

EVALUASI KINERJA INSTALASI PENGOLAHAN AIR LIMBAH (IPAL) PADA FASILITAS DAUR ULANG PLASTIK: ANALISIS PARAMETER FISIK-KIMIA

Winda Islamiyah Umarie^{1*}, Arseto Yekti Bagastyo², Iskandar Umarie³, Rusdiana Setyaningtyas¹, Resti Dwi Utami¹, Vania Zitha Amodia¹

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember, Jawa Timur, Indonesia

²Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus Sukolilo, Jawa Timur, Indonesia

³Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Muhammadiyah Jember, Jawa Timur, Indonesia

*Korespondensi: winda.umarie@unmuhjember.ac.id

Abstrak

Industri daur ulang plastik menghasilkan air limbah dengan karakteristik yang kompleks dan memerlukan sistem pengolahan yang efektif untuk memenuhi standar kualitas lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) di fasilitas daur ulang plastik melalui analisis parameter fisik-kimia air limbah. Pengambilan sampel dilakukan di empat titik sampling yaitu *pump it* (PI), *floating clarifier* 1 (FC1), *floating clarifier* 2 (FC2), dan *floating clarifier* 3 (FC3) dalam dua kondisi operasional yang berbeda. Parameter fisik-kimia yang diukur meliputi COD, TSS, suhu, turbiditas, TOC, dan pH. IPAL yang diteliti terdiri dari tiga unit utama: *tube flocculator*, *electrocoagulation* (EC), dan *moving bed biofilm reactor* (MBBR). Hasil penelitian menunjukkan bahwa *tube flocculator* memiliki kinerja terbaik dengan efisiensi penyisihan TSS 94,7%, turbiditas 97,3%, dan COD 82,4% serta berhasil menetralkan pH dari 11,84 menjadi 7,24. Unit EC menunjukkan kinerja yang bervariasi antara kondisi operasional dan non-operasional, dengan efisiensi penyisihan BOD 42,9% dan turbiditas 40,9% pada kondisi operasional. MBBR dengan HRT 14,5 jam menunjukkan efisiensi penyisihan BOD 41,7% dan COD 13,8%. Meskipun demikian, kualitas efluen akhir belum memenuhi baku mutu yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No.5 Tahun 2014, khususnya untuk parameter BOD dan COD yang masih melampaui batas yang diizinkan. Penelitian ini memberikan evaluasi komprehensif terhadap kinerja IPAL fasilitas daur ulang plastik dan mengidentifikasi kebutuhan optimasi lebih lanjut untuk meningkatkan efektivitas pengolahan air limbah.

Kata kunci: Daur ulang plastik, *Electrocoagulation*, Kualitas air limbah, MBBR, *Tube flocculator*

Abstract

Plastic recycling industries generate wastewater with complex characteristics requiring effective treatment systems to meet environmental quality standards. This study aimed to evaluate the performance of Wastewater Treatment Plant (WWTP) at plastic recycling facilities (PRF) through analysis of wastewater physicochemical parameters. Sampling was conducted at four sampling points: pump it (PI), floating clarifier 1 (FC1), floating clarifier 2 (FC2), and floating clarifier 3 (FC3) under two different operational conditions. The physicochemical parameters measured included COD, TSS, temperature, turbidity, TOC, and pH. The investigated WWTP consisted of three main units: tube flocculator, electrocoagulation (EC), and moving bed biofilm reactor (MBBR). Results showed that tube flocculator had the best performance with removal efficiency of TSS 94.7%, turbidity 97.3%, and COD 82.4%, while successfully neutralizing pH from 11.84 to 7.24. EC unit showed variable performance between operational and non-operational conditions, with BOD removal efficiency of 42.9% and turbidity 40.9% under operational conditions. MBBR with HRT 14.5 hours showed BOD removal efficiency of 41.7% and COD 13.8%. However, the final effluent quality did not meet the standards set in Minister of Environment Regulation No.5 of 2014, particularly for BOD and COD parameters which still exceeded the permitted limits. This study provides comprehensive evaluation of WWTP performance in plastic recycling facilities and identifies the need for further optimization to improve wastewater treatment effectiveness.

Keywords: *Electrocoagulation, MBBR, Plastic recycling, Tube flocculator, Wastewater quality, WWTP*

1. PENDAHULUAN

Industri daur ulang plastik menjadi bagian penting dalam ekonomi sirkular karena dapat mengurangi limbah plastik sekaligus menyediakan bahan baku sekunder. Namun, proses pencucian dan pemrosesan plastik menghasilkan air limbah dengan karakteristik kompleks, termasuk kadar tinggi *Total Suspended Solids* (TSS), *Chemical Oxygen Demand* (COD), minyak, surfaktan, dan logam berat (Jabłońska, 2018). Tanpa pengolahan yang memadai, limbah ini berisiko mencemari badan air dan merusak kualitas lingkungan. Limbah industri memiliki tingkat bahaya yang lebih tinggi dibandingkan limbah pemukiman karena mengandung berbagai macam kontaminan yang berbeda tergantung dari jenis industrinya (Ahmed *et al.* 2021; Häder, 2018)

Kualitas air limbah yang dibuang ke lingkungan harus memenuhi standar yang ditetapkan, sehingga IPAL berperan krusial dalam sistem pengelolaan limbah industri. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 5 Tahun 2014 mengatur baku mutu limbah industri di Indonesia dengan menetapkan batasan ketat untuk parameter pH, COD, *Biological Oxygen Demand* (BOD), dan TSS. Sistem IPAL umumnya menerapkan tiga tahapan pengolahan: primer, sekunder, dan tersier, dengan pemilihan teknologi yang disesuaikan dengan karakteristik limbah. Perkembangan terkini dalam pengolahan air limbah menekankan pada penggabungan teknologi canggih untuk meningkatkan efisiensi sambil mengurangi konsumsi energi dan ketergantungan pada bahan kimia non-biodegradable (Fernandes *et al.*, 2024). Penelitian ini mengkaji IPAL pada fasilitas daur ulang plastik yang mengintegrasikan teknologi pengolahan primer (*tube flocculator* dan *electrocoagulation/EC*) dengan pengolahan sekunder (*moving bed biofilm reactor/MBBR*).

Tube flocculator bekerja berdasarkan prinsip koagulasi-flokulasi dan efektif dalam menyisihkan partikel tersuspensi serta menurunkan turbiditas (Khairul Zaman *et al.*, 2021). Proses koagulasi-flokulasi memiliki keunggulan dalam penyisihan koloid dan partikel terlarut, namun memiliki kekurangan dalam hal biaya operasional yang tinggi (Iwuozor, 2019). EC merupakan teknologi elektrokimia yang efisien untuk menyisihkan polutan organik dan logam berat melalui pembentukan koagulan in-situ, dan mulai banyak diterapkan karena tidak memerlukan penambahan bahan kimia eksternal (De La Luz-Pedro *et al.*, 2019). Di sisi lain, MBBR merupakan sistem biologis berbasis biofilm yang mampu mengolah polutan organik secara stabil, terutama saat terjadi fluktuasi beban limbah (Bobade & Joshi, 2023).

Studi terdahulu mengonfirmasi bahwa efektivitas IPAL ditentukan oleh kompatibilitas teknologi pengolahan dengan karakteristik limbah serta parameter kontrol operasional yang

tepat (Zhang *et al.*, 2020). Dengan demikian, evaluasi menyeluruh terhadap kinerja setiap unit pengolahan diperlukan untuk menganalisis efisiensi removal dan mengidentifikasi peluang peningkatan sistem.

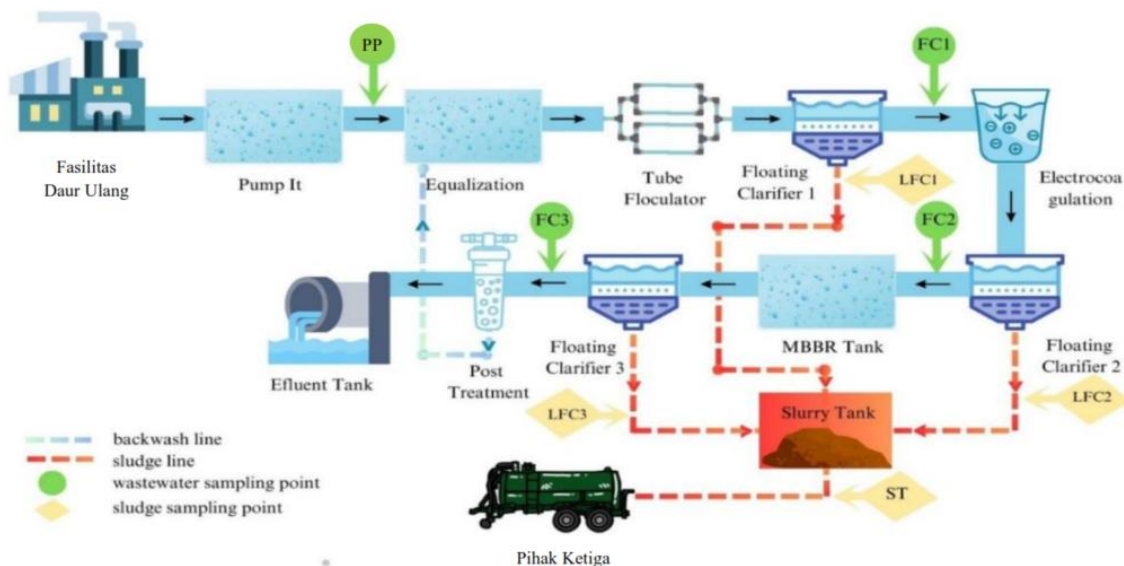
Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja IPAL fasilitas daur ulang plastik melalui monitoring parameter fisik-kimia kunci: *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biological Oxygen Demand* (BOD), *Total Suspended Solids* (TSS), *Total Organic Carbon* (TOC), turbiditas, pH, dan suhu pada tiga unit pengolahan utama (*tube flocculator*, EC, dan MBBR). Analisis dilakukan pada dua skenario operasional berbeda untuk memperoleh pemahaman menyeluruh tentang karakteristik sistem. Temuan penelitian ini diharapkan berkontribusi pada optimalisasi desain dan operasi IPAL serta penguatan kepatuhan terhadap standar lingkungan yang berlaku.

2. METODOLOGI

Air limbah yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari IPAL di fasilitas daur ulang plastik di Banten, Indonesia. Fasilitas ini mengolah limbah plastik botol air mineral dengan debit air limbah 24 m³/hari. Pengambilan sampel dilakukan di 4 titik, yaitu *pump pit* (PP), *floating clarifier* 1 (FC1), *floating clarifier* 2 (FC2), dan *floating clarifier* 3 (FC3). Titik-titik sampling ini dipilih untuk mewakili hasil efluen dari unit-unit yang ada di IPAL, yaitu *tube flocculator*, EC, dan MBBR. Diagram alir dan titik sampling dapat dilihat pada Gambar 1.

Pengambilan sampel dilakukan pada dua kondisi, yaitu operasional dan non-operasional. Kondisi operasional mengacu pada saat fasilitas aktif memproses bahan baku, sedangkan kondisi non-operasional adalah saat fasilitas tidak beroperasi. Setiap kondisi melibatkan pengambilan sampel pada tiga waktu (pagi, siang, sore) dengan volume 5 L per waktu sampling. Total 15 L sampel dihomogenisasi, kemudian diambil 5 L sebagai sampel akhir untuk analisis. Parameter fisik-kimia yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi suhu, pH, COD, BOD, TSS, TS, dan TOC. Seluruh prosedur analisis dilakukan sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI), yaitu pengukuran suhu (SNI 06-6989.23:2005), pH (SNI 6989.11:2019), COD (SNI 06-6989.2-2004), BOD (SNI 6989.72-2009), TSS (SNI 6989.3-2004), dan TS (SNI 06-6989.26-2005), sedangkan analisis TOC menggunakan instrumen *Sievers InnovOx* dengan metode *Supercritical Water Oxidation* (SCWO), yaitu teknik oksidasi pada kondisi superkritis yang mampu mengoksidasi berbagai senyawa organik dengan tingkat pemulihan tinggi serta stabilitas kalibrasi jangka panjang. Analisis parameter tersebut bertujuan untuk: (1) mengkarakterisasi kualitas air limbah pada setiap unit pengolahan, (2) mengevaluasi efisiensi

removal masing-masing tahapan proses IPAL, dan (3) mengkaji kinerja sistem pengolahan dalam mencapai baku mutu air limbah sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014.



Gambar 1. Titik sampling dari IPAL di fasilitas daur ulang (Sumber:Umarie & Bagastyo, 2024)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan metodologi yang telah ditetapkan, penelitian ini menghasilkan data lengkap mengenai karakteristik kualitas air limbah pada berbagai titik sampling dalam sistem pengolahan (Tabel 1) serta efisiensi penyisihan (Tabel 2). Data hasil pengujian mencerminkan dinamika proses pengolahan dalam dua kondisi operasional yang berbeda, memberikan pandangan mendalam untuk memahami konsistensi kinerja sistem serta mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi removal polutan pada setiap unit treatment. Temuan ini selanjutnya akan dianalisis secara sistematis untuk mengevaluasi efektivitas masing-masing unit pengolahan dalam mencapai standar baku mutu yang ditetapkan.

3.1. TUBE FLOCCULATOR

Kinerja *tube flocculator* dalam IPAL fasilitas daur ulang plastik menunjukkan efektivitas dalam menyisihkan berbagai polutan. *Tube flocculator* menggunakan *aluminium chlorohydrate* (ACH) sebagai koagulan dengan dosis 5,2 L/jam dan polimer 9 L/jam. Penurunan nilai TSS dari 2.927 mg/L menjadi 156 mg/L setara dengan efisiensi sebesar 94,7%. Efisiensi penyisihan turbiditas sebesar 97,3% di mana konsentrasi awal turbiditas sebesar 4.000 NTU menurun menjadi 110 NTU. COD juga menunjukkan penurunan yang signifikan dengan efisiensi

penyisihan 82,4% dari 9.260 mg/L menjadi 1.632 mg/L. Unit *tube flocculator* juga menunjukkan kemampuan yang baik dalam menetralkan pH, menurunkan dari 11,84 menjadi 7,24, yang penting untuk proses pengolahan selanjutnya. Kinerja unit dalam mengurangi TOC menunjukkan hasil efisiensi penyisihan sebesar 42,1%, menunjukkan kemampuan terbatas unit dalam menghilangkan materi organik terlarut.

Perbandingan hasil penelitian ini dengan penelitian terkait, efisiensi penyisihan turbiditas yang dicapai (97,3%) sangat mirip dengan temuan Khairul Zaman *et al.*, 2021, yang melaporkan efisiensi 97% menggunakan ACH dengan dosis 10 mg/L. Penelitian oleh Kuc *et al.* (2022) pada pengolahan air limbah farmasi menunjukkan hasil yang menarik untuk dibandingkan. Dalam penelitian tersebut, karakteristik awal air limbah farmasi yang diolah memiliki konsentrasi TOC 151 ± 23 mg/L, TSS 90 ± 9 mg/L, dan turbiditas 26 ± 2 NTU.

Dengan kondisi optimal menggunakan ACH (pH 6,5, dosis 0,35 mL/L, waktu kontak 30 menit), efisiensi penyisihan mencapai: 88,7% untuk TOC, 97,8% untuk TSS, dan 96,2% untuk turbiditas. Meskipun konsentrasi awal polutan dalam penelitian ini jauh lebih tinggi (TSS 2.927 mg/L, turbiditas 4.000 NTU, TOC 891 mg/L) dibandingkan dengan air limbah farmasi dalam studi Kuc *et al.*, efisiensi penyisihan untuk TSS dan turbiditas tetap sebanding. Namun, efisiensi penyisihan TOC dalam penelitian ini (42,1%) jauh lebih rendah dibandingkan dengan yang dicapai oleh Kuc *et al.* (88,7%). Perbedaan signifikan ini dapat disebabkan oleh variasi dalam karakteristik air limbah, terutama jenis dan kompleksitas senyawa organik yang ada, serta perbedaan kondisi operasional yang diterapkan.

Karakteristik awal air limbah dengan konsentrasi polutan yang tinggi dan pH yang sangat basa memberikan tantangan tersendiri dalam proses pengolahan. Unit *tube flocculator* menunjukkan kinerja yang sangat baik dalam penyisihan TSS dan turbiditas, dengan efisiensi removal yang mencapai di atas 95%. Kemampuan unit ini dalam menetralkan pH dari kondisi sangat basa (pH 11,2) menjadi netral (pH 7,1) menunjukkan efektivitas proses koagulasi-flokulasi yang optimal. Tingginya beban polutan awal, khususnya TSS yang mencapai 2.927 mg/L, memerlukan dosis koagulan yang optimal untuk mencapai efisiensi removal maksimal. Efektivitas ini dicapai melalui mekanisme destabilisasi koloid, yaitu netralisasi muatan dan *bridging*, di mana ion Al^{3+} hidroksida yang terbentuk dari ACH menjembatani partikel tersuspensi sehingga terbentuk flok yang stabil. Proses ini memungkinkan peningkatan

aglomerasi partikel dan mempermudah pengendapan flok yang lebih besar dan padat, sehingga mengoptimalkan efisiensi penyisihan polutan tersuspensi (Aragaw & Bogale, 2023).

Efisiensi penyisihan TOC yang relatif rendah (42,1%) mengindikasikan kompleksitas karakteristik senyawa organik dalam limbah daur ulang plastik. Limbah ini mengandung campuran senyawa organik dengan sifat fisiko-kimia yang beragam, termasuk surfaktan dan deterjen (bersifat amfifilik), polimer pendek dan oligomer (cenderung hidrofilik), serta aditif plastik (bersifat hidrofobik). Meskipun pH telah dikondisikan pada rentang optimal (7,24), fraksi organik hidrofilik dan senyawa dengan berat molekul rendah sulit dikoagulasi karena stabilitas tinggi dalam fase terlarut (Khan et al., 2019). Selain itu, keberadaan surfaktan dapat mengganggu mekanisme koagulasi dengan membentuk micelle yang menstabilkan partikel koloid, sehingga mengurangi efisiensi removal TOC secara keseluruhan (Wang et al., 2025).

3.2. ELECTROCOAGULATION

Unit elektrokoagulasi (EC) dalam sistem pengolahan air limbah ini menggunakan anoda aluminium (Al) dengan *current density* 304-310 A/m² (setara dengan 0,0304-0,031 mA/cm²) dan beroperasi pada pH 7,5. Sistem menunjukkan kinerja yang bervariasi antara kondisi operasional dan non-operasional. Pada kondisi operasional, efisiensi penyisihan menunjukkan hasil yang beragam dengan BOD mengalami penurunan sebesar 42,9%, TOC berkurang 39,5%, dan turbiditas menunjukkan penurunan 40,9%. Namun, efisiensi penyisihan untuk TSS dan COD relatif lebih rendah, masing-masing sebesar 17,9% dan 11%. Sementara pada kondisi non-operasional, unit EC menampilkan pola yang berbeda dengan penyisihan COD dan TOC yang relatif rendah (3,8% dan 17,6%), namun efisiensi penyisihan turbiditas meningkat menjadi 54,2%.

Perbandingan hasil penelitian dengan studi sebelumnya menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam efisiensi penyisihan. De La Luz-Pedro *et al.* (2019) melaporkan efisiensi penyisihan COD sebesar 72% dan TOC sebesar 57% dalam pengolahan limbah penyamakan menggunakan proses elektrokoagulasi dengan elektroda aluminium pada kondisi pH 7, *current density* 28 mA/cm², dan waktu elektrolisis 60 menit. Sementara itu, (Ebba *et al.* (2021) mencapai efisiensi penyisihan yang sangat tinggi untuk COD (97,02%) dan turbiditas (90,91%) dalam studi skala laboratorium menggunakan elektroda besi-besi pada pH 7,5 dengan *current density* 0,09 A selama 60 menit.

Tabel 1. Data Parameter Fisik-kimiandi IPAL Fasilitas Daur Ulang Plastik

Tabel 1. Data Parameter Fisik-kimiandi IPAL Fasilitas Daur Ulang Plastik

	pH	Suhu (°C)	TSS (mg/L)	TS (mg/L)	TVS organik (mg/L)	Turbidity (NTU)	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	TOC (mg/L)
Operasional									
Pump it	11.84	43.90	2927	-	-	4000	9260	1176	891
Efluen CF 1	7.24	31.13	156	-	-	110	1632	699	516
Efluen CF 2	7.35	30.43	128	-	-	65	1452	399	312
Efluen CF 3	7.92	29.43	156	-	-	55	1639	397	298
Slurry tank	8.01	26.83	-	12864	5308	-	-	-	-
Lumpur Effluen CF1	7.50	29.87	-	10976	5576	-	-	-	-
Lumpur Effluen CF2	7.82	30.73	-	9256	3224	-	-	-	-
Lumpur Effluen CF3	7.78	28.07	-	3876	820	-	-	-	-
Non-operasional									
Pump it	8.70	27.97	2150	-	-	950	1423		901
Efluen CF 1	7.50	27.37	140	-	-	120	1759		501
Efluen CF 2	7.40	26.97	112	-	-	55	1692	599	413
Efluen CF 3	8.43	26.43	136	-	-	50	1459	349	343
Slurry tank	7.20	27.27	-	6152	2668	-	-	-	-
Lumpur Effluen CF1	7.57	27.87	-	9740	5356	-	-	-	-
Lumpur Effluen CF2	7.98	27.13	-	15064	6428	-	-	-	-
Lumpur Effluen CF3	8.07	25.97	-	4720	1852	-	-	-	-

Perbedaan signifikan dalam efisiensi penyisihan dapat dikaitkan dengan variasi mendasar dalam karakteristik air limbah dan kondisi operasional yang diterapkan. Konsentrasi awal pencemar dalam penelitian ini jauh lebih tinggi, khususnya untuk COD (1.632–1.759 mg/L), dibandingkan dengan yang dilaporkan oleh De La Luz-Pedro *et al.* (533,33 mg/L) dan Ebba *et al.* (448 mg/L). Konsentrasi awal yang lebih tinggi menciptakan beban organik yang lebih besar, sehingga proses elektrokoagulasi dengan anoda aluminium memerlukan waktu reaksi yang lebih lama dan konsumsi energi listrik yang lebih besar untuk mencapai efisiensi optimal (Boinpally *et al.*, 2023).

Selain itu, perbedaan signifikan dalam *current density* yang digunakan juga menjadi faktor kunci dalam menjelaskan variasi efisiensi. *Current density* pada penelitian ini (304–310 A/m² atau 0,0304–0,031 mA/cm²) jauh lebih rendah dibandingkan dengan De La Luz-Pedro *et al.* (28 mA/cm²) dan Ebba *et al.* (90 mA/cm²). *Current density* yang lebih rendah menghasilkan laju dissolusi anoda aluminium yang lebih lambat, sehingga produksi ion Al³⁺ sebagai koagulan menjadi terbatas. Akibatnya, pembentukan flok Al(OH)₃ yang bertanggung jawab dalam destabilisasi koloid dan mekanisme *sweep coagulation* berlangsung dengan kinetika yang lebih lambat. Fenomena ini sejalan dengan Hukum Faraday, dimana jumlah koagulan yang dihasilkan berbanding lurus dengan arus yang diaplikasikan (Ghernaout & Elboughdiri, 2019).

Lebih lanjut, durasi elektrolisis yang lebih singkat dalam operasi skala penuh dibandingkan dengan kondisi laboratorium (60 menit) juga berkontribusi terhadap efisiensi yang lebih rendah. Waktu kontak yang terbatas mengurangi peluang interaksi antara koagulan dan partikel pencemar, sehingga proses flokulasi dan sedimentasi tidak mencapai kondisi optimal. Selain itu, perbedaan skala operasi antara penelitian ini (skala penuh) dan studi pembandingan (skala laboratorium) menciptakan kompleksitas tambahan, seperti fluktuasi beban hidraulik dan organik, keterbatasan homogenitas *mixing*, serta tantangan dalam pemeliharaan elektroda yang dapat mempengaruhi konsistensi kinerja sistem (Bani-Melhem *et al.*, 2017; Nguyen *et al.*, 2020).

3.3. MOVING BED BIOFILM REACTOR

MBBR merupakan teknologi pengolahan biologis yang dirancang untuk menyisihkan polutan organik dalam air limbah melalui proses biodegradasi oleh mikroorganisme yang melekat pada media pembawa. Dalam sistem pengolahan air limbah yang diteliti, unit MBBR menggunakan media biochip dengan volume media 3 m³, waktu retensi hidraulik (HRT) 14,5 jam, dan beroperasi pada kondisi aerobik dengan pasokan oksigen terlarut yang memadai. Kinerja MBBR dalam menyisihkan polutan organik menunjukkan hasil yang bervariasi, dengan efisiensi penyisihan BOD mencapai 41,7% dan COD sebesar 13,8%. Unit ini juga berkontribusi dalam penurunan TOC sebesar 16,9%, namun efisiensinya relatif lebih rendah dibandingkan dengan unit-unit pengolahan fisiko-kimia sebelumnya.

Perbandingan kinerja MBBR dalam penelitian ini dengan studi sebelumnya menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam efisiensi penyisihan. Bobade & Joshi (2023) melaporkan efisiensi penyisihan BOD yang jauh lebih tinggi mencapai 88,27% menggunakan media biochip serupa dalam skala laboratorium dengan HRT 12 jam untuk air limbah dengan BOD awal 286,62 mg/L.

Perbedaan mencolok dalam efisiensi penyisihan dapat dikaitkan dengan beberapa faktor fundamental yang mempengaruhi kinerja biologis sistem MBBR. Pertama, tingginya konsentrasi polutan dalam influen MBBR menciptakan beban organik yang berlebihan terhadap komunitas mikroba. Influen MBBR menunjukkan konsentrasi BOD sebesar 599 mg/L (kondisi operasional) dan 399 mg/L (kondisi non-operasional), serta COD masing-masing 1.452 mg/L dan 1.692 mg/L. Beban organik yang tinggi dapat menyebabkan inhibisi metabolisme mikroorganisme dan mengganggu keseimbangan ekosistem mikroba dalam biofilm. Menurut teori Monod, laju pertumbuhan mikroorganisme akan menurun ketika konsentrasi substrat melebihi kapasitas maksimum sistem, yang dapat menjelaskan rendahnya efisiensi removal yang diamati (Monod, 2012). Namun, pada konsentrasi substrat yang sangat tinggi, pertumbuhan mikroba dapat mengalami hambatan (*substrate inhibition*), sehingga efisiensi removal menurun (Andrew, 1968).

Selain itu, kompleksitas karakteristik air limbah daur ulang plastik, terutama karena adanya senyawa organik rekalsitran seperti polimer aditif, stabilizer, dan surfaktan, berpotensi menghambat aktivitas biologis dalam sistem MBBR. Senyawa-senyawa ini bersifat xenobiotik dan sulit didegradasi oleh mikroorganisme konvensional, sehingga diperlukan waktu adaptasi yang lebih lama atau pemanfaatan konsorsium mikroba khusus untuk mempertahankan kinerja proses. Struktur biofilm dan *Extracellular Polymeric Substances* (EPS) memang dapat memberikan perlindungan tambahan terhadap tekanan lingkungan, namun keberadaan senyawa toksik juga berisiko menimbulkan stres oksidatif yang berdampak pada penurunan aktivitas enzimatik dan efisiensi metabolisme mikroba (Das & Mishra, 2025).

Lebih lanjut, perbedaan skala operasi antara penelitian ini (skala penuh) dan studi pembandingan (laboratorium maupun pilot) menimbulkan tantangan dalam mempertahankan kondisi lingkungan yang optimal bagi pertumbuhan biofilm. Pada skala penuh, distribusi oksigen sering kali tidak merata akibat keterbatasan sistem aerasi, yang secara langsung mempengaruhi aktivitas mikroba dan stabilitas biofilm (Abu Hasan *et al.*, 2025). Selain itu, faktor pH, suhu, ketersediaan nutrisi, dan dinamika hidraulik seperti tingkat pencampuran dan turbulensi berperan penting dalam menjaga biofilm agar tetap stabil dan fungsional, sehingga tantangan operasional pada skala penuh cenderung lebih kompleks dibandingkan skala laboratorium (Madan *et al.*, 2022).

Evaluasi kualitas efluen MBBR menunjukkan bahwa unit ini belum mampu menghasilkan air olahan yang memenuhi baku mutu yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No.5 Tahun 2014 Lampiran XLVII (Tabel 3). Konsentrasi BOD dalam efluen mencapai 397

mg/L (operasional) dan 349 mg/L (non-operasional), sementara COD mencapai 1.639 mg/L dan 1.459 mg/L, yang keduanya masih melampaui batas maksimum yang diizinkan untuk Golongan I (BOD 50 mg/L, COD 100 mg/L) maupun Golongan II (BOD 150 mg/L, COD 300 mg/L). Meskipun demikian, konsentrasi TSS dalam efluen (156 mg/L dan 136 mg/L) masih berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan (400 mg/L), dan nilai pH efluen (7,92 dan 8,43) berada dalam rentang yang diizinkan (6-9).

Kinerja MBBR yang kurang optimal memerlukan strategi optimisasi menyeluruh melalui pendekatan multifaktorial. Penggunaan media *biocarrier* dengan luas permukaan tinggi, terutama desain media *3D-printed* canggih, dapat meningkatkan pertumbuhan biofilm dan efisiensi pengolahan secara signifikan. Teknologi *3D-printing* menawarkan fleksibilitas dalam desain dan pemilihan material manufaktur untuk menciptakan *biocarrier* dengan karakteristik optimal (Banti *et al.*, 2023; Madan *et al.*, 2022). Keunggulan teknologi ini telah didemonstrasikan oleh (Elliott *et al.* (2017) yang berhasil meningkatkan laju removal NH_3 sebesar 1.620 ppm/hari dibandingkan *biocarrier* konvensional melalui desain *spherical* dengan luas permukaan spesifik yang lebih besar. Tang *et al.* (2017) juga membuktikan efektivitas *biocarrier* 3D berbentuk struktur *honeycomb spherical* berlubang untuk removal COD dan NH_3 .

Optimasi sistem aerasi melalui penerapan *intermittent aeration* dengan OTR (*Oxygen Transfer Rate*) terkontrol terbukti mampu mempertahankan transfer oksigen yang efektif sambil mengurangi kebutuhan energi secara substansial (Abu Hasan *et al.*, 2025). Penyesuaian waktu tinggal hidraulik (HRT) terhadap fluktuasi beban organik menunjang pembentukan biofilm aktif yang lebih kuat dan meningkatkan degradasi substrat, dengan HRT optimal pada kisaran 12–16 jam (Ali Kawan *et al.*, 2016).

Tabel 2. Efisiensi penyisihan IPAL fasilitas daur ulang plastik

Kondisi	Lokasi	TSS (%)	Turbidity (%)	COD (%)	BOD (%)	TOC (%)
Operasional	Tube flocculator	94,67	97,25	82,38	40,56	42,09
	EC	17,95	40,9	11	42,9	39,5
	MBBR	-21,9*	15,4	-12,9	0,5	4,5
Non-Operasional	Tube flocculator	93,49	87,37	-23,61	–	44,40
	EC	20	54,2	3,8	–	17,6
	MBBR	-21,4	9,1	13,8	41,7	16,9

*nilai negatif menunjukkan peningkatan konsentrasi

Tabel 3. Baku mutu untuk usaha dan/atau kegiatan yang belum memiliki baku mutu air limbah yang diterapkan

Parameter	Satuan	Golongan I	Golongan II
pH		6-9	6-9
BOD	Mg/L	50	150
Parameter	Satuan	Golongan I	Golongan II
COD	mg/L	100	300
TSS	mg/L	200	400

4. KESIMPULAN

Evaluasi kinerja IPAL fasilitas daur ulang plastik menunjukkan efektivitas yang bervariasi pada setiap unit pengolahan. Unit *tube flocculator* menunjukkan kinerja terbaik dengan efisiensi penyisihan TSS 94,7%, turbiditas 97,3%, dan COD 82,4%, serta mampu menurunkan pH dari kondisi basa (11,84) menjadi netral (7,24). Unit EC dengan *current density* rendah (0,0304-0,031 mA/cm²) mencapai efisiensi BOD 42,9% dan turbiditas 40,9% pada kondisi operasional, namun efisiensi TSS dan COD relatif rendah. Sementara itu, MBBR dengan HRT 14,5 jam

hanya mencapai efisiensi BOD 41,7% dan COD 13,8%, terbatas oleh tingginya konsentrasi polutan influen serta kompleksitas senyawa organik dalam limbah daur ulang plastik.

Secara keseluruhan, kualitas efluen akhir masih belum memenuhi baku mutu dengan konsentrasi BOD (349–397 mg/L) dan COD (1.459–1.639 mg/L) yang melebihi batas maksimum Golongan I dan II. Untuk mencapai kepatuhan terhadap baku mutu air limbah, diperlukan strategi optimasi bertahap sebagai berikut: (1) Peningkatan *current density* unit EC dengan target efisiensi COD mencapai 60-70% dan BOD 55-60%; (2) Optimasi MBBR melalui bioaugmentasi dan penyesuaian parameter operasional untuk mencapai target efisiensi BOD 60-65% dan COD 35-40%; (3) Penambahan unit pengolahan tersier dengan efisiensi removal yang disesuaikan berdasarkan klasifikasi badan air penerima. Untuk discharge ke badan air Golongan II (COD < 300 mg/L, BOD < 150 mg/L), diperlukan unit tersier dengan efisiensi minimum 82% untuk COD dan 62% untuk BOD. Sementara untuk mencapai standar Golongan I yang lebih ketat (COD < 100 mg/L, BOD < 50 mg/L), diperlukan unit tersier dengan efisiensi minimum 94% untuk COD dan 87% untuk BOD. Implementasi strategi optimasi ini memungkinkan fleksibilitas dalam pencapaian target kualitas efluen sesuai dengan klasifikasi badan air penerima, sehingga dapat meminimalkan risiko pencemaran lingkungan. Penelitian ini memberikan dasar teknis untuk optimalisasi desain IPAL industri daur ulang plastik dengan pendekatan adaptif yang dapat disesuaikan dengan standar lingkungan yang berlaku.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, J., Thakur, A. and Goyal, A., 2021. Industrial wastewater and its toxic effects. In: M.P. Shah, ed. *Biological treatment of industrial wastewater*. 1st ed. London: The Royal Society of Chemistry, pp.1–14.
- Abu Hasan, H., Azahar, N.A. and Muhamad, M.H., 2025. Insights into aeration intensification in biofilm reactors for efficient wastewater treatment. *Water (Switzerland)*, 17(13). <https://doi.org/10.3390/w17131861>
- Ali Kawan, J., Abu Hasan, H., Suja, F., Jaafar, O., Bin Jaafar, O. and Abd-Rahman, R., 2016. A review on sewage treatment and polishing using moving bed biofilm reactor. *Journal of Engineering Science and Technology*, 11(8), pp.1098–1120.
- Andrews, J.F., 1968. A mathematical model for the continuous culture of microorganisms utilizing inhibitory substrates. *Biotechnology and Bioengineering*, 10(6), pp.707–723.
- Aragaw, T.A. and Bogale, F.M., 2023. Role of coagulation/flocculation as a pretreatment option to reduce colloidal/bio-colloidal fouling in tertiary filtration of textile

- wastewater: A review and future outlooks. *Frontiers in Environmental Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1142227>
- Bani-Melhem, K., Al-Shannag, M., Alrousan, D., Al-Kofahi, S., Al-Qodah, Z. and Rasool Al-Kilani, M., 2017. Impact of soluble COD on grey water treatment by electrocoagulation technique. *Desalination and Water Treatment*, 89, pp.101–110. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21379>
- Banti, D.C., Samaras, P., Kostopoulou, E., Tsioni, V. and 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>
- Bobade, G. and Joshi, A.R., 2023. Progression of various MBBR media in wastewater treatment process. *International Research Journal of Engineering and Technology*.
- Boinpally, S., Kolla, A., Kainthola, J., Kodali, R. and Vemuri, J., 2023. A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment. *Water Cycle*, 4, pp.26–36. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.01.001>
- Das, A. and Mishra, S., 2025. Reimagining biofiltration for sustainable industrial wastewater treatment. *Discover Sustainability*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01784-8>
- De La Luz-Pedro, A., Martínez Prior, E.F., López-Araiza, M.H., Jaime-Ferrer, S., Estrada-Monje, A. and Bañuelos, J.A., 2019. Pollutant removal from wastewater at different stages of the tanning process by electrocoagulation. *Journal of Chemistry*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8162931>
- Ebba, M., Asaithambi, P. and Alemayehu, E., 2021. Investigation on operating parameters and cost using an electrocoagulation process for wastewater treatment. *Applied Water Science*, 11(11). <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01517-y>
- Elliott, O. et al., 2017. Design and manufacturing of high surface area 3D-printed media for moving bed bioreactors for wastewater treatment. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 160(1), pp.144–156. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704x.2017.03246.x>
- Fernandes, J., Ramísio, P.J. and Puga, H., 2024. A comprehensive review on various phases of wastewater technologies: Trends and future perspectives. *Eng*, 5(4), pp.2633–2661. <https://doi.org/10.3390/eng5040138>
- Gheraout, D. and Elboughdiri, N., 2019. Electrocoagulation process intensification for disinfecting water: A review. *Applied Engineering*, 3(2), pp.140–147. <https://doi.org/10.11648/j.ae.20190302.20>

- Häder, D.-P., 2018. Ecotoxicological monitoring of wastewater. In: D.-P. Häder and G.S. Erzinger, eds. *Bioassays*. Elsevier, pp.369–386. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811861-0.00018-8>
- Iwuozor, K.O., 2019. Prospects and challenges of using coagulation-flocculation method in the treatment of effluents. *Advances in Journal of Chemistry A*, 2, pp.105–127. <https://doi.org/10.29088/SAMI/AJCA.2019.2.105127>
- Jabłońska, B., 2018. Water consumption management in polyethylene terephthalate (PET) bottles washing process via wastewater pretreatment and reuse. *Journal of Environmental Management*, 224, pp.215–224. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.054>
- Khairul Zaman, N. et al., 2021. Eco-friendly coagulant versus industrially used coagulants: Identification of their coagulation performance, mechanism and optimization in water treatment process. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(17). <https://doi.org/10.3390/ijerph18179164>
- Khan, R. et al., 2019. Effect of dissolved organic matter on agglomeration and removal of CuO nanoparticles by coagulation. *Processes*, 7(7), pp.1–12. <https://doi.org/10.3390/pr7070455>
- Kuc, J. et al., 2022. Determination and removal of selected pharmaceuticals and total organic carbon from surface water by aluminum chlorohydrate coagulant. *Molecules*, 27(17). <https://doi.org/10.3390/molecules27175740>
- Madan, S., Madan, R. and Hussain, A., 2022. Advancement in biological wastewater treatment using hybrid moving bed biofilm reactor (MBBR): A review. *Applied Water Science*, 12(6). <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01662-y>
- Monod, J., 2012. The growth of bacterial cultures. In: *Selected papers in molecular biology by Jacques Monod*, 139, p.606.
- Nguyen, Q.H. et al., 2020. COD removal from artificial wastewater by electrocoagulation using aluminum electrodes. *International Journal of Electrochemical Science*, 15(1), pp.39–51. <https://doi.org/10.20964/2020.01.42>
- Silva, J.A., 2025. Advanced oxidation process in the sustainable treatment of refractory wastewater: A systematic literature review. *Sustainability (Switzerland)*, 17(8). <https://doi.org/10.3390/su17083439>

- Srivastav, M. et al., 2018. Removal of refractory organic compounds from wastewater by various advanced oxidation process: A review. *Current Environmental Engineering*, 6(1), pp.8–16. <https://doi.org/10.2174/2212717806666181212125216>
- Tang, B. et al., 2017. Variation of the characteristics of biofilm on the semi-suspended bio-carrier produced by a 3D printing technique: Investigation of a whole growing cycle. *Bioresource Technology*, 244, pp.40–47. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.132>
- Umarie, W.I. and Bagastyo, A.Y., 2024. Microplastics identification in plastic recycling facility – Removal efficiencies of the treatment plants and its potential release to the environment. *Journal of Ecological Engineering*, 25(9). <https://doi.org/10.12911/22998993/191506>
- Wang, J. et al., 2025. Fate of dissolved organic matter and cooperation behavior of coagulation: Fenton combined with MBR treatment for pharmaceutical tail water. *Molecules*, 30(12). <https://doi.org/10.3390/molecules30122520>
- Zhang, Y. et al., 2020. Wastewater treatment technology selection under various influent conditions and effluent standards based on life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104562>