

Analisis Bibliometrik: Tren Penelitian Pengolahan Limbah Cair 2019-2024

Bibliometric Analysis: Trends In Research In Wastewater Treatment 2019-2024

Muhammad Aidil Fitrah ^{1)*}, Ayudhia Rachmawati ²⁾, Syamsir Syamsir ³⁾

^{1, 2, 3)}Departemen Kesehatan Lingkungan, Fakultas Kesehatan Masyarakat, Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia

Abstrak

Pengolahan limbah cair merupakan masalah lingkungan utama yang telah mendapatkan perhatian besar dalam penelitian ilmiah karena dampaknya terhadap kesehatan masyarakat dan lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi tren penelitian dalam bidang pengolahan limbah cair selama lima tahun terakhir (2019-2024) untuk memberikan rekomendasi perkembangan riset tentang pengolahan limbah cair dimasa mendatang. Data diperoleh dari basis data artikel ilmiah Google Scholar, Sqopus, dan PubMed. Penelusuran menggunakan aplikasi Publish or Perish dengan kata kunci wastewater treatment dan dianalisis menggunakan VOSviewer. Hasil analisis menunjukkan peningkatan signifikan dalam jumlah publikasi pada tahun 2020, diikuti oleh penurunan hingga tahun 2024. Topik utama dan terbaru yang muncul meliputi *photocatalytic degradation*, *antibiotik*, *microplastic*, *ARGs*, *microalga*, dan *energy recovery*. Temuan ini memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk merumuskan kebijakan, inovasi teknologi, serta pendekatan preventif sekaligus memberikan saran kepada peneliti dalam melakukan kajian penelitian yang mengarah pada topik-topik tersebut dimasa mendatang

Kata kunci: Bibliometrik; Degradasi Fotokatalik; Mikroplastik; Teknologi; Pengolahan Limbah Cair

Abstract

Wastewater treatment is a major environmental issue that has received considerable attention in scientific research due to its impact on public health and the environment. This study aims to identify research trends in wastewater treatment over the past five years (2019-2024) to provide recommendations for future research developments in wastewater treatment. Data were obtained from Google Scholar, Scopus, and PubMed scientific article databases. The search used the Publish or Perish application with the keyword wastewater treatment and was analyzed using VOSviewer. The analysis results show a significant increase in publications in 2020, followed by a decrease until 2024. The latest emerging topics include *photocatalytic degradation*, *antibiotics*, *microplastics*, *ARGs*, *microalgae*, and *energy recovery*. These findings provide a strong scientific basis for formulating policies, technological innovations, and preventive approaches, as well as advising researchers in conducting research studies that lead to these topics in the future.

Keywords: Bibliometric, microplastic; photocatalytic degradation, wastewater,; Wastewater Treatment

1. Pendahuluan

Pengelolaan limbah cair merupakan isu penting dalam kesehatan lingkungan dan masyarakat, terutama di sektor konstruksi dan industri. Limbah cair yang berasal dari berbagai aktivitas produksi, seperti pencampuran bahan, aplikasi, pembersihan peralatan, limpasan dari curah hujan, dan pelepasan zat konstruksi, memiliki potensi besar untuk mencemari permukaan tanah dan lingkungan secara umum ¹. Tidak hanya di sektor konstruksi, limbah cair dari operasi industri dan kegiatan domestik juga menjadi sumber polusi yang signifikan. Limbah ini, dengan karakteristiknya yang berbahaya, berpotensi mencemari badan air dan lingkungan darat, menghadirkan tantangan serius dalam pengelolaan limbah yang efektif ². Permasalahan terkait dengan pencemaran limbah cair banyak dialami oleh berbagai kota di negara berkembang, dimana terdapat rata-rata 30-70 mm³ limbah cair per orang per tahun. Indonesia,

menjadi salah satu negara dengan permasalahan pengelolaan limbah cair domestik. Terdapat jumlah *grey water* yang tidak diolah sebanyak 3 hingga 6 kali lebih tinggi dibandingkan dengan *black water* yang tidak diolah. Kondisi tersebut berdampak langsung pada kejadian degradasi badan air^{3,4}

Masalah ini semakin mendesak mengingat sebagian kecil populasi dunia, sekitar 10%, masih kekurangan akses air minum yang aman, yang berkontribusi pada sekitar 1 juta kematian setiap tahun, termasuk 300.000 di antaranya adalah anak-anak⁵. Dampak dari akses air yang layak dapat berperan dalam meningkatkan sanitasi, air minum yang aman yang mana dapat menurunkan morbiditas dan mortalitas bayi baru lahir. Selain itu, juga dapat mencegah terjadinya berbagai penyakit seperti diare, schistosomiasis, filariasis, trachoma yang berperan menyebabkan 1.6 juta kematian pertahun⁶. Kondisi ini diproyeksikan akan memburuk dalam beberapa dekade mendatang, dengan setengah populasi dunia berisiko mengalami kelangkaan air yang signifikan akibat sebagian sumber air tercemar oleh limbah.

Pengolahan limbah cair tidak hanya terbatas pada cemaran konvensional tetapi juga mencakup limbah berbahaya seperti radioaktif yang berasal dari kegiatan industri dan medis. Pengelolaan limbah radioaktif yang terpadu sangat penting untuk melindungi kesehatan manusia dan lingkungan⁷. Oleh karena itu, penelitian yang masih berfokus pada cemaran umum perlu diperluas untuk cakupannya dalam pengembangan solusi dan teknologi canggih dalam pengolahan limbah cair.

Dalam kerangka ini, analisis bibliometrik mengambil peran penting dalam mengkaji kedalaman dan kemajemukan suatu penelitian. Bibliometri merupakan metode sistematis untuk evaluasi kuantitatif publikasi ilmiah dan dampaknya dalam komunitas akademik, meliputi analisis dinamika kolaborasi, tren yang muncul, output penelitian, dan metrik tambahan yang berasal dari database bibliografi seperti Scopus, Google Scholar, dan Web of Science. Melalui penerapan sistem integrasi data, bibliometri memfasilitasi pengumpulan dan analisis data dalam jumlah besar yang diproduksi setiap hari dalam database ilmiah,. Hal ini memberikan wawasan penting bagi para akademisi, lembaga, dan pembuat kebijakan untuk memahami produktivitas ilmiah, membedakan tren, dan merumuskan strategi yang lebih informatif terkait upaya penelitian dimasa yang akan datang⁸.

Peranan penting analisis bibliometrik adalah upaya penilaian kuantitatif publikasi dan pengaruhnya dalam komunitas ilmiah, yang mana melibatkan pemeriksaan pola kolaborasi, tren yang muncul, *output* penelitian, dan indikator lainnya yang diperoleh dari berbagai *database* bibliografi seperti Scopus, Google Scholar, dan Web of Science. Melalui menggunakan sistem integrasi data, bibliometrik memungkinkan pengumpulan dan analisis data dalam jumlah besar yang diproduksi setiap hari dalam database ilmiah. Evaluasi ini memberikan wawasan berharga bagi peneliti, organisasi, dan pembuat kebijakan untuk memahami output ilmiah, mengidentifikasi tren, dan membuat keputusan yang lebih terinformasi terkait upaya penelitian di masa depan^{8,9}.

Adapun penelitian literatur ilmiah terkait pengelolaan limbah cair dapat memberikan wawasan mendalam mengenai keadaan penelitian saat ini. Tinjauan literatur ini bertujuan untuk mengidentifikasi pola dalam penelitian dan kolaborasi, tema-tema utama dalam studi pengelolaan limbah cair, serta perkembangan teknologi yang akan datang di bidang pengelolaan limbah cair. Melalui analisis ini, pemahaman yang lebih komprehensif tentang pengelolaan limbah cair dapat diperoleh, yang mana dapat menjadi dasar bagi para praktisi, peneliti, dan pembuat kebijakan dalam menetapkan langkah-langkah yang sesuai dan diperlukan.

2. Metode

Metode yang digunakan penelitian ini adalah *literature review* dimana menggunakan analisis bibliometrik. Bibliometrik merupakan metode untuk memetakan informasi ilmiah secara kuantitatif dalam literatur. Metode yang digunakan melibatkan analisis pola publikasi, kutipan, dan kolaborasi. Sehingga melalui metode analisis tersebut dapat dimanfaatkan dalam mengamati visualisasi perkembangan penelitian dimasa mendatang^{8,10}.

Analisis bibliometrik dimulai dengan penggunaan aplikasi *reference manager Harzing's Publish or Perish* (PoP) guna mendapatkan data sebaran artikel dari suatu sumber (database tertentu). Terdapat berbagai sumber metadata yang diambil dari jurnal tersinkronisasi dengan Google Scholar, Scopus, dan PubMed. Selanjutnya informasi diproses dan diperiksa secara bersamaan menggunakan Mendeley yang berfokus pada bagian abstrak dan kata kunci. Setelah langkah ini, visualisasi data dari artikel dilakukan melalui format jaringan, menggunakan aplikasi perangkat lunak VOSviewer.

Pada tahap pencarian artikel dalam aplikasi PoP menggunakan kata kunci "*wastewater treatment*" dengan penelusuran pada periode 2019 hingga 2024. Proses pencarian artikel berlangsung pada 08 Agustus 2024. Alasan pemilihan database Google Scholar sebagai sumber utama dalam koleksi jurnal terletak pada antarmuka yang ramah pengguna untuk pencarian jurnal, dimana banyaknya artikel yang

dapat diakses termasuk artikel tanpa berbayar. Meskipun database Google Scholar mengizinkan batas pencarian maksimum 1000 artikel, maka pengguna memiliki opsi untuk memasukkan nilai lebih rendah dari 1000 yang mana berisiko pada hasil yang kurang detil. Scopus dan PubMed juga digunakan untuk memfasilitasi eksplorasi jurnal internasional terkemuka. Selanjutnya, data yang diambil dari segmen metrik kutipan, dengan menyajikan informasi secara kuantitatif dan komprehensif. Data yang terkumpul disimpan dalam format terstruktur untuk analisis lanjutan.

Perangkat lunak VOSViewer digunakan untuk analisis tren publikasi mengenai perkembangan penelitian dibidang pengolahan limbah cair. Output yang dihasilkan melalui pemrosesan data meliputi visualisasi jaringan, visualisasi *overlay*, dan visualisasi kepadatan. Peta visualisasi jaringan memainkan peran penting dalam memvisualisasikan interkoneksi dan pengelompokan topik penelitian terkait kata kunci. Di sisi lain, visualisasi *overlay* berfungsi dalam menentukan tahun tertentu di mana tema penelitian tertentu diperiksa. Terakhir, visualisasi kepadatan diterapkan untuk meneliti topik penelitian yang telah mendapat perhatian luas serta topik yang masih relatif kurang diteliti.

3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini menggambarkan tren kepenulisan terhadap topik penelitian pengolahan limbah yang menggunakan alat PoP dan VOSViewer, dengan data yang bersumber dari repositori seperti Google Scholar, Scopus, dan PubMed, kemudian diimpor ke Mendeley. Berdasarkan hasil evaluasi bibliometrik akan menampilkan informasi, antara lain: 1) Analisis data sitasi dari PoP, 2) Tren penelitian mengenai pengolahan limbah cair kurung waktu 5 tahun terakhir (2019-2024), 3) Jaringan topik penelitian pengolahan limbah cair, 4) Klaster penelitian kesehatan mental, untuk penjelasan lebih rinci dapat dipahami dari uraian berikut ini.

Analisis Data Sitasi

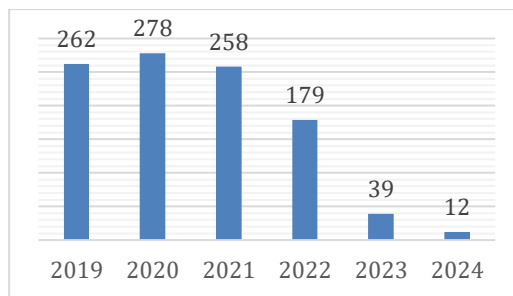
Tabel 1. Metrik Data Sitasi (sumber PoP)

Publication years	2019-2024
Citation years	5 (2019-2024)
Papers	1000
Citations	105416
Cites/year	21083.20
Cite/paper	28198.19
Cites/author	256.55
Author/paper	4.54
h-index	158
g-index	238
hI, norm	69
hI, annual	13.80
hA-index	72
Paper with ACC > = 1,2,5,10,20,997,992,980,906,549	

Sumber : Analisis Data Publish or Perish (2024)

Dari tabel 1 dapat dideskripsikan bahwa selama 5 tahun terakhir terdapat 1000 artikel yang relevan dengan kata kunci “wastewater treatment” memiliki paper penuh, abstrak, serta kata kunci yang ditampilkan di basis data scopus. Total jumlah sitasi dari semua artikel 105416 dengan jumlah rata-rata sitasi pertahun 21083.20 dan rata-rata sitasi per paper adalah 28198.19, Rata-rata h-index yang memiliki oleh setiap penulis adalah 158, dengan jumlah kutipan tertinggi adalah 238.

Tren penelitian pengolahan limbah cair 5 tahun terakhir (2019-2024)



Grafik 1. *Tren penelitian pengolahan limbah cair.*
Sumber : Hasil Analisis Data VOSviewer (2024)

Grafik tersebut menggambarkan tren penelitian dalam pengolahan limbah cair dari tahun 2019 hingga 2024 berdasarkan analisis data menggunakan VOSviewer. Jumlah publikasi mencapai puncaknya pada tahun 2020 dengan 278 artikel, mencerminkan peningkatan signifikan yang mungkin dipicu oleh meningkatnya kesadaran global terhadap isu-isu lingkungan dan kebutuhan mendesak akan solusi baru dalam pengolahan limbah cair. Namun, setelah tahun 2020, tren ini mengalami penurunan bertahap, dengan 258 publikasi pada tahun 2021 dan hanya 179 publikasi pada tahun 2022. Penurunan ini menjadi lebih drastis pada tahun 2023 dan 2024, dengan hanya 39 dan 12 publikasi masing-masing.

Penurunan yang signifikan dapat disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk pergeseran minat penelitian, perubahan fokus ke area lain, atau dampak dari tantangan global yang memengaruhi aktivitas penelitian secara keseluruhan salah satunya perhatian global yang meningkat terhadap COVID-19 yang menyebabkan pergeseran fokus penelitian dari topik-topik yang sebelumnya menjadi prioritas, seperti pengolahan limbah cair, ke penelitian yang lebih langsung berkaitan dengan pandemi, seperti pengembangan vaksin, studi epidemiologi, dan analisis dampak pandemi terhadap masyarakat. Meskipun demikian, penurunan jumlah publikasi juga dapat dilihat sebagai peluang untuk penelitian lebih lanjut, terutama pada topik yang belum sepenuhnya dieksplorasi atau diintegrasikan dalam penelitian sebelumnya. Secara keseluruhan, data ini menunjukkan perlunya pembaruan fokus penelitian agar tetap relevan dan dapat berkontribusi pada pengembangan solusi inovatif dan berkelanjutan dalam pengelolaan limbah cair.

Tabel 2. Peringkat Kata kunci yang digunakan dalam artikel.

term	occurrences	relevance score
wastewater treatment	639	0.0495
wastewater	435	0.0358
treatment	295	0.0499
wastewater treatment plant	189	0.5769
review	186	0.1435
removal	170	0.1033
application	149	0.1956
process	119	0.1062
study	116	0.1507
water	93	0.2262

Sumber : Hasil Analisis Data VOSviewer (2024)

Tabel 2 menampilkan hasil analisis bibliometrik terhadap kata kunci yang paling sering digunakan dalam artikel tentang pengolahan limbah cair. Kata kunci "wastewater treatment" muncul paling dominan dengan 639 kemunculan, diikuti oleh "wastewater" (435 kemunculan) dan "treatment" (295 kemunculan) untuk menegaskan fokus utama penelitian pada topik ini. "Wastewater treatment plant" mencatat 189 kemunculan dengan skor relevansi tertinggi (0,5769), menunjukkan kepentingannya sebagai area penelitian. Kata kunci lain seperti "review" (186 kemunculan) dan "removal" (170 kemunculan)

mengindikasikan banyaknya penelitian yang berfokus pada tinjauan literatur dan metode penghilangan polutan. Secara keseluruhan, tabel ini menggambarkan tema utama yang mendominasi penelitian di bidang pengolahan limbah cair dan menyoroti area yang paling relevan untuk dikaji lebih lanjut.

Tabel 3. Identifikasi pembagian klaster

<i>Klaster</i>	<i>Total Item</i>	<i>Most frequent keywords (occurrences)</i>	<i>Keyword</i>
1	53	Wastewater treatment (639), wastewater (435), treatment (295), application (149)	Adsorbent, advance ocidation process, antibiotic wastewater, aop, application, catalyst, combination, composite, compound, degradation, dye, dye wastewater, dye wastewater treatment, example. Fabrication, fenton, field, kinetic, mechanism, nanocomposite, nanomaterial, nanoparticle, organic wasteawater, organic wastewater treatment, overview, oxidation process, pharmaceutical wastewater, photocatalysis, photocatalyst, photocatalytic wastewater treatment, pollutant, potencial application, practical wastewater treatment, property, purification, real wastewater, recent advance, recent progress, recenty year, synergistic effect, synthesis, textile. Tio, tio2, toxicity, visible light irradiation, waste water treatment, wastewater remediation, wastewater treatment, wastewater treatment application
2	45	Review (186), membrane (86), technology (75)	Advance, advantage, bio, biological wastewater treatment, challenge, characterization, critical review, desalinationn, development, graphene oxide, industrial effluent, industrial wastewater, industrial wastewater treatment, industry, membrane, membrane fouling, membrane technology, modification, nanofiltration, oil, oil wastewater, oil wastewater treatment, opportunity, order, polluted water, potensial, practical application, preparation, principle, prospect, recent development, recovery, remeditation, researcher, reuse, review, salt, separation, strategy, technology, textile wastewater, treatment method, utilization, wastewater treatment method, water treatment.
3	44	System (82), effluent (46), effect (43)	Acticated sludge, advanced treatment, advancce wastewater treatment, antibiotic, antibiotic resistance, gene, approach, args, article, bacterium, batch, biological treatment, coking wastewater, composition, condition, contaminant, covid, discharge, disinfection, effect, evaluation, experiment, hospital wastewater, impact, knowledge, life cycle assesment, main source, need, ozonation, persulfate, pilot scale, presence, sars cov,

<i>Klaster</i>	<i>Total Item</i>	<i>Most frequent keywords (occurrences)</i>	<i>Keyword</i>
			secondary effluent, sulfate, system, term, textile industry wastewater, treatment, urban wastewater treatment, wastewater effluent, wastewater sample.
4	44	Wastewater treatment plan (189), wwtp (76), municipal wastewater treatment (43)	Amount, artificial intelligence, assesment, biological process, case study, china, circular economy, city, comparison, concentration, conventional treatment, cost, cost analysis, country, data, electrocoagulation, energy consumption, formation, implication, influent, integration, investigation, iron, low cost, municipal wastewater, municipal wastewater treatment, municipal wastewater treatment plan, wwtp.
5	34	Removal (170), water (93), technique (37)	Addition, art, coagulant, coagulation, concern, conventional wastewater treatment, conventional waste water treatment plant, disposal, domestic wastewater, environment, flocculation, focus, heavy metal, metal, microplastic, model, natural coagulant, nutrient, plant, removal, role, source, state, technique, treatment plant, treatment process, type, use, wastewater treatment system, wastewater treatment technique, water, work.
6	29	Process (119), textile wastewater treatment (32), removal efficiency (21)	Ability, alternative, anaerobic membran bioreactor, characteristic, chemical, coagulation flocculation, cod, comprehensive review, cultivation, effective treatment, efficiency, effluent treatment, feasibility future perspective, literature, membran bioreactor, microalgae, microalgae cultivation, perspective, process, real textile wastewater, real textile wastewater treatment, recent advancement, removal efficiency, stage, step, textile wastewater treatment, treatment system, treatment technology.
7	26	Performance (88), wastewater treatment process (71), production (50)	Ammonia, eco, effectiveness, electricity, electricity generation, energy, energy recovery, environmental impact, generation, important role, mfc, microbial fuel cell, microorganism, nitrogen, nitrogen removal, nutrient recovery, optimization, performance, production, swine wastewater, wastewater treatment facility, wastewater treatment process, wastewater treatment technology, wetland.
8	16	Study (116), adsorption (42), carbon (22)	Adsorption, aquatic environment, biochar, carbon, fate, insight, machine, machine learning, occurrence, personal care product,

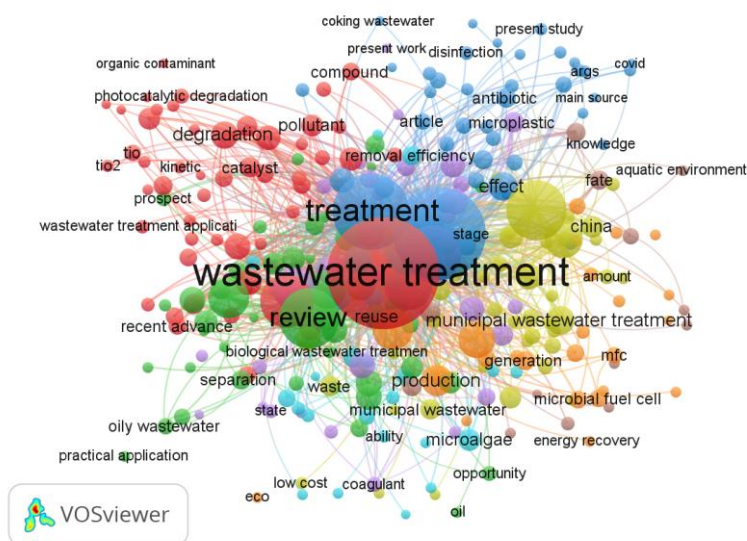
<i>Klaster</i>	<i>Total Item</i>	<i>Most frequent keywords (occurrences)</i>	<i>Keyword</i>
			<i>pharmaceutical, ppcp, promising technology, selection, study, sustainable wastewater treatment,</i>

Sumber : Hasil Analisis Data VOSviewer (2024)

Tabel 3 menunjukkan pengelompokan kata kunci yang sering muncul dalam penelitian pengolahan limbah cair ke dalam delapan klaster utama, masing-masing dengan topik atau tema yang berbeda. Klaster pertama memiliki 53 item dengan kata kunci yang paling sering muncul seperti "wastewater treatment" dan "wastewater," yang menunjukkan fokus pada proses pengolahan limbah, penggunaan katalis, dan teknologi terkait seperti fotokatalisis. Klaster kedua terdiri dari 45 item dengan kata kunci dominan seperti "review" dan "membrane," yang menunjukkan perhatian pada teknologi membran dan aplikasinya dalam pengolahan limbah. Klaster ketiga berisi 44 item yang berfokus pada sistem pengolahan, dengan perhatian khusus pada "effluent" dan efek berbagai proses terhadap lingkungan. Klaster keempat terdiri dari 44 item, dengan fokus utama pada pengolahan air limbah perkotaan dan perencanaan fasilitas pengolahan limbah. Klaster kelima, dengan 34 item, mengedepankan teknik-teknik untuk "removal" atau penghilangan polutan, terutama dalam konteks pengolahan air dan limbah domestik. Klaster keenam yang memiliki 29 item berfokus pada proses pengolahan air limbah tekstil dan efisiensi penghilangan polutan. Klaster ketujuh, yang terdiri dari 26 item, membahas tentang kinerja dan proses pengolahan limbah, termasuk pemulihan energi dari air limbah. Terakhir, klaster kedelapan dengan 16 item berfokus pada "adsorption" dan penggunaan karbon, yang relevan dengan teknologi yang menjanjikan dalam pengolahan limbah yang berkelanjutan. Tabel ini memberikan gambaran yang komprehensif tentang berbagai pendekatan dan topik penelitian yang sedang berkembang dalam bidang pengolahan limbah cair.

Topik penelitian pengolahan limbah cair

Jaringan antar-topik ditemukan melalui studi yang berfokus pada isu-isu yang berkaitan dengan pengolahan limbah cair. Jumlah total topik yang diidentifikasi mencapai 1000 artikel yang mencakup dari 2019 hingga 2024. Analisis menggunakan bibliometrik dilakukan mencakup visualisasi jaringan VOSViewer yang spesifik. Visualisasi jaringan antar topik dengan kata kunci yang diilustrasikan pada gambar 3. Klaster bibliometrik ini dengan cermat memetakan visual, menawarkan wawasan mendalam sementara klaster memberikan perspektif yang luas. Setiap node melambangkan kata kunci yang sering terjadi, dengan ukurannya mencerminkan hubungannya dengan artikel lain tentang subjek. tren penelitian mengenai pengolahan limbah cair selama lima tahun terakhir dapat dianalisis melalui visualisasi jaringan berikut ini.



Gambar 1. Visualisasi jaringan antar topik penelitian.

Pada gambar 1. Visualisasi yang dihasilkan menggunakan vosviewer memperlihatkan kata kunci yang sering muncul dan hubungan antar kunci disetiap literatur ilmiah, gambar ini menunjukkan identifikasi klaster yang menggambarkan sub-tema dominan dalam bidang ini. Klaster merah, yang berpusat pada kata kunci seperti "photocatalytic degradation" dan "pollutant degradation," menunjukkan fokus penelitian yang signifikan pada penggunaan teknologi fotokatalitik untuk menguraikan polutan dalam air limbah. Teknologi ini merupakan salah satu pendekatan yang berkembang pesat dalam pengolahan air limbah, terutama karena potensinya untuk mengatasi berbagai jenis polutan organik yang sulit diolah dengan metode konvensional¹¹.

Penerapan teknologi photocatalytic degradation menjadi hal baru yang diperbincangkan dalam mengurangi risiko kesehatan yang terkait dengan paparan polutan dalam air limbah, khususnya dalam masyarakat yang bergantung pada sumber air yang tidak diolah secara memadai. Polutan organik yang tetap terurai menimbulkan ancaman signifikan berupa kontaminasi air tanah dan air permukaan, sehingga meningkatkan risiko penyakit yang ditularkan melalui air, termasuk diare, kolera, dan hepatitis A. Oleh karena itu, menyelidiki metode untuk meningkatkan efisiensi pengolahan polutan dalam air limbah sangat relevan bagi kesehatan masyarakat, khususnya di wilayah dengan infrastruktur sanitasi yang terbatas¹².

Pada klaster hijau menyoroti penelitian yang berkaitan dengan pengolahan air limbah secara biologis, seperti yang ditunjukkan oleh kata kunci "biological wastewater treatment" dan "separation." Ini mencerminkan minat yang meningkat dalam menggunakan proses biologis untuk menguraikan bahan organik dalam air limbah, yang dianggap lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan dibandingkan dengan teknik pengolahan kimia atau fisik¹³. Teknik pemisahan yang efektif dalam pengolahan ini juga menjadi fokus utama, karena kemampuan untuk memisahkan polutan dari air limbah sangat menentukan keberhasilan pengolahan.

Sistem biological wastewater treatment ini dapat mengurangi polusi air sekaligus berkontribusi pada konservasi ekosistem perairan dan menjaga sumber daya air tawar. Penerapan teknik pemisahan polutan yang efektif juga sangat penting dalam domain ini, karena kemampuan pemisahan yang ditingkatkan secara signifikan meningkatkan efisiensi sistem sanitasi dan mengurangi dampak buruk limbah terhadap integritas lingkungan dan kesehatan manusia.

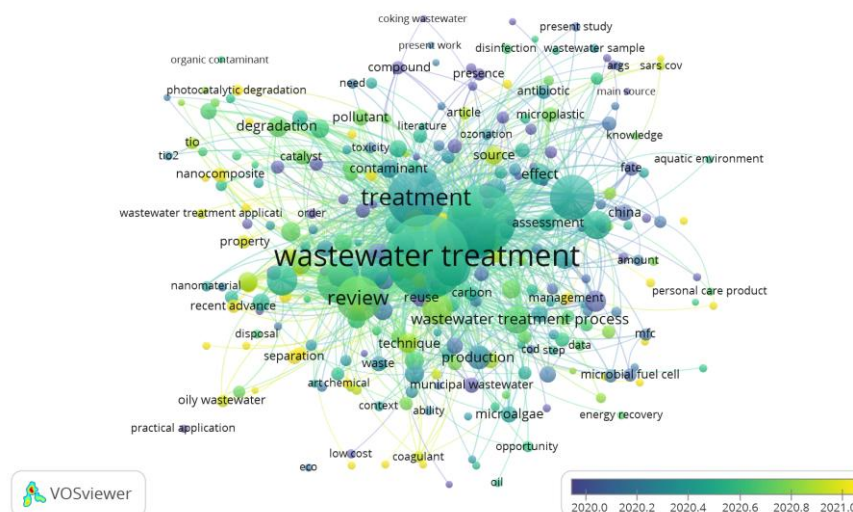
Selain itu, klaster biru menampilkan perhatian yang signifikan terhadap isu "antibiotic" dan "microplastic," yang mencerminkan kekhawatiran global terkait dengan kontaminasi air oleh bahan-bahan ini. antibiotik dalam air limbah dapat berkontribusi pada perkembangan resistensi antimikroba, sebuah tantangan besar dalam bidang kesehatan Masyarakat¹⁴. Sementara itu, mikroplastik telah menjadi ancaman lingkungan yang serius karena ukurannya yang kecil memungkinkan mereka untuk memasuki rantai makanan akuatik, dengan potensi dampak negatif yang luas¹⁵.

Dampak potensial mikroplastik terhadap kesehatan manusia melalui rantai makanan sangat signifikan. Mikroplastik yang menyusup ke ekosistem perairan dapat terakumulasi secara biologis dalam organisme perairan, yang selanjutnya menyebabkan konsumsi manusia dan menimbulkan risiko berbagai masalah kesehatan, termasuk disfungsi organ, gangguan metabolisme, dan perubahan respons imun. Oleh karena itu, sangat penting untuk melakukan penelitian yang berfokus pada metodologi pengolahan limbah yang bertujuan untuk mengurangi kadar antibiotik dan mikroplastik, karena hal ini penting untuk mengurangi konsekuensi kesehatan masyarakat yang terkait dengan pencemaran air limbah¹⁶.

Selain permasalahan polutan, ada klaster yang berfokus pada "microalgae" dan "energy recovery," mengindikasikan adanya penelitian yang mencoba mengintegrasikan pendekatan berkelanjutan ke dalam sistem pengolahan air limbah. Penggunaan mikroalga dalam pengolahan air limbah tidak hanya bertujuan untuk mengurangi polutan tetapi juga untuk memanfaatkan biomassa mikroalga sebagai sumber energi terbarukan¹⁷. Inovasi ini mencerminkan integrasi teknologi pengolahan limbah yang berorientasi pada pemanfaatan kembali sumber daya dapat membantu mengurangi dampak lingkungan serta meningkatkan efisiensi pengelolaan air dan energi. Dengan demikian, penelitian dalam bidang ini berkontribusi pada pengembangan sistem sanitasi yang lebih berkelanjutan dan mendukung kebijakan pengelolaan air limbah yang selaras dengan prinsip kesehatan masyarakat dan lingkungan.

Secara keseluruhan, visualisasi ini menggambarkan temuan-temuan penelitian terhadap teknologi pengolahan air limbah tidak hanya difokuskan pada peningkatan efektivitas penghilangan polutan; tetapi juga membawa konsekuensi signifikan bagi kesehatan manusia, kualitas lingkungan, dan kebijakan sanitasi global. Oleh karena itu, penelitian di masa mendatang harus terus dilakukan untuk mengembangkan inovasi yang dapat meningkatkan standar sanitasi dan mengurangi risiko kesehatan yang terkait dengan limbah cair.

Topik penelitian dari waktu ke waktu



Gambar 2. Visualisai overlay tren penelitian berdasarkan keyword .

Hasil visualisasi *overlay* gambar 2 menunjukkan perkembangan penelitian di bidang pengolahan air limbah dan mengidentifikasi area penelitian yang sedang berkembang, serta memiliki potensi untuk studi lebih lanjut. visualisasi *overlay* ini membantu peneliti memahami evolusi penelitian di bidang pengolahan air limbah dan mengidentifikasi area penelitian yang sedang berkembang, serta memiliki potensi untuk studi lebih lanjut¹⁸.

Pada gambar 2. *Overlay visualization* analisis bibliometrik memberikan wawasan mendalam tentang tren penelitian terbaru dalam pengolahan air limbah (*wastewater treatment*). Kata kunci yang muncul dalam warna kuning dan hijau muda menunjukkan fokus penelitian terkini yang mencerminkan tantangan dan inovasi terbaru dalam bidang ini. Salah satu temuan penting adalah munculnya klaster terkait dengan antibiotik dan mikroplastik, yang telah menjadi polutan yang mendapat perhatian global dalam beberapa tahun terakhir. Hal ini terutama disebabkan oleh dampaknya terhadap ekosistem akuatik dan kesehatan manusia. Klaster ini menunjukkan bahwa penelitian terbaru berfokus pada pemantauan, pengelolaan, dan mitigasi kontaminan mikro ini dalam sistem pengolahan air limbah. Penelitian ini sangat relevan mengingat kemampuan antibiotik dan mikroplastik untuk bertahan dalam proses pengolahan air limbah konvensional, serta potensinya untuk menyebar ke lingkungan dan masuk ke rantai makanan^{15,17}.

Selain itu, pada tahun 2019-2021 terjadi pandemi COVID-19 yang mendorong penelitian baru dalam memanfaatkan air limbah sebagai alat surveilans epidemiologis. Klaster yang berhubungan dengan "COVID" menunjukkan minat yang semakin meningkat dalam mengembangkan metode untuk mendeteksi SARS-CoV-2 dalam air limbah sebagai cara untuk melacak penyebaran virus di populasi ^{14,19}.

Lebih lanjut, munculnya gen resistensi antibiotik (ARGs) dalam kluster terbaru menandakan adanya peningkatan penelitian terhadap bagaimana sistem pengolahan air limbah yang menyebabkan resistensi antimikroba (AMR). Menurut CDC (2021), penyebaran gen resistensi antibiotik (ARGs) melalui air limbah yang tidak terolah dengan baik dapat meningkatkan kejadian infeksi yang sulit diobati, yang pada akhirnya membebani sistem kesehatan masyarakat²⁰. Penelitian dalam area ini sangat mendesak, mengingat ancaman resistensi antibiotik yang semakin meningkat dan kebutuhan untuk mengembangkan teknologi pengolahan air limbah yang lebih efektif dalam mengurangi penyebaran ARGs²¹.

Dalam hal inovasi berkelanjutan, klaster yang mengandung kata kunci pemulihan energi dan mikroalga mengindikasikan arah baru dalam penelitian yang berfokus pada solusi pengolahan air limbah yang tidak hanya efektif tetapi juga berkelanjutan. Penelitian ini mengeksplorasi penggunaan mikroalga dalam proses bioremediasi, yang tidak hanya membersihkan air limbah tetapi juga menghasilkan biomassa yang dapat digunakan untuk produksi energi ¹⁷. Selain itu, pemulihan energi dari proses pengolahan air limbah menjadi fokus penting, mengingat kebutuhan untuk mengurangi jejak karbon dan meningkatkan efisiensi energi dalam pengelolaan limbah ²².

Dalam bidang kesehatan lingkungan, keberlanjutan pengolahan air limbah telah muncul sebagai bidang penelitian yang penting. penelitian terhadap bioremediasi yang menggunakan mikroalga menjadikan potensi pemanfaatan biomassa untuk pemulihan energi, sekaligus mengurangi beban polutan

yang ada dalam air limbah²³. Hal ini sejalan dengan konsep sanitasi berkelanjutan, yang bertujuan tidak hanya untuk menghilangkan polutan tetapi juga mengoptimalkan penggunaan kembali sumber daya, seperti air daur ulang dan energi dari biomassa.

Dengan demikian minat ilmiah terhadap klaster yang terkait dengan pengolahan air limbah yang berkelanjutan semakin meningkat. Tren ini menggarisbawahi kebutuhan mendesak untuk kemajuan teknologi pengolahan yang lebih efisien yang mampu mengatasi tantangan yang ditimbulkan oleh air limbah yang sangat terkontaminasi akibat operasi industri intensif. Pentingnya disinfeksi yang efektif sangat penting, khususnya dalam menjamin bahwa air limbah yang dibuang ke lingkungan bebas dari patogen dan kontaminan berbahaya lainnya²⁴.

4. Simpulan dan Saran

Studi bibliometrik ini dilakukan menggunakan basis data artikel selama lima tahun terakhir (2019-2024) berhasil mengungkapkan tren utama dari peta tematik pengolahan limbah cair. Walau penelitian terkait pengolahan limbah cair mengalami penurunan hingga tahun 2024. Terlihat fokus dominan terbaru terletak pada isu *photocatalytic degradation*, *antibiotik*, *microplastic*, *ARGs*, *microalga*, dan *energy recovery*. temuan ini memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk merumuskan kebijakan, inovasi teknologi, serta pendekatan preventif sekaligus memberikan saran kepada peneliti dalam melakukan kajian penelitian yang mengarah pada topik-topik tersebut.

5. Daftar Pustaka

1. Karunasena G, Gajanayake A, Wijeratne WMPU, Milne N, Udawatta N, Perera S, et al. Liquid waste management in the construction sector: a systematic literature review. *Int J Constr Manag.* 2024;24(1):86–96.
2. Balaji K, Sakthivel R, Tamilarasan N, Pranay P, Rishiyadhav G, Subrajith SP, et al. Overview of biodiesel production from liquid wastes. In: *Waste Valorization for Bioenergy and Bioproducts*. Elsevier; 2024. p. 251–81.
3. Edokpayi JN, Odiyo JO, Durowoju OS. Impact of wastewater on surface water quality in developing countries: a case study of South Africa. *Water Qual.* 2017;10(66561):10–5772.
4. Widayarani, Wulan DR, Hamidah U, Komarulzaman A, Rosmalina RT, Sintawardani N. Domestic wastewater in Indonesia: Generation, characteristics and treatment. *Environ Sci Pollut Res.* 2022;29(22):32397–414.
5. Zapata-Mendoza PCO, Berrios-Taucaya OJ, Tirado-Kulieva VA, Gonzales-Malca JA, Ricse-Reyes DR, Berrios-Zevallos AA, et al. Environmentally friendly technologies for wastewater treatment in food processing plants: a bibliometric analysis. *Sustainability.* 2022;14(22):14698.
6. Tarrass F, Benjelloun M. The effects of water shortages on health and human development. *Perspect Public Health.* 2012;132(5):240–4.
7. Rahman ROA, Ibrahim HA, Hung YT. Liquid radioactive wastes treatment: a review. *Water.* 2011;3(2):551–65.
8. Van Eck N, Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics.* 2010;84(2):523–38.
9. Tamtam S, Laguidi A, Elkalay A. Data integration systems and bibliometrics. In: *ITM Web of Conferences*. EDP Sciences; 2023. p. 1008.
10. de Sousa MNA, de Oliveira Almeida EP, Bezerra ALD. Bibliometrics: what is it? What is it used for? And how to do it? *Cuad Educ y Desarro.* 2024;16(2):e3042–e3042.
11. Feng R, Zheng H jun. Evidence for regional heterogeneous atmospheric particulate matter distribution in China: implications for air pollution control. *Environ Chem Lett.* 2019;17:1839–47.
12. Abd Elmohsen SA, Daigham GE, Mohamed SA, Sidkey NM. Photocatalytic degradation of biological contaminant (*E. coli*) in drinking water under direct natural sunlight irradiation using incorporation of green synthesized TiO₂, Fe₂O₃ nanoparticles. *Biomass Convers Biorefinery* 2024 155 [Internet]. 2024 Apr 27 [cited 2025 Apr 5];15(5):6713–34. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-024-05602-5>
13. Yada S, Nakajima Y, Itahashi S, Asada K, Yoshikawa S, Eguchi S. Procedure for rapid determination of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of nitrate: development and application to an irrigated rice paddy watershed. *Water Sci Technol.* 2016;73(9):2108–18.
14. Ahmed W, Angel N, Edson J, Bibby K, Bivins A, O'Brien JW, et al. First confirmed detection of SARS-CoV-2 in untreated wastewater in Australia: a proof of concept for the wastewater surveillance of COVID-19 in the community. *Sci Total Environ.* 2020;728:138764.

15. Barboza LGA, Gimenez BCG. Microplastics in the marine environment: current trends and future perspectives. *Mar Pollut Bull.* 2015;97(1–2):5–12.
16. Li Y, Tao L, Wang Q, Wang F, Li G, Song M. Potential Health Impact of Microplastics: A Review of Environmental Distribution, Human Exposure, and Toxic Effects. *Environ Heal* [Internet]. 2023 Oct 20 [cited 2025 Apr 5];1(4):249–57. Available from: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/envhealth.3c00052>
17. Olguín EJ. Dual purpose microalgae–bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a Biorefinery. *Biotechnol Adv.* 2012;30(5):1031–46.
18. Donthu N, Kumar S, Mukherjee D, Pandey N, Lim WM. How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *J Bus Res.* 2021;133:285–96.
19. Lodder W, de Roda Husman AM. SARS-CoV-2 in wastewater: potential health risk, but also data source. *Lancet Gastroenterol Hepatol.* 2020;5(6):533–4.
20. CDC. Understanding Antibiotic Resistance in Water | One Health | CDC [Internet]. CDC One Health. 2021 [cited 2025 Apr 5]. Available from: <https://www.cdc.gov/one-health/php/stories/understanding-antibiotic-resistance-in-water.html>
21. Rizzo L, Manaia C, Merlin C, Schwartz T, Dagot C, Ploy MC, et al. Urban wastewater treatment plants as hotspots for antibiotic resistant bacteria and genes spread into the environment: a review. *Sci Total Environ.* 2013;447:345–60.
22. Bell JNB, Power SA, Jarraud N, Agrawal M, Davies C. The effects of air pollution on urban ecosystems and agriculture. *Int J Sustain Dev World Ecol.* 2011;18(3):226–35.
23. Hasan HA, Muhamad MH, Ji B, Nazairi NA, Jiat KW, Sim SISWA, et al. Revolutionizing wastewater treatment with microalgae: Unveiling resource recovery, mechanisms, challenges, and future possibilities. *Ecol Eng.* 2023 Dec 1;197:107117.
24. Saleem F, Harris J, Zhang K, Harvey A. Non-thermal plasma as a promising route for the removal of tar from the product gas of biomass gasification–A critical review. *Chem Eng J.* 2020;382:122761.