

Bagaimana *La Nina* Dan *El Nino* Memberikan Pengaruh Terhadap Pencemaran Udara? Sebuah Tinjauan Bibliometrik

Muhammad Zidan Dzakwan^{1a)} dan Dian Hudawan Santoso^{1,2)}

¹⁾ Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknologi Mineral dan Energi, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta, Jl. Padjajaran, Condongcatur, Depok, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55283

²⁾ Prodi Doktor Ilmu Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Universitas Gadjah Mada, Jl. Teknik Utara, Pogung Kidul, Sinduadi, Mlati, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55284

^{a)} Corresponding author: 114220132@student.upnyk.ac.id

ABSTRAK

Fenomena El Niño dan La Niña merupakan variabilitas iklim alami yang mempengaruhi kondisi atmosfer dan pencemaran udara secara signifikan. Perubahan pola cuaca akibat fenomena ini berdampak pada distribusi dan konsentrasi polutan di berbagai wilayah. Penelitian ini bertujuan melakukan tinjauan bibliometrik untuk mengidentifikasi tren penelitian, jejaring kolaborasi, dan perkembangan ilmu terkait pengaruh El Niño dan La Niña terhadap kualitas udara. Data diperoleh dari metadata publikasi pada basis data Scopus periode 2000–2025 dan dianalisis menggunakan perangkat lunak Biblioshiny. Metode meliputi analisis performa publikasi, jejaring kolaborasi antar institusi dan negara, serta analisis tematik untuk memetakan evolusi konsep dan kata kunci utama. Hasil studi menunjukkan teridentifikasi 58 dokumen pada 36 sumber publikasi dengan laju pertumbuhan 11,13% per tahun, rata-rata 32,59 sitasi per dokumen, serta 36,21% kolaborasi internasional. Tema utama yang teridentifikasi mencakup *air pollution*, *environmental monitoring*, *spatiotemporal analysis*, *air quality*, dan *particulate matter*. Tiongkok mendominasi kontribusi publikasi dan afiliasi institusi, dengan Zhejiang University of Technology sebagai institusi paling produktif (10 artikel). *Atmospheric Environment* menjadi sumber referensi paling relevan (10 dokumen). Studi ini memberikan rekomendasi strategis untuk pengembangan riset dan kebijakan adaptasi berbasis bukti ilmiah guna mengelola dampak variabilitas iklim terhadap pencemaran udara, sekaligus menunjukkan peluang riset di kawasan Asia Tenggara, khususnya Indonesia.

Kata Kunci: Bibliometrik; El Niño; La Niña; Pencemaran Udara

ABSTRACT

The El Niño and La Niña phenomena are natural climate variabilities that significantly affect atmospheric conditions and air pollution. Changes in weather patterns caused by these phenomena influence the distribution and concentration of pollutants across regions. This study aims to conduct a bibliometric review to identify research trends, collaboration networks, and scientific developments related to the effects of El Niño and La Niña on air quality. Data were obtained from publication metadata in the Scopus database for the 2000–2025 period and analyzed using Biblioshiny software. The methods included publication performance analysis, collaboration networks between institutions and countries, and thematic analysis to map the evolution of concepts and main keywords. The results identified 58 documents from 36 sources

with an annual growth rate of 11.13%, an average of 32.59 citations per document, and 36.21% international co-authorship. Key themes include air pollution, environmental monitoring, spatiotemporal analysis, air quality, and particulate matter. China dominates publication contributions and institutional affiliations, with Zhejiang University of Technology as the most productive institution (10 articles). Atmospheric Environment serves as the most relevant reference source (10 documents). This study provides strategic recommendations for the development of evidence-based research and adaptation policies to manage the impacts of climate variability on air pollution, while highlighting research opportunities in Southeast Asia, particularly Indonesia.

Keywords: *Bibliometrics; El Niño; La Niña; Air Pollution*

PENDAHULUAN

Pencemaran udara merupakan krisis lingkungan dan kesehatan masyarakat yang dampaknya melintasi batas negara, terutama melalui paparan partikulat halus (PM_{2.5}) dan ozon permukaan. Beban penyakit akibat paparan polusi udara ambien tetap tinggi dan berkontribusi besar terhadap kematian dini serta hilangnya tahun hidup sehat, sehingga menjadi prioritas dalam agenda pembangunan berkelanjutan. Bukti epidemiologis skala global menunjukkan hubungan konsisten antara paparan PM_{2.5} jangka panjang dan peningkatan risiko kematian, termasuk penyakit kardiovaskular dan pernapasan (Cohen et al., 2017; Burnett et al., 2018). Di sisi regulasi, standar rujukan internasional semakin ketat. Pedoman WHO 2021 menurunkan ambang rata-rata tahunan PM_{2.5} menjadi 5 µg/m³, yang menegaskan bahwa risiko kesehatan muncul bahkan pada konsentrasi yang sebelumnya dianggap moderat (World Health Organization, 2021). Dengan demikian, pemahaman faktor pengendali variasi polusi, termasuk variabilitas iklim, menjadi kunci untuk mitigasi berbasis bukti.

Variasi konsentrasi polutan tidak hanya ditentukan oleh emisi, tetapi juga sangat dipengaruhi kondisi meteorologi dan dinamika atmosfer yang mengatur pencampuran, transport, deposisi, serta pembentukan polutan sekunder. Kerangka kimia atmosfer menjelaskan bagaimana perubahan suhu, kelembapan, radiasi, dan sirkulasi angin dapat memperkuat pembentukan ozon maupun aerosol sekunder, sekaligus memicu episode stagnasi yang meningkatkan akumulasi polutan di lapisan batas (Seinfeld & Pandis, 2016). Kajian sintesis menekankan bahwa perubahan iklim dan variabilitas iklim dapat menggeser *baseline* kualitas udara melalui perubahan ventilasi atmosfer, frekuensi gelombang panas, serta pola presipitasi yang memengaruhi pembersihan polutan (Jacob & Winner, 2009). Karena itu, studi kualitas udara perlu mengintegrasikan penggerak iklim antar-tahunan yang berulang dan dapat diprediksi sebagian, bukan hanya tren emisi jangka panjang.

Salah satu pengendali variabilitas iklim antar-tahunan paling dominan adalah *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO), yang mencakup fase El Niño dan La Niña. ENSO dipahami sebagai konsep pemersatu dalam ilmu kebumihan karena telekoneksinya memengaruhi pola curah hujan, suhu, dan sirkulasi atmosfer pada skala regional hingga global (McPhaden et al., 2006). Perubahan medan tekanan dan angin selama ENSO dapat mengubah transport massa udara, stabilitas atmosfer, serta peluang terjadinya cuaca ekstrem. Mekanisme tersebut relevan langsung bagi pembentukan dan dispersi polutan. Oleh karena itu, mengkaji ENSO sebagai penggerak sistemik kualitas udara dapat memperkuat penjelasan kausal dari fluktuasi polusi yang sulit dipahami bila hanya dilihat sebagai variasi acak.

Selain melalui dinamika transport dan stagnasi, ENSO berpengaruh kuat terhadap polusi udara lewat jalur kebakaran lanskap dan emisi pembakaran biomassa. Bukti historis menunjukkan bahwa periode ENSO tertentu berkaitan dengan lonjakan emisi kebakaran di kawasan tropis, termasuk Asia Tenggara, yang kemudian meningkatkan aerosol dan partikulat pada skala luas (van der Werf et al., 2004). Di Indonesia, kebakaran gambut dan hutan terbukti melepaskan karbon dalam jumlah besar dan menghasilkan asap pekat yang dapat bertahan lama, terutama saat kondisi

kering memperkuat kerentanan lahan (Page et al., 2002). Lebih jauh, rekaman jangka panjang menunjukkan peran penguatan manusia melalui tata guna lahan dan praktik pembakaran yang memperbesar respons kebakaran terhadap kekeringan terkait ENSO (Field et al., 2009). Jalur ENSO–kekeringan–kebakaran–asap menempatkan ENSO sebagai faktor risiko penting dalam variasi polusi partikulat di wilayah tropis.

Konteks Asia Tenggara memperlihatkan implikasi kesehatan dan ekonomi yang nyata dari hubungan ENSO dan polusi. Episode kabut asap 2015 dianalisis sebagai peristiwa besar yang dipengaruhi kondisi iklim dan menghasilkan paparan asap lintas batas yang signifikan (Koplitz et al., 2016). Studi lain menunjukkan bahwa variabilitas kebakaran lanskap yang terkait kekeringan ENSO berkorelasi dengan peningkatan risiko kesehatan, sehingga memperkuat pentingnya pendekatan preventif berbasis iklim untuk melindungi populasi rentan (Marlier et al., 2013). Dari perspektif kebijakan pembangunan, temuan ekonomi-politik mengindikasikan bahwa variasi kebakaran antar-tahun banyak dijelaskan oleh El Niño, dan efeknya dapat diperparah faktor tata kelola wilayah serta insentif penggunaan api (Edwards et al., 2020). Dengan demikian, ENSO tidak hanya relevan sebagai fenomena iklim, melainkan juga sebagai pemicu risiko polusi yang berinteraksi dengan struktur sosial-ekonomi.

Di luar Asia Tenggara, penelitian di Asia Timur menunjukkan bagaimana ENSO memodulasi episode $PM_{2.5}$ melalui perubahan sirkulasi regional, presipitasi, dan monsun. Perbedaan tipe El Niño dilaporkan memiliki dampak yang tidak seragam terhadap konsentrasi $PM_{2.5}$ di Asia Timur, yang menandakan perlunya membedakan karakteristik ENSO saat menilai risiko polusi (Jeong et al., 2018). Kajian berbasis observasi jangka panjang di China selatan juga menemukan korelasi kuat antara fase ENSO dan parameter aerosol, sekaligus menegaskan bahwa pengaruh ENSO dapat dominan pada variasi antar-tahun walaupun tren jangka panjang tetap dipengaruhi perubahan emisi antropogenik (Wang et al., 2022). Temuan ini memperkuat argumen bahwa ENSO berperan sebagai pengubah kondisi meteorologi yang menentukan apakah penurunan emisi akan segera tampak pada kualitas udara atau tertutupi oleh anomali iklim.

Bukti terbaru juga mengarah pada pemahaman yang lebih mekanistik mengenai mengapa polusi dapat bertahan meski terjadi penurunan emisi, terutama saat terjadi transisi ENSO yang cepat. Studi di Delta Sungai Mutiara menunjukkan bahwa perubahan meteorologi selama transisi El Niño ke La Niña dapat menjadi pendorong dominan persistensi $PM_{2.5}$, sehingga kebijakan pengendalian emisi perlu mempertimbangkan variabilitas iklim sebagai faktor yang memengaruhi efektivitas jangka pendek (Qu et al., 2025). Selain itu, temuan baru di bidang kesehatan lingkungan menambah dimensi penting. ENSO dapat berperan sebagai *effect modifier* pada hubungan paparan $PM_{2.5}$ dengan luaran kesehatan tertentu, sehingga evaluasi dampak polusi juga perlu menimbang fase ENSO untuk menghindari bias estimasi risiko (Majeed & Zuberi, 2025). Evolusi ini menunjukkan bahwa literatur ENSO–polusi berkembang dari sekadar asosiasi menuju integrasi mekanisme atmosfer dan implikasi kesehatan.

Studi di kawasan tropis Amerika Selatan juga memperlihatkan bahwa hubungan ENSO dan aerosol tidak tunggal, melainkan dipengaruhi interaksi meteorologi lokal dan dinamika

pembakaran. Penelitian di Amazon bagian selatan menunjukkan bahwa aerosol dan variabel meteorologi dapat berubah mengikuti variabilitas ENSO dengan pola keterlambatan (*lag*) tertentu, mengindikasikan proses sistemik yang melibatkan akumulasi kondisi kering, ketersediaan bahan bakar, serta transport asap (Pereira et al., 2024). Kajian lain menekankan bahwa keterkaitan aerosol–meteorologi di Amazon dapat dipengaruhi faktor regional, sehingga temuan di satu benua tidak otomatis dapat digeneralisasi ke wilayah tropis lain tanpa sintesis lintas-kasus (Palacios et al., 2024). Sementara itu, bukti tambahan di wilayah *outflow* Asia Timur menunjukkan adanya keterkaitan koherensi partikulat lintas ruang dengan variabilitas iklim seperti ENSO, sehingga menegaskan pentingnya analisis *spatio-temporal* dalam menilai pola polusi lintas kawasan (Kueh et al., 2023). Dengan demikian, kebutuhan akan peta pengetahuan yang merangkum keragaman temuan lintas wilayah menjadi semakin mendesak.

Dari sisi operasional, kemajuan pemantauan kualitas udara mempercepat pertumbuhan literatur sekaligus memperluas skala analisis dari lokal menjadi regional hingga global. Tren penggunaan data satelit, reanalisis, jaringan stasiun, dan sensor berbiaya rendah mendorong meningkatnya studi *spatiotemporal* serta integrasi data besar dalam penilaian hubungan iklim–polusi. Dalam konteks ini, kontribusi peneliti Indonesia juga relevan, misalnya Santoso et al. (2024) yang menunjukkan meningkatnya perhatian pada pemanfaatan *low-cost sensor* (LCS) dan *Internet of Things* (IoT) untuk pemantauan PM_{2.5} serta pemetaan tren riset berbasis Scopus, sejalan dengan kebutuhan bukti cepat untuk tata kelola kualitas udara. Perkembangan perangkat dan data tersebut memperbesar peluang penelitian ENSO–polusi untuk lebih presisi, tetapi juga berpotensi menghasilkan literatur yang terfragmentasi karena beragam metode, wilayah, dan objek polutan.

Dalam situasi literatur yang berkembang cepat dan lintas-disiplin, metode bibliometrik menjadi penting untuk memetakan struktur pengetahuan, mengidentifikasi aktor kunci, serta melacak evolusi tema penelitian secara objektif. Pedoman bibliometrik modern menekankan bahwa analisis jaringan (*co-authorship*, *co-citation*, dan *co-word*) dapat mengungkap bagaimana komunitas ilmiah membangun konsensus, sekaligus menunjukkan kesenjangan riset yang belum terhubung (Donthu et al., 2021). Ketersediaan perangkat lunak pemetaan seperti *bibliometrix/biblioshiny* dan VOSviewer juga memperkuat replikasi serta transparansi proses analisis pada korpus besar (Aria & Cuccurullo, 2017). Selain itu, pendekatan *science mapping* membantu menilai dinamika bidang riset dari waktu ke waktu, termasuk kemunculan topik baru dan pergeseran fokus metodologis (Cobo et al., 2011).

Meskipun literatur tentang ENSO dan kualitas udara berkembang pesat, masih terdapat sejumlah celah penelitian (*research gap*) yang perlu diisi. Pertama, belum tersedia studi bibliometrik yang secara khusus memetakan keterkaitan ENSO dengan pencemaran udara secara komprehensif, sebab kajian terdahulu cenderung berfokus pada studi kasus regional atau polutan spesifik tanpa sintesis lintas-wilayah. Kedua, belum ada studi yang menjembatani perspektif global dengan konteks Indonesia secara seimbang, padahal Indonesia merupakan kawasan yang sangat rentan terhadap dampak ENSO melalui kebakaran lahan gambut dan hutan. Ketiga, pemetaan tema riset dan jejaring kolaborasi yang dilakukan secara bersamaan masih terbatas, sehingga gambaran

utuh mengenai struktur pengetahuan, aktor kunci, dan arah perkembangan riset belum tersaji secara terintegrasi. Ketiga celah tersebut menegaskan urgensi tinjauan bibliometrik yang sistematis pada periode 2000–2025.

Berdasarkan latar belakang dan celah penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) memetakan tren temporal publikasi ilmiah yang membahas pengaruh El Niño dan La Niña terhadap pencemaran udara pada periode 2000–2025; (2) mengidentifikasi sebaran geografis dan jejaring kolaborasi antar negara serta institusi yang berkontribusi pada bidang ini; dan (3) menganalisis struktur tematik melalui jaringan kata kunci untuk mengungkap evolusi konsep dan arah riset di masa depan. Hasil studi diharapkan menegaskan kontribusi keilmuan bidang ENSO–pencemaran udara dan mengidentifikasi ruang riset yang masih terbuka, baik dalam konteks global maupun Indonesia.

METODE

Penelitian ini mengadopsi pendekatan bibliometrik untuk memetakan evolusi literatur tentang pengaruh *La Niña* dan *El Niño* terhadap pencemaran udara pada periode 2000 hingga 2025. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan analisis metrik publikasi sekaligus membangun konsep induktif dari pola data, seperti tren kata kunci dan jaringan kolaborasi, yang sesuai dengan tujuan mengidentifikasi kesenjangan pengetahuan. Menurut Donthu et al. (2021), bibliometrik efektif untuk mengevaluasi pola ilmiah secara sistematis, sementara integrasi pendekatan tematik menambah kedalaman interpretatif pada data berskala besar.

Sumber Data dan Waktu Pencarian. Data diperoleh dari basis data Scopus karena cakupan luasnya pada literatur lingkungan, atmosfer, dan iklim. Pencarian literatur dilakukan pada bulan Oktober 2025 untuk memastikan kebaruan data publikasi yang teridentifikasi, dengan rentang waktu publikasi 2000–2025.

Query Pencarian. Strategi pencarian dirancang menggunakan kombinasi kata kunci dengan operator Boolean pada kolom *Title-Abstract-Keywords* (TITLE-ABS-KEY). Query yang digunakan adalah sebagai berikut:

```
TITLE-ABS-KEY (("El Niño" OR "El Nino" OR "La Niña" OR "La Nina" OR "ENSO" OR  
"El Niño–Southern Oscillation") AND ("air pollution" OR "air quality" OR "particulate  
matter" OR "PM2.5" OR "aerosol" OR "haze")) AND PUBYEAR > 1999 AND PUBYEAR  
< 2026
```

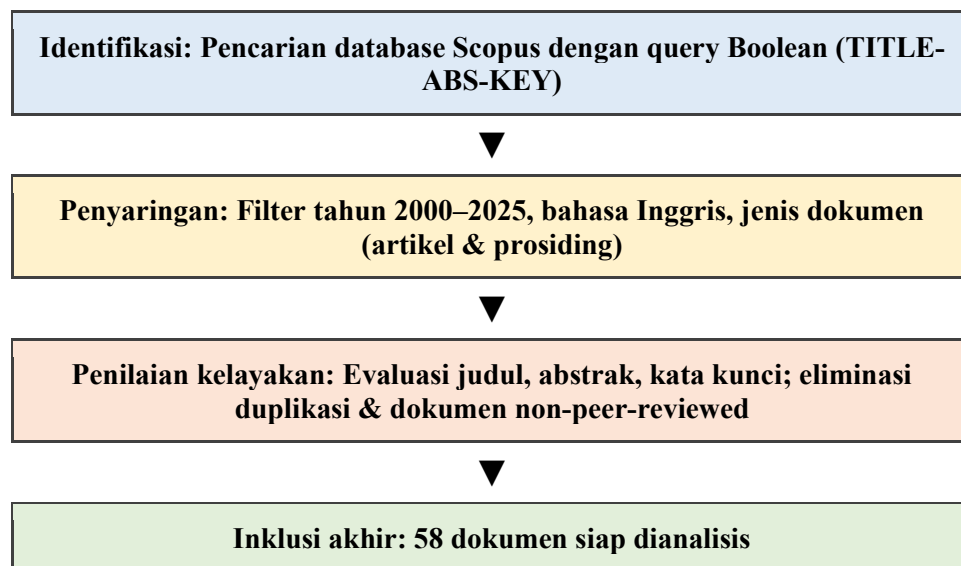
Kriteria Inklusi dan Eksklusi. Penyaringan dokumen dilakukan secara sistematis untuk memastikan integritas dataset (Linnenluecke et al., 2020). Kriteria inklusi dan eksklusi yang diterapkan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kriteria inklusi dan eksklusi pada proses pemilihan dokumen

Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Publikasi rentang tahun 2000–2025	Publikasi sebelum tahun 2000

Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Berbahasa Inggris	Tidak berbahasa Inggris
Jenis dokumen artikel jurnal dan prosiding konferensi	Editorial, surat pembaca, catatan, errata, book review
Memuat kata kunci ENSO/El Niño/La Niña dan polusi udara/kualitas udara	Tidak relevan dengan tema ENSO–pencemaran udara
Metadata lengkap (judul, abstrak, penulis, sitasi)	Metadata tidak lengkap atau duplikasi

Prosedur Seleksi Dokumen (*Flow Diagram*). Proses seleksi dokumen mengikuti tahapan PRISMA yang dimodifikasi untuk studi bibliometrik, yang mencakup empat tahap: (1) identifikasi, melalui pencarian awal pada Scopus dengan query di atas yang menghasilkan total dokumen mentah; (2) penyaringan, dengan menerapkan filter rentang tahun (2000–2025), bahasa Inggris, dan jenis dokumen (artikel jurnal dan prosiding konferensi); (3) penilaian kelayakan, dengan memeriksa kesesuaian judul, abstrak, dan kata kunci terhadap fokus penelitian, serta menghapus duplikasi dan dokumen *non-peer-reviewed* seperti editorial, errata, dan *book review*; dan (4) inklusi akhir, yang menghasilkan 58 dokumen yang memenuhi seluruh kriteria dan digunakan dalam analisis. Diagram alir tahapan tersebut diilustrasikan secara ringkas pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Diagram alir prosedur seleksi dokumen

Analisis Data. Metadata dokumen terpilih (judul, abstrak, penulis, afiliasi, negara, tahun publikasi, kata kunci, sitasi, dan referensi) diekspor dari Scopus dalam format BibTeX/CSV. Analisis bibliometrik dilakukan menggunakan perangkat lunak Biblioshiny (<https://www.bibliometrix.org>), yaitu antarmuka berbasis web dari paket *bibliometrix* pada R (Aria & Cuccurullo, 2017). Analisis mencakup: (1) *performance analysis* untuk menilai tren produksi

tahunan, sumber paling produktif, dan afiliasi institusi paling relevan; (2) *collaboration network analysis* untuk memetakan keterkaitan antar negara dan penulis; serta (3) *science mapping* melalui analisis *co-occurrence* kata kunci dan *trend topics* untuk mengidentifikasi struktur tematik dan evolusi konsep penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pencarian artikel berdasarkan data literatur Scopus disajikan pada Tabel 2. Analisis ini mencakup pemeriksaan tren dan kemajuan dalam artikel yang berkaitan dengan pengaruh *La Niña* dan *El Niño* terhadap pencemaran udara.

Tabel 2. Informasi utama publikasi yang diambil dari basis data Scopus

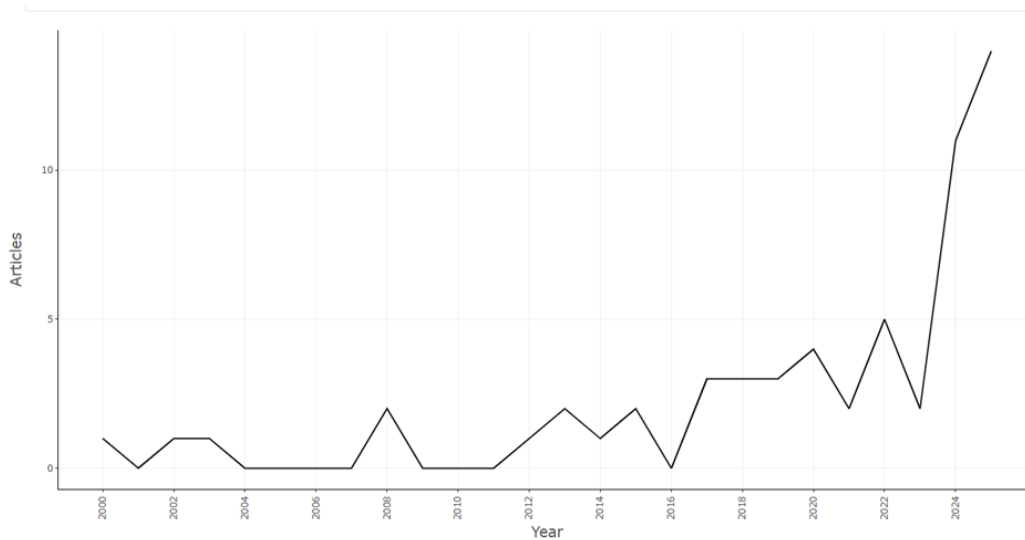
<i>Description</i>	<i>Results</i>
MAIN INFORMATION ABOUT DATA	
<i>Timespan</i>	2000:2025
<i>Sources (Journals, Books, etc)</i>	36
<i>Documents</i>	58
<i>Annual Growth Rate %</i>	11.13
<i>Document Average Age</i>	5.05
<i>Average citations per doc</i>	32.59
<i>References</i>	544
DOCUMENT CONTENTS	
<i>Keywords Plus (ID)</i>	872
<i>Author's Keywords (DE)</i>	194
AUTHORS	
<i>Authors</i>	355
<i>Authors of single-authored docs</i>	0
AUTHORS COLLABORATION	
<i>Single-authored docs</i>	0
<i>Co-Authors per Doc</i>	9.74
<i>International co-authorships %</i>	36.21
DOCUMENT TYPES	
<i>article</i>	54

<i>Description</i>	<i>Results</i>
<i>conference paper</i>	4

Selama periode 2000–2025, teridentifikasi 58 dokumen yang tersebar pada 36 sumber publikasi (jurnal, buku, dan sejenisnya). Sebaran ini menandakan topik dibahas lintas kanal publikasi, meskipun masih dalam korpus yang relatif terfokus. Laju pertumbuhan publikasi mencapai 11,13% per tahun, yang mengindikasikan minat riset meningkat cukup cepat seiring meningkatnya perhatian pada dampak anomali iklim terhadap kualitas udara, misalnya perubahan curah hujan, kekeringan, kebakaran hutan, dan transport polutan. Rata-rata usia dokumen 5,05 tahun memperlihatkan bahwa literatur yang dominan bersifat baru. Dari sisi pengaruh ilmiah, rata-rata 32,59 sitasi per dokumen menunjukkan publikasi di bidang ini cenderung sering dirujuk, yang menandakan adanya kontribusi konseptual dan empiris yang kuat.

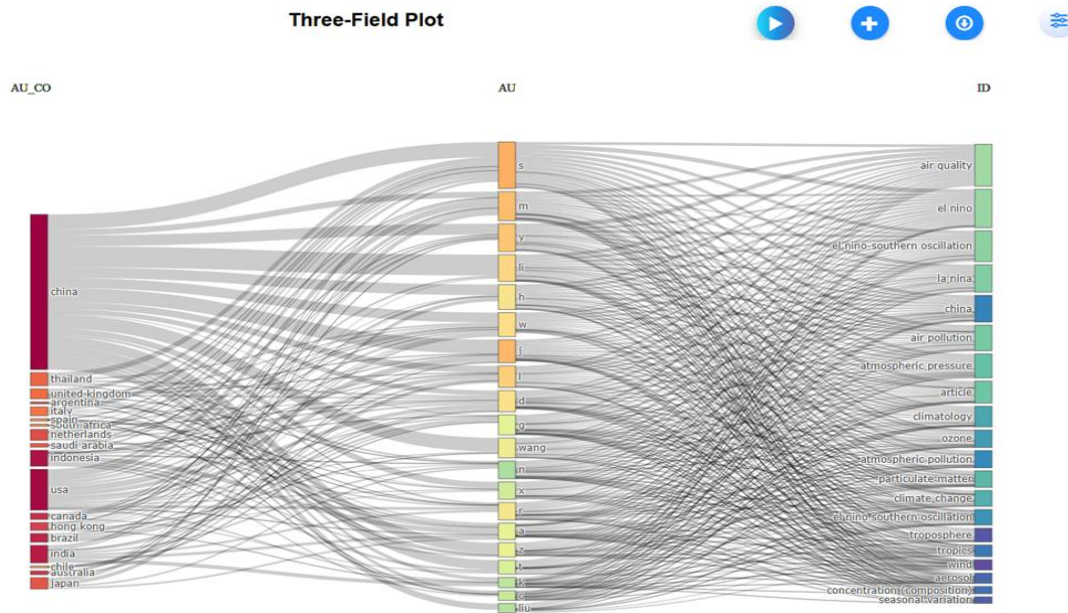
Struktur pengetahuan dalam korpus tampak kompleks. *Keywords Plus* berjumlah 872 jauh lebih banyak dibanding kata kunci penulis (194), yang biasanya menandakan tema yang muncul di literatur sangat beragam dan sering meluas melampaui istilah yang secara eksplisit dipilih penulis. Pola kolaborasi sangat kuat. Teridentifikasi 355 penulis tanpa dokumen penulis tunggal, dengan rata-rata 9,74 ko-penulis per artikel. Kondisi ini menggambarkan bahwa riset El Niño–La Niña dan polusi udara bersifat interdisipliner (iklim, atmosfer, kesehatan lingkungan, dan sains data) serta cenderung membutuhkan tim besar dan data multi-sumber. Selain itu, 36,21% kolaborasi bersifat internasional. Hal ini menegaskan bahwa isu ini lintas batas, sebab dampak ENSO terhadap kualitas udara dapat terjadi melalui mekanisme regional maupun transregional, misalnya asap lintas negara, perubahan sirkulasi atmosfer, dan anomali curah hujan. Terakhir, dominasi artikel jurnal (54) dibanding makalah konferensi (4) menunjukkan bahwa temuan di bidang ini lebih sering dimatangkan menjadi kontribusi yang komprehensif dan terarsip kuat di jurnal.

Berdasarkan data tersebut, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai bagaimana La Niña dan El Niño memengaruhi pencemaran udara berkembang menjadi tema ilmiah yang semakin penting dan terus bertumbuh pada periode 2000–2025. Temuan ini terlihat dari 58 publikasi pada 36 sumber dengan laju pertumbuhan 11,13% per tahun, yang menandakan perhatian akademik meningkat seiring penguatan isu variabilitas iklim dan kualitas udara.



Gambar 2. Grafik produksi ilmiah tahunan

Pola produksi ilmiah tahunan ditampilkan pada Gambar 2. Berdasarkan grafik tersebut, publikasi terkait pengaruh El Niño–La Niña terhadap pencemaran udara terlihat sangat rendah pada fase awal (sekitar 2000–2011), umumnya hanya 0–1 artikel per tahun dan beberapa tahun bahkan tidak ada publikasi. Memasuki 2012–2016, jumlah artikel mulai muncul lebih konsisten meskipun masih kecil (sekitar 1–2 artikel/tahun) dan sempat turun lagi pada pertengahan periode. Setelah itu, terjadi pergeseran tren yang jelas. Sejak 2017 publikasi meningkat dan relatif stabil pada kisaran ± 3 artikel per tahun, lalu naik bertahap hingga mencapai sekitar 4 artikel pada 2020 dan puncak menengah ± 5 artikel pada 2022. Lonjakan paling menonjol terjadi pada dua tahun terakhir, ketika produksi ilmiah meningkat tajam dan melampaui 10 artikel per tahun pada 2024 serta mencapai puncak tertinggi pada 2025. Pola ini menegaskan bahwa topik pengaruh La Niña dan El Niño terhadap pencemaran udara sedang memasuki fase akselerasi riset, kemungkinan didorong oleh meningkatnya perhatian pada kejadian ekstrem (kekeringan, kebakaran, dan asap) serta ketersediaan data dan metode analisis atmosfer yang semakin kuat.

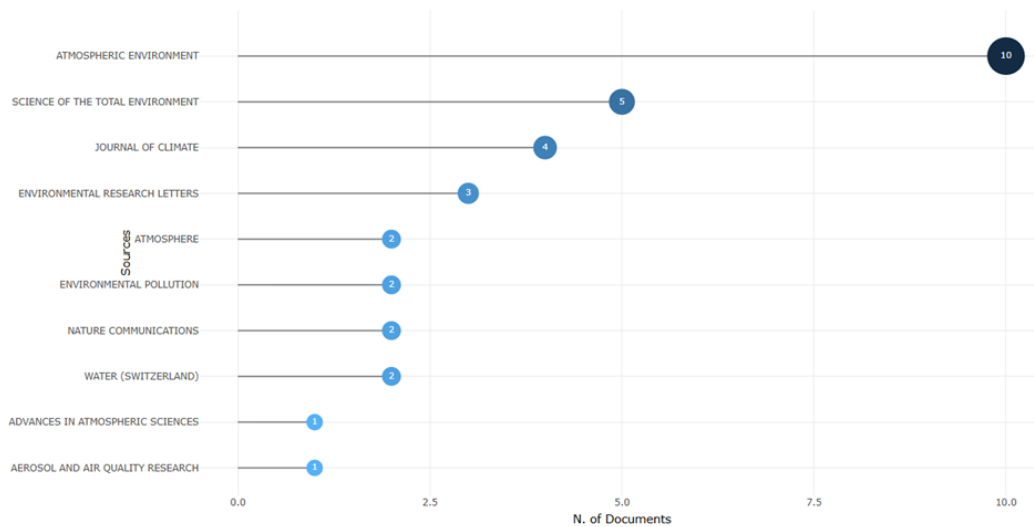


Gambar 3. Hubungan keterkaitan antara kata kunci, penulis, dan negara asal

Hubungan keterkaitan antara kata kunci, penulis, dan negara asal penulis ditunjukkan pada Gambar 3. Aliran paling tebal berasal dari China, yang menandakan kontribusi publikasi dalam topik ini paling banyak datang dari peneliti dan afiliasi China. Negara lain seperti Thailand, *United Kingdom*, Argentina, Italia, Afrika Selatan, Belanda, Arab Saudi, Indonesia, Amerika Serikat, Kanada, India, Australia, dan Jepang muncul, tetapi alirannya lebih tipis sehingga kontribusinya relatif lebih kecil. Pola ini mengindikasikan bahwa pembahasan La Niña, El Niño, dan kualitas udara banyak berangkat dari konteks regional yang kuat, misalnya Asia Timur, namun tetap melibatkan jejaring global.

Pada kolom penulis (AU), terlihat beberapa nama atau kelompok nama yang menjadi simpul penghubung karena menerima aliran dari banyak negara dan meneruskan ke banyak kata kunci. Nama yang tampak menonjol seperti pola umum Li dan Wang serta beberapa penulis lain menunjukkan adanya kelompok penulis yang produktif dan berperan sebagai pusat produksi pengetahuan. Pola ini biasanya berarti tiga hal: (a) terdapat tim riset besar; (b) ada kolaborasi lintas institusi dan negara; serta (c) penulis-penulis tertentu konsisten mengembangkan tema pengaruh La Niña dan El Niño terhadap pencemaran udara dari waktu ke waktu.

Secara bibliometrik, jaringan ini menunjukkan bahwa riset mengenai pengaruh La Niña dan El Niño terhadap pencemaran udara didorong terutama oleh kontribusi China dan kelompok penulis yang relatif terpusat. Tema paling dominan berkisar pada El Niño/La Niña dan kualitas/polusi udara, lalu diperluas ke mekanisme atmosfer (angin, tekanan, troposfer) dan polutan utama (PM, ozon, aerosol). Temuan ini penting untuk menyusun narasi tinjauan bahwa bidangnya sudah cukup matang pada tema inti, namun masih terbuka peluang memperkuat kontribusi dari negara lain, termasuk Indonesia, dan memperdalam kajian mekanisme spesifik per wilayah.

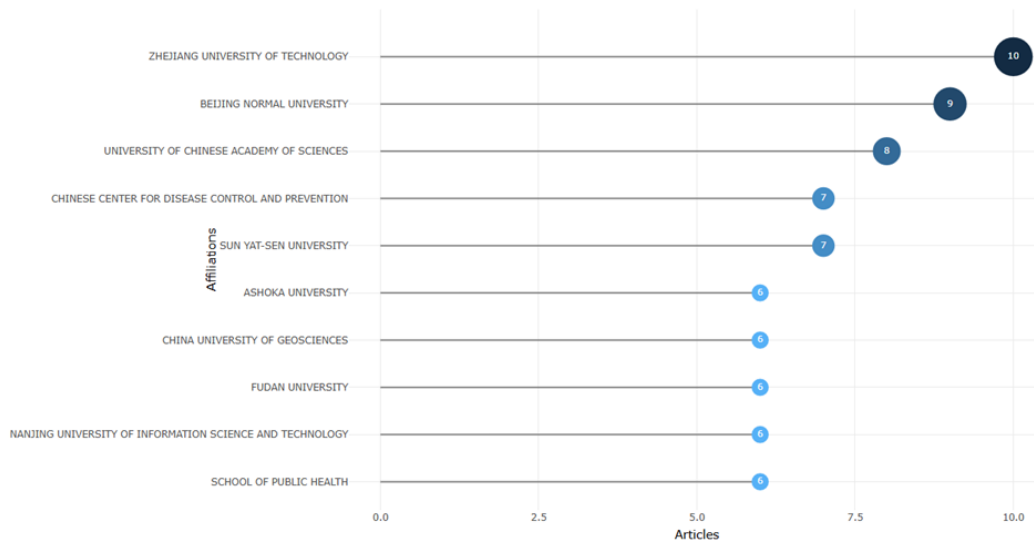


Gambar 4. Sumber referensi yang paling relevan

Sumber referensi yang paling relevan ditampilkan pada Gambar 4. Gambar tersebut memperlihatkan jurnal yang paling sering menjadi tempat publikasi atau rujukan untuk penelitian tentang pengaruh El Niño–La Niña terhadap pencemaran udara, ditunjukkan oleh jumlah dokumen pada tiap jurnal. Yang paling dominan adalah *Atmospheric Environment* dengan 10 dokumen, sehingga dapat dianggap sebagai sumber utama dalam korpus. Dominasi ini logis karena jurnal tersebut berfokus pada proses atmosfer dan polusi udara yang tepat untuk studi yang mengaitkan variabilitas iklim El Niño–La Niña dengan dinamika polutan. Setelah itu, *Science of the Total Environment* berada di posisi kedua dengan 5 dokumen, yang menunjukkan bahwa topik El Niño–La Niña–kualitas udara juga kuat dibahas dari perspektif lingkungan terpadu (interaksi atmosfer–kehatan–ekosistem).

Berikutnya, *Journal of Climate* menyumbang 4 dokumen dan *Environmental Research Letters* 3 dokumen. Hal ini menegaskan bahwa kajian tidak hanya berhenti pada tingkat polusi, tetapi juga menekankan mekanisme iklim dan variabilitas atmosfer (telekoneksi, anomali sirkulasi, pola curah hujan, dan angin) yang menjadi jalur pengaruh El Niño–La Niña terhadap pembentukan dan sebaran polutan. Sementara itu, kelompok jurnal dengan 2 dokumen seperti *Atmosphere*, *Environmental Pollution*, *Nature Communications*, dan *Water* (Switzerland) mengindikasikan adanya perluasan tema ke ranah yang lebih spesifik dan lintas-disiplin, misalnya komponen polutan tertentu, dampak lingkungan yang lebih luas, hingga kaitan hidrometeorologi.

Terakhir, jurnal dengan kontribusi 1 dokumen seperti *Advances in Atmospheric Sciences* serta *Aerosol and Air Quality Research* menunjukkan adanya sumber pendukung yang biasanya terkait pendekatan metodologis tertentu (misalnya aerosol/partikulat) atau fokus wilayah. Secara keseluruhan, sebaran ini menandakan bahwa penelitian La Niña dan El Niño serta pencemaran udara berpusat pada jurnal atmosfer dan lingkungan, namun tetap interdisipliner karena melibatkan *outlet* iklim dan sains lingkungan terpadu. Kondisi ini menguatkan bahwa topik ini membutuhkan kombinasi analisis iklim, meteorologi, kimia atmosfer, dan studi kualitas udara.



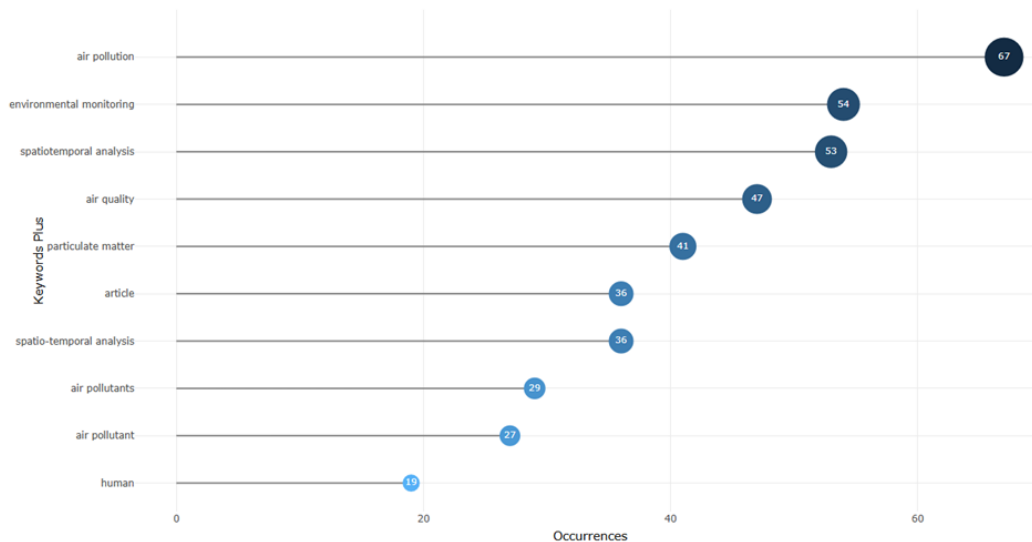
Gambar 5. Afiliasi institusi yang paling relevan

Afiliasi institusi yang paling relevan dalam publikasi penelitian terkait pengaruh La Niña dan El Niño terhadap pencemaran udara dicantumkan pada Gambar 5. Gambar tersebut menunjukkan afiliasi institusi paling produktif dalam publikasi yang membahas pengaruh La Niña dan El Niño terhadap pencemaran udara. Polanya sangat jelas. Institusi dari Tiongkok mendominasi daftar teratas, yang mengindikasikan bahwa pusat produksi pengetahuan (data, model, dan studi kasus) untuk tema ini banyak bertumpu pada jejaring riset di China.

Institusi dengan kontribusi terbesar adalah Zhejiang University of Technology (10 artikel), disusul Beijing Normal University (9 artikel) dan University of Chinese Academy of Sciences (8 artikel). Dominasi tiga institusi ini menandakan adanya hub riset yang kuat. Hub tersebut biasanya ditopang oleh kapasitas pemodelan atmosfer/iklim, akses data jangka panjang (stasiun pemantauan, reanalisis, dan satelit), serta kelompok peneliti yang aktif menerbitkan studi La Niña dan El Niño–kualitas udara secara berkelanjutan. Pada lapisan berikutnya, Chinese Center for Disease Control and Prevention (7 artikel) dan Sun Yat-sen University (7 artikel) menegaskan bahwa topik ini tidak hanya dilihat dari sisi fisik–atmosfer, tetapi juga terkait kuat dengan dampak kesehatan masyarakat, misalnya peningkatan risiko akibat $PM_{2.5}$ atau ozon saat kondisi La Niña dan El Niño tertentu.

Kelompok institusi dengan 6 artikel seperti Ashoka University, China University of Geosciences, Fudan University, Nanjing University of Information Science and Technology, serta School of Public Health menggambarkan karakter riset yang interdisipliner. Tampak adanya jalur sains atmosfer/iklim (telekoneksi La Niña dan El Niño, angin, curah hujan, stabilitas atmosfer), jalur ilmu lingkungan (aerosol, partikulat, polusi), dan jalur kesehatan (paparan dan beban penyakit). Temuan ini relevan karena memperkuat argumen bahwa studi La Niña dan El Niño terhadap pencemaran udara paling berkembang di ekosistem riset yang menggabungkan pemodelan iklim–atmosfer dan analisis kesehatan lingkungan, serta menunjukkan peluang penting

untuk memperluas kontribusi dan studi kasus di wilayah lain seperti Asia Tenggara dan Indonesia agar pemahaman dampak La Niña dan El Niño terhadap polusi udara menjadi lebih representatif lintas kawasan.



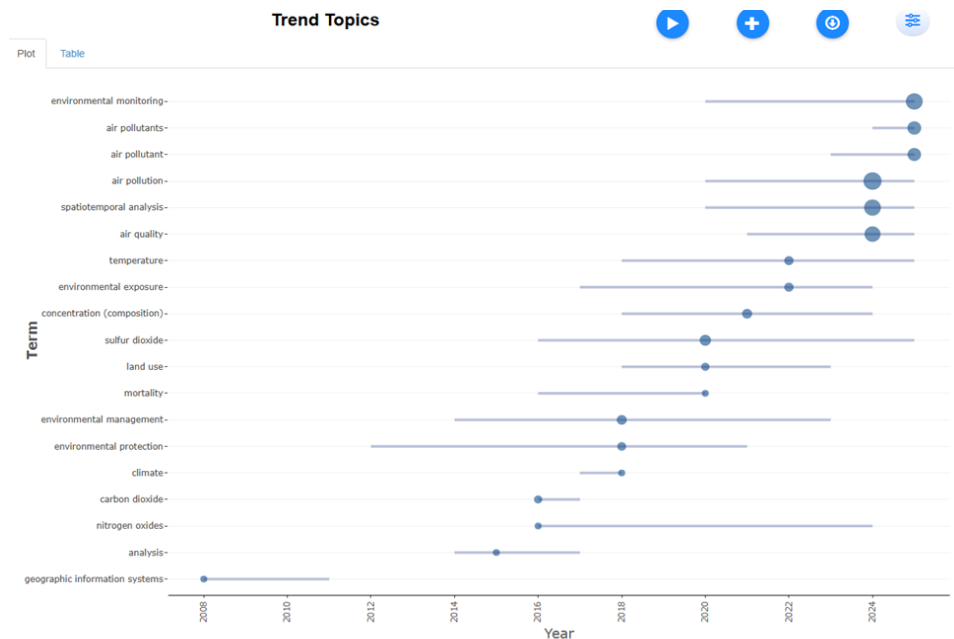
Gambar 6. Distribusi kata kunci

Distribusi kata kunci yang paling dominan dan relevan dalam artikel-artikel yang dianalisis ditampilkan pada Gambar 6. Gambar distribusi kata kunci menunjukkan fokus tematik utama dalam literatur tentang pengaruh La Niña dan El Niño terhadap pencemaran udara berdasarkan frekuensi kemunculan istilah. Kata kunci yang paling dominan adalah *air pollution* (67 kemunculan), yang menegaskan bahwa pusat perhatian penelitian adalah perubahan tingkat pencemar dan dinamika polusi udara. Setelah itu, *environmental monitoring* (54) dan *spatiotemporal analysis* (53) menonjol, yang berarti bidang ini sangat bergantung pada pemantauan lingkungan (stasiun kualitas udara, satelit, dan reanalisis) dan analisis ruang–waktu untuk menangkap variasi polusi antar wilayah serta antar musim atau antar tahun. Konteks ini sangat relevan karena La Niña dan El Niño bekerja melalui perubahan pola meteorologi yang tidak seragam secara geografis.

Istilah *air quality* (47) memperkuat bahwa banyak studi tidak hanya mengukur polutan tertentu, tetapi juga menilai kualitas udara sebagai indikator komposit atau berbasis standar (misalnya indeks kualitas udara). Kata kunci *particulate matter* (41) menunjukkan bahwa PM (terutama PM_{2.5} dan PM₁₀) menjadi polutan kunci yang sering dianalisis. Hal ini masuk akal karena konsentrasinya sangat sensitif terhadap kondisi La Niña dan El Niño melalui mekanisme seperti kekeringan, kebakaran/asap, stabilitas atmosfer, dan perubahan ventilasi angin. Kemunculan *article* (36) lebih bersifat metadata, tetapi keberadaan *spatio-temporal analysis* (36) sebagai variasi penulisan dari *spatiotemporal* mengindikasikan konsistensi pendekatan metodologis. Penelitian cenderung menggabungkan data multi-tahun dan multi-lokasi untuk menguji hubungan La Niña, El Niño, dan polusi. Kata kunci *air pollutants* (29) dan *air pollutant* (27) menggambarkan bahwa

sebagian studi membahas polutan secara agregat atau multi-komponen (PM, ozon, NO₂, SO₂, CO) daripada satu polutan saja. Terakhir, *human* (19) memberi sinyal adanya cabang kajian yang mengaitkan perubahan polusi akibat La Niña dan El Niño dengan paparan manusia dan implikasi kesehatan, meskipun porsinya lebih kecil dibanding fokus atmosfer dan pemantauan.

Secara keseluruhan, distribusi ini menyiratkan bahwa kajian ENSO–polusi udara paling kuat jika menekankan tiga pilar utama: (1) La Niña dan El Niño sebagai pengubah kondisi meteorologi; (2) respons polusi terutama *particulate matter* yang terdeteksi lewat pemantauan; dan (3) analisis *spatio-temporal* sebagai pendekatan dominan untuk membuktikan keterkaitan La Niña dan El Niño dengan variasi pencemaran udara lintas wilayah dan waktu, dengan perluasan pada dampak manusia dan kesehatan sebagai arah riset yang juga mulai berkembang.



Gambar 7. Perkembangan topik (trend topics)

Gambar 7 (*Trend Topics*) memperlihatkan bagaimana fokus La Niña dan El Niño serta pencemaran udara bergeser dari tema metodologis ke tema yang semakin operasional dan berdampak langsung, terutama pada periode terbaru. Pada fase awal sekitar 2008–2012, topik yang muncul masih relatif terbatas dan cenderung berbasis alat atau pendekatan, misalnya *geographic information systems*, yang menunjukkan tahap ketika penelitian banyak bertumpu pada pemetaan dan integrasi data spasial. Memasuki 2014–2018, mulai terlihat perluasan ke tema yang lebih analitis dan mekanik, seperti *analysis*, *nitrogen oxides*, *carbon dioxide*, dan *climate*, yang menandakan upaya menghubungkan variabilitas iklim dengan indikator polutan dan dinamika atmosfer secara lebih kuat. Pada rentang 2017–2021, topik seperti *environmental protection*, *environmental management*, *land use*, serta istilah polutan spesifik seperti *sulfur dioxide* dan *concentration* menjadi lebih menonjol. Pergeseran ini menunjukkan bahwa riset mulai mengaitkan

PM (PM_{2.5} dan PM₁₀) dan aerosol sebagai indikator utama pencemaran, keterkaitan dengan asap, kebakaran biomassa, dan kekeringan (mekanisme yang sering dipengaruhi ENSO), serta peran meteorologi (misalnya stagnasi atmosfer dan ventilasi angin) dalam akumulasi polutan. Cluster ini menguatkan narasi bahwa ENSO sering memengaruhi polusi udara melalui jalur kekeringan–kebakaran–asap dan perubahan kondisi meteorologi yang meningkatkan konsentrasi partikulat.

Cluster hijau: klimatologi, sirkulasi atmosfer, dan variabilitas iklim. Pada sisi kanan, *cluster* hijau didominasi istilah seperti *climatology*, *atmospheric circulation*, *atmospheric movements*, serta keterkaitan dengan wilayah dan indikator iklim seperti *Pacific Ocean* dan pola musiman. *Cluster* ini menunjukkan fokus pada mekanisme ENSO yang bekerja melalui perubahan sirkulasi atmosfer, pergeseran pola musim, dan telekoneksi yang mengubah transport polutan serta kondisi pembentukan polutan sekunder seperti ozon.

Node penghubung: jembatan antara iklim dan polusi. Beberapa istilah berperan sebagai jembatan, seperti *atmospheric pollution*, *climate change*, *seasonal variation*, *spatiotemporal analysis*, dan *concentration*. Studi-studi terbaru tidak hanya menyatakan adanya hubungan ENSO–polusi, tetapi juga berusaha menguji variasi antar musim dan antar tahun, memetakan pola spasial, serta menilai perubahan konsentrasi dan komposisi polutan. Adanya node seperti *spatiotemporal analysis* menandakan metode dominan untuk membuktikan hubungan tersebut adalah analisis ruang–waktu berbasis pemantauan. Dengan demikian, visualisasi ini memperkuat bahwa pembahasan La Niña dan El Niño memengaruhi pencemaran udara dalam literatur internasional bukan sekadar korelasi sederhana, melainkan telah membentuk peta pengetahuan yang menautkan variabilitas iklim → proses atmosfer → dinamika polutan → kualitas udara secara sistematis.

KESIMPULAN

Studi ini menyajikan tinjauan bibliometrik periode 2000–2025 untuk memetakan perkembangan penelitian tentang pengaruh El Niño dan La Niña (ENSO) terhadap pencemaran udara. Hasil menunjukkan bahwa bidang ini berkembang pesat dengan 58 dokumen pada 36 sumber dan laju pertumbuhan publikasi 11,13% per tahun, disertai usia dokumen yang relatif muda dan dampak sitasi yang kuat (rata-rata 32,59 sitasi per dokumen). Temuan ini menegaskan bahwa keterkaitan ENSO–kualitas udara telah menjadi agenda riset yang semakin penting, terutama pada fase akselerasi publikasi pasca-2017 hingga mencapai puncak pada tahun-tahun terakhir. Dari sisi struktur pengetahuan, peta kata kunci dan jaringan ko-kemunculan memperlihatkan bahwa tema inti penelitian terpusat pada ENSO (*El Niño–Southern Oscillation* dan *La Niña*), *air pollution*, dan *air quality*, dengan penguatan pada mekanisme atmosfer serta polutan utama, khususnya *particulate matter*. Dominasi kata kunci seperti *environmental monitoring* dan *spatiotemporal analysis* menegaskan bahwa pendekatan berbasis pemantauan data besar dan analisis ruang–waktu merupakan metodologi utama untuk menguji hubungan ENSO dengan variasi konsentrasi dan sebaran polutan lintas wilayah dan musim. Tren topik juga menunjukkan pergeseran dari tema metodologis menuju tema yang lebih operasional, termasuk penguatan kaitan ke paparan lingkungan dan indikator dampak kesehatan.

Kontribusi studi. Penelitian ini memberikan tiga kontribusi penting. Pertama, studi ini menyajikan peta pengetahuan (*knowledge map*) yang sistematis dan komprehensif mengenai keterkaitan ENSO dan pencemaran udara, yang sebelumnya belum tersedia dalam bentuk tinjauan bibliometrik terpadu. Kedua, studi ini mengidentifikasi aktor kunci, jejaring kolaborasi, dan struktur tematik secara bersamaan, sehingga menghasilkan gambaran utuh tentang dinamika keilmuan bidang ini. Ketiga, studi ini menjadi rujukan empiris bagi para peneliti, khususnya di Indonesia, untuk mengembangkan riset lanjutan yang lebih kontekstual mengenai dampak ENSO terhadap kualitas udara di kawasan tropis dan rawan kebakaran lahan.

Rekomendasi riset lebih lanjut. Berdasarkan temuan tersebut, terdapat beberapa arah riset yang direkomendasikan untuk dikembangkan. Pertama, perlu dilakukan studi empiris berbasis observasi jangka panjang di Indonesia dan Asia Tenggara yang secara eksplisit menghubungkan fase ENSO dengan variasi PM_{2.5}, PM₁₀, dan polutan gas, mengingat kontribusi kawasan ini dalam literatur internasional masih relatif kecil. Kedua, riset lanjutan disarankan untuk membedakan tipe-tipe ENSO (*Eastern Pacific vs Central Pacific*) dalam menilai dampaknya pada kualitas udara, sebab dampak setiap tipe tidak seragam secara spasial. Ketiga, integrasi data satelit, sensor berbiaya rendah, dan model kimia atmosfer perlu diperkuat untuk meningkatkan resolusi temporal dan spasial analisis. Keempat, riset interdisipliner yang menjembatani sains atmosfer dengan kesehatan masyarakat perlu diperluas, khususnya untuk mengkuantifikasi dampak ENSO sebagai *effect modifier* pada hubungan paparan polusi dengan luaran kesehatan. Kelima, penelitian kebijakan adaptasi berbasis bukti perlu dikembangkan agar pengambilan keputusan terkait mitigasi pencemaran udara dapat mempertimbangkan variabilitas iklim antar tahunan secara eksplisit.

DAFTAR PUSTAKA

- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, *11*(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Burnett, R., Chen, H., Szyszkowicz, M., Fann, N., Hubbell, B., Pope, C. A., Apte, J. S., Brauer, M., Cohen, A., Weichenthal, S., Coggins, J., Di, Q., Brunekreef, B., Frostad, J., Lim, S. S., Kan, H., Walker, K. D., Thurston, G. D., Hayes, R. B., & Spadaro, J. V. (2018). Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *115*(38), 9592–9597. <https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115>
- Cobo, M. J., Lopez-Herrera, A. G., Herrera-Viedma, E., & Herrera, F. (2011). Science mapping software tools: Review, analysis, and cooperative study among tools. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, *62*(7), 1382–1402. <https://doi.org/10.1002/asi.21525>
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R., Feigin, V., Freedman, G., Hubbell, B., Jobling, A., Kan, H., Knibbs, L., Liu, Y., Martin, R., Morawska, L., & Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: An analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, *389*(10082), 1907–1918. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, *133*, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Edwards, R. B., Naylor, R. L., Higgins, M. M., & Falcon, W. P. (2020). Causes of Indonesia's forest fires. *World Development*, *127*, 104717. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2019.104717>
- Field, R. D., van der Werf, G. R., & Shen, S. S. P. (2009). Human amplification of drought-induced biomass burning in Indonesia since 1960. *Nature Geoscience*, *2*(3), 185–188. <https://doi.org/10.1038/ngeo443>
- Jacob, D. J., & Winner, D. A. (2009). Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment*, *43*(1), 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.051>
- Jeong, J. I., Park, R. J., Yeh, S.-W., & Sung, M.-K. (2018). Dissimilar effects of two El Niño types on PM_{2.5} concentrations in East Asia. *Scientific Reports*, *8*, 2767. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21063-0>
- Kopplitz, S. N., Mickley, L. J., Marlier, M. E., Buonocore, J. J., Kim, P.-S., Liu, T., Sulprizio, M. P., DeFries, R. S., Jacob, D. J., Schwartz, J., Pongsiri, M., & Myers, S. S. (2016). Public health impacts of the severe haze in Equatorial Asia in September–October 2015:

- Demonstration of a new framework for informing fire management strategies to reduce downwind smoke exposure. *Environmental Research Letters*, 11(9), 094023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/9/094023>
- Kueh, M. T., Shin, M., & Park, R. J. (2023). Temporal coherence in particulate matter in East Asian outflow and its relation to climate variability. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 6, 206. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00530-z>
- Linnenluecke, M. K., Marrone, M., & Singh, A. K. (2020). Conducting systematic literature reviews and bibliometric analyses. *Australian Journal of Management*, 45(2), 175–194. <https://doi.org/10.1177/0312896219877678>
- Majeed, H., & Zuberi, D. (2025). *Extreme air pollution and sleep: Evidence of ENSO as an effect modifier in long-term PM_{2.5} associations with insufficient sleep*.
- Marlier, M. E., DeFries, R. S., Kim, P.-S., Koplitz, S. N., Jacob, D. J., Mickley, L. J., & Myers, S. S. (2013). El Niño and health risks from landscape fire emissions in Southeast Asia. *Nature Climate Change*, 3(2), 131–136. <https://doi.org/10.1038/nclimate1658>
- McPhaden, M. J., Zebiak, S. E., & Glantz, M. H. (2006). ENSO as an integrating concept in Earth science. *Science*, 314(5806), 1740–1745. <https://doi.org/10.1126/science.1132588>
- Page, S. E., Siegert, F., Rieley, J. O., Boehm, H.-D. V., Jaya, A., & Limin, S. (2002). The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature*, 420(6911), 61–65. <https://doi.org/10.1038/nature01131>
- Palacios, R. S., do Nascimento, E. L., & Artaxo, P. (2024). ENSO effects on the relationship between aerosols and meteorological variables in southern Amazonia. *Environmental Research*, 252, 116707. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.116707>
- Pereira, I. P., Santos, D. A., & de Souza, R. A. F. (2024). Analysis of El Niño–Southern Oscillation effects on aerosol optical depth in the Amazon: Cross-correlation and lag patterns. *Climate*, 12(2), 23. <https://doi.org/10.3390/cli12020023>
- Qu, K., Wang, X., Yan, Y., Jin, X., He, L.-Y., & Huang, X.-F. (2025). Unexpectedly persistent PM_{2.5} pollution in the Pearl River Delta, South China, in the 2015–2017 cold seasons: The dominant role of meteorological changes during the El Niño-to-La Niña transition over emission reduction. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 25(22), 16983–17007. <https://doi.org/10.5194/acp-25-16983-2025>
- Santoso, D. H., Santosa, S. J., & Sekaranom, A. B. (2024). Bibliometric analysis of research trends on utilisation of low-cost sensor (LCS) and Internet of Things (IoT) for PM_{2.5} air pollution monitoring. *Jurnal Mineral, Energi, Dan Lingkungan*, 8(2). <https://doi.org/10.31315/jmel.v8i2.14769>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change* (3rd ed.). Wiley.

- van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Collatz, G. J., Giglio, L., Kasibhatla, P. S., Arellano, A. F., Olsen, S. C., & Kasischke, E. S. (2004). Continental-scale partitioning of fire emissions during the 1997–2001 El Niño/La Niña period. *Science*, *303*(5654), 73–76. <https://doi.org/10.1126/science.1090753>
- Wang, S., Li, S., Xing, J., Yang, J., Dong, J., Qin, Y., & Sahu, S. K. (2022). Evaluation of the influence of El Niño–Southern Oscillation on air quality in southern China from long-term historical observations. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, *16*, 27. <https://doi.org/10.1007/s11783-021-1460-0>
- World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization.