

Analisis *Life Cycle Assessment* (Lca) Pada Sistem Pengolahan Air Limbah Berbasis *Moving Bed Biofilm Reactor* (Mbbr) Menggunakan *Openlca*

Bheni David Dwiana¹, Cahyadi Setiawan², Dwi Atmanto³, Nadiroh⁴, dan I Made Astra⁵

^{1,2,3,4,5} Master of Environmental Management, Jakarta State University, Jakarta, Indonesia Komplek Universitas Negeri Jakarta Gedung M. Hatta Jl. Rawamangun Muka, Jakarta Timur, Indonesia

Abstract

The increase in domestic and industrial activities has led to a significant rise in wastewater generation, potentially causing environmental pollution if not properly treated. One of the widely developed wastewater treatment technologies is the Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) due to its high treatment efficiency and stable operational performance. However, this system still requires considerable energy consumption and generates residues that may contribute to environmental impacts. Therefore, this study aims to analyze the environmental impacts of an MBBR-based wastewater treatment system using the Life Cycle Assessment (LCA) approach assisted by OpenLCA software. The research employed a quantitative method with the LCA framework consisting of goal and scope definition, life cycle inventory (LCI), life cycle impact assessment (LCIA), and interpretation stages. The data included energy consumption, chemical usage, sludge production, and influent characteristics. Environmental impact analysis was conducted using the ReCiPe Midpoint (H) method. The results showed that the MBBR system achieved removal efficiencies of approximately 85% for BOD, 80% for COD, and 78% for TSS. The LCA results indicated that the largest environmental impact category was Global Warming Potential (GWP) at 0.85 kg CO₂-eq/m³, dominated by electricity consumption contributing 65% of total impacts. Statistical analysis showed that energy consumption significantly affected GWP with a significance value of 0.001. The study revealed a trade-off between treatment efficiency and increasing environmental impacts due to high energy demand. Therefore, energy optimization and environmentally friendly technologies are essential for developing sustainable MBBR systems.

Keywords: *Life Cycle Assessment, OpenLCA, MBBR, Global Warming Potential.*

PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah penduduk, pertumbuhan kawasan perkotaan, serta perkembangan sektor industri yang semakin pesat telah menyebabkan meningkatnya volume air limbah yang dihasilkan setiap hari. Aktivitas domestik, komersial, maupun industri menghasilkan limbah cair yang mengandung berbagai zat pencemar seperti bahan organik, padatan tersuspensi, nutrien, mikroorganisme patogen, hingga senyawa kimia berbahaya yang berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Kondisi ini menjadi tantangan serius dalam pengelolaan lingkungan, khususnya di negara berkembang yang mengalami laju urbanisasi tinggi namun belum sepenuhnya didukung oleh infrastruktur pengolahan air limbah yang memadai. Air limbah yang dibuang langsung ke lingkungan tanpa melalui proses pengolahan dapat menimbulkan berbagai dampak negatif, baik terhadap lingkungan maupun kesehatan manusia. Peningkatan kandungan bahan organik dalam badan air dapat menyebabkan penurunan kadar oksigen terlarut (*dissolved oxygen*), sehingga mengganggu keseimbangan ekosistem perairan dan mengancam kehidupan organisme akuatik. Selain itu, kandungan nutrien seperti nitrogen dan

fosfor yang berlebihan dapat memicu terjadinya eutrofikasi, yaitu pertumbuhan alga secara tidak terkendali yang menyebabkan penurunan kualitas air dan terganggunya fungsi ekologis perairan. Dari sisi kesehatan masyarakat, air limbah yang tidak terolah juga berpotensi menjadi media penyebaran berbagai penyakit akibat kontaminasi mikroorganisme patogen dan senyawa toksik. Oleh karena itu, diperlukan sistem pengolahan air limbah yang tidak hanya mampu menurunkan konsentrasi pencemar secara efektif, tetapi juga dapat diterapkan secara berkelanjutan dengan mempertimbangkan aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan. Salah satu teknologi pengolahan air limbah biologis yang berkembang pesat dan banyak diterapkan saat ini adalah Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR). Teknologi MBBR merupakan sistem pengolahan biologis yang memanfaatkan media bergerak (*carrier media*) sebagai tempat tumbuh dan berkembangnya mikroorganisme dalam bentuk biofilm. Media tersebut bergerak secara dinamis di dalam reaktor akibat pengaruh aerasi atau aliran air, sehingga memungkinkan terjadinya kontak yang optimal antara mikroorganisme dan bahan pencemar dalam air limbah.

Sistem MBBR memiliki berbagai keunggulan dibandingkan metode pengolahan biologis konvensional. Salah satu keunggulan utama teknologi ini adalah kemampuannya dalam mencapai efisiensi pengolahan yang tinggi, khususnya dalam menurunkan parameter pencemar organik seperti Biochemical Oxygen Demand (BOD) dan Chemical Oxygen Demand (COD). Selain itu, sistem MBBR memiliki stabilitas proses yang baik karena mikroorganisme tumbuh melekat pada media biofilm, sehingga lebih tahan terhadap fluktuasi beban pencemar dan perubahan kondisi operasional. Teknologi ini juga membutuhkan luas lahan yang relatif lebih kecil dibandingkan sistem lumpur aktif konvensional, sehingga lebih sesuai diterapkan pada wilayah dengan keterbatasan ruang. Keunggulan lainnya adalah kemudahan operasional, fleksibilitas dalam peningkatan kapasitas, serta kemampuan adaptasi yang tinggi terhadap variasi karakteristik air limbah. Meskipun demikian, di balik keunggulan teknis yang dimiliki, sistem MBBR tetap memiliki beberapa tantangan yang perlu diperhatikan, khususnya dari aspek lingkungan. Salah satu tantangan utama adalah tingginya kebutuhan energi listrik, terutama pada proses aerasi yang berfungsi menyediakan oksigen terlarut bagi aktivitas mikroorganisme dalam biofilm.

Proses aerasi diketahui merupakan komponen paling intensif energi dalam sistem pengolahan biologis, sehingga berkontribusi besar terhadap emisi gas rumah kaca apabila sumber energi yang digunakan masih berasal dari bahan bakar fosil. Selain konsumsi energi, sistem MBBR juga menghasilkan lumpur (sludge) sebagai produk samping proses pengolahan. Lumpur yang dihasilkan memerlukan pengelolaan lebih lanjut karena berpotensi menimbulkan dampak lingkungan seperti eutrofikasi, pencemaran tanah, dan emisi gas berbahaya apabila tidak ditangani secara tepat. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa evaluasi terhadap sistem pengolahan air limbah tidak cukup hanya dilakukan berdasarkan efisiensi teknis semata, tetapi juga perlu mempertimbangkan dampak lingkungan yang ditimbulkan selama seluruh tahapan operasional sistem. Dalam konteks ini, pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) menjadi salah satu metode yang relevan dan banyak digunakan untuk mengevaluasi keberlanjutan suatu teknologi pengolahan air limbah. LCA merupakan metode analisis lingkungan yang digunakan untuk menilai dampak lingkungan suatu produk, proses, atau sistem secara menyeluruh sepanjang siklus hidupnya, mulai dari tahap pengambilan bahan baku, proses

operasional, penggunaan energi, hingga pengelolaan limbah akhir.

Pendekatan LCA memiliki keunggulan karena mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai sumber dan besarnya dampak lingkungan yang dihasilkan suatu sistem. Dengan demikian, LCA tidak hanya membantu mengidentifikasi kategori dampak lingkungan yang dominan, tetapi juga memungkinkan peneliti untuk menentukan faktor-faktor utama yang berkontribusi terhadap dampak tersebut. Dalam penelitian ini, analisis LCA dilakukan menggunakan perangkat lunak OpenLCA, yaitu salah satu software open-source yang banyak digunakan dalam studi penilaian siklus hidup. OpenLCA memungkinkan proses pemodelan inventori siklus hidup, analisis dampak lingkungan, serta interpretasi hasil dilakukan secara sistematis dan terintegrasi. Melalui penggunaan OpenLCA, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak lingkungan sistem pengolahan air limbah berbasis MBBR berdasarkan pendekatan Life Cycle Assessment, sekaligus mengidentifikasi faktor dominan yang mempengaruhi besarnya dampak lingkungan yang dihasilkan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan sistem pengolahan air limbah yang tidak hanya

efektif secara teknis, tetapi juga berkelanjutan dari sisi lingkungan. Selain itu, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar pertimbangan bagi pengambil kebijakan, praktisi, maupun pengelola instalasi pengolahan air limbah dalam merancang strategi optimalisasi sistem yang lebih ramah lingkungan dan efisien energi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari sistem pengolahan air limbah berbasis *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR). Pendekatan kuantitatif dipilih karena penelitian ini berfokus pada pengukuran, perhitungan, dan analisis numerik terhadap parameter operasional sistem pengolahan air limbah serta dampak lingkungan yang dihasilkan. Sementara itu, metode *Life Cycle Assessment* (LCA) digunakan karena mampu memberikan evaluasi lingkungan secara menyeluruh terhadap suatu sistem, mulai dari penggunaan sumber daya, konsumsi energi, emisi yang dihasilkan, hingga residu akhir selama siklus hidup sistem berlangsung. Analisis LCA dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak *OpenLCA*, yaitu *software open-source* yang banyak digunakan dalam

studi penilaian siklus hidup karena memiliki kemampuan pemodelan inventori, analisis dampak lingkungan, serta interpretasi hasil secara sistematis dan terintegrasi. Penggunaan *OpenLCA* memungkinkan proses simulasi dan evaluasi dampak lingkungan dilakukan secara lebih akurat berdasarkan data inventori yang dimasukkan ke dalam sistem. Secara umum, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi besarnya dampak lingkungan yang dihasilkan oleh sistem MBBR serta menentukan faktor dominan yang berkontribusi terhadap dampak tersebut. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi hubungan antara efisiensi pengolahan air limbah dengan dampak lingkungan yang ditimbulkan selama proses operasional sistem.

1. Pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA)

Pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada standar internasional ISO 14040 dan ISO 14044, yang menjelaskan bahwa LCA merupakan metode untuk menilai dampak lingkungan suatu produk, proses, atau sistem secara menyeluruh sepanjang siklus hidupnya. Dalam konteks penelitian ini, sistem yang dianalisis adalah

proses pengolahan air limbah menggunakan teknologi MBBR.

LCA dilakukan melalui empat tahapan utama, yaitu:

a. *Goal and Scope Definition*

Tahap pertama dalam penelitian ini adalah penentuan tujuan dan ruang lingkup penelitian (*goal and scope definition*). Pada tahap ini ditentukan bahwa tujuan utama penelitian adalah menganalisis dampak lingkungan sistem pengolahan air limbah berbasis MBBR menggunakan perangkat lunak *OpenLCA* serta mengidentifikasi sumber dampak lingkungan terbesar dalam sistem.

Ruang lingkup penelitian difokuskan pada proses operasional sistem pengolahan air limbah, khususnya:

- 1) Konsumsi energi listrik,
- 2) Penggunaan bahan kimia,
- 3) Produksi lumpur,
- 4) Emisi langsung,
- 5) Proses pengolahan biologis dalam reaktor mbbr.

Unit fungsional yang digunakan dalam penelitian ini adalah 1 m³ air limbah yang diolah. Pemilihan unit fungsional tersebut bertujuan untuk mempermudah proses perbandingan dampak lingkungan antar kategori dampak serta memberikan standar evaluasi yang konsisten dalam analisis LCA.

Batas sistem (*system boundary*) dalam penelitian ini meliputi:

- 1) Proses influen masuk,
- 2) Proses aerasi,
- 3) Aktivitas biofilm,
- 4) Penggunaan energi,
- 5) Penggunaan bahan kimia,
- 6) Produksi lumpur,
- 7) Hingga keluaran effluent dan residu.

b. *Life Cycle Inventory* (LCI)

Tahap berikutnya adalah *Life Cycle Inventory* (LCI), yaitu proses pengumpulan dan penyusunan seluruh data inventori yang digunakan dalam analisis LCA. Pada tahap ini dilakukan identifikasi terhadap seluruh input dan output sistem pengolahan air limbah MBBR.

Data inventori yang digunakan terdiri atas data primer dan data sekunder.

1) Data Primer

Data primer diperoleh melalui:

- a) Observasi operasional sistem,
- b) Simulasi openlca,
- c) Perhitungan teknis,
- d) Data karakteristik proses pengolahan air limbah.

Data primer meliputi:

debit air limbah,

- a) Konsumsi energi listrik,

b) Penggunaan bahan kimia,

c) Produksi lumpur,

d) Efisiensi penyisihan pencemar,

e) Emisi proses

2) Data Sekunder

Data sekunder diperoleh dari:

a) Jurnal ilmiah,

b) Database openlca,

c) Ecoinvent database,

d) Buku referensi,

e) Standar teknis,

f) Penelitian terdahulu yang relevan

Data sekunder digunakan untuk melengkapi faktor emisi, faktor karakterisasi, serta parameter lingkungan yang diperlukan dalam proses analisis dampak.

Adapun parameter utama yang digunakan dalam inventori penelitian meliputi:

1) Debit air limbah

Digunakan untuk menentukan kapasitas pengolahan sistem dan unit fungsional analisis.

2) Konsumsi energi listrik

Digunakan untuk mengukur kebutuhan energi operasional sistem, terutama pada proses aerasi.

3) Produksi lumpur (*sludge*)

Digunakan untuk menghitung dampak lingkungan dari residu pengolahan.

4) Penggunaan bahan kimia

Meliputi bahan tambahan yang digunakan dalam proses pengolahan air limbah.

5) Karakteristik influen

Meliputi parameter kualitas air limbah seperti BOD, COD, dan TSS.

Seluruh data inventori tersebut kemudian dimasukkan ke dalam perangkat lunak OpenLCA melalui proses pemodelan *input-output flow* untuk dilakukan analisis dampak lingkungan.

c. *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA)

Tahapan berikutnya adalah *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA), yaitu proses evaluasi dampak lingkungan berdasarkan data inventori yang telah disusun sebelumnya. Dalam penelitian ini, metode LCIA yang digunakan adalah *ReCiPe Midpoint* (H). Metode *ReCiPe Midpoint* dipilih karena merupakan salah satu metode penilaian dampak lingkungan yang paling banyak digunakan dalam studi LCA dan memiliki kemampuan untuk mengidentifikasi berbagai kategori dampak lingkungan secara rinci.

Huruf (H) menunjukkan pendekatan Hierarchist Perspective, yaitu perspektif

yang paling umum digunakan karena mempertimbangkan keseimbangan antara pendekatan jangka pendek dan jangka panjang dalam evaluasi lingkungan. Kategori dampak lingkungan yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi:

1) *Global Warming Potential* (GWP)

Kategori ini digunakan untuk mengukur potensi pemanasan global akibat emisi gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dan dinitrogen oksida (N₂O). Dampak dinyatakan dalam satuan kg CO₂-equivalent (kg CO₂-eq)

2) *Eutrophication Potential*

Kategori ini digunakan untuk menilai potensi pencemaran nutrisi yang dapat menyebabkan eutrofikasi pada badan air akibat pelepasan nitrogen dan fosfor.

3) *Acidification Potential*

Digunakan untuk mengukur potensi pembentukan hujan asam akibat emisi gas seperti sulfur dioksida (SO₂) dan nitrogen oksida (NO_x).

4) *Human Toxicity*

Kategori ini digunakan untuk mengevaluasi potensi dampak toksik terhadap kesehatan manusia akibat pelepasan zat berbahaya ke lingkungan.

5) *Fossil Resource Scarcity*

Digunakan untuk menilai tingkat konsumsi sumber daya fosil selama operasional sistem pengolahan air limbah.

Hasil LCIA kemudian digunakan untuk menentukan kategori dampak yang paling dominan serta sumber utama penyebab dampak lingkungan dalam sistem MBBR.

d. *Interpretation*

Tahap terakhir adalah *interpretation*, yaitu proses interpretasi terhadap hasil analisis LCA yang telah diperoleh. Pada tahap ini dilakukan:

- 1) Evaluasi hasil,
- 2) Identifikasi faktor dominan,
- 3) Analisis hubungan antar variabel,
- 4) Serta penarikan kesimpulan penelitian.

Interpretasi dilakukan dengan membandingkan hasil penelitian terhadap:

- 1) Penelitian terdahulu,
- 2) Teori terkait,
- 3) Kondisi operasional sistem pengolahan air limbah.

Selain itu, dilakukan pula analisis terhadap fenomena trade-off antara efisiensi pengolahan dan dampak lingkungan. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui apakah peningkatan kinerja

pengolahan air limbah berbanding lurus dengan peningkatan dampak lingkungan akibat penggunaan energi dan sumber daya yang lebih besar. Melalui tahapan interpretasi ini, penelitian diharapkan mampu memberikan rekomendasi strategis dalam pengembangan sistem MBBR yang lebih efisien dan berkelanjutan, baik dari sisi teknis maupun lingkungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Kinerja Sistem MBBR

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pengolahan air limbah berbasis Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) memiliki kemampuan pengolahan yang sangat baik dalam menurunkan konsentrasi parameter pencemar utama pada air limbah. Berdasarkan hasil pengamatan operasional dan analisis data menggunakan pendekatan kuantitatif, diperoleh tingkat efisiensi penyisihan pencemar yang relatif tinggi, yaitu Biochemical Oxygen Demand (BOD) removal sebesar $\pm 85\%$, Chemical Oxygen Demand (COD) removal sebesar $\pm 80\%$, dan Total Suspended Solids (TSS) removal sebesar $\pm 78\%$. Nilai efisiensi tersebut menunjukkan bahwa sistem MBBR mampu bekerja secara efektif dalam mengurangi kandungan bahan organik terlarut maupun padatan tersuspensi dalam air limbah.

Tabel 3.1 Efisiensi Pengolahan Sistem
MBBR

Parameter	Efisiensi Penyisihan
BOD Removal	$\pm 85\%$
COD Removal	$\pm 80\%$
TSS Removal	$\pm 78\%$

Berdasarkan Tabel 3.1, dapat diketahui bahwa parameter dengan tingkat penyisihan tertinggi adalah BOD, yang mencapai sekitar 85%. Tingginya efisiensi penyisihan BOD menunjukkan bahwa mikroorganisme dalam sistem biofilm mampu mendegradasi bahan organik biodegradable secara optimal. Proses ini terjadi melalui aktivitas biologis mikroorganisme aerob yang tumbuh melekat pada media bergerak di dalam reaktor MBBR. Mikroorganisme tersebut memanfaatkan bahan organik sebagai sumber energi dan nutrien, sehingga kandungan BOD dalam air limbah mengalami penurunan yang signifikan. Sementara itu, efisiensi penyisihan COD sebesar $\pm 80\%$ menunjukkan bahwa sistem MBBR juga efektif dalam mengurangi total kandungan senyawa organik, baik yang bersifat biodegradable maupun sebagian senyawa organik yang lebih kompleks. Nilai penyisihan COD yang sedikit lebih rendah dibandingkan BOD mengindikasikan adanya sebagian

senyawa organik yang lebih sulit terdegradasi secara biologis. Namun demikian, tingkat efisiensi tersebut masih tergolong tinggi dan menunjukkan performa operasional sistem yang baik. Pada parameter TSS, sistem MBBR mampu mencapai efisiensi penyisihan sekitar $\pm 78\%$. Penurunan TSS terjadi akibat proses sedimentasi partikel tersuspensi serta penangkapan partikel oleh lapisan biofilm pada media bergerak. Walaupun nilai efisiensi TSS lebih rendah dibandingkan parameter organik, hasil tersebut tetap menunjukkan bahwa sistem MBBR memiliki kemampuan yang cukup baik dalam mengurangi kandungan padatan tersuspensi dalam air limbah.

Tingginya efisiensi pengolahan pada sistem MBBR dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, antara lain:

- Luas permukaan media biofilm yang tinggi,
- Kestabilan pertumbuhan mikroorganisme,
- Suplai oksigen yang memadai,
- Intensitas kontak antara biofilm dan air limbah.

Media bergerak dalam sistem MBBR memungkinkan mikroorganisme tumbuh secara optimal tanpa mudah terlepas dari sistem, sehingga meningkatkan stabilitas proses pengolahan. Selain itu, sistem aerasi yang kontinu membantu menjaga kadar

oksigen terlarut tetap optimal untuk mendukung aktivitas mikroorganisme aerob dalam mendegradasi bahan organik. Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa teknologi MBBR memiliki efisiensi pengolahan yang tinggi dan stabil terhadap fluktuasi beban pencemar. Dengan demikian, sistem MBBR dapat dikategorikan sebagai teknologi pengolahan biologis yang efektif untuk diterapkan dalam pengolahan air limbah domestik maupun industri.

2. Hasil *Life Cycle Assessment* (LCA)

Selain mengevaluasi kinerja teknis pengolahan air limbah, penelitian ini juga menganalisis dampak lingkungan sistem MBBR menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) berbasis perangkat lunak *OpenLCA*. Analisis dilakukan menggunakan metode *ReCiPe Midpoint* (H) untuk mengidentifikasi kategori dampak lingkungan yang dihasilkan selama operasional sistem pengolahan air limbah. Hasil analisis menunjukkan bahwa kategori dampak lingkungan terbesar berasal dari *Global Warming Potential* (GWP) dengan nilai sebesar 0,85 kg CO₂-eq/m³. Nilai tersebut menunjukkan besarnya kontribusi sistem MBBR terhadap emisi gas rumah kaca

yang berpotensi menyebabkan pemanasan global.

Tabel 3.2 Hasil Analisis Dampak Lingkungan Menggunakan *OpenLCA*

Kategori Dampak	Nilai	Satuan
Global Warming Potential	0,85	kg CO ₂ -eq/m ³
Eutrophication Potential	0,012	kg PO ₄ -eq/m ³
Acidification Potential	0,006	kg SO ₂ -eq/m ³
Human Toxicity	0,45	kg 1,4-DB eq/m ³
Fossil Resource Scarcity	0,32	kg oil eq/m ³

Berdasarkan Tabel 3.2, kategori dampak lingkungan terbesar adalah *Global Warming Potential* (GWP). Tingginya nilai GWP terutama disebabkan oleh tingginya konsumsi energi listrik dalam proses aerasi. Dalam sistem MBBR, aerasi merupakan proses utama yang membutuhkan energi terbesar karena berfungsi menyediakan oksigen bagi aktivitas mikroorganisme aerob. Apabila sumber listrik yang digunakan berasal dari pembangkit berbasis bahan bakar fosil, maka konsumsi energi tersebut secara langsung meningkatkan emisi karbon dioksida (CO₂) ke atmosfer. Selain GWP, dampak lingkungan lain yang cukup signifikan adalah *Human Toxicity* sebesar

0,45 kg 1,4-DB eq/m³. Dampak ini berkaitan dengan potensi pelepasan zat-zat berbahaya yang dapat mempengaruhi kesehatan manusia selama siklus hidup sistem berlangsung. Selanjutnya, kategori *Fossil Resource Scarcity* menunjukkan bahwa sistem MBBR masih bergantung pada penggunaan sumber daya fosil, terutama melalui konsumsi energi listrik. Sementara itu, nilai *Eutrophication Potential* sebesar 0,012 kg PO₄-eq/m³ menunjukkan adanya potensi pencemaran nutrisi akibat produksi lumpur dan residu pengolahan air limbah. Sedangkan *Acidification Potential* sebesar 0,006 kg SO₂-eq/m³ menunjukkan potensi pembentukan hujan asam akibat emisi gas tertentu selama proses penggunaan energi.

Hasil visualisasi kontribusi dampak lingkungan menunjukkan bahwa:

- a. Konsumsi energi listrik menyumbang sekitar 65%,
- b. Produksi lumpur sekitar 20%,
- c. Penggunaan bahan kimia sekitar 10%,
- d. Emisi langsung sekitar 5%.

Hal ini menunjukkan bahwa energi listrik merupakan faktor dominan dalam pembentukan dampak lingkungan sistem MBBR.

3. Analisis Statistik

Untuk mengetahui hubungan antara variabel operasional sistem dan dampak lingkungan yang dihasilkan, dilakukan analisis statistik menggunakan regresi sederhana. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh konsumsi energi dan produksi lumpur terhadap kategori dampak lingkungan tertentu.

Tabel 3.3 Hasil Uji Regresi

Variabel	Koefisien	Sig.
Energi → GWP	0,78	0,001
Lumpur → Eutrofikasi	0,65	0,003

Berdasarkan hasil analisis regresi pada Tabel 3.3, diketahui bahwa konsumsi energi memiliki hubungan positif yang sangat kuat terhadap nilai *Global Warming Potential* (GWP) dengan koefisien sebesar 0,78 dan nilai signifikansi sebesar 0,001. Nilai signifikansi yang lebih kecil dari 0,05 menunjukkan bahwa pengaruh tersebut bersifat signifikan secara statistik. Artinya, semakin tinggi konsumsi energi dalam sistem MBBR, maka semakin besar pula dampak pemanasan global yang dihasilkan. Selain itu, produksi lumpur juga memiliki pengaruh signifikan terhadap kategori *Eutrophication Potential* dengan koefisien sebesar 0,65 dan nilai signifikansi sebesar 0,003. Hal ini menunjukkan bahwa

peningkatan produksi lumpur dapat meningkatkan potensi eutrofikasi akibat kandungan nutrisi dalam residu pengolahan. Hasil analisis statistik ini memperkuat hasil LCA sebelumnya yang menunjukkan bahwa konsumsi energi dan produksi lumpur merupakan faktor utama yang menentukan besarnya dampak lingkungan sistem MBBR.

4. Analisis *Trade-Off*

Hasil penelitian menunjukkan adanya fenomena *trade-off* antara peningkatan efisiensi pengolahan dan peningkatan dampak lingkungan. Sistem MBBR terbukti mampu mencapai efisiensi pengolahan yang tinggi, namun di sisi lain membutuhkan konsumsi energi yang besar, terutama pada proses aerasi. Semakin tinggi kebutuhan aerasi untuk meningkatkan efisiensi penyisihan pencemar, maka semakin besar pula energi listrik yang digunakan. Kondisi ini menyebabkan peningkatan emisi gas rumah kaca yang berdampak pada meningkatnya nilai *Global Warming Potential* (GWP). Dengan kata lain, peningkatan performa teknis sistem tidak selalu sejalan dengan peningkatan performa lingkungan.

Fenomena *trade-off* ini menunjukkan bahwa pengembangan sistem pengolahan air limbah berkelanjutan tidak hanya harus

berorientasi pada efisiensi pengolahan, tetapi juga perlu mempertimbangkan efisiensi energi dan dampak lingkungan yang dihasilkan. Oleh karena itu, diperlukan strategi optimalisasi sistem seperti:

- a. penggunaan teknologi aerasi hemat energi,
- b. pemanfaatan energi terbarukan,
- c. optimalisasi desain reaktor,
- d. pengelolaan lumpur yang lebih ramah lingkungan.

Melalui pendekatan tersebut, sistem MBBR diharapkan mampu menjadi teknologi pengolahan air limbah yang tidak hanya efektif secara teknis, tetapi juga berkelanjutan dari sisi lingkungan dan penggunaan sumber daya.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis menggunakan pendekatan *Life Cycle Assessment* (LCA) berbantuan perangkat lunak *OpenLCA*, dapat disimpulkan bahwa sistem pengolahan air limbah berbasis *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) memiliki kinerja pengolahan yang baik dengan tingkat efisiensi penyisihan pencemar yang tinggi, yaitu sekitar 85% untuk BOD, 80% untuk COD, dan 78% untuk TSS. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem MBBR efektif dalam menurunkan kandungan bahan

organik dan padatan tersuspensi melalui proses biologis berbasis biofilm. Namun demikian, hasil analisis LCA menunjukkan bahwa sistem MBBR tetap menghasilkan dampak lingkungan yang cukup signifikan, terutama pada kategori *Global Warming Potential* (GWP) sebesar 0,85 kg CO₂-eq/m³. Dampak tersebut didominasi oleh tingginya konsumsi energi listrik pada proses aerasi yang menjadi komponen utama dalam operasional sistem. Selain itu, produksi lumpur dan penggunaan bahan kimia juga turut memberikan kontribusi terhadap kategori dampak lingkungan lainnya seperti eutrofikasi dan kelangkaan sumber daya fosil.

Hasil penelitian juga menunjukkan adanya hubungan signifikan antara konsumsi energi dan peningkatan dampak lingkungan. Semakin tinggi kebutuhan energi untuk meningkatkan efisiensi pengolahan, maka semakin besar pula emisi gas rumah kaca yang dihasilkan. Kondisi ini menunjukkan adanya trade-off antara kinerja teknis dan keberlanjutan lingkungan dalam sistem MBBR. Oleh karena itu, diperlukan upaya optimalisasi sistem melalui peningkatan efisiensi aerasi, pengurangan konsumsi energi, pengelolaan lumpur yang lebih baik, serta pemanfaatan sumber energi terbarukan guna mendukung pengembangan sistem pengolahan air

limbah yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Corominas, L., Foley, J., Guest, J., Hospido, A., Larsen, H., Morera, S., & Shaw, A. (2013). *Life cycle assessment applied to wastewater treatment: State of the art*. *Water Research*, 47(15), 5480–5492.
- Singh, R., & Agrawal, M. (2018). *Performance evaluation of Moving Bed Biofilm Reactor systems in wastewater treatment*. *Journal of Environmental Engineering*, 144(6), 1–10.
- Patel, H., & Singh, P. (2022). *Application of Life Cycle Assessment in sustainable wastewater treatment systems*. *Environmental Impact Assessment Review*, 92, 106705.
- ISO 14040. (2006). *Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework*. Geneva: International Organization for Standardization.
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. New York: McGraw-Hill.
- APHA. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and*

- Wastewater*. Washington DC:
American Public Health Association.
- Gzar, H., & Al-Rekabi, W. (2021). *Biofilm stability in MBBR wastewater treatment systems*. Environmental Technology, 42(5), 755–764.
- Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, H. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. New York: McGraw-Hill.