

# Inovasi Teknologi Moving Bed Biofilm Reactor dalam Pengolahan Air Limbah: Kajian Bibliometrik

<sup>1</sup>Budirman\*, <sup>1</sup>Ain Khaer, <sup>2</sup>Setiawan Kasim

<sup>1</sup>Jurusan Kesehatan Lingkungan, Poltekkes Kemenkes Makassar, Makassar, Indonesia

<sup>2</sup>Fakultas Kesehatan, Universitas Patria Artha, Gowa, Indonesia

\*Penulis korespondensi: [budirman@poltekkes-mks.ac.id](mailto:budirman@poltekkes-mks.ac.id)

Info Artikel: Diterima bulan April 2025 ; Disetujui Bulan Mei 2025 ; Publikasi bulan Juni 2025

## ABSTRACT

Biofilm technology, particularly Moving Bed Biofilm Reactors (MBBR), has been recognized as an effective method for reducing wastewater pollution. Biofilm utilizes support media in biological reactors to support the growth of bacteria that break down various pollutants, including nitrogen compounds, carbon, pharmaceuticals, industrial chemicals, and other micropollutants that are key parameters of wastewater quality. MBBR enhances the removal efficiency of Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), and nitrogen compounds through nitrification and denitrification. This study investigates the evolution of biofilm technology research for wastewater treatment, with a focus on MBBR. Bibliometric analysis reveals global trends, organizations, institutions, and authors most contributing to MBBR research over the past decade. Data were collected from the Scopus database and analyzed using Excel, OpenRefine, Tableau, and VOSviewer. The results show a significant increase in the number of publications related to biofilm technology and MBBR, with an annual increase of 8.43%. China is the main contributor with 1,026 publications, followed by India, Denmark, and the United States. Although MBBR is recognized as effective, further research is needed on microbial community dynamics and the influence of operational variables on its performance. These findings highlight the importance of MBBR technology in wastewater treatment and provide insights into future research directions. However, this study has limitations, as it only used the Scopus database without accessing other sources such as Web of Science or Google Scholar, so it may not cover the entire international literature on the subject. Future research should focus on developing more efficient biocarriers, gaining a deeper understanding of microbial community dynamics within MBBR, and optimizing operational parameters. Integrating MBBR technology with other treatment technologies is also a promising area to explore.

**Keywords:** MBBR, Wastewater treatment, Technological innovation, Bibliometric analysis, Biofilm reactor

## ABSTRAK

Pengolahan air limbah menjadi esensial dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan kesehatan masyarakat. Meningkatnya populasi dan industrialisasi menghasilkan air limbah berlimpah, menuntut solusi pengolahan yang lebih efisien dan efektif. Teknologi biofilm, khususnya *Moving Bed Biofilm Reactors* (MBBR), telah diakui sebagai metode efektif dalam mengurangi pencemaran air limbah. Biofilm memanfaatkan media penyangga dalam reaktor biologis untuk menunjang pertumbuhan bakteri yang menguraikan berbagai polutan, termasuk senyawa nitrogen, karbon, farmasi, bahan kimia industri, dan mikropolutan lainnya yang menjadi parameter kunci kualitas air limbah. MBBR meningkatkan efisiensi penghilangan Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), dan senyawa nitrogen melalui nitrifikasi dan denitrifikasi. Penelitian ini menyelidiki evolusi penelitian teknologi biofilm untuk pengolahan air limbah dengan fokus pada MBBR. Analisis bibliometrik menunjukkan tren global, organisasi, lembaga, dan penulis yang paling berkontribusi dalam penelitian MBBR selama dekade terakhir. Data dikumpulkan dari database Scopus dan dianalisis menggunakan Excel, OpenRefine, Tableau, dan VOSviewer. Hasil menunjukkan peningkatan signifikan dalam jumlah publikasi terkait teknologi biofilm dan MBBR, dengan peningkatan tahunan sebesar 8,43%. China menjadi kontributor utama dengan 1.026 publikasi, diikuti oleh India, Denmark, dan Amerika Serikat. Meskipun MBBR diakui efektif, masih diperlukan penelitian lebih lanjut tentang dinamika komunitas mikroba dan pengaruh variabel operasional terhadap kinerjanya. Temuan ini menyoroti pentingnya teknologi MBBR dalam pengolahan air limbah dan memberikan wawasan tentang arah penelitian di masa depan. Penelitian di masa depan harus fokus pada pengembangan biocarrier baru yang lebih efisien, pemahaman mendalam tentang dinamika komunitas mikroba dalam MBBR, dan optimasi parameter operasional. Integrasi teknologi MBBR dengan teknologi pengolahan lainnya juga merupakan area yang menjanjikan untuk dieksplorasi.

**Kata Kunci:** MBBR, Pengolahan air limbah, Inovasi teknologi, Kajian bibliometric, Reaktor biofilm

## PENDAHULUAN

Pengolahan air limbah merupakan aspek krusial dalam menjaga keseimbangan ekosistem dan kesehatan masyarakat. Limbah yang tidak diolah dengan benar dapat menyebabkan pencemaran air yang serius, merusak ekosistem akuatik, dan mengancam kesehatan manusia (Gzar et al., 2021). Seiring

dengan peningkatan populasi dan industrialisasi, jumlah air limbah yang dihasilkan semakin meningkat, menuntut adanya solusi pengolahan air limbah yang lebih efisien dan efektif (Li et al., 2023).

Pentingnya penggunaan teknologi biofilter dalam pengolahan air limbah tidak dapat disangkal karena memainkan peran penting dalam menjaga lingkungan dan kesehatan masyarakat (Hashtroudi et al., 2023). Teknologi biofilter merupakan salah satu metode yang efektif dalam mengurangi pencemaran air limbah (Singh et al., 2022). Biofilter memanfaatkan media penyangga di dalam reaktor biologis untuk mendukung pertumbuhan bakteri yang dapat menguraikan zat-zat pencemar dalam air limbah (Ashkanani et al., 2019; Saidulu et al., 2021). Dengan luas permukaan media filter yang dimiliki, biofilter mampu meningkatkan proses penguraian oleh mikroorganisme, sehingga efisiensi penghilangan pencemar seperti BOD dan COD dapat ditingkatkan (Leyva-Díaz et al., 2016; Shokoohi et al., 2017).

Teknologi biofilm merupakan komponen penting dalam pengolahan air limbah karena melibatkan penggunaan mikroorganisme untuk memecah polutan organik (Ginter-Kramarczyk et al., 2021). Biofilm dapat menyerap dan mengonsumsi zat organik terlarut, sehingga meningkatkan efisiensi pengolahan air limbah (Ibrahim et al., 2018). Struktur biofilm yang kompleks memungkinkan mikroorganisme bertahan di berbagai kondisi lingkungan yang ekstrem (Q. Zhang et al., 2020). Biofilm memfasilitasi dekomposisi anaerobik di lapisan dalam dan proses aerobik di lapisan luar, memungkinkan pengolahan yang menyeluruh (Mazioti et al., 2021). Pemahaman tentang dinamika komunitas mikroba dalam biofilm dapat mengoptimalkan proses pengolahan air limbah (Alizadeh et al., 2019; Persson et al., 2014; X. Zhang et al., 2023).

Biofilm sangat penting dalam konteks pengolahan air limbah karena mereka memiliki kapasitas untuk mendegradasi berbagai macam polutan secara biologis (Madan et al., 2022). Teknologi ini memanfaatkan mikroorganisme yang tumbuh pada permukaan media tertentu untuk memecah kontaminan organik dan anorganik (Aqeel & Liss, 2020). Salah satu bentuk teknologi biofilm yang inovatif adalah Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR). MBBR mengombinasikan proses pertumbuhan mikroorganisme yang tersuspensi dan terikat, meningkatkan kapasitas pengolahan air limbah dalam volume reaktor yang lebih kecil (Li et al., 2023). Teknologi ini telah terbukti efektif dalam mengurangi Biochemical Oxygen Demand (BOD), menghilangkan nitrogen melalui proses nitrifikasi dan denitrifikasi, serta menangani berbagai jenis air limbah industri dengan efisiensi tinggi (Gzar et al., 2021).

Kemajuan terbaru dalam teknologi biofilm, khususnya yang berfokus pada *Moving Bed Biofilm Reactors* (MBBR), telah menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam efisiensi pengolahan air limbah. Jang dkk. (2023) menyoroti bahwa jenis biocarrier secara signifikan memengaruhi kinerja nitrifikasi dalam MBBR, dengan pembawa Mutag Biochip mempertahankan efisiensi penghilangan amonia lebih dari 99%, dibandingkan dengan bola serat yang turun menjadi 65% pada waktu retensi hidrolik yang berkurang (HRT) (Jang et al., 2023). Tinjauan komprehensif tentang teknologi MBBR, termasuk pengembangan, modifikasi, dan aspek ekonominya, terutama dalam konteks India, disediakan dalam bab buku tahun 2023 (Ghangrekar et al., 2023). Studi lain meninjau integrasi flotasi udara terlarut (DAF) dengan MBBR, yang menunjukkan efisiensi penghilangan polutan yang signifikan untuk air limbah berminyak sintetis, dan mengoptimalkan parameter seperti waktu pengapungan dan laju aliran udara (Ali & Aziz, 2024). Lebih lanjut, Walker dkk. (2024) mengeksplorasi penggunaan nitrat sebagai akseptor elektron dalam MBBR, yang secara signifikan meningkatkan tingkat penyisihan COD untuk pengolahan air limbah kilang anggur (Walker et al., 2024). Terakhir, analisis terperinci tentang sistem pengolahan biologis berbasis granular dan biofilm menyoroti tantangan operasional dan potensi masa depan proses biofilm dalam pengolahan air limbah (Dzihora et al., 2023; Kowalski et al., 2018; Raudkivi et al., 2017; Sun et al., 2021). Studi-studi ini secara kolektif menggarisbawahi keserbagunaan dan efektivitas teknologi MBBR dalam berbagai konteks industri, yang menegaskan kembali peran pentingnya dalam pengelolaan air limbah modern.

Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki dan memberikan wawasan kepada para peneliti mengenai evolusi penelitian teknologi biofilm untuk pengolahan air limbah, dengan fokus khusus pada *Moving Bed Biofilm Reactors* (MBBR). Tujuan penelitian ini meliputi: (1) Mengidentifikasi tren global dalam teknologi biofilm untuk pengolahan air limbah selama dekade terakhir, (2) Mengidentifikasi organisasi dan lembaga yang paling berkontribusi dalam penelitian MBBR, (3) Mengidentifikasi penulis terkemuka dan kontribusi mereka dalam bidang penelitian MBBR, (4) Menganalisis fokus

penelitian dan topik utama berdasarkan kata kunci, (5) Menyediakan proyeksi masa depan dan arah penelitian yang terkait dengan teknologi MBBR.

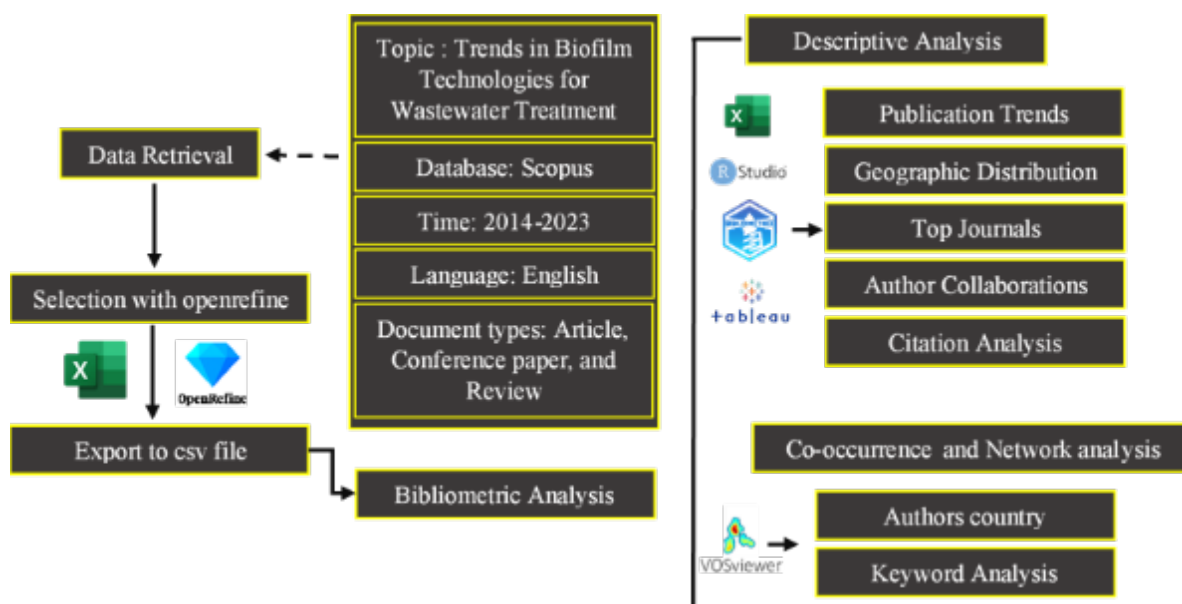
## METODOLOGI

### Pengumpulan Data

Penelitian ini melakukan analisis bibliometrik dengan mengumpulkan data dari Scopus, sebuah database multidisiplin yang dikelola oleh Elsevier. Pencarian di Scopus dilakukan dengan menggunakan kata kunci ( TITLE-ABS-KEY ( "moving bed biofilm reactor" ) AND TITLE-ABS-KEY ( "wastewater" ) ) AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2024 AND PUBYEAR > 2013 AND PUBYEAR < 2024 AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE , "cp" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE , "re" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE , "English" ) ) AND ( LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD , "Wastewater Treatment" ) OR LIMIT-TO ( EXACTKEYWORD , "Moving Bed Biofilm Reactors " ) ) sebagai kueri lanjutan. Kata kunci Wastewater Treatment dan Moving Bed Biofilm Reactors secara khusus dicari di Scopus. Analisis mencakup publikasi dari tahun 2014 hingga 2023, termasuk artikel, makalah konferensi, dan ulasan. Fokus pada sepuluh tahun terakhir dimaksudkan untuk meningkatkan perspektif, menawarkan wawasan terkini tentang sistem pengolahan air limbah dengan teknologi Moving Bed Biofilm Reactors (MBBR), dan meletakkan dasar untuk arah penelitian di masa depan berdasarkan temuan yang disajikan. Penelitian ini menggunakan kata kunci utama 'moving bed biofilm reactor' dan 'wastewater' karena kedua istilah tersebut merupakan istilah inti yang paling sering digunakan dalam literatur internasional untuk merujuk pada teknologi MBBR dan konteks aplikasinya. Namun, kami mengakui bahwa variasi sinonim seperti 'biofilm reactor', 'attached growth system', atau 'moving bed bioreactor' mungkin juga relevan namun tidak termasuk dalam pencarian awal. Hal ini dapat menyebabkan beberapa dokumen potensial tidak terdeteksi, meskipun langkah-langkah seperti penggunaan wildcard dan penggabungan sinonim pasca-analisis dilakukan untuk meminimalkan bias pencarian.

### Teknik Analisis Bibliometrik

Data yang diekstrak dari Scopus akan diproses di Excel dan openRefine untuk menggabungkan kata-kata yang bersinonim. Fokus dari analisis ini adalah pada kata kunci Penulis dan kata kunci indeks. Selanjutnya, hasil pemeriksaan openRefine akan digunakan untuk membuat jaringan kata melalui aplikasi VOSviewer. Hasil temuan akan direpresentasikan secara visual melalui grafik, tabel, dan plot peta global dengan menggunakan aplikasi perangkat lunak Excel, Rstudio, dan Tableau. Gambar 1 menyajikan alur strategi pencarian data serta analisisnya.



**Figure 1.** Flow diagram of method (search strategy and data processing)

## HASIL

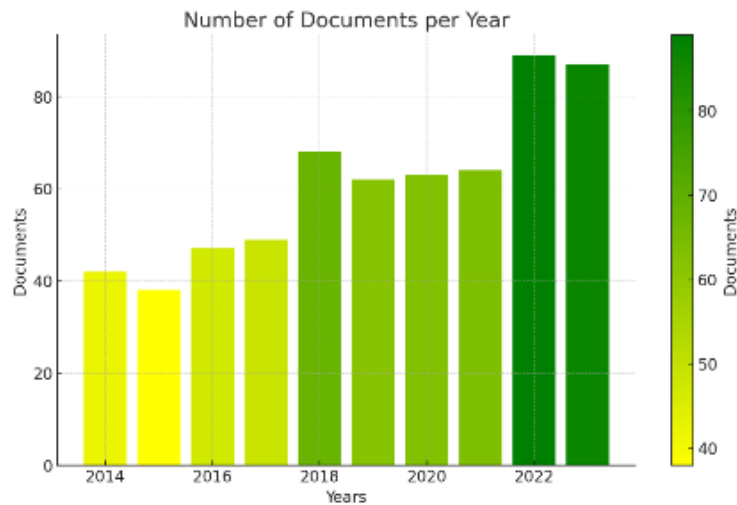
### Informasi Umum Tentang Data

Tabel 1 menunjukkan informasi informasi dari penelitian yang mencakup tahun 2014 hingga 2023, dengan kata kunci Wastewater Treatment dan *Moving Bed Biofilm Reactors* , data ini mencakup 610 dokumen yang bersumber dari 132 sumber termasuk jurnal dan buku. Dengan tingkat pertumbuhan tahunan sebesar 8,43%, terdapat peningkatan yang signifikan dalam hasil penelitian. Usia rata-rata dokumen adalah 4,78 tahun, masing-masing menerima rata-rata 33,13 kutipan, yang menunjukkan dampaknya. Sebanyak 22.659 referensi digunakan, menunjukkan kedalaman dan luasnya penelitian. Terdapat 112 Kata Kunci Plus (ID) dan 292 kata kunci penulis (DE) dalam konten. Sebanyak 1,914 penulis berkontribusi, dengan hanya 8 dokumen yang merupakan penulis tunggal, hal ini menunjukkan tingginya kolaborasi dengan rata-rata 5,46 penulis per dokumen dan 28,03% publikasi dihasilkan dari kolaborasi internasional. Artikel adalah jenis dokumen yang paling umum (522), diikuti oleh makalah konferensi (56) dan ulasan (31), yang menunjukkan peningkatan kolaborasi dan relevansi di bidang teknologi biofilm pada pengolahan air limbah dan *Moving Bed Biofilm Reactors* (MBBR).

**Tabel 1.** Informasi umum terkait teknologi biofilm pada pengolahan air limbah dan MBBR dalam sepuluh tahun terakhir (2014-2023)

| Description                         | Results   |
|-------------------------------------|-----------|
| <b>INFORMASI UTAMA TENTANG DATA</b> |           |
| Rentang Waktu                       | 2014:2023 |
| Sumber (Jurnal, Buku, dll)          | 132       |
| Dokumen                             | 610       |
| Tingkat Pertumbuhan Tahunan (%)     | 8.43      |
| Usia Rata-Rata Dokumen              | 4.78      |
| Kutipan Rata-Rata per Dokumen       | 33.13     |
| Referensi                           | 22659     |
| <b>KONTEN DOKUMEN</b>               |           |
| Kata Kunci Plus (ID)                | 112       |
| Kata Kunci Penulis (DE)             | 292       |
| <b>PENULIS</b>                      |           |
| Penulis                             | 1914      |
| Penulis Dokumen Tunggal             | 8         |
| <b>KOLABORASI PENULIS</b>           |           |
| Dokumen Tunggal                     | 8         |
| Mitra Penulis per Dokumen           | 5.46      |
| Kolaborasi Internasional (%)        | 28.03     |
| <b>JENIS DOKUMEN</b>                |           |
|                                     | 1         |
| artikel                             | 522       |
| makalah konferensi                  | 56        |
| tinjauan                            | 31        |

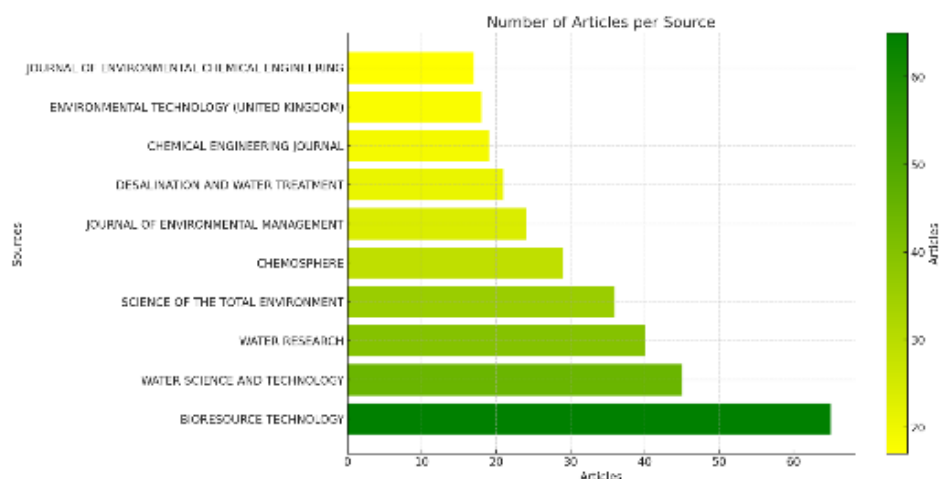
## Analisis Tren Publikasi



**Gambar 2:** Tren penelitian berdasarkan jumlah publikasi setiap tahun (2014-2023)

Figure 2 menggambarkan peningkatan yang nyata dalam jumlah publikasi setiap tahunnya dari tahun 2014 hingga 2023. Tahun 2016 mencatat jumlah publikasi terendah yaitu sekitar 38 dokumen, diikuti dengan peningkatan yang konsisten dengan sedikit variasi setiap tahun berikutnya. Periode 2018 hingga 2022 menampilkan rentang publikasi yang relatif stabil, berkisar antara 60 hingga 70 dokumen per tahun. Puncak publikasi terjadi pada tahun 2022 dan 2023, masing-masing sebanyak 87 dan 89 dokumen. Tren ini menandakan lonjakan minat dan upaya penelitian dalam bidang terkait selama dekade terakhir, yang kemungkinan menunjukkan peningkatan penekanan pada tema penelitian yang relevan belakangan ini. Gradien warna yang digambarkan dalam diagram batang, bertransisi dari kuning tua ke hijau tua, secara efektif memvisualisasikan tren peningkatan jumlah publikasi terkait teknologi biofilm pada pengolahan air limbah dan MBBR dari tahun ke tahun.

## Analisis Dokumen Menurut Sumber



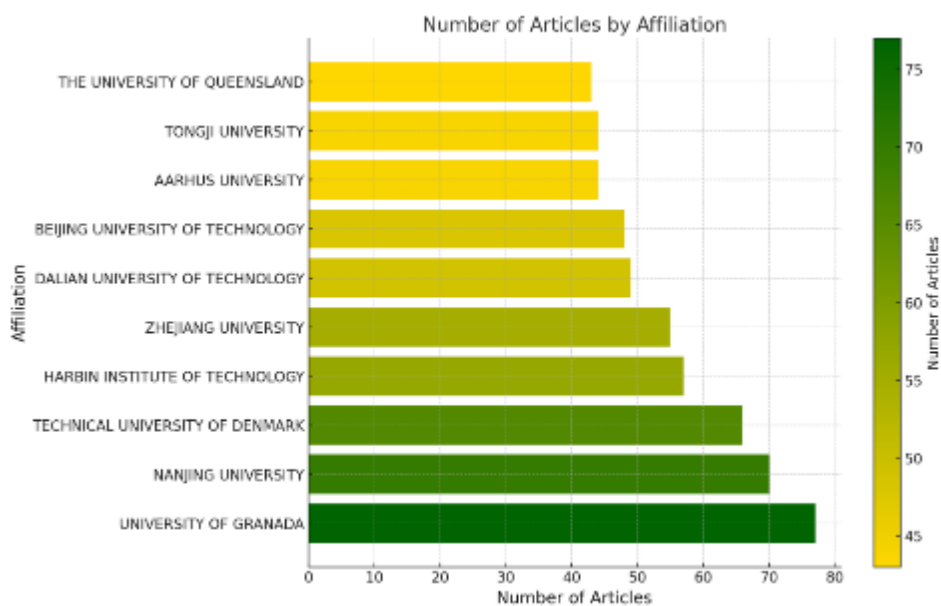
**Gambar 3:** Jumlah publikasi berdasarkan sumber dalam sepuluh tahun terakhir (2014-2023)

Representasi grafis pada gambar 3 menggambarkan sebaran artikel di berbagai sumber selama sepuluh tahun terakhir (2014-2023) yang mengeksplorasi penelitian terkait teknologi biofilm dalam pengolahan air limbah, khususnya yang berfokus pada Reaktor Biofilm Moving Bed (MBBR). Jurnal Bioresource Technology menonjol dengan 65 artikel, menunjukkan tingkat minat dan penekanan yang signifikan terhadap teknologi ini. Menyusul di belakang adalah Water Science and Technology dengan 45 artikel, yang menunjukkan komitmen penting untuk meliput penelitian MBBR dan biofilm dalam publikasinya.

Publikasi seperti yang ditemukan dalam Water Research dan Science of the Total Environment telah memberikan kontribusi penting dalam bidang ini dengan masing-masing 40 dan 36 artikel, menyoroti pentingnya penelitian teknologi biofilm dan MBBR dalam lingkup ilmu air dan lingkungan yang lebih luas. . Demikian pula, Chemosphere dan Journal of Environmental Management masing-masing telah menerbitkan 29 dan 24 artikel, menekankan peran penting kimia dan manajemen lingkungan dalam bidang pengolahan air limbah menggunakan teknologi biofilm. Jurnal Desalination and Water Treatment memuat 21 artikel yang menunjukkan pentingnya teknologi biofilm dalam pengolahan air asin dan air limbah. Demikian pula dengan publikasi Chemical Engineering Journal yang memuat 19 artikel yang menyoroti relevansi teknologi ini dalam bidang teknik kimia.

Jurnal seperti Environmental Technology (United Kingdom) dan Journal of Environmental Chemical Engineering masing-masing telah menerbitkan 18 dan 17 artikel, yang menunjukkan minat yang terus berlanjut dalam penelitian tentang teknologi biofilm dan MBBR. Meskipun jumlah artikelnya relatif lebih sedikit, publikasi ini menunjukkan penyebaran yang luas dan minat yang beragam terhadap teknologi pengolahan air limbah ini di seluruh jurnal ilmiah.

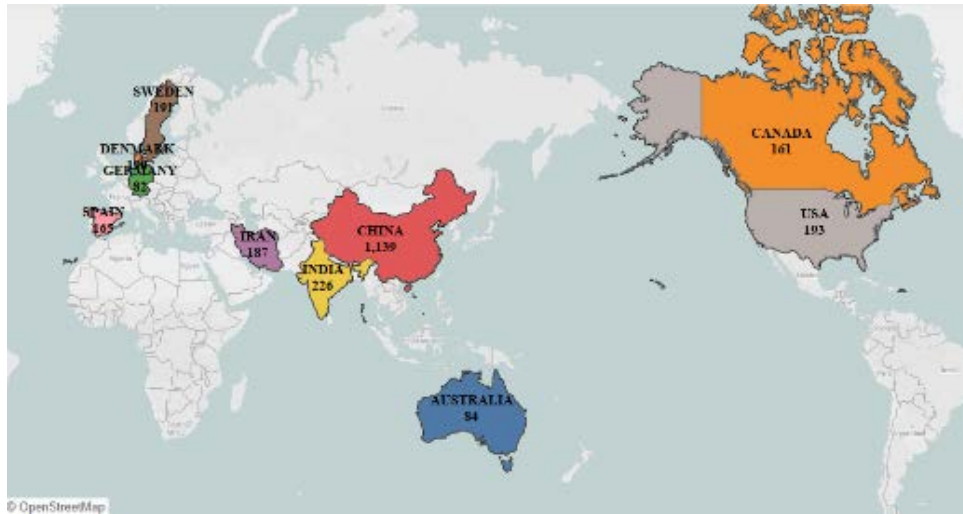
Penelitian teknologi biofilm, khususnya Reaktor Biofilm Moving Bed (MBBR), untuk pengolahan air limbah mendapat perhatian besar dari berbagai universitas. University Of Granada menunjukkan kontribusi utama dengan 77 publikasi, diikuti Nanjing University dengan 70 publikasi. Keterlibatan aktif Technical University of Denmark dibuktikan dengan 66 publikasi. Dedikasi tinggi terhadap penelitian ilmiah pada bidang ini ditunjukkan juga oleh Harbin Institute Of Technology dan Zhejiang University, masing-masing menghasilkan 57 dan 55 publikasi. Kontribusi penting Dalian University Of Technology dan Beijing University Of Technology dalam kemajuan teknologi ini dibuktikan dengan masing-masing artikel 49 dan 48 publikasi. Aarhus University, Tongji University, dan The University Of Queensland menunjukkan partisipasi tinggi dengan 44, 44, dan 43 publikasi. Temuan ini mencerminkan tingginya komitmen universitas-universitas tersebut dalam pengembangan teknologi biofilm MBBR untuk pengolahan air limbah, seperti yang terlihat pada gambar 4.



**Gambar 4.** Afiliasi teratas yang menerbitkan artikel terbanyak dalam bidang teknologi pengolahan air limbah dan MBBR.



## Distribusi Geografis



**Gambar 5.** Peta distribusi publikasi mengenai teknologi biofilm dalam pengolahan air limbah dan MBBR berdasarkan negara

Representasi grafis pada gambar 5 terkait data publikasi tentang teknologi biofilm dan MBBR untuk pengolahan air limbah yang menunjukkan dominasi China dengan 1.026 publikasi. India mengikuti dengan 210 publikasi, menandakan minat besar mereka dalam bidang ini. Denmark dan Amerika Serikat, dengan 182 dan 181 publikasi masing-masing, memberikan kontribusi signifikan dalam penelitian. Swedia dan Iran menunjukkan angka yang hampir sama, yaitu 174 dan 172 publikasi. Kanada dan Spanyol, dengan 157 publikasi masing-masing, menunjukkan partisipasi kuat dalam penelitian. Australia dan Jerman memiliki 82 dan 78 publikasi, menunjukkan kontribusi yang lebih rendah dibandingkan negara-negara sebelumnya. Dominasi China mencerminkan fokus kuat mereka pada inovasi teknologi biofilm dan MBBR. Kontribusi signifikan dari India, Denmark, dan Amerika Serikat menunjukkan perhatian global terhadap pengembangan teknologi ini. Distribusi publikasi yang merata di berbagai negara menunjukkan pentingnya kolaborasi internasional untuk mengatasi tantangan pengolahan air limbah. Data ini menunjukkan bahwa penelitian biofilm dan MBBR melibatkan berbagai negara dengan kontribusi yang beragam namun signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa pengolahan air limbah adalah isu global yang memerlukan pendekatan inovatif dan kolaboratif dari berbagai negara untuk mencapai solusi yang efektif (Adegoke et al., 2023; Ali & Aziz, 2024).

**Tabel 2.** Artikel teratas tentang teknologi biofilm untuk pengolahan air limbah dengan fokus khusus pada *Moving Bed Biofilm Reactors* (MBBR)

| No. | Authors                                                                                                            | Source title                                       | Title                                                                                                               | Total Citations | Year | TC per Year |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------|-------------|
| 1.  | Casas M.E.; Chhetri R.K.; Ooi G.; Hansen K.M.S.; Litty K.; Christensson M.; Kragelund C.; Andersen H.R.; Bester K. | Water Research                                     | Biodegradation of pharmaceuticals in hospital wastewater by staged <i>Moving Bed Biofilm Reactors</i> (MBBR)        | 234             | 2015 | 26.0        |
| 2.  | Barwal A.; Chaudhary R.                                                                                            | Reviews in Environmental Science and Biotechnology | To study the performance of biocarriers in moving bed biofilm reactor (MBBR) technology and kinetics of biofilm for | 205             | 2014 | 20.5        |

| No. | Authors                                                                                                                                                                   | Source title                                             | Title                                                                                                                                                                    | Total Citations | Year | TC per Year |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------|-------------|
|     |                                                                                                                                                                           |                                                          | retrofitting the existing aerobic treatment systems: A review                                                                                                            |                 |      |             |
| 3.  | Torresi E.; Fowler S.J.; Polesel F.; Bester K.; Andersen H.R.; Smets B.F.; Plósz B.G.; Christensson M.                                                                    | Environmental Science and Technology                     | Biofilm thickness influences biodiversity in nitrifying MBBRs - Implications on micropollutant removal                                                                   | 142             | 2016 | 17.8        |
| 4.  | Malovanyy A.; Yang J.; Trela J.; Plaza E.                                                                                                                                 | Bioresource Technology                                   | Combination of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor and partial nitrification/anammox moving bed biofilm reactor (MBBR) for municipal wastewater treatment     | 119             | 2015 | 13.2        |
| 5.  | Zinatizadeh A.A.L.; Ghaytooli E.                                                                                                                                          | Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers    | Simultaneous nitrogen and carbon removal from wastewater at different operating conditions in a moving bed biofilm reactor (MBBR): Process modeling and optimization     | 107             | 2015 | 11.9        |
| 6.  | Ooi G.T.H.; Tang K.; Chhetri R.K.; Kaarsholm K.M.S.; Sundmark K.; Kragelund C.; Litty K.; Christensen A.; Lindholm S.; Sund C.; Christensson M.; Bester K.; Andersen H.R. | Bioresource Technology                                   | Biological removal of pharmaceuticals from hospital wastewater in a pilot-scale staged moving bed biofilm reactor (MBBR) utilising nitrifying and denitrifying processes | 103             | 2018 | 17.2        |
| 7.  | Biswas K.; Taylor M.W.; Turner S.J.                                                                                                                                       | Applied Microbiology and Biotechnology                   | Successional development of biofilms in moving bed biofilm reactor (MBBR) systems treating municipal wastewater                                                          | 103             | 2014 | 10.3        |
| 8.  | Morgan-Sagastume F.                                                                                                                                                       | Critical Reviews in Environmental Science and Technology | Biofilm development, activity and the modification of carrier material surface properties in moving-bed biofilm reactors (MBBRs) for wastewater treatment                | 98              | 2018 | 16.3        |



| No. | Authors                                                                                                                        | Source title                 | Title                                                                                                                                      | Total Citations | Year | TC per Year |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------|-------------|
| 9.  | Tang K.; Ooi G.T.H.; Litty K.; Sundmark K.; Kaarsholm K.M.S.; Sund C.; Kragelund C.; Christensson M.; Bester K.; Andersen H.R. | Bioresource Technology       | Removal of pharmaceuticals in conventionally treated wastewater by a polishing moving bed biofilm reactor (MBBR) with intermittent feeding | 98              | 2017 | 14.0        |
| 10. | Xu X.; Wang G.; Zhou L.; Yu H.; Yang F.                                                                                        | Chemical Engineering Journal | Start-up of a full-scale SNAD-MBBR process for treating sludge digester liquor                                                             | 94              | 2018 | 15.7        |

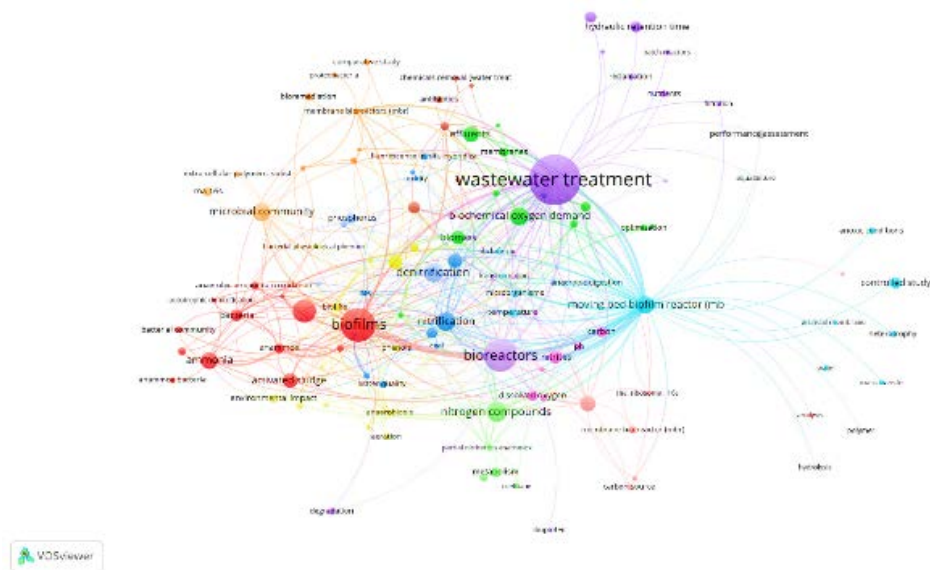
Tabel 2. memperlihatkan analisis data artikel penelitian yang berfokus pada teknologi Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) mengungkap beberapa temuan penting terkait pengolahan air limbah. Artikel yang paling banyak disitasi adalah karya Casas M.E. et al., dengan 234 sitasi sejak 2015, atau rata-rata 26 sitasi per tahun. Penelitian ini menyoroti biodegradasi farmasi di air limbah rumah sakit menggunakan MBBR berjenjang, menunjukkan pentingnya teknologi ini dalam mengolah polutan kompleks (Casas et al., 2015). Artikel oleh Barwal A. dan Chaudhary R. yang diterbitkan pada 2014 telah disitasi 205 kali dengan rata-rata 20.5 sitasi per tahun, fokus pada performa biocarrier dalam MBBR dan kinetika biofilm, yang menunjukkan pentingnya optimasi biocarrier untuk meningkatkan efisiensi pengolahan (Barwal & Chaudhary, 2014). Penelitian oleh Torresi E. et al., diterbitkan pada 2016 dengan 142 sitasi dan rata-rata 17.8 sitasi per tahun, memfokuskan pada pengaruh ketebalan biofilm terhadap biodiversitas dalam MBBR dan penghilangan mikropolutan. Temuan ini menunjukkan bahwa struktur biofilm sangat mempengaruhi efisiensi pengolahan (Torresi et al., 2016). Malovanyy A. et al. memadukan reaktor MBBR dengan UASB untuk pengolahan air limbah kota, memperoleh 119 sitasi sejak 2015, dengan rata-rata 13.2 sitasi per tahun, menekankan manfaat kombinasi teknologi untuk meningkatkan efektivitas pengolahan (Malovanyy et al., 2015). Penelitian oleh Zinatizadeh A.A.L. dan Ghaytooli E. tentang penghilangan nitrogen dan karbon dalam MBBR menunjukkan pentingnya memahami dan mengoptimalkan kondisi operasi (Zinatizadeh & Ghaytooli, 2015), dengan 107 sitasi sejak 2015 dan rata-rata 11.9 sitasi per tahun. Ooi G.T.H. et al., dalam artikel yang diterbitkan pada 2018 dengan 103 sitasi dan rata-rata 17.2 sitasi per tahun, fokus pada penghilangan farmasi dari air limbah rumah sakit dalam skala pilot melalui proses nitrifikasi dan denitrifikasi dalam MBBR (Ooi et al., 2018).

Biswas K. et al. meneliti perkembangan biofilm dalam sistem MBBR untuk pengolahan air limbah kota, menunjukkan bagaimana biofilm berkembang dalam kondisi operasional yang berbeda (Biswas et al., 2014), dengan 103 sitasi sejak 2014 dan rata-rata 10.3 sitasi per tahun. Penelitian oleh Morgan-Sagastume F., dengan 98 sitasi sejak 2018 dan rata-rata 16.3 sitasi per tahun, membahas pengembangan dan aktivitas biofilm serta modifikasi permukaan material carrier dalam MBBR, menunjukkan bahwa penyesuaian sifat material carrier dapat meningkatkan efisiensi proses (Morgan-Sagastume, 2018). Penelitian oleh Tang K. et al., diterbitkan pada tahun 2017, memiliki 98 sitasi dengan rata-rata 14.0 sitasi per tahun, fokus pada penghilangan farmasi dari air limbah yang diolah secara konvensional menggunakan MBBR sebagai proses pemolesan dengan pemberian pakan intermiten (Tang et al., 2017). Terakhir, Xu X. et al., yang diterbitkan pada tahun 2018, meneliti proses start-up SNAD-MBBR untuk mengolah cairan digester lumpur, memperoleh 94 sitasi dengan rata-rata 15.7 sitasi per tahun. Penelitian ini menunjukkan efektivitas teknologi MBBR dalam mengolah berbagai jenis air limbah dan residu pengolahan (Xu et al., 2018). Secara keseluruhan, data menunjukkan bahwa penelitian tentang MBBR sangat berfokus pada pengolahan polutan spesifik seperti farmasi dan penghilangan nitrogen dan karbon, serta optimasi kondisi operasi dan pengembangan biofilm. Artikel

yang lebih baru cenderung mendapatkan sitasi lebih cepat, menunjukkan tren peningkatan minat dan relevansi teknologi MBBR dalam pengolahan air limbah modern.

### Analisis Kata Kunci

Analisis kata kunci "Biofilm" dan "Wastewater treatment" dan "MBBR" terlihat pada gambar 6, 7 dan 8. Analisis kemunculan bersama (co-occurrence analysis) digunakan untuk mengidentifikasi pola hubungan antar kata kunci dalam suatu kumpulan teks. Nilai default atau yang dipilih untuk pertimbangan kata kunci ditetapkan sebesar 25 kemunculan, artinya kata kunci harus muncul minimal 25 kali agar dapat disertakan dalam analisis lebih lanjut. Dari total 3571 kata kunci, hanya 169 kata kunci yang memenuhi ambang batas tersebut. Menetapkan ambang batas pada 25 kemunculan memungkinkan analisis yang lebih terfokus pada kata kunci yang sering muncul, sehingga meminimalkan dampak gangguan dari kata kunci yang jarang muncul.



**Gambar 6.** Visualisasi keterkaitan berdasarkan kata kunci

Visualisasi pada Gambar 6 menunjukkan keterkaitan antara berbagai kata kunci dalam dataset penelitian terkait pengolahan air limbah. Setiap titik dalam visualisasi ini mewakili kata kunci tertentu, sementara garis yang menghubungkannya menunjukkan hubungan berdasarkan frekuensi kemunculan bersama. Kata kunci seperti "wastewater treatment", "biofilms", dan "moving bed biofilm reactor (mbbr)" menonjol dengan ukuran font lebih besar, menandakan frekuensi kemunculan yang tinggi atau keterkaitan signifikan dengan kata kunci lainnya. Cluster yang terbentuk mengindikasikan kelompok kata kunci yang sering muncul bersama, seperti cluster hijau yang mencakup "wastewater treatment" dan "biochemical oxygen demand", serta cluster merah yang melibatkan "biofilms" dan "ammonia". Ini menunjukkan bahwa ada beberapa subtopik utama dalam penelitian, seperti pengolahan air limbah secara umum dan studi tentang biofilm serta proses nitrifikasi dan denitrifikasi.

Keberadaan cluster ungu yang mencakup "moving bed biofilm reactor (mbbr)" menunjukkan fokus pada teknologi reaktor biofilm yang bergerak dalam konteks pengolahan air limbah. Kata kunci ini dihubungkan dengan topik-topik lain seperti "carbon" dan "hydraulic retention time", menunjukkan hubungan erat antara teknologi ini dengan parameter operasional dan efisiensi proses. Visualisasi ini sangat berguna untuk memahami tema utama dan hubungan antar topik dalam penelitian. Misalnya, hubungan antara "biochemical oxygen demand" dan "wastewater treatment" menunjukkan bahwa pengukuran kebutuhan oksigen biokimia adalah parameter penting dalam pengolahan air limbah. Selain itu, keberadaan banyak garis yang menghubungkan "biofilms" dengan kata kunci lain seperti "ammonia" dan "activated sludge" menunjukkan kompleksitas dan berbagai aspek yang perlu dipertimbangkan dalam studi biofilm.



Visualisasi pada Gambar 7 menunjukkan perkembangan kemunculan kata kunci dalam penelitian pengolahan air limbah dari tahun 2016 hingga 2022. Setiap titik (node) dalam jaringan ini mewakili kata kunci tertentu, dan garis yang menghubungkannya menunjukkan keterkaitan atau hubungan berdasarkan frekuensi kemunculan bersama. Warna titik-titik ini mencerminkan periode waktu kemunculan kata kunci, dengan gradasi warna dari biru (2016) hingga hijau (2022). Misalnya, kata kunci dengan warna hijau muncul lebih sering pada tahun-tahun terakhir, sedangkan yang berwarna biru muncul lebih sering pada awal periode. Kata kunci "wastewater treatment" berada di pusat jaringan, menunjukkan bahwa topik ini memiliki frekuensi kemunculan yang tinggi dan relevansi yang konsisten dalam penelitian selama beberapa tahun terakhir. Kata kunci lain seperti "biochemical oxygen demand" dan "denitrification" juga sering muncul dan berhubungan erat dengan pengolahan air limbah, menunjukkan pentingnya parameter ini dalam studi.

11



Visualisasi pada Gambar 8 menampilkan kepadatan kata kunci dalam penelitian pengolahan air limbah berdasarkan waktu kemunculan. Skala warna digunakan untuk menunjukkan frekuensi dan relevansi kata kunci, dengan warna yang lebih terang menunjukkan kepadatan yang lebih tinggi. Kata kunci "wastewater treatment" terlihat sangat terang, menunjukkan bahwa topik ini sangat sering muncul dan menjadi pusat dari banyak penelitian selama periode yang dianalisis. Ini menunjukkan bahwa pengolahan air limbah adalah topik utama yang memiliki banyak studi terkait.

Cluster "biofilms" yang cukup terang menunjukkan bahwa penelitian terkait biofilm juga signifikan. Kata kunci seperti "ammonia" dan "activated sludge" sering muncul bersamaan dengan "biofilms", mencerminkan perhatian besar pada proses biologis dan kimia yang terjadi dalam biofilm selama pengolahan air limbah. Ini mencakup studi tentang bagaimana biofilm dapat membantu dalam penguraian ammonia dan peran lumpur aktif dalam proses pengolahan.

Area di sekitar "nitrogen compounds" dan "bioreactors" juga menunjukkan kepadatan yang cukup tinggi. Ini mengindikasikan bahwa penelitian tentang senyawa nitrogen dan penggunaan bioreaktor dalam pengolahan air limbah juga menjadi fokus utama. Kepadatan tinggi di sekitar kata kunci ini menunjukkan bahwa banyak penelitian telah dilakukan untuk memahami dan mengoptimalkan proses yang melibatkan senyawa nitrogen dan bioreaktor.

Analisis bibliometrik terhadap 610 dokumen yang diterbitkan antara tahun 2014 hingga 2023 menunjukkan peningkatan signifikan dalam penelitian terkait teknologi biofilm, khususnya *Moving Bed Biofilm Reactors* (MBBR). Publikasi meningkat dengan laju tahunan sebesar 8,43%, mencerminkan

peningkatan minat dan upaya penelitian dalam bidang ini. Studi menunjukkan bahwa *Moving Bed Biofilm Reactors* (MBBR) telah terbukti efektif dalam mengurangi polutan seperti Kebutuhan Oksigen Biokimia (BOD) dan Kebutuhan Oksigen Kimiawi (COD) dalam pengolahan air limbah (Ødegaard, 2016; Wang et al., 2022; Yang et al., 2020). Efisiensi ini dicapai melalui pemanfaatan biocarrier yang mendukung pertumbuhan mikroorganisme, sehingga meningkatkan luas permukaan yang tersedia untuk perlekatan mikroba dan pembentukan biofilm (Boavida-Dias et al., 2022).

Inovasi teknologi Moving Bed Reactor (MBBR) telah menjadi salah satu solusi yang menjanjikan dalam pengolahan air limbah, terutama dalam konteks pengolahan limbah domestik dan industri. MBBR merupakan sistem yang menggabungkan keunggulan dari proses pengolahan limbah biologis dengan biofilm yang terikat pada media bergerak, yang memungkinkan efisiensi tinggi dalam pengurangan bahan pencemar, termasuk senyawa organik dan nitrogen (Kristanti et al., 2023). Teknologi MBBR telah banyak digunakan untuk penyisihan nitrogen karena ketahanannya yang tinggi terhadap fluktuasi beban, penyisihan nitrogen yang efisien, dan produksi limbah berkualitas tinggi (Yuan et al., 2015). Penelitian yang dilakukan oleh Subagyo et al. menunjukkan bahwa penggunaan media kaldness dalam MBBR dapat meningkatkan efisiensi pengolahan limbah tersebut, dengan aerasi yang dilakukan selama 8 jam (Subagyo et al., 2022). Selain itu, Anisa dan Herumurti juga menekankan bahwa MBBR mampu menurunkan konsentrasi senyawa organik dan nitrogen dalam limbah domestik dengan variasi beban organik yang berbeda (Subroto et al., 2022). Selain itu, penggunaan biofilm dengan bahan pembawa khusus seperti spons poliuretan telah dikaitkan dengan peningkatan kualitas air (Liu et al., 2023).

Publikasi dalam berbagai jurnal yang berpengaruh menyoroti berbagai aspek dari MBBR, termasuk penghilangan farmasi dari air limbah rumah sakit dan penghilangan nitrogen melalui proses nitrifikasi dan denitrifikasi. Sebagai contoh, studi oleh Casas et al. (2015) menemukan bahwa MBBR berjenjang mampu menguraikan farmasi dalam air limbah rumah sakit dengan efisiensi tinggi. Jang et al. (2023) melaporkan bahwa jenis biocarrier secara signifikan memengaruhi kinerja nitrifikasi dalam MBBR, dengan Mutag Biochip menunjukkan efisiensi penghilangan amonia lebih dari 99% dibandingkan dengan bola serat. Penelitian lain menunjukkan bahwa integrasi flotasi udara terlarut (DAF) dengan MBBR dapat meningkatkan efisiensi penghilangan polutan dalam air limbah berminyak. Selain itu, Walker et al. (2024) menunjukkan bahwa penggunaan nitrat sebagai akseptor elektron dalam MBBR secara signifikan meningkatkan tingkat penyisihan COD untuk pengolahan air limbah kilang anggur. Selain itu, penggabungan biocarrier fungsional baru telah ditemukan untuk meningkatkan kinerja sistem bioreaktor MBBR-membran hibrida, yang mengarah pada efisiensi penyisihan fosfat yang lebih tinggi (Deng et al., 2016). Selain itu, penambahan biocarrier yang dicetak 3D telah terbukti meningkatkan kinerja MBBR dengan mendorong proses pertumbuhan biomassa yang melekat dan tersuspensi (Banti et al., 2023).

China mendominasi penelitian tentang Moving Bed Biofilm Reactors (MBBR) dalam pengolahan air limbah karena beberapa alasan. Pertama, investasi besar dalam riset dan pengembangan serta kebijakan pemerintah China yang mendorong inovasi teknologi berperan penting (Gzar et al., 2021). Kedua, dengan pertumbuhan populasi dan industrialisasi yang pesat, China menghadapi kebutuhan mendesak untuk pengolahan limbah yang efisien, menjadikan MBBR sebagai solusi yang tepat (Li et al., 2023). Selain itu, universitas ternama seperti Nanjing University aktif terlibat dalam penelitian dan publikasi ilmiah terkait MBBR, yang memperkuat posisi China sebagai pemimpin global dalam bidang ini (Budirman, 2023). Penekanan penelitian di China sering kali pada peningkatan efisiensi operasional dan pengembangan teknologi biofilm yang inovatif (Jang et al., 2023). Kolaborasi yang melibatkan akademisi dan industri juga mempercepat penerapan teknologi ini (Adegoke et al., 2023). Distribusi geografis publikasi yang luas menunjukkan adanya perhatian global terhadap pengembangan teknologi MBBR, namun kontribusi China yang paling signifikan mencerminkan fokus kuat mereka pada pengembangan dan implementasi teknologi ini untuk mengatasi tantangan lingkungan yang kompleks (Hashtroudi et al., 2023) hal ini mengindikasikan dedikasi mereka terhadap inovasi dan aplikasi teknologi ini. Analisis kata kunci lebih lanjut menunjukkan fokus utama dalam penelitian MBBR pada aspek-aspek seperti "biochemical oxygen demand" (BOD), "denitrification", dan "hydraulic retention time". Ketiga topik ini sering muncul dalam literatur, menggambarkan perhatian yang besar para ilmuwan dalam meningkatkan efisiensi pengolahan dan mengoptimalkan parameter operasional MBBR. Secara keseluruhan, tren dalam penelitian ini menggarisbawahi bahwa



teknologi MBBR terus berkembang dan berperan penting dalam pengolahan air limbah modern. Penekanan pada efisiensi, optimasi sistem, serta kolaborasi internasional menunjukkan bahwa teknologi ini dihargai secara global sebagai solusi potensial untuk tantangan pengolahan air limbah yang semakin meningkat.

### **Implikasi Penelitian**

Tren menunjukkan peningkatan kolaborasi internasional dan publikasi dalam jurnal terkemuka. Teknologi MBBR menjadi fokus utama karena kemampuannya dalam mengolah berbagai jenis air limbah dengan efisiensi tinggi. Studi-studi juga menunjukkan bahwa biocarrier dan dinamika komunitas mikroba dalam biofilm sangat memengaruhi kinerja MBBR, menjadikan topik ini sebagai area penelitian yang penting. Penelitian ini menunjukkan bahwa teknologi MBBR dapat meningkatkan efisiensi pengolahan air limbah secara signifikan, terutama dalam penghilangan polutan kompleks. Implementasi teknologi ini dapat membantu fasilitas pengolahan air limbah dalam mencapai standar kualitas air yang lebih tinggi, mengurangi dampak lingkungan, dan meningkatkan keberlanjutan operasional.

### **Celah Penelitian dan Arah Masa Depan**

Masih terdapat beberapa area yang memerlukan penelitian lebih lanjut, seperti interaksi antara berbagai jenis biocarrier dengan mikroorganisme tertentu, serta pengaruh variabel operasional yang berbeda pada kinerja MBBR. Studi tentang dampak jangka panjang penggunaan MBBR terhadap ekosistem juga masih terbatas. Kinerja biofilm sangat dipengaruhi oleh karakteristik material seperti luas permukaan, porositas, dan sifat hidrofobik. Penelitian mendalam diperlukan untuk mengembangkan media berbasis material inovatif seperti nanokomposit atau material ramah lingkungan yang dapat meningkatkan pertumbuhan mikroorganisme serta efisiensi degradasi polutan. Dari segi efisiensi energi dan biaya operasional, MBR sering menghadapi kendala dalam konsumsi energi tinggi pada sistem aerasi dan pengadukan.

### **KESIMPULAN**

Penelitian ini menyoroti peningkatan signifikan dalam jumlah publikasi dan minat penelitian pada pengolahan air limbah yang menggunakan teknologi biofilm dan MBBR selama dekade terakhir. Teknologi MBBR terbukti efektif dalam pengolahan berbagai jenis air limbah, dengan fokus pada penghilangan polutan kompleks dan optimasi kondisi operasional, dengan potensi untuk pengoptimalan lebih lanjut melalui penggunaan biocarrier yang inovatif dan penyesuaian operasional untuk meningkatkan efisiensi penyisihan polutan. Temuan ini berkontribusi pada pemahaman yang lebih baik tentang tren dan perkembangan teknologi biofilm dalam pengolahan air limbah.

### **REKOMENDASI**

Berdasarkan temuan ini, peneliti disarankan untuk terus mengeksplorasi inovasi dalam biocarrier dan optimasi operasional MBBR. Dengan eksplorasi parameter operasional seperti waktu tinggal, beban organik, dan jenis media, inovasi ini berpotensi menjadi solusi berkelanjutan yang mendukung pengelolaan air limbah yang lebih efektif dan ramah lingkungan. Praktisi di lapangan harus mempertimbangkan penerapan teknologi MBBR ini diintegrasikan dengan teknologi pengolahan lainnya untuk meningkatkan efisiensi pengolahan air limbah. Pembuat kebijakan diharapkan mendukung penelitian lebih lanjut dan mengembangkan regulasi yang mendorong adopsi teknologi MBBR di industri pengolahan air limbah.

### **REFERENSI**

- Adegoke, A. E., Abel, O. M., Ikechukwuka, E. M., Opeyemi, A. O. M., & Nifemi, A. O. (2023). Microbial Biofilm Reactor for Sustainable Wastewater Treatment. In A. S. Mathuriya, S. Pandit, & N. K. Singh (Eds.), *Green Technologies for Industrial Waste Remediation* (pp. 285–316). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-46858-2\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-46858-2_14)
- Ali, S. M., & Aziz, S. Q. (2024). Combining dissolved air flotation (DAF) and modified *Moving Bed Biofilm Reactors* (MMBBR) for synthetic oily wastewater treatment. *Global Nest Journal*, 26(4). <https://doi.org/10.30955/gnj.005451>
- Alizadeh, S., Abdul Rahim, A., Guo, B., Hawari, J., Ghoshal, S., & Comeau, Y. (2019). Impacts of Continuous Inflow of Low Concentrations of Silver Nanoparticles on Biological Performance and



- Microbial Communities of Aerobic Heterotrophic Wastewater Biofilm. *Environmental Science and Technology*, 53(15), 9148–9159. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01214>
- Aqeel, H., & Liss, S. N. (2020). Autotrophic Fixed-Film Systems Treating High Strength Ammonia Wastewater. *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.551925>
- Ashkanani, A., Almomani, F., Khraisheh, M., Bhosale, R., Tawalbeh, M., & AlJaml, K. (2019). Bio-carrier and operating temperature effect on ammonia removal from secondary wastewater effluents using moving bed biofilm reactor (MBBR). *Science of the Total Environment*, 693. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.231>
- Banti, D. C., Samaras, P., Kostopoulou, E., Tsioni, V., & Sfetsas, T. (2023). Improvement of MBBR-MBR Performance by the Addition of Commercial and 3D-Printed Biocarriers. *Membranes*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/membranes13080690>
- Barwal, A., & Chaudhary, R. (2014). To study the performance of biocarriers in moving bed biofilm reactor (MBBR) technology and kinetics of biofilm for retrofitting the existing aerobic treatment systems: A review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 13(3), 285–299. <https://doi.org/10.1007/s11157-014-9333-7>
- Biswas, K., Taylor, M. W., & Turner, S. J. (2014). Successional development of biofilms in moving bed biofilm reactor (MBBR) systems treating municipal wastewater. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(3), 1429–1440. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5082-8>
- Boavida-Dias, R., Silva, J. R., Santos, A. D., Martins, R. C., Castro, L. M., & Quinta-Ferreira, R. M. (2022). A Comparison of Biosolids Production and System Efficiency between Activated Sludge, Moving Bed Biofilm Reactor, and Sequencing Batch Moving Bed Biofilm Reactor in the Dairy Wastewater Treatment. *Sustainability (Switzerland)*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/su14052702>
- Casas, M. E., Chhetri, R. K., Ooi, G., Hansen, K. M. S., Litty, K., Christensson, M., Kragelund, C., Andersen, H. R., & Bester, K. (2015). Biodegradation of pharmaceuticals in hospital wastewater by staged Moving Bed Biofilm Reactors (MBBR). *Water Research*, 83, 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.06.042>
- Deng, L., Guo, W., Ngo, H. H., Zhang, X., Wang, X. C., Zhang, Q., & Chen, R. (2016). New functional biocarriers for enhancing the performance of a hybrid moving bed biofilm reactor–membrane bioreactor system. *Bioresource Technology*, 208, 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.057>
- Dzihora, Y., Aparecida da Silva, K., Korczyk, K., Teja Nelabhotla, A. B., Kjeldsberg, L. A., Rasooli, R., & Wang, S. (2023). Granular and moving bed biofilm reactor-based wastewater treatment plant. In *Material-Microbes Interactions* (pp. 439–468). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95124-1.00016-4>
- Ghangrekar, M. M., Sathe, S. M., & Chakraborty, I. (2023). Moving bed biofilm bioreactors for wastewater treatment. In *Material-Microbes Interactions* (pp. 425–437). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95124-1.00001-2>
- Ginter-Kramarczyk, D., Kruszelnicka, I., Michalkiewicz, M., Muszyński, P., Zajchowski, S., & Tomaszewska, J. (2021). Biofilm on the polymer composites - qualitative and quantitative microbiological analysis. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19(1), 641–649. <https://doi.org/10.1007/s40201-021-00634-9>
- Gzar, H. A., Al-Rekabi, W. S., & Shuhaieb, Z. K. (2021). Application of Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) for Treatment of Industrial Wastewater: A mini Review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1973(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012024>
- Hashtroudi, H., Farhadian, M., & Borghei, M. (2023). Beet sugar wastewater treatment in a hybrid biological reactor: operational optimization and kinetic coefficients calculation. *Advances in Environmental Technology*, 9(4), 339–350. <https://doi.org/10.22104/aet.2023.6325.1736>
- Ibrahim, H. T., Al-Aboodi, A. H., & Abbas, S. A. (2018). Nutrients Removal from Domestic Wastewater in Basrah City (Southern Iraq) using Combined A2/O Bio Contact Oxidation Technology. In L. Ling, K. H. Leong, Y. F. Huang, & K. W. Tan (Eds.), *E3S Web of Conferences* (Vol. 65). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186505001>
- Jang, D., Won, J., Jo, Y., Kim, Y.-O., & Jang, A. (2023). Effect of biocarriers on the nitrification and microbial community in moving bed biofilm reactor for anaerobic digestion effluent treatment. *Environmental Research*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116350>

- Kowalski, M. S., Devlin, T. R., & Oleszkiewicz, J. A. (2018). Start-up and long-term performance of anammox moving bed biofilm reactor seeded with granular biomass. *Chemosphere*, 200, 481–486. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.130>
- Kristanti, R., Seng, B., Kumar, R., & Mohamed, A. (2023). Municipal wastewater treatment technologies in malaysia: a short review. *Industrial and Domestic Waste Management*, 3(1), 38–46. <https://doi.org/10.53623/idwm.v3i1.243>
- Leyva-Díaz, J. C., Muñío, M. M., González-López, J., & Poyatos, J. M. (2016). Anaerobic/anoxic/oxic configuration in hybrid moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor for nutrient removal from municipal wastewater. *Ecological Engineering*, 91, 449–458. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.03.006>
- Li, M., Liu, Y., Zhou, X., Wang, N., & Yuan, B. (2023). A Study on The Carriers Compound Multi-Stage MBBR Biological Treatment Process for Domestic Sewage. *Sustainability*, 15(10), 7922. <https://doi.org/10.3390/su15107922>
- Liu, C., Chen, L., Xu, A., & Song, Z. (2023). Evaluation of polyurethane sponge biocarrier effects on *Litopenaeus vannamei* cultivation in zero water exchange systems based on water quality, shrimp performance and bacterial community analysis. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1326194>
- Madan, S., Madan, R., & Hussain, A. (2022). Advancement in biological wastewater treatment using hybrid moving bed biofilm reactor (MBBR): a review. *Applied Water Science*, 12(6), 141. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01662-y>
- Malovanyy, A., Yang, J., Trela, J., & Plaza, E. (2015). Combination of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor and partial nitrification/anammox moving bed biofilm reactor (MBBR) for municipal wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 180, 144–153. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.101>
- Mazioti, A. A., Koutsokeras, L. E., Constantinides, G., & Vyrides, I. (2021). Untapped potential of *Moving Bed Biofilm Reactors* with different biocarrier types for bilge water treatment: A laboratory-scale study. *Water (Switzerland)*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/w13131810>
- Morgan-Sagastume, F. (2018). Biofilm development, activity and the modification of carrier material surface properties in moving-bed biofilm reactors (MBBRs) for wastewater treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 48(5), 439–470. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1465759>
- Ødegaard, H. (2016). A road-map for energy-neutral wastewater treatment plants of the future based on compact technologies (including MBBR). *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 10(4). <https://doi.org/10.1007/s11783-016-0835-0>
- Ooi, G. T. H., Tang, K., Chhetri, R. K., Kaarsholm, K. M. S., Sundmark, K., Kragelund, C., Litty, K., Christensen, A., Lindholm, S., Sund, C., Christensson, M., Bester, K., & Andersen, H. R. (2018). Biological removal of pharmaceuticals from hospital wastewater in a pilot-scale staged moving bed biofilm reactor (MBBR) utilising nitrifying and denitrifying processes. *Bioresource Technology*, 267, 677–687. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.077>
- Persson, F., Sultana, R., Suarez, C., Hermansson, M., Plaza, E., & Wilén, B.-M. (2014). Structure and composition of biofilm communities in a moving bed biofilm reactor for nitrification-anammox at low temperatures. *Bioresource Technology*, 154, 267–273. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.062>
- Raudkivi, M., Zekker, I., Rikmann, E., Vabamäe, P., Kroon, K., & Tenno, T. (2017). Nitrite inhibition and limitation - The effect of nitrite spiking on anammox biofilm, suspended and granular biomass. *Water Science and Technology*, 75(2), 313–321. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.456>
- Saidulu, D., Majumder, A., & Gupta, A. K. (2021). A systematic review of moving bed biofilm reactor, membrane bioreactor, and moving bed membrane bioreactor for wastewater treatment: Comparison of research trends, removal mechanisms, and performance. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106112>
- Shokoohi, R., Asgari, G., Leili, M., Khiadani, M., Foroughi, M., & Sedighi Hemmat, M. (2017). Modelling of moving bed biofilm reactor (MBBR) efficiency on hospital wastewater (HW) treatment: a comprehensive analysis on BOD and COD removal. *International Journal of*

- Environmental Science and Technology*, 14(4), 841–852. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1255-9>
- Singh, S. P., Sharma, M. K., Kumar, C., & Gaur, R. C. (2022). Effect of Filter Media on Performance of Biofilm Reactor for Treatment of Domestic Wastewater. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 26(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000700](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000700)
- Subroto, M., Prayogo, W., Soewondo, P., & Setiyawan, A. (2022). Organic removal in domestic wastewater using anaerobic treatment system-mbbr with flow recirculation ratio and intermittent aeration. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, 296-316. <https://doi.org/10.25105/urbanenvirotech.v5i3.12776>
- Sun, Y., Huang, L., Lai, C., Li, H., & Yang, P. (2021). Removal of organics from shale gas fracturing flowback fluid using expanded granular sludge bed and moving bed biofilm reactor. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 42(24), 3736–3746. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1739750>
- Tang, K., Ooi, G. T. H., Litty, K., Sundmark, K., Kaarsholm, K. M. S., Sund, C., Kragelund, C., Christensson, M., Bester, K., & Andersen, H. R. (2017). Removal of pharmaceuticals in conventionally treated wastewater by a polishing moving bed biofilm reactor (MBBR) with intermittent feeding. *Bioresource Technology*, 236, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.159>
- Torresi, E., Fowler, S. J., Polesel, F., Bester, K., Andersen, H. R., Smets, B. F., Plósz, B. G., & Christensson, M. (2016). Biofilm thickness influences biodiversity in nitrifying MBBRs - Implications on micropollutant removal. *Environmental Science and Technology*, 50(17), 9279–9288. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02007>
- Walker, P., Nerenberg, R., Pizarro, G., Aybar, M., Pavissich, J. P., González, B., & Pastén, P. (2024). Nitrate increases the capacity of an aerobic moving-bed biofilm reactor (MBBR) for winery wastewater treatment. *Water Science & Technology*, 89(6), 1454–1465. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.060>
- Wang, G., Hambly, A. C., Dou, Y., Wang, G., Tang, K., & Andersen, H. R. (2022). Polishing micropollutants in municipal wastewater, using biogenic manganese oxides in a moving bed biofilm reactor (BioMn-MBBR). *Journal of Hazardous Materials*, 427. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127889>
- Xu, X., Wang, G., Zhou, L., Yu, H., & Yang, F. (2018). Start-up of a full-scale SNAD-MBBR process for treating sludge digester liquor. *Chemical Engineering Journal*, 343, 477–483. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.032>
- Yang, X., López-Grimau, V., Vilaseca, M., & Crespi, M. (2020). Treatment of textilewaste water by CAS, MBR, and MBBR: A comparative study from technical, economic, and environmental perspectives. *Water (Switzerland)*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/W12051306>
- Yuan, Q., Wang, H., Hang, Q., Deng, Y., Liu, K., Li, C., & Zheng, S. (2015). Comparison of the MBBR denitrification carriers for advanced nitrogen removal of wastewater treatment plant effluent. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(18), 13970–13979. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4546-z>
- Zhang, Q., Chen, X., Zhang, Z., Luo, W., Wu, H., Zhang, L., Zhang, X., & Zhao, T. (2020). Performance and microbial ecology of a novel moving bed biofilm reactor process inoculated with heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacteria for high ammonia nitrogen wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 315. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123813>
- Zhang, X., Zuo, S., Li, S., Shang, Y., Du, Q., Wang, H., Guo, W., & Ngo, H. H. (2023). Responses of biofilm communities in a hybrid moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor system to sulfadiazine antibiotic exposure. *Bioresource Technology*, 382. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129126>
- Zinatizadeh, A. A. L., & Ghaytooli, E. (2015). Simultaneous nitrogen and carbon removal from wastewater at different operating conditions in a moving bed biofilm reactor (MBBR): Process modeling and optimization. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 53, 98–111. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.02.034>