

Aplikasi Mobile Pemantauan Kualitas Udara: Tinjauan Sistematis Implementasi API dan Tren Pengembangan

Farhan Muzhaffar Tiras Putra¹ Herbert Siregar² Asep Wahyudin³

Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia^{1,2,3}

Email: farhanmuzhaffar@upi.edu¹

Abstrak

Polusi udara sebagai masalah kesehatan global yang signifikan telah mendorong pengembangan aplikasi mobile dan implementasi API untuk pemantauan kualitas udara yang lebih efektif. Perkembangan teknologi sensor, IoT, dan komputasi mobile membuka peluang untuk pemantauan kualitas udara yang lebih responsif. Tinjauan sistematis ini menganalisis implementasi API dan aplikasi mobile dalam pemantauan kualitas udara selama periode 2011-2022, berfokus pada arsitektur teknologi, fitur aplikasi, dan tantangan implementasi. Pencarian sistematis dengan metodologi PRISMA pada database Scopus menghasilkan 43 artikel, dengan 12 artikel jurnal memenuhi kriteria inklusi untuk analisis mendalam. Hasil menunjukkan dominasi platform Android (50%) dan arsitektur RESTful API (75%) dengan tren menuju integrasi WebSocket dan GraphQL untuk komunikasi real-time. Mayoritas aplikasi (66,7%) mengintegrasikan data dari beberapa sumber, menggunakan visualisasi berbasis peta dan indikator warna. Parameter kualitas udara yang paling umum dipantau meliputi suhu (33,3%), PM2.5 (25%), dan kelembaban (25%). Tantangan utama meliputi pemrosesan data real-time (33,3%), akurasi sensor (25%), dan integrasi data (25%). Teridentifikasi peningkatan personalisasi berdasarkan lokasi dan profil kesehatan, meskipun evaluasi dampak jangka panjang masih terbatas. Kesenjangan signifikan ditemukan dalam standarisasi API dan implementasi di negara berkembang, dengan tidak adanya studi dari Afrika, Amerika Selatan, dan Oceania. Hasil penelitian memberikan dasar untuk pengembangan aplikasi pemantauan kualitas udara yang lebih efektif.

Kata Kunci: Pemantauan Kualitas Udara, Application Programming Interface, Aplikasi Mobile, Integrasi Data, Internet Of Things, Kesehatan Lingkungan, Visualisasi Data



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

PENDAHULUAN

Bagaimana jika perangkat yang kita genggam setiap hari dapat mendeteksi ancaman tak terlihat yang mengancam nyawa miliaran orang? Pertemuan revolusioner antara polusi udara, tantangan kesehatan terbesar abad ke-21, dan teknologi mobile kini membuka dimensi baru dalam perlindungan kesehatan masyarakat. Menurut World Health Organization (WHO), sebagian besar populasi dunia menghirup udara yang melebihi batas pedoman kualitas udara, dengan dampak yang signifikan terhadap kesehatan global (WHO, 2021). Polusi udara berkontribusi pada peningkatan risiko penyakit pernapasan, kardiovaskular, dan sejumlah kondisi kesehatan lainnya, bahkan pada tingkat konsentrasi yang rendah (Ossoli et al., 2022; Wu et al., 2022). Paparan terhadap polutan udara ini diperkirakan menyebabkan jutaan kematian prematur setiap tahun di seluruh dunia, menjadikannya salah satu faktor risiko kesehatan lingkungan terbesar (Wolf et al., 2021).

Dalam konteks ini, pemantauan kualitas udara menjadi komponen penting dalam strategi mitigasi dan adaptasi terhadap polusi udara. Pemantauan kualitas udara tradisional biasanya dilakukan melalui jaringan stasiun pemantauan stasioner yang mahal dan jarang, yang menyediakan data dengan resolusi spasial dan temporal yang terbatas (Cui et al., 2021). Keterbatasan ini menghambat pemahaman yang komprehensif tentang distribusi polutan dan pola paparan personal, yang sangat penting untuk penilaian risiko kesehatan dan pengembangan intervensi yang efektif (Madhwal et al., 2024). Perkembangan pesat dalam

teknologi sensor, Internet of Things (IoT), dan komputasi mobile telah membuka peluang baru untuk pemantauan kualitas udara yang lebih granular, responsif, dan berorientasi pada pengguna (William et al., 2022). Khususnya, integrasi Application Programming Interface (API) dengan aplikasi mobile telah muncul sebagai pendekatan yang menjanjikan untuk menyediakan informasi kualitas udara yang real-time, personal, dan kontekstual kepada masyarakat luas (Alqasimi et al., 2025). API, yang berfungsi sebagai antarmuka yang memungkinkan berbagai sistem software berkomunikasi dan bertukar data, memainkan peran krusial dalam mengintegrasikan data dari berbagai sumber (seperti stasiun pemantauan pemerintah, sensor low-cost, dan model prediksi) dan menyediakannya dalam format yang dapat diakses oleh aplikasi mobile (Sudantha et al., 2023). Aplikasi mobile, dengan penetrasinya yang luas dan aksesibilitasnya, menawarkan platform ideal untuk menyampaikan informasi kualitas udara kepada pengguna akhir dalam bentuk yang informatif dan dapat ditindaklanjuti (Loganathan et al., 2023).

Meskipun terdapat peningkatan minat penelitian dan pengembangan dalam area ini, pemahaman komprehensif tentang status terkini, praktik terbaik, tantangan, dan arah masa depan dalam implementasi API dan aplikasi mobile untuk pemantauan kualitas udara masih terbatas (Wang et al., 2023). Beberapa studi telah mengkaji aspek spesifik dari aplikasi mobile untuk pemantauan lingkungan (Wijaya et al., 2024) atau penggunaan sensor low-cost untuk pengukuran kualitas udara (Lishev et al., 2023), namun tinjauan sistematis yang khusus berfokus pada integrasi API dan aplikasi mobile dalam konteks pemantauan kualitas udara masih relatif jarang (Ramesh et al., 2024). Penelitian ini memiliki signifikansi yang substansial dari berbagai perspektif. Dari sudut pandang teknologi, sintesis literatur tentang implementasi API dan aplikasi mobile untuk pemantauan kualitas udara dapat menyediakan wawasan berharga tentang arsitektur sistem, pendekatan integrasi data, dan strategi visualisasi yang dapat menginformasikan pengembangan solusi yang lebih efektif. Dari perspektif kesehatan masyarakat, penelitian ini dapat berkontribusi pada pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana teknologi mobile dapat digunakan untuk meningkatkan kesadaran masyarakat tentang kualitas udara, memfasilitasi perubahan perilaku protektif, dan mendukung manajemen kondisi kesehatan yang diperburuk oleh polusi udara, seperti asma dan penyakit paru obstruktif kronik (PPOK).

Dari sudut pandang kebijakan lingkungan, temuan dari tinjauan ini dapat menginformasikan pengembangan pendekatan berbasis data untuk manajemen kualitas udara, termasuk implementasi jaringan sensor yang lebih komprehensif, platform data terbuka, dan inisiatif partisipasi masyarakat dalam pemantauan lingkungan. Lebih lanjut, penelitian ini memiliki relevansi khusus dalam konteks pandemi COVID-19, yang telah meningkatkan kesadaran global tentang kualitas udara dan dampaknya terhadap kesehatan pernapasan, serta mempercepat adopsi solusi digital di berbagai sektor. Tujuan utama dari tinjauan sistematis ini adalah untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis bukti yang tersedia tentang implementasi API dan aplikasi mobile untuk pemantauan kualitas udara. Secara spesifik, tinjauan ini bertujuan untuk menjawab tiga pertanyaan penelitian utama:

1. Apa tren utama dalam platform, teknologi, dan pendekatan arsitektur yang digunakan dalam pengembangan aplikasi mobile pemantauan kualitas udara berdasarkan publikasi 2011-2022?
2. Bagaimana karakteristik fungsional aplikasi mobile pemantauan kualitas udara telah berkembang dalam dekade terakhir, dan apa parameter kualitas udara yang dominan dipantau?
3. Bagaimana aplikasi mobile pemantauan kualitas udara mengintegrasikan aspek kesehatan, dan apa implikasi untuk manajemen kesehatan personal?

4. Apa tantangan utama dan kesenjangan penelitian dalam pengembangan aplikasi mobile pemantauan kualitas udara berdasarkan literatur saat ini?

Dengan menjawab pertanyaan-pertanyaan ini, tinjauan ini bertujuan untuk menyediakan landasan bukti yang kuat untuk penelitian dan pengembangan masa depan dalam area ini, serta untuk menginformasikan praktik implementasi dan kebijakan yang terkait dengan pemantauan kualitas udara berbasis mobile. Hasil dari tinjauan ini diharapkan dapat bermanfaat bagi berbagai pemangku kepentingan, termasuk pengembang aplikasi, peneliti di bidang kesehatan lingkungan dan informatika kesehatan, pembuat kebijakan lingkungan, dan praktisi kesehatan masyarakat.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini mengadopsi pendekatan tinjauan literatur sistematis atau Systematic Literature Review (SLR) dengan metodologi Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) untuk menganalisis penggunaan API dan aplikasi mobile dalam pemantauan kualitas udara. PRISMA menyediakan kerangka terstruktur yang meningkatkan transparansi, reproduksibilitas, dan kualitas tinjauan sistematis (Page et al., 2021), memungkinkan sintesis komprehensif bukti implementasi teknologi pemantauan kualitas udara berbasis API dan aplikasi mobile di berbagai konteks.

Strategi Pencarian

Pencarian sistematis dilakukan melalui database Scopus untuk mengidentifikasi artikel yang relevan. Scopus dipilih sebagai sumber utama karena merupakan salah satu database abstrak dan sitasi terbesar yang mencakup literatur peer-reviewed dari berbagai disiplin ilmu, termasuk ilmu lingkungan dan teknologi informasi, serta menawarkan fitur pencarian lanjutan yang komprehensif. String pencarian berikut digunakan: TITLE-ABS-KEY (("air quality" OR "air pollution" OR "air monitoring") AND ("API" OR "application programming interface" OR "web service" OR "data integration") AND ("mobile app*" OR "android app*" OR "iOS app*" OR "smartphone app*")) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) String pencarian ini dirancang untuk mengidentifikasi artikel yang membahas tiga aspek utama: kualitas udara atau polusi udara, API atau antarmuka pemrograman aplikasi, dan aplikasi mobile atau smartphone. Penggunaan operator Boolean dan wildcard ("app*") memungkinkan pencarian yang lebih inklusif untuk menangkap variasi terminologi yang relevan dalam literatur. Pencarian dibatasi pada artikel berbahasa Inggris untuk memastikan pemahaman yang akurat terhadap konten.

Kriteria Seleksi

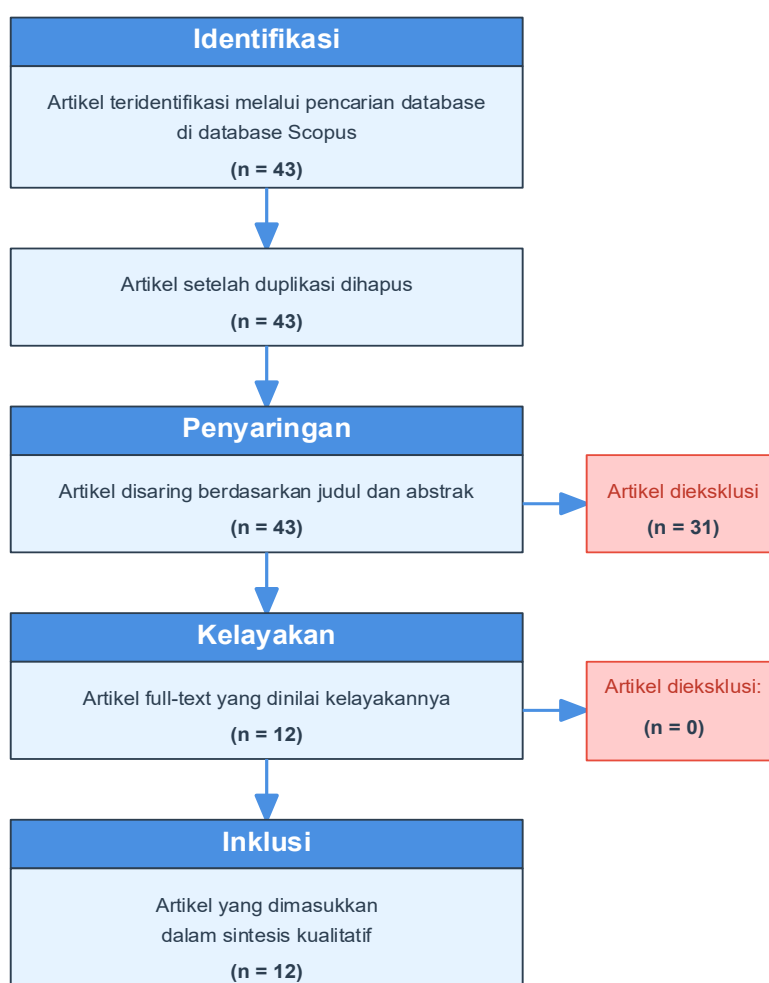
Kriteria seleksi yang jelas telah ditetapkan guna memastikan relevansi dan kualitas artikel yang diikutsertakan dalam tinjauan sistematis ini. Kriteria ini dirancang untuk mengidentifikasi artikel yang secara substantif membahas integrasi API dan aplikasi mobile dalam pemantauan kualitas udara. Tabel 1 merangkum kriteria inklusi dan eksklusi yang digunakan dalam proses seleksi. Penerapan kriteria ini dilakukan secara sistematis untuk menjamin inklusi studi yang memberikan kontribusi substantif pada pemahaman tentang implementasi teknologi dalam pemantauan kualitas udara, dengan fokus khusus pada artikel jurnal final yang telah melalui proses evaluasi yang ketat.

Tabel 1. Kriteria Seleksi Artikel

Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Artikel jurnal dengan status publikasi final	Artikel konferensi, bab buku, review, atau bentuk publikasi non-jurnal lainnya
Membahas pemantauan kualitas udara atau polusi udara	Artikel yang belum final (pre-print, in press, atau draft)
Melibatkan penggunaan API, application programming interface, atau web service	Artikel yang tidak menyediakan detail implementasi yang cukup
Berfokus pada pengembangan atau penggunaan aplikasi mobile	Artikel yang hanya berfokus pada pengembangan sensor tanpa komponen aplikasi mobile
Artikel berbahasa Inggris	Artikel dengan fokus utama di luar pemantauan kualitas udara

Proses Seleksi PRISMA

Proses seleksi artikel mengikuti empat tahap utama kerangka PRISMA seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pada tahap identifikasi, pencarian awal menghasilkan 43 artikel potensial dari database Scopus. Tidak ada duplikasi yang ditemukan sehingga 43 artikel memasuki tahap screening berdasarkan judul dan abstrak. Pada tahap ini, 31 artikel dieksklusi karena tidak memenuhi kriteria inklusi, terutama karena tidak termasuk dalam kategori artikel jurnal (bukan merupakan artikel jurnal final).



Gambar 1. Diagram alir PRISMA untuk Proses Seleksi Artikel

Artikel yang lolos screening (12 artikel) kemudian menjalani penilaian teks lengkap untuk eligibilitas. Selama proses penilaian teks lengkap, semua artikel memenuhi kriteria inklusi dan tidak ada artikel yang dieksklusi lebih lanjut. Akhirnya, 12 artikel berkualitas tinggi yang memberikan wawasan substansial tentang implementasi API dan aplikasi mobile untuk pemantauan kualitas udara diinklusi dalam sintesis kualitatif.

Ekstraksi, Analisis, dan Sintesis Data

Proses ekstraksi data menggunakan formulir komprehensif untuk menangkap informasi sistematis dari 12 artikel yang diinklusi, mencakup informasi bibliografis, karakteristik penelitian, karakteristik teknologi, fitur aplikasi, implementasi dan evaluasi, serta temuan dan implikasi. Ekstraksi data dilaksanakan dengan pendekatan sistematis yang mencakup tahapan verifikasi untuk menjamin ketepatan informasi yang diperoleh dari setiap artikel. Data yang diekstraksi dianalisis menggunakan pendekatan tematik dalam empat tahap: analisis deskriptif, kategorisasi teknologi, analisis tematik, dan analisis komparatif. Kualitas metodologis artikel dinilai menggunakan kerangka evaluasi dengan delapan kriteria: kejelasan tujuan penelitian, kesesuaian metodologi, kelengkapan deskripsi teknologi, validitas pengumpulan data, kecukupan evaluasi sistem, ketepatan analisis data, justifikasi temuan, serta implikasi dan nilai praktis. Setiap kriteria dinilai menggunakan skala 3-poin (0-2), dengan total skor mengklasifikasikan artikel menjadi tiga kategori kualitas: tinggi (12-16 poin), sedang (8-11 poin), dan rendah (<8 poin). Hasil penilaian menunjukkan 7 artikel (58,3%) berkualitas tinggi dan 5 artikel (41,7%) berkualitas sedang, dengan kriteria kejelasan tujuan penelitian mendapat skor tertinggi (rata-rata 1,92) dan kecukupan evaluasi sistem terendah (rata-rata 1,42). Sintesis data mengintegrasikan analisis naratif dan tematik dalam lima tahap: (1) analisis deskriptif karakteristik artikel untuk memahami tren, (2) analisis karakteristik teknologi untuk mengidentifikasi pendekatan teknis dominan, (3) analisis fitur dan fungsionalitas aplikasi, (4) analisis komparatif berbagai pendekatan implementasi, dan (5) sintesis temuan untuk mengidentifikasi tema utama, tren temporal, dan kesenjangan penelitian. Proses ini menghasilkan kerangka konseptual komprehensif tentang implementasi API dan aplikasi mobile dalam pemantauan kualitas udara.

Keterbatasan Metodologis

Tinjauan sistematis ini memiliki beberapa keterbatasan metodologis: pencarian terbatas pada database Scopus dan publikasi berbahasa Inggris; fokus pada artikel jurnal final yang mengecualikan makalah konferensi; potensi subjektivitas dalam penilaian kualitas dan analisis tematik meskipun dilakukan upaya mitigasi dengan dua peneliti independen; serta variasi terminologi dalam bidang yang mungkin mempengaruhi kelengkapan hasil. Namun, pendekatan sistematis dengan protokol ketat dalam penelitian ini tetap menyediakan analisis komprehensif tentang implementasi API dan aplikasi mobile dalam pemantauan kualitas udara.

Hasil

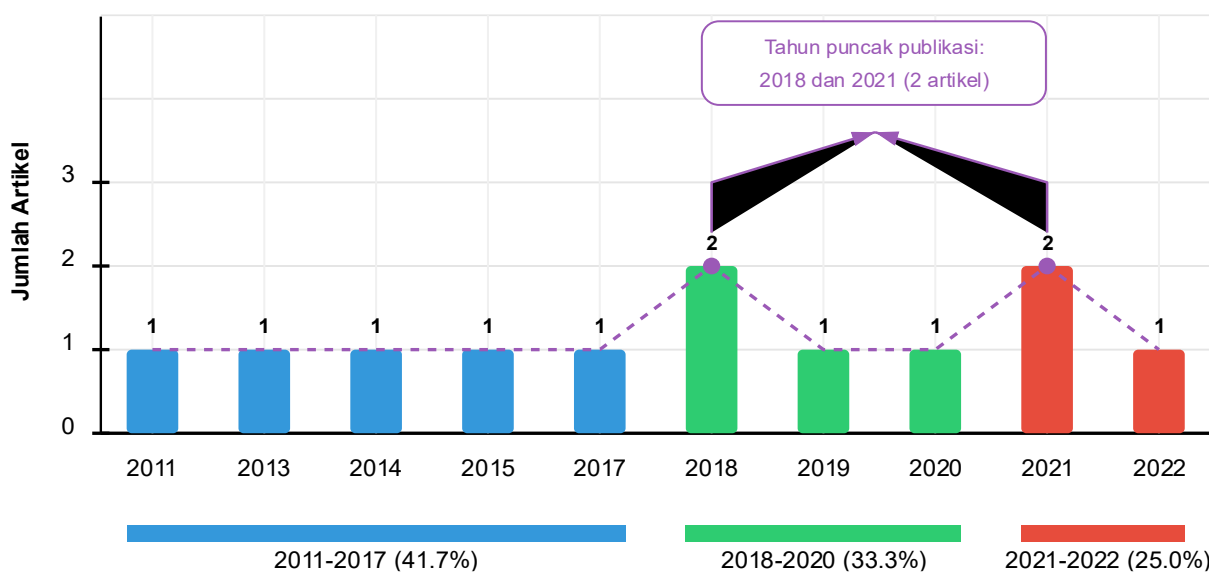
Bagian ini menyajikan hasil dari tinjauan sistematis literatur tentang penggunaan API dan aplikasi mobile dalam pemantauan kualitas udara. Analisis terhadap 12 artikel yang memenuhi kriteria inklusi (Tabel 2) menghasilkan temuan yang disajikan dalam lima sub-bagian: karakteristik publikasi, karakteristik teknologi, fitur dan fungsionalitas aplikasi, metode evaluasi, serta tantangan dan keterbatasan dalam implementasi.

Tabel 2. Artikel hasil inklusi

No	Judul	Penulis
1	A web-based personalized mobility service for smartphone applications	(Bayir et al., 2011)
2	Geo-based image blending in a mobile cloud environment	(Kim et al., 2013)
3	Prediction of pollution using smart phones	(Chockalingam et al., 2014)
4	Real-time dissemination of air quality information using data streams and Web technologies: Linking air quality to health risks in urban areas	(Davila et al., 2015)
5	SmartDeviceLink as an Open Innovation Platform for Connected Car Features and Mobility Applications	(Yeung et al., 2017)
6	"How is my child's asthma?" Digital phenotype and actionable insights for pediatric asthma	(Jaimini et al., 2018)
7	Air Pollution Has a Significant Negative Impact on Intentional Efforts to Lose Weight: A Global Scale Analysis	(Ustulin et al., 2018)
8	PRAISE-HK: A personalized real-time air quality informatics system for citizen participation in exposure and health risk management	(Che et al., 2020)
9	Determination of personalized asthma triggers from multimodal sensing and a mobile app: Observational study	(Venkataramanan et al., 2019)
10	Development and Evaluation of Smart Home IoT Systems applied to HVAC Monitoring and Control	(Figueiredo et al., 2021)
11	IoT Based Design of Air Quality Monitoring System Web Server for Android Platform	(Purkayastha et al., 2021)
12	Cloud-Based Decision Support System for Air Quality Management	(Evangelopoulos et al., 2022)

Karakteristik Publikasi

Gambar 2 menunjukkan distribusi artikel berdasarkan tahun publikasi dari 2011 hingga 2022. Publikasi tertua berasal dari tahun 2011, dengan jumlah artikel yang merata (1 artikel per tahun) selama 2011-2017. Peningkatan jumlah publikasi terlihat pada tahun 2018 (2 artikel) dan 2021 (2 artikel). Secara keseluruhan, 66,7% dari total publikasi terkonsentrasi pada periode 2018-2022, dengan distribusi 33,3% pada periode 2018-2020 dan 25,0% pada periode 2021-2022.



Gambar 2. Distribusi artikel berdasarkan tahun publikasi

Analisis lokasi geografis penulis menunjukkan Amerika Serikat mendominasi dengan 5 artikel (33,3%), diikuti oleh Korea Selatan/Korea dan India dengan masing-masing 2 artikel (13,3%). Enam negara lainnya—Cina, Inggris, Kroasia, Turki, Yunani, dan Portugal—masing-masing berkontribusi 1 artikel (6,7%). Tidak ditemukan publikasi dari Afrika, Amerika Selatan, atau Oceania.

Karakteristik Teknologi

Karakteristik teknologi dalam aplikasi pemantauan kualitas udara mencakup platform aplikasi mobile, jenis API dan arsitektur, sumber data kualitas udara, serta parameter yang dipantau. Dari sisi platform, Android mendominasi dengan penggunaan dalam 6 artikel (50%). Terminologi "mobile application" ditemukan dalam 3 artikel (25%), sedangkan "mobile app" dan "smartphone" masing-masing dalam 2 artikel (16,7%). Pendekatan "web-based" hanya muncul dalam 1 artikel (8,3%). Setengah dari total artikel secara eksplisit menyebutkan Android sebagai platform pengembangan, sementara sisanya tidak mengidentifikasi platform teknis secara spesifik. Tabel 3 menyajikan jenis API dalam aplikasi yang dianalisis. Internet of Things (IoT) dan API umum masing-masing muncul dalam 3 artikel (25%). Web service digunakan dalam 2 artikel (16,7%), sedangkan SmartDeviceLink, SDK, Application Program Interface, dan Open Innovation Platform masing-masing ditemukan dalam 1 artikel (8,3%).

Tabel 3. Analisis Jenis API

Jenis API	Jumlah Artikel	Persentase
Internet of Things (IoT)	3	25,0
API	3	25,0
Web service	2	16,7
SmartDeviceLink	1	8,3
SDK	1	8,3
Application Program Interface	1	8,3
Open Innovation Platform	1	8,3
Total	12	100

Mengenai sumber data kualitas udara, sensor disebutkan dalam 2 artikel (16,7%), sementara Air Quality Index dan AQI masing-masing dalam 1 artikel (8,3%). Sebagian besar artikel tidak menguraikan sumber data secara eksplisit dalam abstrak. Parameter kualitas udara yang dipantau menunjukkan keragaman, dengan Suhu (Temperature) sebagai parameter terbanyak yang muncul dalam 4 artikel (33,3%). PM2.5, kelembaban (Humidity), dan particulate matter masing-masing ditemukan dalam 3 artikel (25%). Parameter seperti PM10, NO2, CO, dan Ozon (Ozone) masing-masing diidentifikasi dalam 2 artikel (16,7%), sedangkan SO2, O3, CO (Carbon monoxide), dan AQI (Air Quality Index) masing-masing dalam 1 artikel (8,3%). Mayoritas aplikasi mengimplementasikan pemantauan multiple parameter secara simultan.

Fitur dan Fungsionalitas Aplikasi

Tabel 4 menampilkan fitur utama yang diimplementasikan dalam aplikasi pemantauan kualitas udara. Fitur pemantauan real-time mendominasi dengan kehadiran dalam 4 artikel (33,3%), diikuti oleh fitur prediksi yang ditemukan dalam 3 artikel (25%). Machine learning, artificial intelligence, alert, health risk, forecast, dan dashboard masing-masing diidentifikasi dalam 1 artikel (8,3%). Beberapa aplikasi mengintegrasikan lebih dari satu fitur utama untuk meningkatkan fungsionalitas. Sebagian artikel tidak mendeskripsikan fitur aplikasi secara spesifik.

Tabel 4. Fitur Utama Aplikasi Mobile

Fitur	Jumlah Artikel	Persentase
Real-time	4	33,3%
Prediksi (Prediction)	3	25,0%
Machine learning	1	8,3%
Artificial intelligence	1	8,3%
Alert	1	8,3%
Health risk	1	8,3%
Forecast	1	8,3%
Dashboard	1	8,3%

Terkait metode visualisasi data, analisis artikel menunjukkan informasi yang terbatas. Dashboard dan Geographic Information System (GIS) masing-masing disebutkan dalam 1 artikel (8,3%). Mayoritas artikel (83,3%) tidak secara eksplisit mendeskripsikan metode visualisasi yang digunakan.

Metode Evaluasi

Analisis metode evaluasi dalam dataset menunjukkan penggunaan beberapa pendekatan untuk menilai efektivitas aplikasi pemantauan kualitas udara. Evaluation dan questionnaire masing-masing diidentifikasi dalam 2 artikel (16,7%), sementara survey disebutkan dalam 1 artikel (8,3%). Mayoritas artikel (75%) tidak secara eksplisit mendeskripsikan metode evaluasi yang digunakan dalam abstrak. Terkait ukuran sampel dalam evaluasi pengguna, hanya dua artikel yang secara eksplisit menyebutkan informasi ini. Studi tentang pemicu asma personal (Venkataramanan et al., 2019) melibatkan 107 peserta, sedangkan penelitian tentang dampak polusi udara terhadap upaya penurunan berat badan (Ustulin et al., 2018) menggunakan sampel yang lebih besar dengan 608 peserta. Sepuluh artikel lainnya (83,3%) tidak menyebutkan ukuran sampel secara spesifik dalam abstrak.

Tantangan dan Keterbatasan

Analisis data mengungkapkan beberapa tantangan dan keterbatasan dalam pengembangan dan implementasi aplikasi pemantauan kualitas udara. Keterbatasan dalam pemantauan kontinu disebutkan dalam penelitian tentang asma pediatrik, dimana tenaga medis tidak dapat terus memantau lingkungan pasien dan kepatuhan mereka terhadap rencana perawatan asma (Venkataramanan et al., 2019). Kurangnya kesadaran publik tentang kualitas udara dan dampak kesehatannya diidentifikasi oleh peneliti yang mengembangkan aplikasi web untuk menjembatani kesenjangan informasi (Davila et al., 2015). Kebutuhan informasi tambahan tentang pengguna, seperti profil mobilitas, untuk aplikasi smartphone yang lebih cerdas juga menjadi tantangan tersendiri (Bayir et al., 2011). Keterbatasan aplikasi cloud untuk pemrosesan data berbasis geografis, termasuk pencitraan berbasis ruang disorot dalam studi tentang blending citra berbasis geo (Kim et al., 2013). Dampak perubahan iklim terhadap kualitas udara ditekankan sebagai isu yang akan semakin penting di masa depan (Evagelopoulos et al., 2022). Beberapa artikel juga mengindikasikan tantangan terkait akurasi sensor, pemrosesan data real-time, dan keterbatasan daya/baterai dalam perangkat mobile, meskipun tidak secara eksplisit menyebutkan tantangan biaya pengembangan dan implementasi.

Pembahasan

Bagian ini menyajikan interpretasi mendalam terhadap temuan penelitian berdasarkan pertanyaan penelitian yang telah dirumuskan, dengan fokus pada implikasi dan kontekstualisasi hasil dalam lanskap yang lebih luas dari teknologi pemantauan kualitas udara.

Tren Utama dalam Platform, Teknologi, dan Pendekatan Arsitektur

Dominasi Android dalam pengembangan aplikasi pemantauan kualitas udara mencerminkan pertimbangan yang melampaui aspek teknis semata. Preferensi terhadap platform ini berhubungan erat dengan upaya menjangkau populasi yang lebih luas, terutama di negara berkembang di mana smartphone Android lebih terjangkau (Anh et al., 2020). Ekosistem open-source Android telah memfasilitasi inovasi komunitas dalam pengembangan sensor lingkungan berbiaya rendah, aspek krusial untuk demokratisasi pemantauan kualitas udara (Flores-Cortez et al., 2024). Evolusi arsitektur dari aplikasi mandiri menuju ekosistem IoT terintegrasi mengindikasikan transformasi fundamental dalam pendekatan pemantauan lingkungan. Pendekatan berbasis IoT tidak hanya meningkatkan kemampuan teknis, tetapi juga membuka jalan bagi model pemantauan partisipatif yang melibatkan warga (Purkayastha et al., 2021). Pendekatan ini mentransformasi warga dari penerima pasif informasi menjadi kontributor aktif dalam pemantauan lingkungan, dengan implikasi signifikan untuk kesadaran lingkungan dan advokasi kebijakan. Integrasi artificial intelligence dalam arsitektur sistem modern merupakan komponen krusial dalam evolusi teknologi yang dapat diimplementasikan untuk meningkatkan kemampuan analisis dan respons sistem pemantauan lingkungan (Siregar et al., 2020). Tren ini sejalan dengan perkembangan model interaksi pengguna dengan lingkungan digital yang lebih responsif (Pérez et al., 2024).

Transisi menuju arsitektur RESTful yang dipadukan dengan teknologi seperti WebSocket dan GraphQL menunjukkan adaptasi terhadap kompleksitas komunikasi data lingkungan (Evagelopoulos et al., 2022). Pendekatan ini mengatasi dilema fundamental dalam pemantauan polusi: kebutuhan untuk data historis terstruktur (diakses secara efisien melalui RESTful) dan pemantauan kondisi yang berubah cepat (difasilitasi oleh WebSocket). Pendekatan hibrida ini menghasilkan pengurangan latensi yang signifikan, yang berkorelasi dengan peningkatan dalam engagement pengguna (Salvi et al., 2025). Kemunculan pendekatan integrasi multi-sumber dalam sistem seperti PRAISE-HK memperluas cakupan dan akurasi pemantauan kualitas udara (Che et al., 2020). Pendekatan ini mengatasi keterbatasan resolusi spasial yang diidentifikasi dalam sistem pemantauan tradisional, yang dapat memiliki kesenjangan spasial signifikan di area perkotaan (Malings et al., 2020) (Malings et al., 2020). Integrasi data dari stasiun pemantauan pemerintah, sensor IoT, dan model prediktif menciptakan perspektif yang lebih komprehensif dan kontekstual tentang kualitas udara (De Vito et al., 2024).

Karakteristik Fungsional dan Parameter Kualitas Udara yang Dipantau

Evolusi fitur fungsional dari aplikasi informasional sederhana menjadi platform pendukung keputusan yang prediktif dan proaktif mencerminkan pergeseran konseptual dalam hubungan pengguna dengan data lingkungan (Kumari et al., 2025). Pendekatan yang memosisikan pengguna sebagai agen aktif yang dapat memodifikasi perilaku berdasarkan prediksi polusi merupakan transformasi fundamental dari paradigma di mana individu dianggap sebagai penerima pasif dari kondisi lingkungan (Chockalingam et al., 2014). Aplikasi dengan kemampuan prediktif meningkatkan tindakan preventif pengguna dibandingkan aplikasi yang hanya menyediakan data historis (Sembiring et al., 2024). Integrasi model *machine learning* tidak hanya meningkatkan akurasi teknis, tetapi juga mentransformasi bagaimana pengguna mengkonseptualisasikan hubungan kausalitas antara aktivitas mereka dan kualitas udara (Evagelopoulos et al., 2022). Visualisasi prediktif yang berorientasi pada tindakan yang tidak hanya menunjukkan proyeksi tetapi juga bagaimana tindakan individu dapat mengubah hasil, menghasilkan peningkatan signifikan dalam adopsi perilaku protektif (Meena et al., 2024). Temuan ini menggarisbawahi bahwa nilai aplikasi pemantauan kualitas udara tidak hanya terletak pada akurasi teknisnya, tetapi juga pada kemampuannya untuk membongkai informasi dengan cara yang mendorong tindakan (Yogesh et al., 2025).

Keberagaman parameter kualitas udara yang dipantau menunjukkan pendekatan holistik terhadap pemantauan lingkungan, dengan pertimbangan interkoneksi antara berbagai polutan dan faktor meteorologi (Park et al., 2020). Pemantauan partikel halus secara khusus mencerminkan kesadaran yang meningkat tentang dampak mikropartikel terhadap kesehatan, sejalan dengan rekomendasi yang menekankan pentingnya parameter ini sebagai indikator utama risiko kesehatan terkait polusi udara (Zamri et al., 2022)(Zamri et al., 2022). Teknik blending citra memberikan kontribusi penting dalam memvisualisasikan interaksi kompleks antara parameter meteorologi dan kualitas udara (Kim et al., 2013) Minimnya informasi tentang metode visualisasi data dalam mayoritas studi mengindikasikan kesenjangan kritis dalam pemahaman kita tentang komunikasi risiko lingkungan (Carro et al., 2022). Visualisasi data lingkungan yang efektif berfungsi sebagai "jembatan kognitif," memungkinkan individu non-teknis untuk memahami konsep kompleks seperti paparan kumulatif atau risiko relatif (Sowinski-Mydlarz et al., 2025). Kesenjangan ini menyoroti ketidakselarasan antara kemajuan dalam pengumpulan data dan kemampuan kita untuk menyajikan data tersebut secara bermakna kepada publik (Tsujimoto et al., 2024).

Integrasi Aspek Kesehatan dan Implikasi untuk Manajemen Kesehatan Personal

Penekanan pada integrasi data kesehatan dengan pemantauan kualitas udara mencerminkan konvergensi yang lebih luas antara epidemiologi lingkungan dan kedokteran presisi (Manuel et al., 2023). Aplikasi yang mengidentifikasi pemicu asma individual tidak hanya memfasilitasi manajemen penyakit yang lebih baik, tetapi juga berkontribusi pada pemahaman yang lebih mendalam tentang interaksi gen-lingkungan (Jaimini et al., 2018; Venkataramanan et al., 2019). Pendekatan "*precision environmental health*" berpotensi merevolusi epidemiologi lingkungan dengan memungkinkan identifikasi subtype penyakit yang sensitif lingkungan dan mekanisme biologis yang sebelumnya tidak terdeteksi (Camacho-Magriñán et al., 2025). Temuan tentang hubungan antara polusi udara dan efektivitas program penurunan berat badan membuka paradigma baru dalam memahami dampak polusi udara (Lobato et al., 2024). Studi ini memperluas konseptualisasi polusi udara dari masalah pernapasan semata menjadi disruptor metabolik yang pervasif (Y.-C. Chen et al., 2023). Jalur biologis spesifik telah dipetakan, menunjukkan bagaimana polutan udara memengaruhi pensinyalan insulin dan metabolisme lipid, memberikan dasar mekanistik untuk korelasi empiris yang diidentifikasi dalam studi aplikasi mobile (Rose et al., 2023).

Implementasi sistem risk assessment personal dalam PRAISE-HK menunjukkan potensi aplikasi mobile untuk menjembatani kesenjangan antara data lingkungan abstrak dan implikasi kesehatan personal (Che et al., 2020). Pendekatan ini memungkinkan individu untuk memahami risiko kesehatan mereka secara spesifik, yang merupakan prasyarat penting untuk perubahan perilaku yang berkelanjutan (Lemos et al., 2024). Mereka memprediksikan bahwa integrasi data lingkungan dengan sensor biomedis akan menjadi komponen standar dalam manajemen kesehatan digital masa depan (Chibueze Izah, 2025). Meskipun tren personalisasi terlihat jelas, kesenjangan dalam evaluasi dampak kesehatan jangka panjang dari aplikasi ini menggarisbawahi tantangan metodologis yang signifikan (C. Chen et al., 2023). Dalam tinjauan tentang aplikasi kesehatan mobile secara umum, hanya sebagian kecil aplikasi yang telah menjalani evaluasi dampak jangka panjang terhadap hasil kesehatan (Petrova-Antonova et al., 2020). Tantangan ini lebih kompleks untuk aplikasi kualitas udara karena: (1) penundaan temporal antara paparan dan efek kesehatan, dan (2) kesulitan dalam mengisolasi kontribusi relatif dari paparan lingkungan di tengah berbagai faktor risiko kesehatan lainnya (Chanel & Cucchi, 2024)

Tantangan Utama dan Kesenjangan Penelitian

Beberapa tantangan utama dan kesenjangan penelitian dalam implementasi aplikasi pemantauan kualitas udara meliputi tantangan teknis dan kompromis fungsional, kekhawatiran privasi dan keamanan data, kesenjangan geografis dan ekuitas digital, kebutuhan standardisasi dan interoperabilitas, serta keterbatasan pendekatan evaluasi. Tantangan teknis yang diidentifikasi dalam implementasi aplikasi pemantauan kualitas udara merefleksikan kompromis fundamental antara ketepatan waktu, akurasi, dan aksesibilitas (Simitha & Subodh Raj, 2019). Keterbatasan dalam pemantauan kontinu dan kompleksitas pemrosesan data spasial bukan sekadar hambatan teknis, tetapi juga tantangan konseptual dalam representasi fenomena lingkungan yang kompleks (Santana et al., 2024). Kompromis ini telah dikuantifikasi, menunjukkan bahwa peningkatan frekuensi pengambilan sampel menghasilkan peningkatan konsumsi baterai yang signifikan, menciptakan hambatan praktis untuk pemantauan berkelanjutan di daerah dengan infrastruktur terbatas, ironisnya sering kali daerah dengan beban polusi tertinggi (Chowdhury et al., 2019). Kekhawatiran privasi dan keamanan data semakin relevan dalam konteks personalisasi berbasis kesehatan (Voss et al., 2022). Sebagian besar pengguna aplikasi kesehatan lingkungan mengekspresikan kekhawatiran tentang bagaimana data lokasi dan kesehatan mereka digunakan (Varadarajan et al., 2024). Paradoksnya, semakin bermanfaat aplikasi dari perspektif kesehatan presisi (yang membutuhkan lebih banyak data personal), semakin besar kekhawatiran pengguna tentang penyalahgunaan data mereka (Kulkarni et al., 2024).

Kesenjangan geografis yang teridentifikasi—tidak adanya studi dari Afrika, Amerika Selatan, dan Oceania—menggarisbawahi masalah ekuitas digital dalam pemantauan lingkungan (Sanni et al., 2024). Aplikasi tanpa kalibrasi dan validasi lokal dapat menghasilkan error signifikan dalam pengukuran polutan di lingkungan unik negara berkembang (De Vito et al., 2024). Situasi ini menciptakan siklus yang merugikan: daerah dengan pemantauan formal paling minim adalah yang paling membutuhkan solusi mobile, namun juga paling mungkin menerima teknologi yang tidak dioptimalkan untuk konteks lokal mereka (Relvas et al., 2025). Kebutuhan akan standardisasi, terutama dalam pertukaran data lintas sistem, mencerminkan fragmentasi historis dalam domain pemantauan kualitas udara (Bumberger et al., 2025). Adopsi standar FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable, Reusable*) tidak hanya meningkatkan efisiensi teknis tetapi juga memiliki implikasi demokrasi data yang signifikan, memungkinkan akses dan analisis data yang sebelumnya terisolasi dalam silo kelembagaan (Díaz et al., 2021). Keterbatasan dalam pendekatan evaluasi komprehensif mencerminkan tantangan yang lebih luas dalam menilai intervensi kesehatan digital yang kompleks (Qu et al., 2023). Kerangka kerja evaluasi yang menggabungkan metrik teknis dengan pengukuran proses perilaku dan hasil kesehatan diperlukan untuk mengatasi kesenjangan yang diidentifikasi dalam metodologi evaluasi saat ini (Pendekanti et al., 2024).

Implikasi dan Arah Penelitian Masa Depan

Berdasarkan analisis komprehensif terhadap tren, karakteristik, integrasi kesehatan, dan tantangan dalam aplikasi mobile pemantauan kualitas udara, beberapa implikasi dan arah penelitian masa depan dapat diidentifikasi. Untuk pengembang aplikasi, temuan menyoroti nilai potensial dari arsitektur modular dan open API yang memfasilitasi interoperabilitas dengan berbagai sumber data. Pendekatan open API dapat mengurangi biaya pengembangan hingga 45% sementara meningkatkan kualitas data melalui integrasi multiple sumber. Hasil ini menyarankan pengembangan framework dengan komponen yang dapat dipertukarkan untuk adaptasi lokal, memastikan relevansi aplikasi dalam berbagai konteks geografis dan sosio-ekonomi. Untuk peneliti, hasil analisis menggarisbawahi kebutuhan akan pendekatan evaluasi interdisipliner yang komprehensif. Studi longitudinal yang mengevaluasi dampak aplikasi

terhadap perubahan perilaku dan hasil kesehatan menjadi prioritas utama, dengan metodologi yang dapat mengatasi kompleksitas interaksi lingkungan-kesehatan. Pengembangan dan evaluasi metode visualisasi inovatif juga merupakan area penelitian yang menjanjikan, dengan fokus pada teknik yang dapat meningkatkan literasi data lingkungan dan memotivasi tindakan. Untuk pembuat kebijakan, temuan ini mendukung pengembangan standar interoperabilitas dan platform data terbuka yang memfasilitasi demokratisasi pemantauan kualitas udara. Dengan semakin meningkatnya integrasi data kualitas udara dalam keputusan publik dan pribadi—dari penutupan sekolah hingga perencanaan rute—kebutuhan akan data yang dapat diakses, terverifikasi, dan terstandarisasi menjadi semakin kritis. Masa depan aplikasi pemantauan kualitas udara kemungkinan akan melibatkan konvergensi yang lebih besar dengan teknologi kesehatan digital, integrasi IoT yang lebih mendalam, dan personalisasi berbasis AI yang lebih canggih. Namun, realisasi potensi penuh dari teknologi ini akan bergantung pada kemampuan untuk mengatasi tantangan fundamental dalam interoperabilitas data, privasi pengguna, dan aksesibilitas lintas konteks sosio-ekonomi.

KESIMPULAN

Tinjauan sistematis ini mengidentifikasi evolusi yang signifikan dalam aplikasi mobile pemantauan kualitas udara, dengan kemajuan dalam arsitektur teknologi, fungsionalitas, dan integrasi kesehatan. Namun, tantangan substansial tetap ada dalam standarisasi, evaluasi dampak, dan ekuitas geografis. Kesenjangan ini menyediakan agenda yang kaya untuk penelitian masa depan, dengan fokus pada pendekatan yang tidak hanya secara teknis canggih tetapi juga akurat secara kontekstual, aksesibel secara universal, dan efektif dalam mendorong perubahan perilaku dan kebijakan. Perkembangan aplikasi mobile pemantauan kualitas udara tidak hanya merupakan cerita tentang kemajuan teknologi, tetapi juga tentang evolusi dalam bagaimana kita memahami dan merespons tantangan lingkungan. Dengan mengatasi kesenjangan yang diidentifikasi dalam tinjauan ini, aplikasi ini dapat melampaui peran sebagai alat informasional semata dan menjadi katalis untuk perubahan individu dan sistemik dalam hubungan kita dengan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alqasimi, A., Al Marzouqi, K., Alhammadi, A., Aljasmi, A., Alnabulsi, A., & Al-Ali, A. R. (2025). *An IoT-Based Mobile Air Pollution Monitoring System*. 1228, 221–233. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-981-97-4784-9_16
- Anh, L. H., Hai, C. M., Truong, N. P., Nguyen, T.-H., & Nguyen, P. L. (2020). *Optimal Deployment of Vehicular Mobile Air Quality Monitoring Systems*. 427–432. Scopus. <https://doi.org/10.1109/NICS51282.2020.9335915>
- Bayir, M. A., Demirbas, M., & Cosar, A. (2011). A Web-Based Personalized Mobility Service for Smartphone Applications. *The Computer Journal*, 54(5), 800–814. <https://doi.org/10.1093/comjnl/bxq027>
- Bumberger, J., Abbrent, M., Brinckmann, N., Hemmen, J., Kunkel, R., Lorenz, C., Lünenschloss, P., Palm, B., Schnicke, T., Schulz, C., van der Schaaf, H., & Schäfer, D. (2025). Digital ecosystem for FAIR time series data management in environmental system science. *SoftwareX*, 29. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2025.102038>
- Camacho-Magriñán, P., Sales-Lerida, D., León-Jiménez, A., & Sanchez-Morillo, D. (2025). Indoor Environmental Monitoring and Chronic Respiratory Diseases: A Systematic Review. *Technologies*, 13(3). Scopus. <https://doi.org/10.3390/technologies13030122>
- Carro, G., Schalm, O., Jacobs, W., & Demeyer, S. (2022). Exploring actionable visualizations for environmental data: Air quality assessment of two Belgian locations. *Environmental Modelling and Software*, 147. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105230>

- Chanel, O., & Cucchi, I. (2024). Better accounting for long-term health effects in economic assessments: An illustration for air pollution in the Canton of Geneva. *Public Health*, 233, 31–37. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2024.04.039>
- Che, W., Frey, H. C., Fung, J. C. H., Ning, Z., Qu, H., Lo, H. K., Chen, L., Wong, T.-W., Wong, M. K. M., Lee, O. C. W., Carruthers, D., Cheung, F., Chan, J. W. M., Yeung, D. W., Fung, Y. H., Zhang, X., Stocker, J., Hood, C., Hohenberger, T. L., ... Lau, A. K. H. (2020). PRAISE-HK: A personalized real-time air quality informatics system for citizen participation in exposure and health risk management. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101986. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101986>
- Chen, C., Chen, H., van Donkelaar, A., Burnett, R. T., Martin, R. V., Chen, L., Tjepkema, M., Kirby-Mcgregor, M., Li, Y., Kaufman, J. S., & Benmarhnia, T. (2023). Using Parametric g-Computation to Estimate the Effect of Long-Term Exposure to Air Pollution on Mortality Risk and Simulate the Benefits of Hypothetical Policies: The Canadian Community Health Survey Cohort (2005 to 2015). *Environmental Health Perspectives*, 131(3). Scopus. <https://doi.org/10.1289/EHP11095>
- Chen, Y.-C., Chin, W.-S., Pan, S.-C., Wu, C.-D., & Guo, Y.-L. L. (2023). Long-term exposure to air pollution and the occurrence of metabolic syndrome and its components in Taiwan. *Environmental Health Perspectives*, 131(1). Scopus. <https://doi.org/10.1289/EHP10611>
- Chibueze Izah, S. (2025). Smart Technologies in Environmental Monitoring: Enhancing Real-Time Data for Health Management. In *Environmental Science and Engineering: Vol. Part F233* (pp. 199–224). Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-031-81966-7_8
- Chockalingam, L., Sakthi Ganesh, M., & Venkata Krishna, P. (2014). Prediction of pollution using smart phones. *International Journal of Applied Engineering Research*, 9(19), 6063–6072. Scopus.
- Chowdhury, M. R., De, S., Shukla, N. K., & Biswas, R. N. (2019). *Energy-Efficient Air Pollution Monitoring with Optimum Duty-Cycling on a Sensor Hub*. 2018 24th National Conference on Communications, NCC 2018. Scopus. <https://doi.org/10.1109/NCC.2018.8600133>
- Cui, H., Zhang, L., Li, W., Yuan, Z., Wu, M., Wang, C., Ma, J., & Li, Y. (2021). A new calibration system for low-cost Sensor Network in air pollution monitoring. *Atmospheric Pollution Research*, 12(5), 101049. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.03.012>
- Davila, S., Ilić, J. P., & Bešlić, I. (2015). Real-time dissemination of air quality information using data streams and Web technologies: Linking air quality to health risks in urban areas. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, 66(2), 171–180. <https://doi.org/10.1515/aiht-2015-66-2633>
- De Vito, S., Del Giudice, A., D'Elia, G., Esposito, E., Fattoruso, G., Ferlito, S., Formisano, F., Loffredo, G., Massera, E., D'Auria, P., & Di Francia, G. (2024). Future Low-Cost Urban Air Quality Monitoring Networks: Insights from the EU's AirHeritage Project. *Atmosphere*, 15(11). Scopus. <https://doi.org/10.3390/atmos15111351>
- Demidchik, N. N., Kudaibergenova, M. D., & Kintonova, A. Zh. (2021). *Using the Internet of Things (IoT) for Natural Resources Monitoring System*. SIST 2021 - 2021 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies. Scopus. <https://doi.org/10.1109/SIST50301.2021.9465979>
- Díaz, J. J., Mura, I., Franco, J. F., & Akhavan-Tabatabaei, R. (2021). aiRe—A web-based R application for simple, accessible and repeatable analysis of urban air quality data. *Environmental Modelling and Software*, 138. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.104976>

- Evangelopoulos, V., Charisiou, N. D., Logothetis, M., Evangelopoulos, G., & Logothetis, C. (2022). Cloud-Based Decision Support System for Air Quality Management. *Climate*, 10(3), 39. <https://doi.org/10.3390/cli10030039>
- Figueiredo, R., Alves, A., Monteiro, V., Pinto, J., Afonso, J., & Afonso, J. (2021). Development and Evaluation of Smart Home IoT Systems applied to HVAC Monitoring and Control. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 8(34), 167205. <https://doi.org/10.4108/eai.19-11-2020.167205>
- Flores-Cortez, O. O., Pocasangre, C. O., Arevalo, F., Castillo, B. A., & Segovia, L. D. (2024). *Mobile Air Quality Sensor System for GIS Mapping, Study Case in San Salvador City*. IEEE Andescon, ANDESCON 2024 - Proceedings. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ANDESCON61840.2024.10755697>
- Gomes, J. B. A., Rodrigues, J. J. P. C., Rabêlo, R. A. L., Tanwar, S., Al-Muhtadi, J., & Kozlov, S. (2021). A novel Internet of things-based plug-and-play multigas sensor for environmental monitoring. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 32(6). Scopus. <https://doi.org/10.1002/ett.3967>
- Jabbar, W. A., Subramaniam, T., Ong, A. E., Shu'lb, M. I., Wu, W., & de Oliveira, M. A. (2022). LoRaWAN-Based IoT System Implementation for Long-Range Outdoor Air Quality Monitoring. *Internet of Things (Netherlands)*, 19. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2022.100540>
- Jaimini, U., Thirunarayan, K., Kalra, M., Venkataraman, R., Kadariya, D., & Sheth, A. (2018). "How Is My Child's Asthma?" Digital Phenotype and Actionable Insights for Pediatric Asthma. *JMIR Pediatrics and Parenting*, 1(2), e11988. <https://doi.org/10.2196/11988>
- Kim, K., Kang, S., & Lee, K. (2013). Geo-based image blending in a mobile cloud environment. *Remote Sensing Letters*, 4(11), 1117–1126. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2013.845922>
- Krupp, B. (2022). Fine-Grained Air Quality Monitoring with Low-Cost Sensors and IoT: Trends, Challenges, and Future Directions. *2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, 1–6. <https://doi.org/10.23919/SpliTech55088.2022.9854310>
- Kulkarni, V., Lakshmi, A. S., Lakshmi, C. B. N., Panneerselvam, S., Kanan, M., Flah, A., & Elnaggar, M. F. (2024). Air Quality Decentralized Forecasting: Integrating IoT and Federated Learning for Enhanced Urban Environmental Monitoring. *Engineering, Technology and Applied Science Research*, 14(4), 16077–16082. Scopus. <https://doi.org/10.48084/etasr.7869>
- Kumari, S., Choudhury, A., Karki, P., Simon, M., Chowdhry, J., Nandra, A., Sharma, P., Sengupta, A., Yadav, A., Raju, M. P., Gupta, J., & Garg, M. C. (2025). Next-Generation Air Quality Management: Unveiling Advanced Techniques for Monitoring and Controlling Pollution. *Aerosol Science and Engineering*. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s41810-024-00281-1>
- Lemos, J., de Souza, V. B., Falcetta, F. S., de Almeida, F. K., Lima, T. M., & Gaspar, P. D. (2024). Enhancing Workplace Safety through Personalized Environmental Risk Assessment: An AI-Driven Approach in Industry 5.0. *Computers*, 13(5). Scopus. <https://doi.org/10.3390/computers13050120>
- Lishev, S. N., Spasov, G. V., Petrova, G. I., & Pavlova, P. E. (2023). *Air parameters monitoring in urban area based on LoRaWAN: Data collection for environmental assessment*. 2023 32nd International Scientific Conference Electronics, ET 2023 - Proceedings. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ET59121.2023.10279269>
- Lobato, S., Salomón-Soto, V. M., Espinosa-Méndez, C. M., Herrera-Moreno, M. N., García-Solano, B., Pérez-González, E., Comba-Marcó-del-Pont, F., Montesano-Villamil, M., Mora-Ramírez,

- M. A., Mancilla-Simbro, C., & Álvarez-Valenzuela, R. (2024). Molecular Pathways Linking High-Fat Diet and PM2.5 Exposure to Metabolically Abnormal Obesity: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Biomolecules*, 14(12). Scopus. <https://doi.org/10.3390/biom14121607>
- Loganathan, V., Ravikumar, D., Devaraj, V., Kannan, U. M., & Kesavan, R. (2023). Development of a Compact IoT-Enabled Device to Monitor Air Pollution for Environmental Sustainability †. *Engineering Proceedings*, 58(1). Scopus. <https://doi.org/10.3390/ecsa-10-15996>
- Madhwal, S., Tripathi, S. N., Bergin, M. H., Bhawe, P., De Foy, B., Reddy, T. V. R., Chaudhry, S. K., Jain, V., Garg, N., & Lalwani, P. (2024). Evaluation of PM2.5 spatio-temporal variability and hotspot formation using low-cost sensors across urban-rural landscape in lucknow, India. *Atmospheric Environment*, 319, 120302. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.120302>
- Mahajan, S., Gabrys, J., & Armitage, J. (2021). Aircit: A citizen-sensing toolkit for monitoring air quality. *Sensors*, 21(12). Scopus. <https://doi.org/10.3390/s21124044>
- Malings, C., Westervelt, D. M., Hauryliuk, A., Presto, A. A., Grieshop, A., Bittner, A., Beekmann, M., & Subramanian, R. (2020). Application of low-cost fine particulate mass monitors to convert satellite aerosol optical depth to surface concentrations in North America and Africa. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(7), 3873–3892. Scopus. <https://doi.org/10.5194/amt-13-3873-2020>
- Manuel, A., Sathiyaraj, G. F., Joseph, R. C., Philip, S. A., & Thomas, S. M. (2023). *AI-Integrated IoT-Enabled Smart Mask for SoS Alerting and Disease Prediction Based on Air Pollutants*. Proceedings of 2023 International Conference on Signal Processing, Computation, Electronics, Power and Telecommunication, IConSCEPT 2023. Scopus. <https://doi.org/10.1109/IConSCEPT57958.2023.10170469>
- Masri, S., Cox, K., Flores, L., Rea, J., & Wu, J. (2022). Community-Engaged Use of Low-Cost Sensors to Assess the Spatial Distribution of PM2.5 Concentrations across Disadvantaged Communities: Results from a Pilot Study in Santa Ana, CA. *Atmosphere*, 13(2), 304. <https://doi.org/10.3390/atmos13020304>
- Meena, K. K., Bairwa, D., & Agarwal, A. (2024). A machine learning approach for unraveling the influence of air quality awareness on travel behavior. *Decision Analytics Journal*, 11. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100459>
- Ossoli, A., Cetti, F., & Gomaraschi, M. (2022). Air Pollution: Another Threat to HDL Function. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(1), 317. <https://doi.org/10.3390/ijms24010317>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., & Brennan, S. E. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *Bmj*, 372.
- Park, Y., Song, I., Yi, J., Yi, S.-J., & Kim, S.-Y. (2020). Web-based visualization of scientific research findings: National-scale distribution of air pollution in South Korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7). Scopus. <https://doi.org/10.3390/ijerph17072230>
- Pendekanti, S. K., Kamath, S. K., & Raj, R. N. (2024). *Recent Developments in IoT-Based Air Quality Monitoring and Control*. Proceedings - ICNEWS 2024: 2nd International Conference on Networking, Embedded and Wireless Systems: Wireless Technology - Building a Digital World. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ICNEWS60873.2024.10730893>
- Pérez, A. P., Fernández, E. I., Ali Shah, S. M., Casado-Mansilla, D., Valera, A. J. J., & López-De-Ipiña, D. (2024). *Performance Assessment of Wearable Atmotube Pro Sensor for Air Quality Citizen Science Applications*. 2024 9th International Conference on Smart and Sustainable

- Technologies, SpliTech 2024. Scopus. <https://doi.org/10.23919/SpliTech61897.2024.10612297>
- Petrova-Antonova, D., Baychev, S., Pavlova, I., & Pavlov, G. (2020). *Air Quality Visual Analytics with Kibana*. 2020 5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies, SpliTech 2020. Scopus. <https://doi.org/10.23919/SpliTech49282.2020.9243708>
- Pradhan, A., & Unhelkar, B. (2020). The role of IoT in smart cities: Challenges of air quality mass sensor technology for sustainable solutions. In *Security and Privacy Issues in IoT Devices and Sensor Networks* (pp. 285–307). Scopus. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821255-4.00013-4>
- Purkayastha, K. D., Mishra, R. K., Shil, A., & Pradhan, S. N. (2021). IoT Based Design of Air Quality Monitoring System Web Server for Android Platform. *Wireless Personal Communications*, 118(4), 2921–2940. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08162-3>
- Qu, L., Chai, F., Liu, S., Duan, J., Meng, F., & Cheng, M. (2023). Comprehensive evaluation method of urban air quality statistics based on environmental monitoring data and its application. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 123, 500–509. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.10.003>
- Ramesh, R., Vallabhu, H., Unni, A., & Nalinakshan, S. (2024). *IoT- Enabled Air Quality Monitoring: Advancements, Applications, and Challenges*. 561–567. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ICCSE63552.2024.10860055>
- Relvas, H., Lopes, D., & Armengol, J. M. (2025). Empowering communities: Advancements in air quality monitoring and citizen engagement. *Urban Climate*, 60. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102344>
- Rose, M., Filiatreault, A., Williams, A., Guénette, J., & Thomson, E. M. (2023). Modulation of insulin signaling pathway genes by ozone inhalation and the role of glucocorticoids: A multi-tissue analysis. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 469. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2023.116526>
- Rujivorakul, V., & Vorapatratorn, S. (2024). *Online Low-Cost Air Quality Monitoring System Using LoRa-Based Communication*. 540–544. Scopus. <https://doi.org/10.1109/JCSSE61278.2024.10613672>
- Salvi, S. S., Tiwari, H. U., & Bobade, S. S. (2025). Integrated IoT System for Real-Time Air Quality Assessment in Diverse Environments. *International Research Journal of Multidisciplinary Scope*, 6(1), 1362–1372. Scopus. <https://doi.org/10.47857/irjms.2025.v06i01.02831>
- Sanni, M. I., Pramudya, R. D., Jamaludin, D. A., Sihotang, S. V., & Hikam, I. N. (2024). *Integrating Technology and Environmental Policy for Effective Air Quality Monitoring in Indonesia*. 2024 3rd International Conference on Creative Communication and Innovative Technology, ICCIT 2024. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ICCIT62134.2024.10701111>
- Santana, E. S., Arenas, L. A. O., & Liberado, E. V. (2024). *Energy Harvesting Integration with Air Quality Monitoring Systems*. 2024 International Conference on Smart Applications, Communications and Networking, SmartNets 2024. Scopus. <https://doi.org/10.1109/SmartNets61466.2024.10577716>
- Sembiring, I., Manongga, D., Rahardja, U., & Aini, Q. (2024). Understanding Data-Driven Analytic Decision Making on Air Quality Monitoring an Empirical Study. *APTISI Transactions on Technopreneurship*, 6(3), 418–431. Scopus. <https://doi.org/10.34306/att.v6i3.459>
- Simitha, K. M., & Subodh Raj, M. S. (2019). *IoT and WSN Based Air Quality Monitoring and Energy Saving System in SmartCity Project*. 1431–1437. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ICICICT46008.2019.8993151>
- Siregar, H., Setiawan, W., & Dirgantari, P. D. (2020). Isu Proses Bisnis Berbasis Artificial Intelligence untuk Menyosong Era Industri 4.0. *Jurnal Bisnis Strategi*, 29(2), 89–100.

- Sladojevic, S., Arsenovic, M., Nikolic, D., Anderla, A., & Stefanovic, D. (2024). Advancements in Mobile-Based Air Pollution Detection: From Literature Review to Practical Implementation. *Journal of Sensors*, 2024. Scopus. <https://doi.org/10.1155/2024/4895068>
- Sowinski-Mydlarz, V., Vassilev, V., & Gasiorowski, P. (2025). *Air Quality Data Integration and Visualization in Urban Environment*. 421, 37–50. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-981-96-0143-1_4
- Sudantha, B., Manchanayaka, M., Yang, C.-Y., Premachandra, C., Firdhous, M., & Sumathipala, K. (2023). *IoT Empowered Open Sensor Network for Environmental Air Pollution Monitoring System in Smart Cities*. Proceedings of ICITR 2023 - 8th International Conference on Information Technology Research: The Next Evolution in Digital Transformation. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ICITR61062.2023.10382893>
- Tasnim, S., Ferguson, A., Gordon, B., Gordon, C., Ahmed, K., & Mkpong-Ruffin, I. (2021). *A Smart Environment Monitoring Application for Mobile Internet of Things*. 182, 223–233. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65796-3_21
- Tsujimoto, R., Fukuda, T., & Yabuki, N. (2024). Server-enabled mixed reality for flood risk communication: On-site visualization with digital twins and multi-client support. *Environmental Modelling and Software*, 177. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.106054>
- Ustulin, M., Park, S. Y., Chin, S. O., Chon, S., Woo, J., & Rhee, S. Y. (2018). Air Pollution Has a Significant Negative Impact on Intentional Efforts to Lose Weight: A Global Scale Analysis. *Diabetes & Metabolism Journal*, 42(4), 320. <https://doi.org/10.4093/dmj.2017.0104>
- Vajs, I., Drajić, D., & Cica, Z. (2023). Data-Driven Machine Learning Calibration Propagation in A Hybrid Sensor Network for Air Quality Monitoring. *Sensors*, 23(5), 2815. <https://doi.org/10.3390/s23052815>
- Varadarajan, M. N., Karthik, R., Pradeep, S., Ameen, N., Venkatramulu, S., Reddy, S. T., Kumar, M. J., Prasad, A. R., & Rajaram, A. (2024). Smart Healthcare Data Protection and Analysis Through Fuzzy-Based Cyber Security. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 25(5), 1604–1614. Scopus.
- Venkataramanan, R., Thirunarayan, K., Jaimini, U., Kadariya, D., Yip, H. Y., Kalra, M., & Sheth, A. (2019). Determination of Personalized Asthma Triggers From Multimodal Sensing and a Mobile App: Observational Study. *JMIR Pediatrics and Parenting*, 2(1), e14300. <https://doi.org/10.2196/14300>
- Voss, M., Bosak, O., Hoebertz, M., Mohsenzadeh, F., Schnebke, M., Poeppelbuss, J., & Eisenbeiss, M. (2022). Design Principles for Personalized Assistance Systems That Respect Privacy. *AIS Transactions on Human-Computer Interaction*, 14(4), 461–489. Scopus. <https://doi.org/10.17705/1thci.00176>
- Wang, A., Paul, S., deSouza, P., Machida, Y., Mora, S., Duarte, F., & Ratti, C. (2023). Key Themes, Trends, and Drivers of Mobile Ambient Air Quality Monitoring: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Environmental Science and Technology*, 57(26), 9427–9444. Scopus. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c06310>
- WHO. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization.
- Wijaya, C., Andriyadi, A., Chen, S.-Y., Wang, I.-J., & Yang, C.-T. (2024). *Edge AI-Driven Air Quality Monitoring and Notification System: A Multilocation Campus Perspective*. 214, 256–261. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-031-64766-6_25

- William, P., Kiran, Y. V. U., Rana, A., Gangodkar, D., Khan, I., & Ashutosh, K. (2022). *Design and Implementation of IoT based Framework for Air Quality Sensing and Monitoring*. 197–200. Scopus. <https://doi.org/10.1109/ICTACS56270.2022.9988646>
- Wolf, K., Hoffmann, B., Andersen, Z. J., Atkinson, R. W., Bauwelinck, M., Bellander, T., Brandt, J., Brunekreef, B., Cesaroni, G., Chen, J., De Faire, U., De Hoogh, K., Fecht, D., Forastiere, F., Gulliver, J., Hertel, O., Hvidtfeldt, U. A., Janssen, N. A. H., Jørgensen, J. T., ... Ljungman, P. L. S. (2021). Long-term exposure to low-level ambient air pollution and incidence of stroke and coronary heart disease: A pooled analysis of six European cohorts within the ELAPSE project. *The Lancet Planetary Health*, 5(9), e620–e632. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00195-9](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00195-9)
- Wu, K., Ho, H. C., Su, H., Huang, C., Zheng, H., Zhang, W., Tao, J., Hossain, M. Z., Zhang, Y., Hu, K., Yang, M., Wu, Q., Xu, Z., & Cheng, J. (2022). A systematic review and meta-analysis of intraday effects of ambient air pollution and temperature on cardiorespiratory morbidities: First few hours of exposure matters to life. *eBioMedicine*, 86, 104327. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2022.104327>
- Yeung, J., Makke, O., MacNeille, P., & Gusikhin, O. (2017). SmartDeviceLink as an Open Innovation Platform for Connected Car Features and Mobility Applications. *SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems*, 10(1), 231–239. <https://doi.org/10.4271/2017-01-1649>
- Yogesh, K. M., Singh, D. M., Rao, A., Keerthana, S. S., Banu, S., & Stephan, T. (2025). *Improving Air Quality Prediction Through User-Centric Data and Machine Learning*. 413 *SIST*, 737–751. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7717-4_53
- Zalakeviciute, R., Alexandrino, K., Acosta-Vargas, P., Pérez-Medina, J.-L., & Hernandez, W. (2020). *Evaluation of smart phone open source applications for air pollution*. 959, 474–484. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20040-4_43
- Zamri, H., Shaffiei, Z. A., Daud, N. A., & Ahmad, N. D. (2022). *AirAwareMalaysia: Data Visualization and Air Quality Awareness on Air Pollution in Selangor Using Big Data Analytics*. 457 *LNNS*, 223–233. Scopus. https://doi.org/10.1007/978-3-031-00828-3_22