



Integrasi Sensor Elektroanalitik dan Kecerdasan Buatan dalam Pengawasan Pencemaran Industri: Analisis Bibliometrik 1998–2024

Alwi Nofriandi¹, Yulkifli^{2,*}, Indang Dewata¹, Yohandri²

¹ Sekolah Pascasarjana, Program Doktor Ilmu Lingkungan, Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia

² Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Program Studi Fisika, Universitas Negeri Padang, Padang, Indonesia

Email: ¹nofriandialwi02@gmail.com ^{2,*}yulkifliamir@fmipa.unp.ac.id

INFORMASI ARTIKEL

Histori Artikel:

Tanggal Submit : 14 Juni 2025

Tanggal di Terima : 30 Juli 2025

Tanggal Publish : 31 Juli 2025

KORESPONDENSI

Email: yulkifliamir@fmipa.unp.ac.id

ABSTRAK

Integrasi sensor elektroanalitik dengan teknologi kecerdasan buatan (AI) semakin menjadi fokus utama dalam pengembangan sistem pengawasan pencemaran industri yang real-time dan akurat. Studi ini menggunakan pendekatan bibliometrik untuk menganalisis tren publikasi, sumber jurnal, penulis, dan topik riset terkait sensor voltametri, impedimetri, dan AI dalam konteks pemantauan kualitas lingkungan industri selama periode 1998–2024. Hasil analisis mengungkapkan peningkatan signifikan dalam jumlah publikasi dan sitasi sejak tahun 2019, dengan jurnal *Sensors* dan *Biosensors* sebagai kanal publikasi utama. Penulis terkemuka dan topik yang berkembang seperti penggunaan jaringan saraf tiruan menandai kemajuan pesat dalam bidang ini. Meskipun demikian, masih diperlukan pengembangan sensor multifungsi, integrasi sistem IoT, dan algoritma AI yang lebih adaptif. Studi ini menegaskan urgensi riset lanjutan dengan pendekatan multidisipliner untuk mendukung pengawasan pencemaran industri yang berkelanjutan, efisien, dan ramah lingkungan

Kata Kunci: Voltammetric Sensor, Impedimetric Sensor, Artificial Intelligence, Bibliometrik, Industri

ABSTRACT

The integration of electroanalytical sensors with artificial intelligence (AI) technology is increasingly becoming a major focus in the development of real-time and accurate industrial pollution monitoring systems. This study uses a bibliometric approach to analyze publication trends, journal sources, authors, and research topics related to voltammetry, impedimetry, and AI sensors in the context of industrial environmental quality monitoring during the period 1998–2024. The analysis results reveal a significant increase in the number of publications and citations since 2019, with the journals *Sensors* and *Biosensors* as the main publication channels. Prominent authors and emerging topics such as the use of artificial neural networks mark rapid progress in this field. However, there is still a need for the development of multifunctional sensors, IoT system integration, and more adaptive AI algorithms. This study emphasizes the urgency of further research with a multidisciplinary approach to support sustainable, efficient, and environmentally friendly industrial pollution monitoring.

Keywords: Voltammetric Sensors, Impedimetric Sensors, Artificial Intelligence, Bibliometrics, Industry

1. PENDAHULUAN

Pencemaran industri merupakan salah satu masalah lingkungan yang signifikan dan berdampak luas terhadap kesehatan manusia serta ekosistem [1], [2], [3]. Aktivitas industri, terutama yang berkaitan dengan pengolahan logam berat, kimia, dan manufaktur, sering menghasilkan limbah berbahaya yang dapat mencemari udara, air, dan tanah [4], [5], [6]. Oleh karena itu, pengawasan dan pengendalian pencemaran industri menjadi sangat penting untuk menjaga kualitas lingkungan dan memastikan keberlanjutan pembangunan industri yang ramah lingkungan [7]. Seiring dengan perkembangan teknologi, metode tradisional pemantauan pencemaran yang bersifat manual dan labor intensif mulai digantikan oleh teknologi sensor yang lebih canggih dan efisien [8], [9], [10]. Sensor elektroanalitik, seperti sensor voltametri dan impedimetri, telah muncul sebagai alat yang mampu mendeteksi kontaminan dengan tingkat sensitivitas dan selektivitas tinggi. Sensor ini juga memungkinkan deteksi secara real-time dan biaya yang relatif lebih rendah dibandingkan metode konvensional [11].

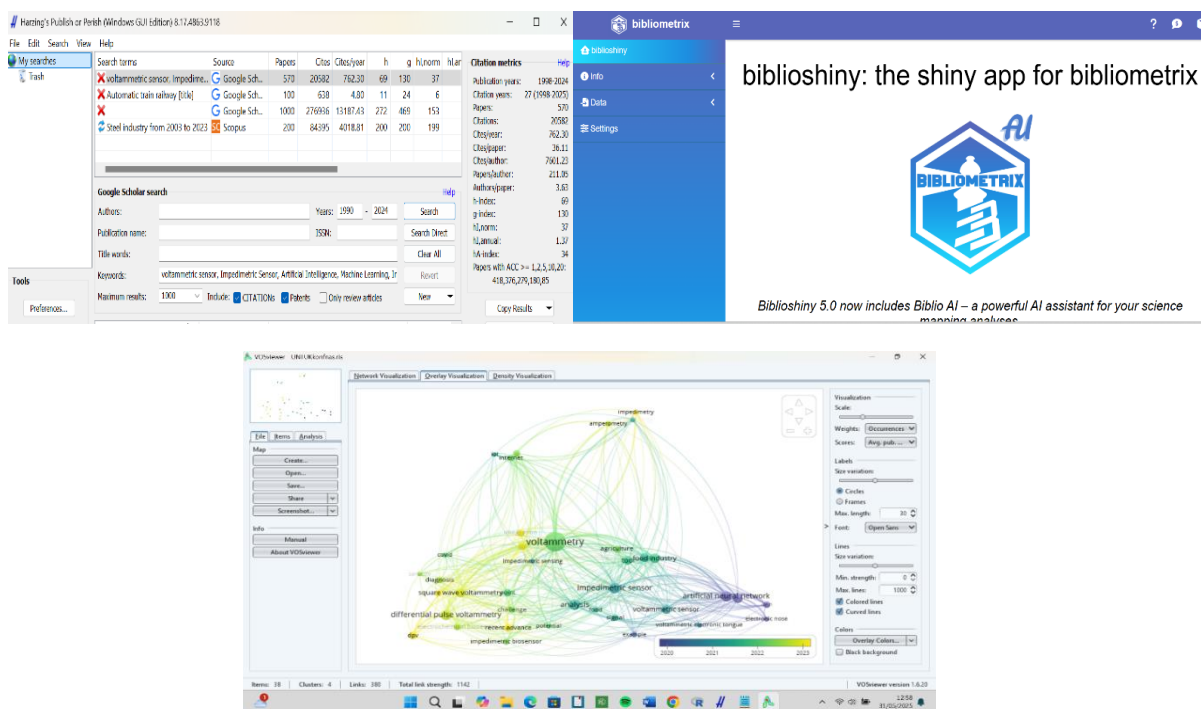
Di sisi lain, kemajuan pesat dalam bidang kecerdasan buatan (AI), termasuk machine learning dan deep learning, membuka peluang besar dalam analisis data sensor yang kompleks dan besar [12], [13]. AI mampu mengolah data secara otomatis, mengidentifikasi pola, serta memprediksi kejadian pencemaran secara akurat. Integrasi sensor elektroanalitik dengan teknologi AI menjadi solusi yang ideal untuk sistem pemantauan pencemaran industri yang lebih cerdas dan adaptif [14]. Beberapa studi telah menunjukkan keberhasilan penggunaan AI dalam meningkatkan performa sensor elektroanalitik, seperti pengurangan noise, optimasi parameter sensor, dan klasifikasi data pencemaran [15], [16], [17]. Pendekatan ini juga mendukung pengembangan sistem monitoring yang dapat beroperasi secara otonom, sehingga mengurangi ketergantungan pada pengawasan manual dan meningkatkan efisiensi pengambilan keputusan.

Meskipun potensi teknologi ini besar, masih terdapat berbagai tantangan dalam implementasinya, mulai dari pengembangan sensor yang mampu beroperasi di lingkungan industri yang keras hingga pengolahan data yang efektif pada kondisi variabilitas tinggi [18]. Selain itu, integrasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta validasi di lapangan, masih menjadi fokus penelitian penting agar sistem monitoring dapat berfungsi secara optimal dan andal [19]. Dalam konteks tersebut, kajian bibliometrik menjadi pendekatan yang efektif untuk memetakan tren riset, penulis utama, jurnal unggulan, serta topik yang sedang berkembang [20], [21], [22] di bidang integrasi sensor elektroanalitik dan AI untuk pengawasan pencemaran industri. Analisis bibliometrik ini dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai kemajuan ilmu pengetahuan serta area yang masih membutuhkan perhatian lebih lanjut.

Studi ini bertujuan untuk mengidentifikasi tren riset, sumber publikasi utama, penulis kunci, dan perkembangan topik terkait sensor elektroanalitik dan AI dalam pemantauan pencemaran industri selama periode 1998 hingga 2024. Hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan wawasan strategis bagi peneliti, praktisi, dan pembuat kebijakan dalam mengarahkan riset dan pengembangan teknologi yang berkelanjutan. Dengan meningkatnya kebutuhan akan sistem pemantauan pencemaran yang lebih akurat dan real-time, integrasi antara sensor elektroanalitik dan kecerdasan buatan menjadi fokus riset yang sangat relevan dan mendesak. Oleh karena itu, pemahaman komprehensif tentang tren dan perspektif riset di bidang ini sangat penting untuk mendukung pengembangan solusi inovatif yang mampu menjawab tantangan lingkungan industri masa depan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur sistematis berbasis data bibliometrik [23][24], dengan memanfaatkan perangkat lunak Harzing's Publish or Perish (PoP) versi 8.17.4863.9118. Data diambil dari Google Scholar sebagai sumber utama, dengan rentang tahun publikasi dari 1998 hingga 2024. Pencarian dilakukan pada bulan Mei 2025 menggunakan kata kunci gabungan: "voltammetric sensor", "impedimetric sensor", "artificial intelligence", "machine learning", "industrial pollution monitoring". Kata kunci tersebut dimasukkan dalam kolom "Keywords" pada PoP dan pengambilan data dilakukan dengan pengaturan maksimum hasil sebanyak 1000 artikel serta hanya mencakup publikasi yang disitasi (Include: CITATIONS dicentang).



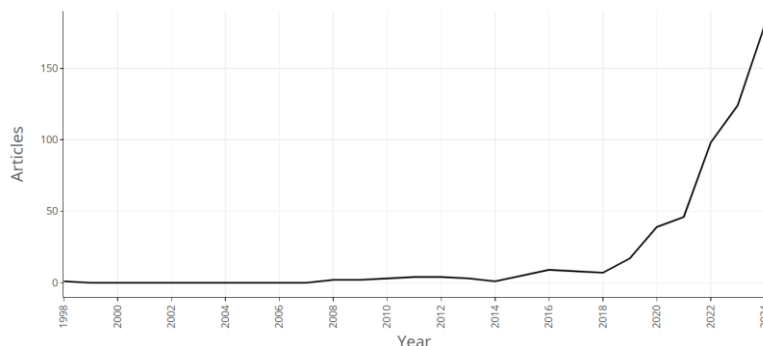
Gambar 1. Tools yang digunakan untuk analisis

Hasil pencarian menghasilkan 570 artikel ilmiah yang relevan dengan topik penelitian. Dari hasil tersebut, diperoleh total 20.582 sitasi dengan rata-rata 762,3 sitasi per tahun, dan rerata 36,11 sitasi per artikel. Nilai h-index

sebesar 69, g-index sebesar 130, serta hl-index (age-weighted) mencapai 37, menunjukkan bahwa tema ini merupakan bidang kajian yang memiliki intensitas sitasi dan perkembangan yang tinggi dalam dua dekade terakhir. Selain itu, jumlah rata-rata publikasi per penulis adalah 4,73, dengan rasio penulis per artikel sebesar 2,71, mencerminkan kolaborasi ilmiah yang cukup aktif dalam bidang ini. Setelah proses identifikasi awal, dilakukan penyaringan berdasarkan kesesuaian judul dan abstrak terhadap fokus penelitian, yaitu pengawasan pencemaran industri menggunakan sensor elektroanalitik dan kecerdasan buatan (AI). Artikel yang tidak relevan atau tidak terkait langsung dengan pemantauan polusi industri (misalnya aplikasi di bidang farmasi atau medis) dikeluarkan dari analisis. Artikel yang lolos seleksi kemudian dianalisis menggunakan pendekatan kualitatif-deskriptif serta visualisasi bibliometrik (jika diperlukan) untuk mengidentifikasi tren utama, kata kunci dominan, dan arah perkembangan riset ke depan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

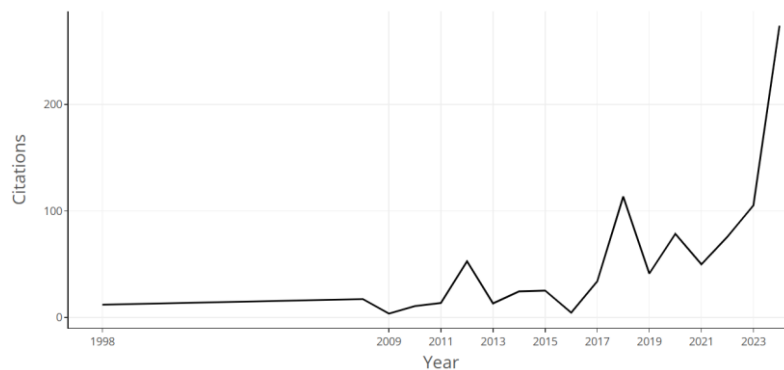
Gambar 2 memperlihatkan tren jumlah publikasi ilmiah tahunan terkait topik integrasi sensor elektroanalitik dan kecerdasan buatan (AI) dalam konteks pengawasan pencemaran industri, selama periode tahun 1998 hingga 2024. Grafik ini menunjukkan adanya peningkatan yang sangat signifikan dalam jumlah artikel ilmiah yang diterbitkan dalam beberapa tahun terakhir, khususnya sejak tahun 2020. Selama dua dekade pertama (1998–2018), jumlah publikasi per tahun relatif rendah dan cenderung stagnan, dengan rata-rata di bawah 10 artikel per tahun. Hal ini mencerminkan bahwa tema riset ini masih berada dalam tahap awal pengembangan, baik dari sisi teknologi sensor maupun dari aspek integrasi dengan sistem kecerdasan buatan.



Gambar 2. Tren jumlah publikasi ilmiah tahunan

Namun, mulai tahun 2019, terjadi lonjakan produksi ilmiah yang mencolok. Lonjakan ini dapat dikaitkan dengan beberapa faktor: (1) meningkatnya kekhawatiran terhadap pencemaran lingkungan akibat aktivitas industri; (2) perkembangan pesat dalam teknologi AI dan machine learning yang memungkinkan analisis data sensor secara lebih cepat dan akurat; serta (3) dorongan kebijakan lingkungan yang lebih ketat dari pemerintah dan lembaga internasional. Peningkatan paling tajam tercatat pada tahun 2023 dan 2024, di mana jumlah artikel mencapai lebih dari 150 publikasi per tahun. Fenomena ini menunjukkan bahwa riset tentang penggunaan sensor voltametri, impedimetri, dan AI untuk pemantauan polusi industri telah menjadi salah satu bidang kajian yang sangat aktif dan strategis. Ini juga sejalan dengan transformasi global menuju smart environmental monitoring sebagai bagian dari kerangka kerja Industri 4.0 dan ekonomi hijau.

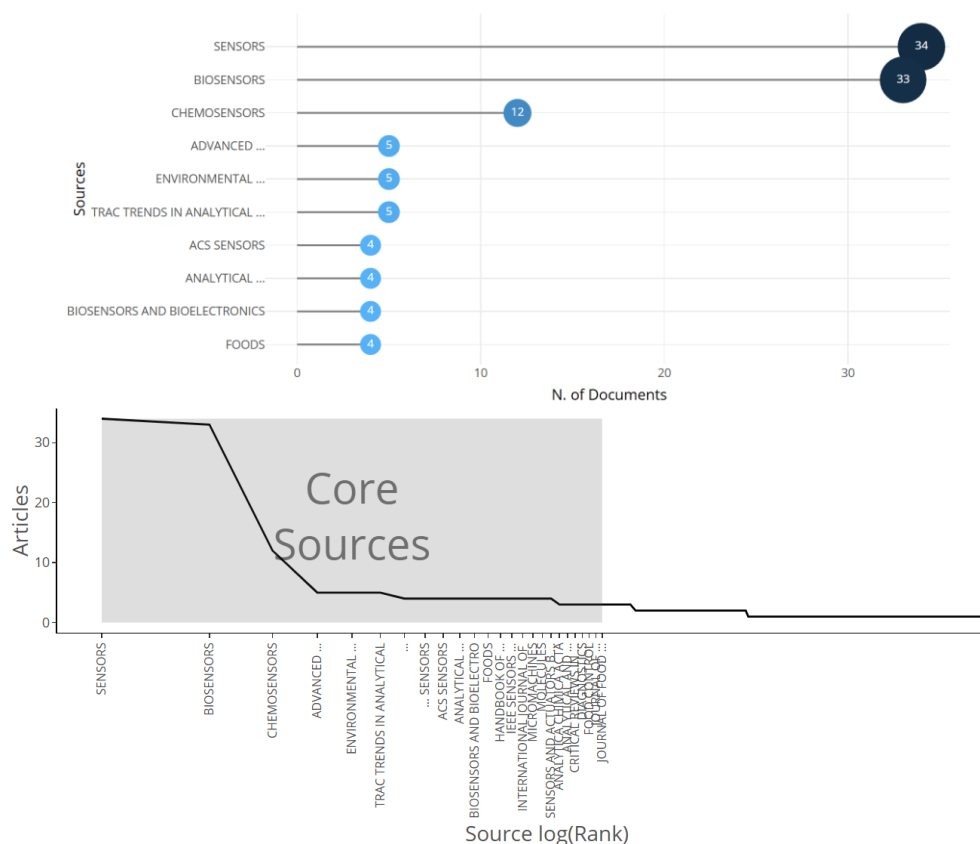
Pada gambar 3 menunjukkan tren rata-rata jumlah sitasi per tahun dari artikel-artikel ilmiah yang membahas topik integrasi sensor elektroanalitik dan kecerdasan buatan (AI) dalam pengawasan pencemaran industri selama periode 1998 hingga 2024. Grafik ini memperlihatkan pola yang fluktuatif di awal, namun mengalami peningkatan tajam dalam lima tahun terakhir, khususnya pada tahun 2024 yang mencatatkan lebih dari 250 sitasi. Pada periode awal (1998–2010), jumlah sitasi per tahun sangat rendah, yang mencerminkan keterbatasan publikasi serta kurangnya perhatian ilmiah terhadap topik ini. Sitasi mulai menunjukkan peningkatan secara bertahap antara tahun 2011 hingga 2016, meskipun masih disertai fluktuasi yang signifikan. Hal ini dapat disebabkan oleh masih minimnya jumlah publikasi dengan dampak tinggi atau belum terbangunnya jaringan sitasi antarpeleliti yang kuat.



Gambar 3. Tren rata-rata jumlah sitasi per tahun

Mulai tahun 2017, terjadi lonjakan signifikan, dengan puncak-puncak sitasi muncul pada tahun 2018, 2020, dan mencapai puncak tertinggi pada tahun 2024. Peningkatan ini menunjukkan bahwa artikel-artikel pada tahun-tahun tersebut mendapatkan perhatian luas dan menjadi rujukan penting dalam riset lanjutan. Kenaikan sitasi dapat diartikan sebagai indikator kualitas, pengaruh, dan visibilitas ilmiah dari karya-karya tersebut dalam komunitas akademik dan praktisi industri. Tingginya rata-rata sitasi pada tahun-tahun terakhir juga mencerminkan relevansi tematik dari riset-riset yang berfokus pada deteksi pencemaran industri berbasis sensor cerdas dan AI. Hal ini mendukung argumen bahwa integrasi teknologi sensor dan pembelajaran mesin telah menjadi pilar penting dalam agenda riset global, terutama yang berkaitan dengan pengendalian kualitas lingkungan, pemantauan real-time, dan penerapan kebijakan industri berkelanjutan.

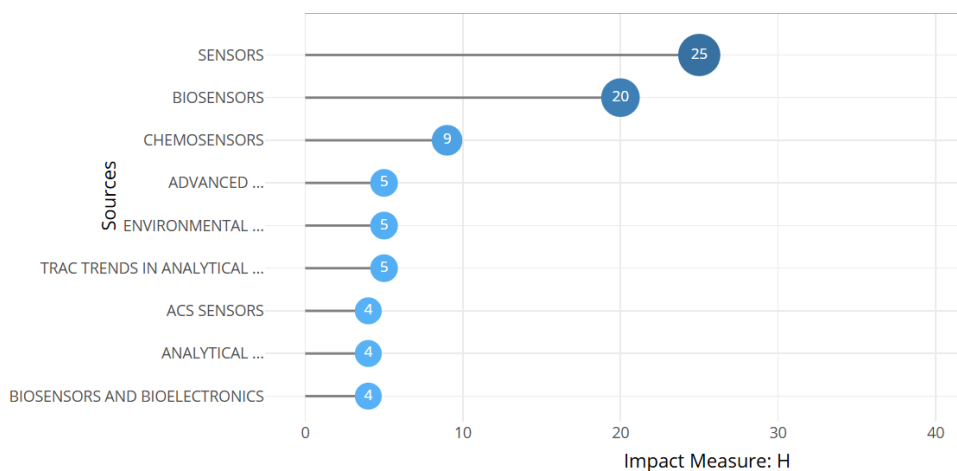
Pada gambar 4 memperlihatkan sumber publikasi (journals) yang paling banyak memuat artikel terkait integrasi sensor elektroanalitik dan kecerdasan buatan (AI) dalam pemantauan pencemaran industri. Dua grafik disajikan: (1) jumlah dokumen per jurnal dan (2) grafik Bradford's Law yang mengidentifikasi sumber inti (core sources). Pada grafik terlihat bahwa jurnal Sensors dan Biosensors mendominasi dengan jumlah masing-masing 34 dan 33 artikel, menjadikannya sebagai kanal utama bagi publikasi di bidang ini. Diikuti oleh Chemosensors (12 artikel), serta jurnal-jurnal lain seperti Advanced Materials, Environmental Science & Technology, dan TrAC Trends in Analytical Chemistry dengan masing-masing 5 artikel. Keberadaan jurnal-jurnal ini menunjukkan bahwa isu pemantauan pencemaran industri berbasis sensor dan AI sangat diminati dalam komunitas ilmiah lintas bidang, termasuk sensorik, analisis kimia, dan lingkungan industri.



Gambar 4. Sumber publikasi (journals) Relevan

Grafik juga menggambarkan distribusi publikasi berdasarkan Bradford's Law, yang membagi jurnal menjadi zona inti (core) dan periferal. Area abu-abu menandai jurnal-jurnal yang termasuk dalam core zone, yang berarti jurnal-jurnal tersebut memiliki tingkat kontribusi tertinggi terhadap literatur yang dikaji. Jurnal seperti Sensors, Biosensors, dan Chemosensors termasuk dalam inti ini dan memainkan peran sentral dalam menyebarluaskan hasil-hasil penelitian penting di bidang ini. Temuan ini menegaskan bahwa terdapat konsentrasi yang kuat dari literatur relevan dalam sejumlah kecil jurnal, yang menjadi pusat penyebaran pengetahuan untuk topik ini. Bagi peneliti yang ingin mengakses literatur paling mutakhir atau mempublikasikan karya ilmiahnya dalam bidang serupa, jurnal-jurnal tersebut merupakan tempat yang sangat strategis.

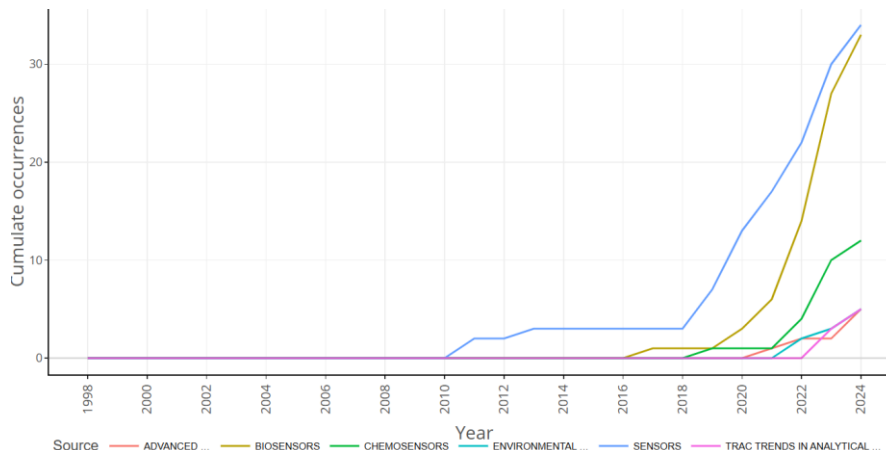
Gambar 5 menyajikan ukuran dampak lokal (Local Impact) dari masing-masing jurnal yang teridentifikasi dalam kajian literatur, berdasarkan nilai H-index yang dihitung dari dataset bibliometrik yang digunakan dalam studi ini. Metode ini digunakan untuk menilai sejauh mana sebuah jurnal memberikan kontribusi signifikan terhadap topik spesifik, yaitu integrasi sensor elektroanalitik dan kecerdasan buatan dalam pemantauan pencemaran industri. Hasil analisis menunjukkan bahwa jurnal Sensors kembali menempati posisi teratas dengan nilai H-index sebesar 25, diikuti oleh Biosensors ($H = 20$) dan Chemosensors ($H = 9$). Ini mengindikasikan bahwa artikel-artikel yang diterbitkan oleh jurnal tersebut tidak hanya banyak, tetapi juga memiliki frekuensi kutipan tinggi dalam ruang lingkup topik yang ditinjau, mencerminkan kualitas dan pengaruhnya dalam komunitas ilmiah



Gambar 5. Ukuran dampak lokal (Local Impact)

Jurnal lain seperti *Advanced Materials*, *Environmental Science & Technology*, dan *TrAC Trends in Analytical Chemistry* memiliki nilai H masing-masing sebesar 5, menandakan kontribusi sedang namun tetap relevan. Sedangkan jurnal seperti *ACS Sensors*, *Analytical Chemistry*, dan *Biosensors and Bioelectronics* menunjukkan H-index sebesar 4, yang tetap menunjukkan pengaruh ilmiah namun dalam skala yang lebih terbatas secara lokal (dalam korpus artikel yang dikaji). Data ini penting untuk menunjukkan jurnal mana yang paling berpengaruh dalam ekosistem riset spesifik ini, baik dari segi kuantitas maupun kualitas sitasi. Oleh karena itu, jurnal dengan H-index tertinggi dapat direkomendasikan sebagai sumber utama rujukan maupun target publikasi strategis bagi para peneliti yang ingin berkontribusi dalam bidang ini.

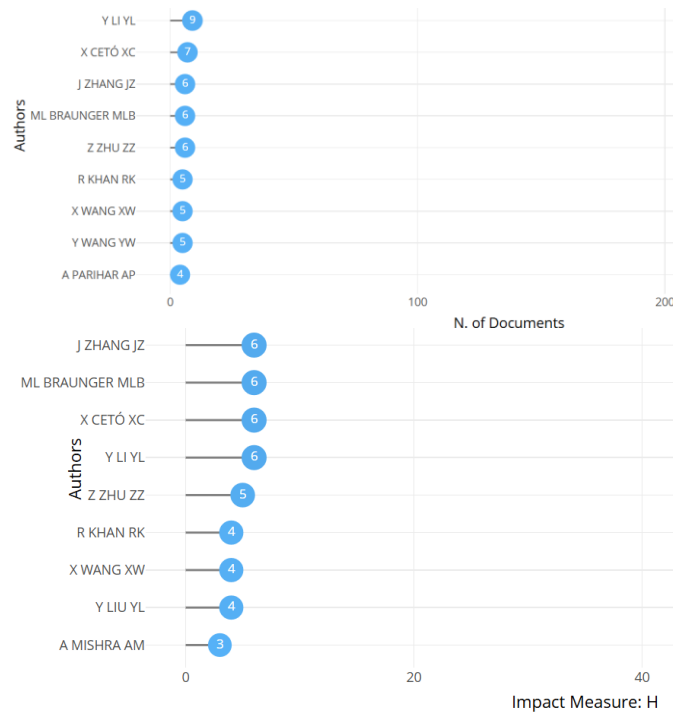
Gambar 6 menggambarkan perkembangan jumlah kumulatif publikasi artikel dari berbagai jurnal utama (sources) yang menerbitkan riset terkait integrasi sensor elektroanalitik dan kecerdasan buatan (AI) dalam pengawasan pencemaran industri selama periode 1998 hingga 2024. Dari grafik, dapat diamati bahwa jurnal *Sensors* menunjukkan pertumbuhan produksi artikel yang paling signifikan, terutama sejak tahun 2016 dan semakin tajam di dekade terakhir. Hal ini mengindikasikan bahwa *Sensors* menjadi salah satu platform utama bagi peneliti untuk mempublikasikan karya-karya terkini dalam bidang sensor cerdas dan aplikasi industri.



Gambar 6. Perkembangan jumlah kumulatif publikasi artikel

Jurnal *Biosensors* dan *Chemosensors* juga menunjukkan tren peningkatan publikasi yang konsisten, dengan *Biosensors* mulai berkembang pesat sejak sekitar tahun 2017 dan *Chemosensors* yang mulai meningkat pada tahun 2015, menegaskan peran mereka sebagai kanal penting di bidang sensor elektroanalitik. Sementara itu, jurnal-jurnal seperti *Advanced Materials*, *Environmental Science & Technology*, dan *TrAC Trends in Analytical Chemistry* juga menunjukkan peningkatan publikasi namun dengan volume yang lebih kecil, mencerminkan kontribusi penting namun lebih tersegmentasi dalam komunitas riset yang lebih spesifik. Pertumbuhan kumulatif ini tidak hanya menggambarkan aktivitas penelitian yang meningkat secara kuantitatif, tetapi juga mencerminkan konsolidasi tema dan perluasan cakupan topik riset yang lebih mendalam serta lintas disiplin, terutama dalam menggabungkan teknologi sensor dengan kecerdasan buatan untuk pemantauan lingkungan industri yang efektif.

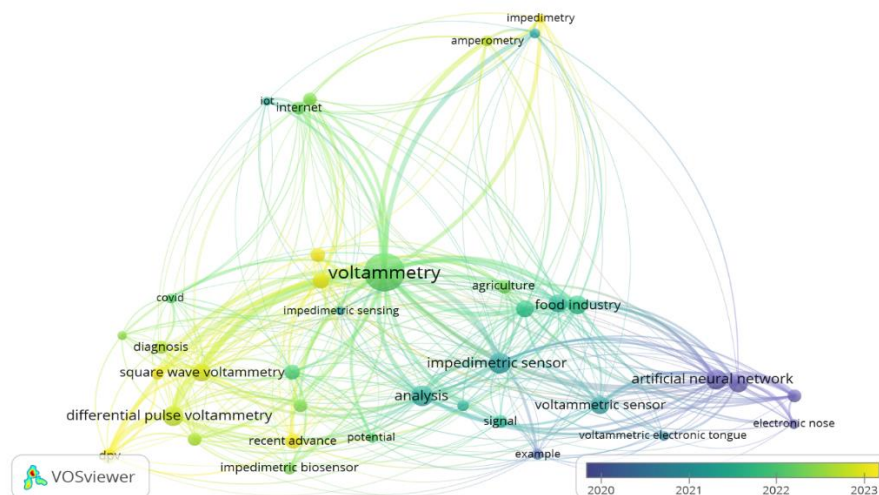
Gambar 7 menampilkan dua grafik terkait para penulis yang paling produktif dan berpengaruh dalam riset integrasi sensor elektroanalitik dan kecerdasan buatan untuk pengawasan pencemaran industri. Grafik pertama menunjukkan jumlah dokumen yang diterbitkan oleh penulis, sedangkan grafik kedua mengilustrasikan dampak lokal para penulis berdasarkan H-index dari dataset yang digunakan. Dari grafik jumlah dokumen, Y. Liyl menjadi penulis dengan produktivitas tertinggi dengan 9 publikasi, diikuti oleh X. Cetó dengan 7 artikel, serta beberapa penulis lain seperti J. Zhang, ML. Braunger, dan Z. Zhu dengan masing-masing 6 artikel. Hal ini menunjukkan adanya kelompok penulis inti yang konsisten berkontribusi pada perkembangan bidang ini.



Gambar 7. Penulis yang paling produktif dan berpengaruh

Sementara itu, dari sisi dampak lokal (H-index), penulis-penulis seperti J. Zhang, ML. Braunger, X. Cetó, dan Y. Liyl memiliki nilai H-index tertinggi (sekitar 6), yang mengindikasikan bahwa karya-karya mereka tidak hanya banyak, tetapi juga sering disitasi dan menjadi referensi penting dalam komunitas riset. Penulis-penulis ini berperan signifikan dalam membentuk arah dan kualitas penelitian di bidang sensor elektroanalitik dan AI untuk pengawasan pencemaran industri.

Gambar 8 menampilkan visualisasi jaringan kata kunci (keyword co-occurrence network) yang menggambarkan tren topik utama dan hubungan antar konsep dalam riset mengenai integrasi sensor elektroanalitik dan kecerdasan buatan (AI) pada pengawasan pencemaran industri. Visualisasi ini menggunakan warna untuk menunjukkan waktu kemunculan relatif kata kunci, dari tahun 2020 (warna biru) hingga 2023 (warna kuning). Dari gambar tersebut, terlihat bahwa topik "voltammetry" dan "artificial neural network" menjadi kata kunci sentral dengan bobot dan konektivitas yang tinggi, menunjukkan fokus riset yang kuat pada teknik voltametri yang dipadukan dengan jaringan saraf tiruan dalam pengolahan data sensor. Kata kunci seperti "impedimetric sensor", "impedimetric biosensor", dan "square wave voltammetry" juga muncul sebagai topik penting yang sering dikaitkan.



Gambar 8. Trend topic

Selain itu, beberapa aplikasi spesifik seperti "food industry", "agriculture", dan "electronic nose" menunjukkan adanya perluasan topik penelitian ke sektor industri yang lebih luas, menunjukkan bahwa teknologi ini tidak hanya digunakan untuk pemantauan pencemaran secara umum, tetapi juga diadaptasi ke konteks yang lebih khusus dan aplikatif. Warna yang menunjukkan tahun kemunculan kata kunci memperlihatkan tren yang terus berkembang dan dinamis, dengan peningkatan signifikan pada istilah yang berhubungan dengan machine learning, AI, dan teknologi sensor canggih sejak tahun 2021 hingga 2023. Hal ini mencerminkan adopsi teknologi terbaru dalam riset dan

perkembangan topik yang semakin modern dan kompleks. Secara keseluruhan, visualisasi ini menegaskan bahwa riset di bidang ini terus berkembang ke arah integrasi teknologi elektroanalitik dan AI dengan berbagai aplikasi industri, serta menunjukkan pola inovasi yang kuat dalam metodologi dan penerapan.

Penelitian selanjutnya perlu mengembangkan sensor elektroanalitik yang lebih sensitif dan selektif dengan memanfaatkan nanomaterial mutakhir agar dapat mendeteksi berbagai jenis pencemar secara simultan dalam kondisi industri yang kompleks. Integrasi dengan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *edge computing* juga penting untuk memungkinkan pemantauan pencemaran secara real-time dan responsif di lapangan. Di sisi kecerdasan buatan, peningkatan algoritma *machine learning* dan *deep learning* yang mampu menangani data sensor yang kompleks, tidak lengkap, dan bising sangat diperlukan untuk menghasilkan prediksi yang lebih akurat dan adaptif. Selain itu, pengujian dan validasi sistem di lingkungan industri nyata sangat krusial untuk memastikan keandalan aplikasi praktisnya. Dukungan kebijakan dan standarisasi juga dibutuhkan agar teknologi ini dapat diadopsi secara luas dan konsisten sesuai regulasi lingkungan yang ketat. Pendekatan multidisipliner dan kolaboratif yang melibatkan ahli dari bidang kimia analitik, teknologi informasi, ilmu lingkungan, dan pembuat kebijakan akan mempercepat inovasi dan penerapan solusi berkelanjutan dalam pengawasan pencemaran industri. Dengan arah ini, integrasi sensor elektroanalitik dan kecerdasan buatan berpotensi besar mendukung terciptanya industri yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan cerdas di masa depan

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi sensor elektroanalitik dengan teknologi kecerdasan buatan (AI) merupakan pendekatan yang sangat potensial dalam pengawasan pencemaran industri. Analisis bibliometrik mengungkapkan tren peningkatan signifikan dalam jumlah publikasi dan sitasi, menandakan meningkatnya perhatian dan relevansi topik ini dalam komunitas ilmiah. Jurnal-jurnal seperti *Sensors* dan *Biosensors* menjadi sumber utama publikasi, sementara penulis-penulis kunci memberikan kontribusi signifikan terhadap perkembangan bidang ini. Visualisasi tren topik mengindikasikan bahwa teknik voltametri dan jaringan saraf tiruan menjadi fokus utama riset, dengan aplikasi yang terus berkembang di berbagai sektor industri. Meskipun sudah banyak kemajuan, masih terdapat tantangan terkait pengembangan sensor yang lebih canggih, integrasi sistem IoT, dan peningkatan algoritma AI yang adaptif. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dengan pendekatan multidisipliner sangat dibutuhkan untuk mewujudkan sistem pemantauan pencemaran yang real-time, akurat, dan berkelanjutan, yang pada akhirnya dapat mendukung industri yang lebih ramah lingkungan dan efisien

REFERENCES

- [1] S. S. Shetty *et al.*, "Environmental pollutants and their effects on human health," *Heliyon*, vol. 9, no. 9, p. e19496, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e19496.
- [2] I. Manisalidis, E. Stavropoulou, A. Stavropoulos, and E. Bezirtzoglou, "Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review," *Front. Public Heal.*, vol. 8, no. February, pp. 1–13, 2020, doi: 10.3389/fpubh.2020.00014.
- [3] A. Siddiqua, J. N. Hahladakis, and W. A. K. A. Al-Attiya, "An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 29, no. 39, pp. 58514–58536, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-21578-z.
- [4] M. Moghimi Dehkordi, Z. Pourmuroz Nodeh, K. Soleimani Dehkordi, H. salmanvandi, R. Rasouli Khorjistan, and M. Ghaffarzadeh, "Soil, air, and water pollution from mining and industrial activities: Sources of pollution, environmental impacts, and prevention and control methods," *Results Eng.*, vol. 23, no. August, p. 102729, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102729.
- [5] S. Das, K. W. Sultana, A. R. Ndhlala, M. Mondal, and I. Chandra, "Heavy metal pollution in the environment and its impact on health: exploring green technology for remediation," *Environ. Health Insights*, vol. 17, pp. 1–10, 2023, doi: 10.1177/11786302231201259.
- [6] A. Nofriandi, A. Frinaldi, D. Lanin, I. Dewata, and D. Rahmadani, "Heavy Metals Contamination and the Evolution of Environmental Policy : A Comprehensive Bibliometric Reviews," vol. 7, no. 1, pp. 9–24, 2024.
- [7] F. Rozi, S. Husin, and R. Rembrandt, "Environmental Management and Monitoring Efforts in Achieving Sustainable Development at PT Japfa Comfeed Indonesia," *Interdiscip. Soc. Stud.*, vol. 1, no. 6, pp. 685–697, 2022, doi: 10.55324/iss.v1i6.144.
- [8] S. R. Laha, B. K. Pattanayak, and S. Pattnaik, "Advancement of Environmental Monitoring System Using IoT and Sensor: A Comprehensive Analysis," *AIMS Environ. Sci.*, vol. 9, no. 6, pp. 771–800, 2022, doi: 10.3934/environsci.2022044.
- [9] K. Sharma and S. K. Shivandu, "Integrating artificial intelligence and Internet of Things (IoT) for enhanced crop monitoring and management in precision agriculture," *Sensors Int.*, vol. 5, no. August, p. 100292, 2024, doi: 10.1016/j.sintl.2024.100292.
- [10] I. Essamlali, H. Nhaila, and M. El Khaili, "Advances in machine learning and IoT for water quality monitoring: A comprehensive review," *Heliyon*, vol. 10, no. 6, p. e27920, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e27920.
- [11] A. T. Lawal, "Recent developments in electrochemical sensors based on graphene for bioanalytical applications," *Sens. Bio-Sensing Res.*, vol. 41, no. July, p. 100571, 2023, doi: 10.1016/j.sbsr.2023.100571.
- [12] C. Collins, D. Dennehy, K. Conboy, and P. Mikalef, "Artificial intelligence in information systems research: A systematic literature review and research agenda," *Int. J. Inf. Manage.*, vol. 60, no. June, p. 102383, 2021, doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2021.102383.
- [13] A. Bin Rashid and M. A. K. Kausik, "AI revolutionizing industries worldwide: A comprehensive overview of its diverse applications," *Hybrid Adv.*, vol. 7, no. August, p. 100277, 2024, doi: 10.1016/j.hybadv.2024.100277.
- [14] S. Subramaniam *et al.*, "Artificial Intelligence Technologies for Forecasting Air Pollution and Human Health: A Narrative Review," *Sustain.*, vol. 14, no. 16, pp. 1–36, 2022, doi: 10.3390/su14169951.

- [15] A. Cernat, A. Groza, M. Tertis, B. Feier, O. Hosu-Stancioiu, and C. Cristea, “Where artificial intelligence stands in the development of electrochemical sensors for healthcare applications-A review,” *TrAC - Trends Anal. Chem.*, vol. 181, no. PB, p. 117999, 2024, doi: 10.1016/j.trac.2024.117999.
- [16] T. Wasilewski, W. Kamysz, and J. Gębicki, “AI-Assisted Detection of Biomarkers by Sensors and Biosensors for Early Diagnosis and Monitoring,” *Biosensors*, vol. 14, no. 7, 2024, doi: 10.3390/bios14070356.
- [17] G. Goumas, E. N. Vlachothanasi, E. C. Fradelos, and D. S. Mouliou, “Biosensors, Artificial Intelligence Biosensors, False Results and Novel Future Perspectives,” *Diagnostics*, vol. 15, no. 8, pp. 1–66, 2025, doi: 10.3390/diagnostics15081037.
- [18] M. Javaid, A. Haleem, R. Pratap, S. Rab, and R. Suman, “Significance of sensors for industry 4.0: Roles, capabilities, and applications,” *Sensors Int.*, vol. 2, no. May, p. 100110, 2021, doi: 10.1016/j.sintl.2021.100110.
- [19] I. Ullah, D. Adhikari, X. Su, F. Palmieri, C. Wu, and C. Choi, “Integration of data science with the intelligent IoT (IIoT): current challenges and future perspectives,” *Digit. Commun. Networks*, vol. 11, no. 2, pp. 280–298, 2024, doi: 10.1016/j.dcan.2024.02.007.
- [20] N. Donthu, S. Kumar, D. Mukherjee, N. Pandey, and W. M. Lim, “How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines,” *J. Bus. Res.*, vol. 133, no. May, pp. 285–296, 2021, doi: 10.1016/j.jbusres.2021.04.070.
- [21] O. Öztürk, R. Kocaman, and D. K. Kanbach, “How to design bibliometric research: an overview and a framework proposal,” *Rev. Manag. Sci.*, vol. 18, no. 11, pp. 3333–3361, 2024, doi: 10.1007/s11846-024-00738-0.
- [22] I. Passas, “Bibliometric Analysis: The Main Steps,” *Encyclopedia*, vol. 4, no. 2, pp. 1014–1025, 2024, doi: 10.3390/encyclopedia4020065.
- [23] K. Chakraborty, K. Mukherjee, S. Mondal, and S. Mitra, “A systematic literature review and bibliometric analysis based on pricing related decisions in remanufacturing,” *J. Clean. Prod.*, vol. 310, no. May, p. 127265, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127265.
- [24] M. A. Rojas-Sánchez, P. R. Palos-Sánchez, and J. A. Folgado-Fernández, *Systematic literature review and bibliometric analysis on virtual reality and education*, vol. 28, no. 1. Springer US, 2023. doi: 10.1007/s10639-022-11167-5.