

ISSN 2597– 6052

DOI: <https://doi.org/10.56338/mppki.v7i5.4935>

MPPKI

Media Publikasi Promosi Kesehatan Indonesia
The Indonesian Journal of Health Promotion

Review Articles

Open Access

Intervensi Pengurangan Polusi Udara dari Sumber Bergerak dan Tidak Bergerak
Berbagai Negara di Dunia : *Systematic Review**Interventions for Reducing Air Pollution from Mobile and Immovable Sources in Various Countries in the World: Systematic Review*Relita Maizara^{1*}, Zakianis², Chairunnisa Athena Pelawi³^{1,2}Departemen Kesehatan Lingkungan, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Indonesia³Department of Epidemiology, Faculty of Medicine, Prince of Songkla University*Korespondensi Penulis : relitamaizara97@gmail.com

Abstrak

Latar belakang: Polusi udara menyebabkan 7 juta kematian dini penduduk tiap tahunnya, 4,2 juta kematian disebabkan oleh polusi udara di luar ruangan. Penanggulangan polusi udara telah dilakukan untuk polusi udara yang bersumber dari sumber bergerak dan tidak bergerak. Namun, diperlukan upaya yang lebih efektif untuk mengurangi polusi udara.**Tujuan:** Mengetahui upaya intervensi yang dilakukan negara-negara di dunia untuk mengurangi polusi udara.**Metode:** Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah *systematic Review* melalui penelusuran *database* Pubmed, ScienceDirect, dan Scopus. Kriteria inklusi yaitu artikel yang diterbitkan antara tahun 2013-2023, tersedia dalam bentuk *full text*, serta tersedia dalam Bahasa Indonesia dan Bahasa Inggris. Kriteria eksklusi yaitu artikel yang termasuk buku atau dokumen, hasil dari meta analisis, *review*, dan *systematicreview*.**Hasil:** Setelah dilakukan penyaringan sesuai kriteria, 24 artikel diperoleh untuk dianalisis. Intervensi terhadap penanggulangan polusi udara dari sumber bergerak adalah skema kendaraan ganjil-genap (pengurangan konsentrasi PM_{2.5} yaitu 2% - 44%, pengurangan konsentrasi PM₁₀ yaitu 5% - 49%), penggunaan Filter karbon aktif baru (NO₂ kendaraan menurun sebesar 87%), pelaksanaan proyek kereta metro (total emisi yang dihemat meningkat 5 kali lipat), penerapan *low emission zone* (mengurangi konsentrasi NO₂ 13.4%), dan sistem energi terbarukan dan program subsidi (mengurangi emisi karbon). Upaya bagisumber tidak bergerak yaitu penggunaan LNG (*liquid natural gas*) dan insentif bagi industri yang menggunakan LNG (reduksi emisi CO₂ naik dari 15% ke 26 %).**Kesimpulan:** Berbagai intervensi untuk mengurangi polusi udara telah dilakukan dan efektif untuk mengurangi polusi udara.**Kata Kunci:** Polusi Udara; Intervensi; *Systematic Review*

Abstract

Introduction: Air pollution causes 7 million premature deaths annually among the population, with 4.2 million deaths were caused by outdoor air pollution. Several mitigation actions have been implemented for both mobile and non-mobile sources of air pollution. However, there is a need to find more effective ways to decrease air pollution.**Objective:** Knowing options of air pollution interventions in countries worldwide.**Method:** This research was done with systematic review method through searches on the PubMed, ScienceDirect, and Scopus databases. The inclusion criterias are studies published between 2013 to 2023, available in full text format, and presented in Bahasa and English. The exclusion criterias are studies documented as books or documents, meta-analysis, review, and systematic review.**Result:** After screening based on the criterias, 24 articles were selected for the analysis. Interventions aimed to mitigate air pollution from mobile sources included are the implementation of odd-even vehicle schemes (resulting in a reduction of PM_{2.5} concentrations ranging from 2% to 44% and a reduction of PM₁₀ concentrations ranging from 5% to 49%), the installation of new activated carbon filters (resulting in an 87% decrease in vehicle NO₂ emissions), the implementation of metro rail projects (yielding a fivefold increase in total emissions saved), the establishment of Low Emission Zones (resulting in a 13.4% reduction in NO₂ concentrations), the promoting of renewable energy systems, and subsidy programs (resulting in carbon emission reduction). For non-mobile sources, the utilization of LNG (liquefied natural gas) and incentives for industries using LNG (led to an increasing trend of CO₂ emission reduction from 15% to 26%).**Conclusion:** Several interventions have been implemented to mitigate air pollution, showing effectiveness in reducing air pollution.**Keywords:** Air Pollution; Intervention; *Systematic Review*

PENDAHULUAN

Secara global, hampir 99% populasi menghirup udara dengan tingkat polutan yang tinggi(1). Sekitar 7 juta kematian dini setiap tahunnya diakibatkan oleh polusi udara(2). Hal ini menempatkan paparan udara luar ruangan sebagai faktor risiko lingkungan terbesar bagi kasus kematian dini dan merupakan penyebab kedua kematian akibat penyakit tidak menular (3). Polusi udara ambien (luar ruangan) di perkotaan dan pedesaan diperkirakan menyebabkan 4,2 juta kematian dini di seluruh dunia pada tahun 2019. Kematian ini disebabkan oleh paparan materi partikulat halus yang menyebabkan penyakit pada sistem kardiovaskular dan sistem pernapasan, serta meningkatkan risiko kanker(4). Pada 2019, di antara 37% kematian dini terkait polusi udara luar ruangan disebabkan oleh penyakit jantung iskemik dan stroke, 18% disebabkan oleh penyakit paru obstruktif kronik, 23% disebabkan oleh infeksi saluran pernapasan, dan 11 % kematian disebabkan oleh kanker saluran pernapasan(4). Hal ini terlihat pada data tahun-tahun sebelumnya di negara-negara Asia Selatan dan Timur sebagai daerah paling tercemar secara global.

Sebagian besar polusi udara disebabkan oleh pembakaran bahan bakar fosil yang tidak sempurna, sehingga menghasilkan gas rumah kaca yang sebagian besarnya merupakan CO₂. Bahan bakar yang dimaksud adalah batu bara, minyak, dan bensin untuk menghasilkan energi listrik dan transportasi.

Sumber polusi udara tersebut dibagi atas sumber bergerak dan tidak bergerak. Sumber bergerak adalah setiap kendaraan yang digerakkan atau melalui pembakaran berbasis karbon atau bahan bakar lainnya. Polusi udara dari sumber bergerak mencakup polusi udara yang berasal dari kendaraan bermotor, pesawat terbang, lokomotif, mesin, serta peralatan lain yang dapat berpindah dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Sumber tidak bergerak berasal dari bangunan atau struktur yang tidak bergerak dan fasilitas yang mengeluarkan polutan udara atau titik-titik emisi udara (cerobong asap). Sumber polusi udara yang tidak bergerak termasuk pabrik, kilang, ketel uap, dan pembangkit listrik(5). Berdasarkan data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, tiga sumber utama yang menyebabkan polusi udara di Jakarta adalah kendaraan bermotor (44%), Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) (34%) dan sisanya berasal dari pembakaran rumah tangga dan aktivitas lainnya(6).

Upaya untuk mengurangi polusi udara luar ruangan telah banyak dilakukan agar paparan polusi udara tidak melebihi ambang batas dan menimbulkan masalah kesehatan pada manusia. Sebagian besar sumber polusi udara luar ruangan berada di luar kendali individu sehingga memerlukan kerja sama dari pemangku kepentingan di tingkat lokal, nasional dan regional yang bergerak di sektor energi, transportasi, pengelolaan limbah, dan sektor lainnya. Telah dilakukan berbagai macam upaya untuk mengurangi polusi emisi kendaraan di antaranya, penggunaan bahan bakar yang lebih bersih, penggunaan kendaraan bertenaga listrik, dan regulasi industri untuk pengendalian emisi dari polusi dan penetapan untuk standar bahan bakar.

Beberapa penelitian telah dilakukan terkait upaya dalam mengurangi polusi udara ambien. Salah satunya penelitian yang dilakukan oleh Fred Lurmann dkk pada tahun 2015 di Australia, penelitian ini membahas kebijakan dalam mempercepat kemajuan masalah polusi udara yaitu pengurangan emisi semaksimal mungkin dari kendaraan dan sumber bergerak lainnya dengan cara mengadakan program kendaraan rendah emisi atau *Low Emissions Vehicle (LEV)/Zero-emission Vehicles* dan program kemajuan teknologi atau *Technology Advancement Program (TAP)* untuk mempercepat pengembangan bahan bakar yang lebih bersih. Sektor industri turut merancang program *Regional Clean Air Incentives Markets (RECLAIM)* yaitu program untuk mengurangi emisi NO_x dan SO_x dari kegiatan industri(7).

Indonesia sendiri telah melakukan berbagai upaya dalam mengurangi polusi udara yang diatur dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 41 tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara. Upaya dalam mengurangi polusi udara dilakukan melalui penanggulangan pencemaran udara yang berasal dari sumber tidak bergerak meliputi pengawasan terhadap penataan baku mutu emisi yang telah ditetapkan, sedangkan penanggulangan dari sumber bergerak meliputi pengawasan terhadap penataan ambang batas emisi gas buang, pemeriksaan emisi gas buang kendaraan bermotor tipe baru dan lama, pengadaan bahan bakar minyak bebas timah hitam serta solar berkadar belerang rendah(8).

Kebijakan yang diterapkan pada sektor industri di antaranya teknologi bersih untuk mengurangi emisi dari cerobong asap industri, peningkatan pengelolaan limbah perkotaan dan pertanian termasuk penangkapan gas metana dari tempat pembuangan sampah. Sektor energi turut memastikan akses terhadap energi bersih rumah tangga untuk memasak, memanaskan, dan sebagainya. Sektor transportasi, beralih ke moda pembangkit listrik yang bersih, beralih ke kendaraan diesel yang lebih bersih, penggunaan kendaraan dan bahan bakar yang rendah emisi serta bahan bakar yang rendah sulfur, dan memprioritaskan angkutan perkotaan yang cepat. Sektor pembangkit listrik melakukan peningkatan penggunaan bahan bakar rendah emisi dan sumber daya terbarukan yang bebas pembakaran (tenaga surya, angin, atau air).

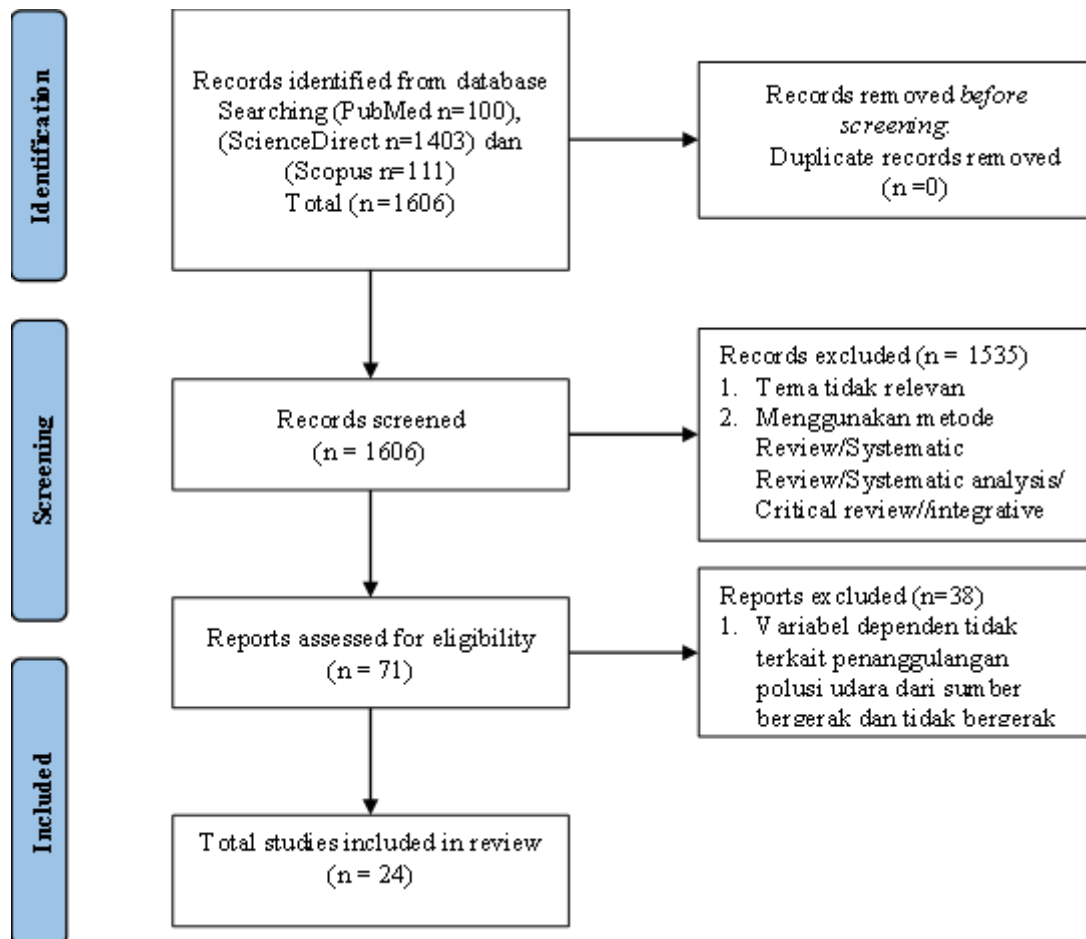
Berbagai intervensi untuk mengurangi polusi udara telah dilakukan, namun masalah polusi udara masih menjadi masalah kesehatan yang berdampak buruk bagi lingkungan dan manusia, sehingga masalah polusi udara

masih menjadi masalah prioritas yang harus dikendalikan. Negara diharapkan mampu mengurangi beban penyakit akibat stroke, penyakit jantung, paru-paru, serta penyakit pernapasan kronis dan akut dengan mengurangi tingkat polusi udara. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui intervensi yang dilakukan berbagai negara di dunia dalam upaya mengurangi polusi udara sebagai informasi dan referensi bagi negara lain dalam upaya mengurangi polusi udara.

METODE

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah *systematic review* melalui penelusuran *database* Pubmed, ScienceDirect dan Scopus. Pada penelusuran database Pubmed, kata kunci yang digunakan dalam pencarian jurnal adalah “*combat air pollution OR air pollution interventions OR reduce air pollution AND outdoor air pollution OR ambient air pollution*”, sedangkan untuk database ScienceDirect dan Scopus kata kunci yang digunakan adalah “*interventions to reduce ambient air pollution*”. Kriteria dalam penelusuran artikel yaitu kriteria inklusi dan eksklusi. Kriteria inklusi terdiri dari hasil penelitian yang diterbitkan antara tahun 2013-2023, tersedia dalam bentuk *full text*, dan tersedia dalam Bahasa Indonesia dan Bahasa Inggris. Kriteria eksklusi yaitu artikel yang termasuk buku atau dokumen, meta analisis, *review*, dan *systematic review*. Setelah melakukan penelusuran pada ketiga *database* tersebut, 1606 artikel teridentifikasi. Penyaringan terhadap artikel dilakukan sesuai kriteria, menghasilkan 24 artikel untuk dianalisis. Proses penyaringan artikel disajikan pada PRISMA gambar 1.

HASIL



Gambar 1. Diagram Prisma untuk identifikasi dan seleksi Artikel

Berdasarkan hasil penelusuran artikel, diperoleh 24 artikel terkait intervensi mengurangi polusi udara dari sumber bergerak dan tidak bergerak. Intervensi untuk sumber bergerak dibahas pada dua artikel terkait penerapan skema kendaraan ganjil-genap, satu artikel masing-masing terkait penggunaan filter karbon aktif, proyek kereta metro dan penggunaan *automated charging mechanism* (ACM), enam artikel terkait penerapan *low emission zone* (LEZ), satu artikel terkait penerapan metode *vehicle's heating, ventilation, and air-conditioning* (HVAC) pada kendaraan umum, dan satu artikel terkait penggunaan energi terbarukan. Sementara itu, untuk sumber tidak bergerak terdapat upaya penggunaan LNG (*liquid natural gas*) bagi industri. Analisis artikel berdasarkan hasil penelusuran dapat dilihat pada tabel berikut:

No	Judul (penulis)	Lokasi dan tahun	Sampel	Desain Studi	Variabel Independen dan Dependen	Intervensi dan Hasil
Sumber Bergerak						
Transportasi						
1	Action Plans to Reduce PM _{2.5} Concentrations in Hotspots of Delhi-NCR Using a One-way Coupled Modeling Approach, (Shubham Sharma, Mukesh Khare, Sri Harsha Kota)	Delhi, 2022	Data konsentrasi PM _{2.5} dari 31 stasiun pengamatan	Simulasi	Variabel independen: skenario intervensi Variabel dependen: konsentrasi PM _{2.5}	Kendaraan skema ganjil-genap Hasil: pengurangan PM _{2.5} rata-rata sebesar 4,39 %
2	The influence of odd-even car trial on fine and coarse particles in Delhi (Prashant Kumar, Sunil Gulia, Roy M. Harrison, Mukesh Khare)	Delhi, 2017	Empat stasiun pemantauan kualitas udara	Uji Coba	Variabel independen: uji coba ganjil-genap Variabel dependen: konsentrasi PM10 dan PM2.5	Uji coba ganjil genap Hasil: pengurangan konsentrasi PM _{2.5} yaitu 2% - 44%, pengurangan konsentrasi PM ₁₀ yaitu 5% - 49%
3	NO ₂ levels inside vehicle cabins with pollen and activated carbon filters: A real world targeted intervention to estimate NO ₂ exposure reduction potential (Vasileios N. Matthaios, Daniel Rooney, Roy M. Harrison, Petros Koutrakis a, William J. Bloss)	Birmingham, 2022	10 kendaraan	Eksperimen	Variabel independen: new standard pollen and new activated carbon cabin filters Variabel dependen: paparan NO ₂ di dalam kendaraan	Penggunaan filter karbon aktif baru Hasil: NO ₂ kendaraan menurun sebesar 87% (kisaran 80-94,2%)
4	Emission reduction from MRTS projects-A case study of Delhi metro (Niraj Sharma, Anil Singh, Rajni Dhyani, Shweta Gaur)	India, 2014	Data dari Delhi Metro Rail Corporation, Kuesioner untuk	Studi kasus	Variabel independen: penumpang kereta metro, konsumsi listrik	Pelaksanaan proyek kereta metro Hasil: total emisi yang dihemat meningkat 5 kali lipat, penghematan emisi CO ₂ 6 kali lipat, menghemat 13.505 ton/tahun emisi polutan kendaraan bermotor

			survei		Variabel dependen: pengurangan emisi kendaraan	konvensional (CO, NOx, PM dan HC)
5	Renewable energy based automatic recharging mechanism for full electric vehicle (C. Chellaswamy, Balaji, T. Kaliraja)	India, 2020	Kendaraan listrik (modul surya dan turbin angin)	Simulasi MATLAB-Simulink untuk automated charging mechanism (ACM)	Variabel independen: turbin angin, modul surya Variabel dependen: emisi CO2 dan CO	Simulasi MATLAB-Simulink untuk ACM Hasil: mengurangi Emisi CO2 dan CO, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil
6	Impacts of planning and policy strategies on freight flows in urban areas (Heike Flämig, Jutta Wolff)	Jerman, 2016	Emisi terkait lalu lintas dan konsumsi sumber daya	Kerangka kerja analisis perencanaan	Variabel independen: kebijakan pembentukan zona lingkungan Variabel dependen: polusi udara	Pembentukan environmental zone Hasil: efektif mencapai pengurangan polusi udara lebih cepat, konsentrasi debu halus adalah 7 % atau 2 mg/m3 lebih rendah, jumlah nitrogen dioksida turun hampir 2 mg/m3 atau sekitar 5 %
7	Evaluation of emissions in traffic reduction and pedestrianization scenarios in Madrid (Jose Manuel Sanchez, Emilio Ortega, María Eugenia Lopez-Lambas, Belen Martín)	Madrid, 2021	Perangkat lunak VISUM, Perangkat lunak COPERT Street Level, model R-LINE	Model simulasi lalu lintas	Variabel independen: Skenario penilaian Variabel dependen: tingkat pengurangan CO, NOx dan PM	<ol style="list-style-type: none"> 1. Low emission zone (LEZ) 2. Low pedestrianisation scenario (ES-LP): konsentrasi CO, NOx dan PM tidak mengalami perbaikan 3. Very high pedestrianisation scenario (ES-HP): konsentrasi CO, NOx dan PM tidak mengalami peningkatan 4. Low traffic reduction scenario (ES-LT): pengurangan lalu lintas sebesar 5% dan pengurangan 45% konsentrasi rata-rata CO, NOx dan PM 5. Very high traffic reduction scenario (ES-HT): pengurangan lalu lintas sebesar 20% dan pengurangan 45% konsentrasi rata-rata CO, NOx dan PM 6. Current scenario (CS): pengurangan konsentrasi polutan secara umum 43-50%
8	Vehicle emissions in a middle-sized city of China: Current status and future	China, 2020	VP dari basis data registrasi kendaraan	Analisis risiko,	Variabel independen: data masukan (VP, VKT)	<ol style="list-style-type: none"> 1. BAU (bisnis-as-usual): emisi CO menurun dari 60,4 menjadi 46,6 di Langfang dari tahun 2011

	trends (Shida Suna, Jiaxin Jin, Men Xiab, Yiming Liub)		bermotor , kilometer kendaraan rata-rata tahunan yang ditempuh (VKT) ditentukan berdasarkan data survei , faktor emisi kendaraan (EF) disimulasikan dengan pedoman teknis inventarisasi emisi	Simulasi Monte Carlo	dan EF) Variabel dependen: emisi kendaraan	hingga 2017 2. VP constrained (VPC): ARRB sebesar 10,5 % merupakan kebijakan pengendalian paling efektif untuk VOC di masa datang, emisi CO di Langfang akan menurun menjadi 41,6 pada tahun 2020 3. Public Transportation Promotion (PTP): ARRB sebesar 10,3 % 4. New Energy Vehicles Promotion (NEP): ARRB sebesar 2,2 % merupakan cara yang efektif untuk mengendalikan emisi NOx, pada tahun 2025 emisi NOx akan berkurang 30,6 % 7. Freight Transportation Structure Optimization (FTO): kebijakan yang paling efektif untuk emisi CO dengan ARRB tertinggi sebesar 8,3 %, memiliki pengaruh yang signifikan dalam pengendalian NOx dengan ARRB sebesar 11,9 %
9	Fuel cell development for New Energy Vehicles (NEVs) and clean air in China (Michaela Kendall)	China, 2017	Pasar China termasuk penjual-pembeli dan perkembangan teknologi FC di China	Analisis kebijakan	Variabel independen: peraturan terkait pemasaran NEV, tantangan pasar NEV, perencanaan saintifik dari pasar NEV Variabel dependen: kualitas udara, frekuensi penggunaan kendaraan NEV	1. Peraturan “The NEV policy”: penggunaan EV dapat mengurangi polusi udara di China sampai dengan 30%. Bentuk promosi yang dilakukan melibatkan bahan bakar rendah emisi, transportasi listrik, dan konsep teknologi bersih. 2. Made in China 2025: China penghasil BECs terbesar sejak 2015, menggalakkan slogan Made in China 2025 untuk mendorong pengguna membeli EVs buatan China 5. BEV incentives: China menjanjikan bantuan industri bagi pabrik NEV di China berupa insentif.
10	Do urban parking restrictions and Low Emission Zones encourage a greener mobility? (Juan Nicolas Gonzalez, Juan Gomez, Jose Manuel Vassallo)	Madrid, 2022	1. Madrid Mobility Survey (untuk mengetahui user yang berpotensi menggunakan SER) 2. Iterative Proportional Fitting (IPF) meliputi informasi sosio	Analisis kebijakan, analisis model, <i>path analysis</i> (PA)	Variabel independen: Parking Management (PM), Low Emission Zones (LEZ), sosio demografis (jenis kelamin, usia, pekerjaan) Variabel dependen: penggunaan kendaraan pribadi, mobilitas setiap individu	1. Regulated Parking Service (SER Zone): individu yang datang ke suatu wilayah diminta untuk menggunakan kendaraan beremisi rendah. Hasil : diperkirakan sebesar 78% bagi mode transportasi nol emisi dan 80% bagi mode kendaraan ramah lingkungan. 2. Low Emission Zones (LEZ): konsep kendaraan nol emisi (cleaner vehicles) dengan memberikan layanan bebas parkir bagi individu yang menggunakan kendaraan ramah lingkungan.

demografis

11	Evaluation of low traffic neighbourhood (LTN) impacts on NO2 and traffic (Xiuleng Yang, Emma McCoy, Katherine Hough, Audrey de Nazelle)	London Borough of Islington, UK, 2022	1. Konsentrasi NO2 per bulan 2. Volume lalu lintas per bulan	Komparasi pra- dan pasca intervensi, survei lapangan	Variabel independen: pembatasan volume kendaraan (LTN) Variabel dependen: kualitas udara, lalu lintas	Low Traffic Neighbourhoods (LTN): pemasangan filter (kamera, tanaman, polisi tidur) Hasil: LTN 2019-2021 mampu mengurangi polusi udara dan volume kendaraan sekitar 6-9%, mengurangi konsentrasi NO2 <i>secara signifikan</i> sampai dengan 8.9% dibandingkan dengan wilayah non-LTN dan 5.7% dibandingkan dengan kondisi sebelumnya.
12	A tale of two cities: is air pollution improving in Paris and London? (Anna Font, Lionel Guiseppin, Marta Blangiardo, Veronique Gherzi, Gary W. Fuller)	Paris, Prancis dan London, UK, 2019	Data kualitas udara (NOX, NO2, PM10, PM2.5) 2005-2016, data arus kendaraan	Analisis model, analisis tren (arus kendaraan, polusi udara)	Variabel independen: kebijakan LEZ Variabel dependen: kualitas udara	Euro emission standards (kebijakan Low Emission Zone (LEZ)) Hasil: penurunan PM10 dan PM2.5 secara signifikan terjadi di London dan Paris. Konsentrasi NO2 mengalami penurunan sebesar ~5% tahun-1 sejak 2010.
13	The 'just' management of urban air pollution? A geospatial analysis of low emission zones in Brussels and London (Thomas Verbeek, Stephen Hincks)	Brussels, Belgia dan London, UK, 2022	Data jumlah transportasi, data populasi, data kualitas udara	Analisis multivariat, analisis regresi	Variabel independen: sosio ekonomi Variabel dependen: polusi udara, kepatuhan terhadap kebijakan LEZ	LEZ: mengurangi emisi dari kendaraan bermotor Hasil: tingkat ketidakpatuhan terhadap kebijakan LEZ sama tingginya baik di daerah berpendapatan rendah di Brussels maupun berpendapatan tinggi di London,
14	Estimated public health benefits of a low-emission zone in Malmo, Sweden (Erin Flanagan, Ebba Malmqvist, Susanna Gustafsson, Anna Oudin)	Malmo, Swedia, 2022	Laporan kesehatan (baseline) termasuk kondisi geografis	Analisis model	Variabel independen: kebijakan LEZ Variabel dependen: konsentrasi emisi	LEZ: mengurangi konsentrasi NO2 sampai dengan 13.4%.
15	Efficiency of portable air purification on public buses: A pilot study (Yuxi Zhang, Yanming Liu dkk)	2023	Data kualitas udara di dalam bus sebelum dan sesudah uji coba	Analisis model, simulasi	Variabel independen: ketersediaan <i>air purifier</i> di transportasi umum Variabel dependen: kualitas udara (reduksi PM2.5) pada	Penerapan metode vehicle's heating, ventilation, and air-conditioning (HVAC): mengurangi jumlah polutan di dalam kendaraan umum Hasil: rata-rata jumlah PM2.5 42-74%, sebelumnya 400 µg/m3, menjadi >15 µg/m3. <i>Air purifier</i> dapat menjaga konsentrasi PM2.5 di dalam bus secara efektif.
Energi						
1	Game theory-based renewable multi-energy system design and subsidy	Tiongkok, 2021	Empat kota percontohan	Studi kasus	Variabel independen: desain dan strategi subsidi	Sistem energi terbarukan dan program subsidi Hasil: kebijakan subsidi pemerintah mengurangi emisi

	strategy optimization (Zuming Liua, Shukun Wang, Mei Qi Lim, Markus Kraft, Xiaonan Wanga)		penggunaan teknologi terbarukan		sistem energi terbarukan	karbon)
					Variabel dependen : membatasi emisi karbon	
2	System dynamics modeling for urban economic growth and CO2 emission: a case study of Jakarta, Indonesia (Wawan Rusiawana, Prijono Tjiptoherijantob dkk)	Jakarta, 2015	Data ekonomi, sosial dan lingkungan	Model Kuantitatif: sistem dinamik, interaksi kausalitas, simulasi dan analisis	Variabel independen: skenario Intervensi Variabel dependen: emisi CO2	1. BAU scenario (business as usual scenario) 2. EGCO2-1 scenario (intervensi pengurangan CO2 dengan pengembangan ruang terbuka hijau): mampu menurunkan emisi CO2 rata-rata 14,29 %/tahun 3. EGCO2-2 scenario (peningkatan penggunaan energi terbarukan dan penurunan penggunaan energi fosil): mampu menurunkan emisi CO2 rata-rata 2,63 %/tahun
3	Can promoting ethanol gasoline usage improve air quality? Evidence from Tianjin, China (Lujiang Miao, Zhixiang Xu, Changyang Liu)	Tianjin, China, 2022	Data kualitas udara harian tahun 2013-2020	Analisis data regresi, estimasi differences-in-differences (DID), dan metode RD	Variabel independen: kebijakan ethanol gasoline Variabel dependen: air quality index (AQI)	Ethanol gasoline policy: mengurangi komponen volatile organik pada bahan bakar Hasil: tidak ada dampak nyata pada konsentrasi PM2.5 and PM10. Tetapi, ethanol gasoline policy mampu mengurangi kadar SO2, NO2, dan CO sekitar 36%, 19%, dan 20%.
4	Estimation of air pollutant emissions from captive diesel generators and its mitigation potential through microgrid and solar energy (Shree Raj Shakya, Iswor Bajracharya, dkk)	Kathmandu, Nepal, 2022	Analisis model, survei lapangan, analisis keuangan	Data ketersediaan listrik harian, estimasi konsumsi bahan bakar tahunan	Variabel independen: penggunaan microgrid DGs dan solar PV di daerah komersial Variabel dependen: konsumsi bahan bakar dan emisi, dampak ekonomi	HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources: optimasi penggunaan microgrid DGs (diesel-power generators) dan solar PV Hasil: mengurangi penggunaan bahan bakar sebesar 19%, memitigasi polusi udara (PM2.5, PM10, CO dan VOCs) sampai dengan 21-92%, mengurangi emisi sampai dengan 100%.
5	Direct and indirect air pollutant reductions as co-benefits of the energy transition toward carbon-neutrality in India's residential sector (Satish Kumar Yawale dkk)	India, 2023	Data faktor emisi	Analisis model the Asia-Pacific Integrated Model/Enduse (AIM/Enduse)	Variabel independen: transisi energi industri bisnis dan pemukiman Variabel dependen: kualitas udara	1. BAU scenario (business as usual): meningkatkan konsumsi LPG dan listrik 2. AFS scenario (advanced fuel substitution): setiap RT harus memiliki LPG selambat-lambatnya pada 2050 3. LCE scenario (low carbon electrification): mengenalkan energi listrik terbarukan (seperti listrik tenaga angin). Hasil: konsumsi biomassa dan arang berkurang hingga

						50%, kenaikan penggunaan LPG dapat meningkatkan emisi NO ₂ sebanyak 2x lipat (2020 ke 2070)
6	Evaluating the effectiveness of low-sulphur marine fuel regulations at improving urban ambient PM _{2.5} air quality: Source apportionment of PM _{2.5} at Canadian Atlantic and Pacific coast cities with implementation of the North American Emissions Control Area (Angelos T. Anastasopoulos dkk)	Atlantic dan Pacific Coast, Canada, 2023	Data konsentrasi PM _{2.5} , lalu lintas pelayaran 2010-2016	Komparasi pra dan pasca intervensi (dengan metode ANOVA dan Dunn's), analisis model	Variabel independen: kebijakan penggunaan bahan bakar (cleaner fuel) Variabel dependen: kualitas udara	Kebijakan terkait PM 2.5: NA ECA (North American Emissions control Area), kebijakan menentukan jenis bahan bakar yang boleh digunakan oleh kapal yang melalui batas wilayah tertentu Hasil: residu bahan bakar dalam bentuk PM _{2.5} berkurang sampai dengan 0.24–0.25 µg/m ³ (94-95% penurunan).
7	Air pollution related externality of district heating - a case study of Changping, Beijing (Xiaoqian Xi, Hailong Li dkk)	Beijing, China, 2018	Data konsentrasi PM _{2.5} , data kematian prematur	Analisis model regresi	Variabel independen: penggunaan gas Variabel dependen: kualitas udara, dampak kesehatan	Kebijakan Coal-To-Gas: menggantikan bahan bakar batu bara dengan gas Hasil: penurunan PM _{2.5} sebanyak 342 ton, dengan penurunan konsentrasi sebesar 0.01-0.11 µg/cm.
8	Rapid decarbonization in the Chinese electric power sector and air pollution reduction Co-benefits in the Post-COP26 Era (Xueting Jiang)	China, 2023	Data penggunaan energi, emisi (gas rumah kaca dan polusi udara), aktivitas RT atau individu	Analisis model, simulasi	Variabel independen: kebijakan dekarbonisasi Variabel dependen: kualitas udara	Kebijakan decarbonization (dekarbonisasi): penyediaan energi rendah karbon atau emisi Hasil: kebijakan dekarbonisasi dengan model GAINS-ASIA dapat mengurangi polusi udara 10-87x dibandingkan hanya memanfaatkan hilirisasi tenaga listrik.
Sumber Tidak Bergerak						
Industri						
1	Assessing environmental benefits of the transition from standard fossil fuels to liquefied natural gas: The Sardinia Region case study (Davide Borelli, Francesco Devia dkk)	Sardinia, Spanyol, 2022	Data fuel mix dan konsumsi energi. Data emisi dari berbagai sektor teknologi dan bahan bakar	Studi kasus	Variabel independen: perubahan penggunaan kendaraan bahan bakar fosil ke energi terbarukan Variabel dependen: kualitas udara, konsumsi energi	1. LNG (liquid natural gas) 2. SIGNAL: pendanaan atau insentif bagi industri yang menggunakan teknologi LNG-based Hasil: reduksi emisi CO ₂ naik dari 15% (2015) ke 26% (2022) pasca penggunaan NG.

PEMBAHASAN

Odd-even car (aturan ganjil-genap kendaraan)

Salah satu upaya untuk mengurangi polusi udara adalah skema ganjil-genap. Berdasarkan skema ini, kendaraan dengan plat nomor yang berakhiran dengan angka genap diperbolehkan beroperasi pada tanggal genap, sedangkan kendaraan dengan plat nomor ganjil diperbolehkan beroperasi pada tanggal ganjil. Berdasarkan artikel hasil penelusuran, dua artikel membahas tentang penerapan skema ganjil-genap dengan hasilnya adalah pengurangan PM_{2.5} rata-rata sebesar 4,39 % (Delhi pada tahun 2022) dan pengurangan konsentrasi PM_{2.5} sebesar 2%-44%, pengurangan konsentrasi PM₁₀ 5% - 49% (Delhi pada tahun 2017). Kedua artikel ini menunjukkan hasil yang sama dimana penerapan kendaraan skema ganjil-genap efektif untuk mengurangi polusi udara.

Berdasarkan hasil penelitian lain, kebijakan ganjil-genap efektif dalam mengurangi polusi udara terkait lalu lintas dan secara substansial meningkatkan kualitas udara di daerah perkotaan Beijing dimana konsentrasi rata-rata harian dan maksimum CO, PM₁₀, NO dan O₃ menurun secara signifikan(9). Sedangkan hasil penelitian Zulkarnain pada tahun 2021 di Jakarta menunjukkan hasil yang berbeda. Pembatasan ganjil-genap tidak secara signifikan mengurangi polutan udara di Jakarta dan belum berhasil memperbaiki kualitas udara. Beberapa faktor yang mempengaruhinya adalah pembatasan ini tidak berlaku untuk sepeda motor yang merupakan transportasi paling populer di Jakarta(10). Program pembatasan tersebut pertama kali dilaksanakan oleh pemerintah DKI Jakarta pada tanggal 30 Agustus 2016 di sembilan ruas jalan DKI Jakarta dan diperluas menjadi 25 ruas jalan pada tanggal 9 September 2019. Pembatasan ini diberlakukan pada hari Senin sampai Jumat pukul 06.00-10.00 WIB dan 16.00-21.00 WIB. Hasil penelitian ini serupa dengan penelitian yang dilakukan oleh Dinesh Mohan dkk pada tahun 2016 di Delhi, hasil penelitian menunjukkan bahwa aturan ganjil-genap tidak efektif dalam mengurangi polusi PM 2.5 yang terukur di Delhi(11).

Low emission zones (LEZ) (zona rendah emisi)

Zona rendah emisi adalah zona yang membatasi penggunaan kendaraan yang menimbulkan polusi. Penerapannya dengan membebankan biaya kepada pengemudi yang masuk, biasanya kendaraan dengan tingkat polusi yang lebih tinggi membayar biaya yang lebih tinggi. Sedangkan kendaraan listrik membayar biaya yang lebih rendah atau masuk secara gratis. LEZ juga membatasi kendaraan dengan melarang kendaraan dengan polusi tertinggi untuk memasuki zona tersebut dan pelanggar akan dikenakan denda yang cukup besar. Namun dalam penerapannya, LEZ memiliki skala pembatasan yang berbeda-beda. LEZ telah diterapkan sebagai metode yang secara langsung berdampak mengurangi polutan yang berkaitan dengan transportasi. Berdasarkan artikel hasil penelusuran, enam artikel membahas terkait penerapan LEZ dengan hasil penurunan PM₁₀ dan PM_{2.5} secara signifikan di London pada tahun 2019, mengurangi konsentrasi NO₂ sampai dengan 13,4% di Swedia pada tahun 2022, mengurangi konsentrasi debu halus 7% dan NO₂ 5% di Jerman pada tahun 2016. Berdasarkan artikel hasil telaah, penerapan LEZ efektif untuk mengurangi polusi udara.

Berdasarkan hasil penelitian lain diperoleh keterangan bahwa antara tahun 2005-2007, 79 kota di Jerman melanggar ambang batas harian untuk PM₁₀ sehingga pemerintah Jerman mengembangkan Clean Air Action Plan dengan LEZ sebagai salah satu yang paling luas diimplementasikan. LEZ diterapkan dengan melarang mobil untuk mengakses zona tersebut berdasarkan kelas emisinya. LEZ mengurangi konsentrasi PM₁₀ bulanan sebesar 0,6-0,9 g/m³ atau penurunan sebesar 3% dan 0,47 g/m³ untuk penurunan PM_{2.5}(12). Pada tahun 2022 terdapat 320 zona emisi rendah di Eropa, meningkat 40% dari tahun-tahun sebelumnya(13). Pada tahun 2021, penelitian di Madrid menemukan bahwa penerapan LEZ efektif untuk pengurangan gas rumah kaca karena berdampak secara signifikan terhadap bertambahnya penggunaan kendaraan bahan bakar alternatif(14). Aberdeen, Dundee, Edinburgh dan Glasgow pada tanggal 31 Mei 2022 juga telah menerapkan LEZ untuk meningkatkan kualitas udara(15). Penelitian yang dilakukan di Lisbon dari tahun 2009 hingga 2016 terkait penerapan LEZ menunjukkan pengurangan konsentrasi PM₁₀ dan NO₂ masing-masing sebesar 29% dan 12%(16).

Electric vehicle policies (kebijakan kendaraan listrik)

Kendaraan listrik merupakan teknologi yang efektif dari sektor transportasi dalam upaya penanggulangan polusi udara, sehingga teknologi ini sangat menjanjikan dalam mengurangi emisi karbon sampai dengan nol,

memiliki efisiensi yang tinggi, dan fleksibel dalam pengoperasiannya. Berdasarkan artikel hasil penelusuran, satu artikel membahas terkait transportasi listrik melalui peraturan “The New Policy” di Cina dengan penggunaan *energy vehicles* (EV) yang dapat mengurangi polusi udara sampai 30% pada tahun 2017. Kendaraan listrik juga terbukti dapat menghemat sekitar 18% energi fosil pada tahun 2015 dan naik menjadi sekitar 37% pada tahun 2030 pada sektor transportasi. Kebijakan ini terbukti dapat mengurangi SO₂ dan PM 2.5 secara signifikan(17). Penelitian yang dilakukan di Washington menunjukkan bahwa peralihan 35% dari seluruh mobil pribadi dan umum serta truk berbahan bakar fosil ke listrik dapat mengurangi emisi karbon sebesar 30 % CO₂(18).

Renewable energy (energi terbarukan)

Energi terbarukan adalah energi yang berasal dari sumber-sumber alami seperti sinar matahari dan angin. Energi terbarukan menghasilkan emisi yang jauh lebih rendah daripada bahan bakar fosil. Sumber energi terbarukan di antaranya adalah energi surya, energi panas bumi, tenaga air, energi laut, dan bioenergi(19). Sementara itu, bahan bakar fosil dapat berupa batu bara, minyak, dan gas yang merupakan kontributor terbesar terhadap perubahan iklim global dengan menyumbang lebih dari 75% emisi gas rumah kaca dan 90% dari semua emisi karbon dioksida. Sekitar 80% populasi global tinggal di negara pengimpor bahan bakar fosil dan sekitar 6 miliar orang bergantung pada bahan bakar fosil dari negara lain. Sebaliknya, sumber energi terbarukan tersedia di setiap negara, tetapi belum dimanfaatkan sepenuhnya. Padahal, energi terbarukan merupakan solusi dari ketergantungan impor bahan bakar fosil.

Menurut Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), sekitar 99% orang di dunia menghirup udara dengan kualitas udara yang melebihi ambang batas dan mengancam kesehatan mereka. Tingkat partikel halus dan nitrogen dioksida yang tidak sehat berasal dari pembakaran bahan bakar fosil. Upaya negara-negara di dunia untuk beralih ke sumber energi bersih secara berkelanjutan dapat mengatasi tidak hanya perubahan iklim tetapi juga polusi udara dan masalah kesehatan(20). Berdasarkan hasil penelusuran artikel, diperoleh satu artikel terkait penerapan energi terbarukan dan program subsidi yang secara efektif dapat mengurangi emisi karbon di Tiongkok pada tahun 2021.

Penelitian lain di Cina, sebagai negara dengan penggunaan energi terbarukan tertinggi di dunia, menunjukkan potensi keberhasilan upaya mengurangi emisi karbon dan menjaga kenaikan suhu di bawah 2 derajat celsius melalui pengembangan energi terbarukan. Hal ini dilakukan dengan mengintervensi sektor listrik yang banyak mengonsumsi bahan bakar fosil dan mengubahnya menjadi tenaga surya pembangkit Listrik fotovoltaik secara bertahap. Upaya ini dapat mempercepat pemulihan kualitas udara dan mencegah jutaan kematian dini (21).

Polusi udara dan emisi karbon berkontribusi terhadap perubahan iklim melalui pelepasan gas rumah kaca dari sumber energi tidak terbarukan seperti batu bara. Hal ini menyebabkan kenaikan suhu, cuaca ekstrem, dan perubahan pola hujan di berbagai belahan dunia(22). Hasil penelitian di Cina menunjukkan bahwa untuk setiap peningkatan kiloton dalam penggunaan energi terbarukan, log emisi CO₂ di Cina berkurang sebesar 0,713%. Berdasarkan hasil tersebut, upaya untuk beralih ke sumber energi terbarukan di Cina terbukti membantu mengurangi emisi CO₂ dan gas rumah kaca di negara tersebut(22).

KESIMPULAN

Intervensi untuk mengurangi polusi udara telah banyak dilakukan baik untuk sumber bergerak maupun sumber tidak bergerak. Beberapa upaya penanggulangan bagi sumber bergerak berupa penerapan skema kendaraan ganjil- genap, penggunaan filter karbon aktif, proyek kereta metro, penggunaan *automated charging mechanism* (ACM), penerapan *low emission zone* (LEZ), dan penggunaan energi terbarukan dalam skala yang lebih besar. Intervensi dari sumber bergerak ini efektif untuk mengurangi polusi udara. Sedangkan bagi polusi udara sumber tidak bergerak, beberapa negara di dunia tengah mengaktifkan peraturan terkait penggunaan LNG (*liquid natural gas*) di bidang industri.

SARAN

Bagi peneliti yang akan melakukan penelitian terkait intervensi penanggulangan polusi udara agar lebih banyak menambahkan artikel terkait intervensi yang berasal dari sumber tidak bergerak.

DAFTAR PUSTAKA

1. WHO. Air pollution [Internet]. 2023 [cited 2023 Sep 25]. Available from: https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
2. UN Environment Programme. Pollution Action Note – Data you need to know [Internet]. 2022 [cited 2023 Sep 25]. Available from: <https://www.unep.org/interactives/air-pollution-note/>
3. WHO. Informing policy and progress [Internet]. 2022 [cited 2023 Sep 24]. Available from: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/policy-progress>
4. WHO. Ambient (outdoor) air pollution [Internet]. 2022 [cited 2023 Sep 25]. Available from: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health?gclid=Cj0KCQjwvL-oBhCxARIsAHkOiu3nTIL8BEA4Ate26H1Gxu9jiYtpk7ho0IMTtydgVwfTgOr9RAJdi70aAunjEALw_wcB](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health?gclid=Cj0KCQjwvL-oBhCxARIsAHkOiu3nTIL8BEA4Ate26H1Gxu9jiYtpk7ho0IMTtydgVwfTgOr9RAJdi70aAunjEALw_wcB)
5. US EPA O. Stationary Sources of Air Pollution [Internet]. 2015 [cited 2024 Jan 26]. Available from: <https://www.epa.gov/stationary-sources-air-pollution>
6. Moving to Clean Energy to Tackle Air Pollution in Jabodetabek - IESR [Internet]. [cited 2024 Feb 7]. Available from: <https://iesr.or.id/en/moving-to-clean-energy-to-tackle-air-pollution-in-jabodetabek>
7. Policies ER. HHS Public Access. 2017;65(3):324–35.
8. Indonesia R. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara. 1999.
9. Cai H, Xie S. Traffic-related air pollution modeling during the 2008 Beijing Olympic Games: The effects of an odd-even day traffic restriction scheme. *Science of The Total Environment*. 2011 Apr;409(10):1935–48.
10. Zulkarnain Z, Ghiffary A. Impact of Odd-Even Driving Restrictions on Air Quality in Jakarta. *IJTech*. 2021 Dec 7;12(5):925.
11. Mohan D, Tiwari G, Goel R, Lahkar P. Evaluation of Odd–Even Day Traffic Restriction Experiments in Delhi, India. *Transportation Research Record*. 2017 Jan;2627(1):9–16.
12. Margaryan S. Low emission zones and population health. *Journal of Health Economics*. 2021 Mar;76:102402.
13. Institute for Transportation and Development Policy - Promoting sustainable and equitable transportation worldwide [Internet]. 2023 [cited 2024 Jan 16]. What Is A Low Emission Zone? - Institute for Transportation and Development Policy. Available from: <https://www.itdp.org/2023/02/22/what-is-a-low-emission-zone/>
14. Peters JF, Burguillo M, Arranz JM. Low emission zones: Effects on alternative-fuel vehicle uptake and fleet CO2 emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2021 Jun;95:102882.
15. Low Emission Zones | Transport Scotland [Internet]. [cited 2024 Jan 16]. Available from: <https://www.transport.gov.scot/our-approach/environment/low-emission-zones/>
16. Santos FM, Gómez-Losada Á, Pires JCM. Impact of the implementation of Lisbon low emission zone on air quality. *Journal of Hazardous Materials*. 2019 Mar;365:632–41.
17. Ma C, Madaniyazi L, Xie Y. Impact of the Electric Vehicle Policies on Environment and Health in the Beijing–Tianjin–Hebei Region. *IJERPH*. 2021 Jan 13;18(2):623.
18. Filigrana P, Levy JI, Gauthier J, Batterman S, Adar SD. Health benefits from cleaner vehicles and increased active transportation in Seattle, Washington. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2022 Jul;32(4):538–44.
19. Nations U. United Nations. United Nations; [cited 2024 Jan 25]. What is renewable energy? Available from: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy>
20. Nations U. United Nations. United Nations; [cited 2024 Jan 25]. Renewable energy – powering a safer future. Available from: <https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy>
21. Xie Y, Xu M, Pu J, Pan Y, Liu X, Zhang Y, et al. Large-scale renewable energy brings regionally disproportional air quality and health co-benefits in China. *iScience*. 2023 Aug;26(8):107459.
22. Chen XH, Tee K, Elnahass M, Ahmed R. Assessing the environmental impacts of renewable energy sources: A case study on air pollution and carbon emissions in China. *Journal of Environmental Management*. 2023 Nov;345:118525.