasi Optimis. Mereka termasuk 12 paket ukuran; setiap paket mencakup beberapa teknologi yang berlaku untuk sektor tertentu. Pembahasan lebih rinci tentang bagaimana langkah-langkah tersebut diambil dimasukkan dalam laporan UNEP/CCAC (2023)⁷ dan juga UNEP (2019).

⁷ Laporan tersebut mengidentifikasi 15 solusi yang mencakup langkah-langkah yang menargetkan pengurangan CH₄ dan HFC, yaitu sawah, pengolahan air limbah, dan penggantian refrigeran HFC.

Tindakan Individu

Tabel 1 memberikan ikhtisar tentang 12 paket tindakan yang dapat menghasilkan pengurangan emisi polutan udara yang signifikan di kawasan ASEAN. Langkah-langkah tersebut merupakan serangkaian kebijakan yang dipilih berdasarkan potensi mereka untuk mengurangi paparan PM_{2.5} bagi populasi

secara maksimum. Seperti yang dijelaskan dalam laporan kajian nasional, beberapa langkah tersebut juga memberikan manfaat tambahan yang kuat, termasuk pengurangan emisi gas rumah kaca, serta berkontribusi pada pencapaian beberapa Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs).

Table 2. Deskripsi opsi mitigasi utama yang terkait dengan 12 solusi yang teridentifikasi

12 solusi	Deskripsi singkat
Memasak bersih	Alternatif bersih untuk memasak tradisional termasuk kompor LPG dan kompor berbahan bakar padat dengan efisiensi lebih tinggi termasuk kompor dengan bantuan kipas
Energi terbarukan, kontrol pasca-pembakaran dalam tenaga dan industri	Pertimbangan potensi penggantian bahan bakar dan energi terbarukan serta penerapan teknologi pembersihan gas buang efisiensi tinggi di pembangkit listrik dan boiler industri, termasuk desulfurisasi gas buang, penghilangan debu efisiensi tinggi.
Standar Proses Industri, termasuk. efisiensi energi	Perbaikan dalam teknologi proses, penangkapan dan penghilangan proses yang lebih efisien dan emisi buronan dari produksi industri.
Standar emisi/elektrifikasi - transportasi	Pengenalan nilai batas emisi yang lebih ketat dan standar efisiensi energi untuk kendaraan. Potensi lebih lanjut diperkirakan dengan asumsi pengenalan segera undang-undang yang mewajibkan kendaraan baru (jalan raya dan non-jalan raya) standar emisi setara Euro VI/6 dan/atau percepatan elektrifikasi armada.
Pemeriksaan dan perawatan kendaraan	Pengenalan undang-undang yang lebih ketat yang membutuhkan pemeriksaan dan pemeliharaan kendaraan yang lebih sering dan ditegakkan yang akan memungkinkan pengenalan dini dan penghapusan/perbaikan kendaraan beremisi tinggi.
Pengiriman internasional	Bahan bakar sulfur rendah, yaitu 0,5% S dalam minyak bahan bakar berat dengan reduksi lebih lanjut menjadi 0,1% S, pengenalan filter partikulat dan instalasi Reduksi Katalis Selektif Reduksi NOx (deNOX SCR). Sebagai alternatif, desulfurisasi gas buang dapat dipasang untuk mencapai pengurangan sulfur dioksida (SO ₂) yang sama seperti saat menggunakan bahan bakar belerang rendah.
Aplikasi pupuk ternak dan N	Pengendalian emisi amoniak dari produksi ternak dan aplikasi pupuk mineral nitrogen. Langkah-langkah peternakan termasuk pembangunan perumahan rendah emisi baru, gudang tertutup untuk pupuk kandang, dan aplikasi pupuk kandang yang efisien di lahan. Untuk pupuk mineral, emisi dari aplikasi urea ditangani baik dengan mengganti urea dengan, misalnya, amonium nitrat, meningkatkan aplikasi urea (waktu dan dosis yang tepat), dan mempromosikan formulasi baru dan penghambat urease
Perubahan pola makan	Pergeseran ke lebih sedikit protein daging dalam pola makan menghasilkan jumlah ternak yang lebih sedikit dan penggunaan pupuk mineral yang lebih rendah serta efisiensi penggunaan nitrogen yang lebih baik
Pembakaran residu pertanian	Penegakan hukum yang efisien atau pelarangan pembakaran terbuka residu pertanian
Pengelolaan sampah	Terutama menangani pengelolaan limbah kota padat dengan mengurangi pembakaran sampah dan memperkenalkan skema pengumpulan dan daur ulang limbah yang efisien.
Pencegahan kebakaran hutan dan lahan gambut	Peningkatan pengelolaan hutan, lahan dan air serta strategi pencegahan kebakaran. Meningkatkan kolaborasi melalui ASEAN Agreement on Transboundary Haze Pollution.
Produksi dan distribusi batu bara, minyak, dan gas	Sementara sebagian besar tindakan dalam ekstraksi, pemrosesan, dan distribusi bahan bakar fosil akan mengurangi emisi metana, ada beberapa pengurangan prekursor PM (termasuk BC) ketika pembakaran rutin dikurangi atau dilarang serta mengurangi emisi debu buronan tailing dari industri atau pertambangan setelahnya berkurangnya permintaan batu bara dalam skenario pembangunan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- AHRQ (2022) Agency for Healthcare Research and Quality, Healthcare Cost and Utilization Project (HCUPnet) Data Tools. <https://datatools.ahrq.gov/hcupnet#setup>
- Alexandratos N, Bruinsma J (2012) World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper Rome, FAO
- Amann, M., Bertok, I., Borken-Kleefeld, J., Cofala, J., Heyes, C., Höglund-Isaksson, L., Klimont, Z., Nguyen, B., Posch, M., Rafaj, P., Sandler, R., Schöpp, W., Wagner, F., and Winiwarter, W.: Cost-effective control of air quality and greenhouse gases in Europe: Modeling and policy applications, *Environ. Model. Softw.*, 26, 1489–1501, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.07.012>, 2011.
- Amann, M., Jiming, H., Borken-Kleefeld, J., Cofala, J., Sanabria, A. G., Heyes, C., Höglund-Isaksson, L., Kiesewetter, G., Klimont, Z., Nguyen, B., Purohit, P., Rafaj, P., Sander, R., Wagner, F., Schöpp, W., Kuylentierna, J., Wang, S., Ye, W., Shindell, D., Seltzer, K., and Borgford-Parnell, N.: Scenarios and Solutions, in: *Air Pollution in Asia and the Pacific: Science-based solutions*, United Nations Environment Programme (UNEP), Bangkok, Thailand, 61–100, 2019.
- Amann M, Kiesewetter G, Schoepp W, et al (2020) Reducing global air pollution: The scope for further policy interventions. *Philos Trans R Soc A*. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0331>
- EANET: Policies and Practices Concerning Acid Deposition - Indonesia, EANET - Acid Deposition Monitoring Network in East Asia, https://www.eanet.asia/wp-content/uploads/2020/04/3-Indonesia_Factsheet_compressed.pdf, 2020.
- Greenstone, M. and Fan, Q. (Claire): Indonesia's Worsening Air Quality and its Impact on Life Expectancy, Energy Policy Institute at the University of Chicago (EPIC), <https://aqli.epic.uchicago.edu/wp-content/uploads/2019/03/Indonesia-Report.pdf>, 2019.
- Haines, A., Amann, M., Borgford-Parnell, N., Leonard, S., Kuylentierna, J., and Shindell, D.: Short-lived climate pollutant mitigation and the sustainable development goals, *Nat. Clim. Change*, 7, 863–869, <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0012-x>, 2017.
- He, X., Shen, W., Wallington, T. J., Zhang, S., Wu, X., Bao, Z., and Wu, Y.: Asia Pacific road transportation emissions, 1900–2050, *Faraday Discuss.*, 226, 2021.
- IEA (2019) World Energy Model Documentation - 2019 version. International Energy Agency, Paris, France
- Lestari, P., Arrohman, M. K., Damayanti, S., and Klimont, Z.: Emissions and spatial distribution of air pollutants from anthropogenic sources in Jakarta, *Atmospheric Pollut. Res.*, 13, 101521, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101521>, 2022.
- Motokura, M., Lee, J., Kutani, I., and Phoumin, H.: Improving Emissions Regulations for Coal-Fired Power Plants in ASEAN, ERIA Research Project Report, Jakarta, 2017.
- Murray CJL, Aravkin AY, Zheng P, et al (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. *The Lancet* 396:1223–1249. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2)
- OECD: OECD Green Growth Policy Review of Indonesia 2019, 2019.
- Robinson LA, Hammitt JK, O'Keeffe L (2019) Valuing Mortality Risk Reductions in Global Benefit-Cost Analysis. *J Benefit-Cost Anal* 10:15–50. <https://doi.org/10.1017/bca.2018.26>
- Simpson D, Benedictow A, Berge H, et al (2012) The EMEP MSC-W chemical transport model—technical description. *Atmos Chem Phys* 12:7825–7865
- Spadaro JV, Kendrovski V, Martinez GS (2018) Achieving health benefits from carbon reductions: Manual for CaRBonH calculation tool. WHO Regional Office for Europe, Denmark
- UN: World Population Prospects: The 2017 Revision., United Nations Department of Economic and Social Affairs, <https://www.un.org/development/desa/publications/world-population-prospects-the-2017-revision.html>, 2017.
- UNEP: Air Quality Policies in Indonesia, <https://www.unep.org/resources/policy-and-strategy/air-quality-policies-indonesia>, 2015.
- UNEP: Air Pollution in Asia and the Pacific: Science-Based Solutions, United Nations Environment Program (UNEP), Nairobi, Kenya, 2019.
- UNEP/CCAC: Clean Air and Climate Solutions for ASEAN, United Nations Environment Programme (UNEP), Climate and Clean Air Coalition (CCAC), Nairobi, Kenya, 2023.

Vos T, Lim SS, Abbafati C, et al (2020) Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet* 396:1204–1222. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30925-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30925-9)

Willett W, Rockström J, Loken B, et al (2019) Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet* 393:447–492. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)

Zhang, X.: Emission standards and control of PM2.5 from coal power plant, IEA Clean Coal Centre, London, 2016.

M. Ru, D. Shindell, J.V. Spadaro, J-F. Lamarque, A. Challapalli, F. Wagner, G. Kieseewetter, New concentration-response functions for seven morbidity endpoints associated with short-term PM2.5 exposure and their implications for health impact assessment, *Environment International* (2023), doi: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108122>

