

Efektivitas MBBR dan Disinfeksi Fotokatalitik ZnO terhadap Kekeruhan, COD, dan Fecal Coliform Terhadap Limbah IPLT

Adithya Satria Pratama*, Rizka Novembrianto

Program Studi Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya, Indonesia

*Koresponden email: adithyasatria04@gmail.com

Diterima: 25 Juni 2026

Disetujui: 2 Juli 2026

Abstract

Domestic wastewater from fecal sludge treatment plants requires advanced treatment to reduce organic and microbiological pollutants before being discharged into the environment. This study evaluated the performance of a combined Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) and ZnO-based photocatalytic disinfection system in reducing turbidity, Chemical Oxygen Demand (COD), and Fecal Coliform in wastewater from the oxidation ditch outlet of IPLT Keputih, Surabaya. The MBBR process was operated using Kaldnes K3 media with filling ratios of 20% and 40% at detention times of 12, 24, and 36 hours. The polishing stage was conducted using photocatalytic disinfection with ZnO dosages of 0, 0.5, 1, and 1.5 g/L. The results showed that longer detention time and higher media filling ratio improved COD removal. The best COD reduction was obtained at 36 hours detention time with 40% Kaldnes media, resulting in a COD concentration of 176 mg/L and 77% removal efficiency. Turbidity values after coagulation-flocculation-sedimentation ranged from 0.58 to 0.70 NTU, indicating good clarification performance. In the photocatalytic disinfection process, the optimum ZnO dosage was 1 g/L, which reduced Fecal Coliform to <17–<18 MPN/100 mL. Increasing the ZnO dosage to 1.5 g/L did not provide a significant additional reduction. Overall, the combined MBBR and ZnO-based photocatalytic disinfection system was effective as an integrated treatment process, with optimum performance achieved at 36 hours detention time, 40% Kaldnes media, and 1 g/L ZnO.

Keywords: domestic wastewater; MBBR; kaldnes K3; ZnO photocatalyst; COD; fecal coliform

Abstrak

Air limbah domestik dari Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja (IPLT) masih berpotensi mengandung beban organik dan mikrobiologi yang perlu diolah lebih lanjut sebelum dibuang ke lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja kombinasi reaktor *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) dan *Photocatalytic Disinfection* berbasis ZnO dalam menurunkan parameter kekeruhan, *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan *Fecal Coliform* pada air limbah IPLT Keputih Surabaya. Reaktor MBBR dioperasikan menggunakan media Kaldnes K3 dengan variasi isian media 20% dan 40%, serta waktu tinggal 12, 24, dan 36 jam. Tahap *polishing* dilakukan menggunakan reaktor *Photocatalytic Disinfection* dengan variasi dosis ZnO sebesar 0; 0,5; 1; dan 1,5 g/L. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan waktu tinggal dan volume media Kaldnes berpengaruh terhadap penurunan kadar COD. Kondisi terbaik pada proses MBBR diperoleh pada waktu tinggal 36 jam dengan media Kaldnes 40%, yang menghasilkan kadar COD sebesar 176 mg/L dengan efisiensi penyisihan 77%. Nilai kekeruhan setelah proses koagulasi-flokulasi-sedimentasi berada pada rentang 0,58–0,70 NTU. Pada proses *Photocatalytic Disinfection*, dosis ZnO optimum diperoleh pada 1 g/L, yang mampu menurunkan *Fecal Coliform* hingga <17–<18 MPN/100 mL. Penambahan ZnO hingga 1,5 g/L tidak memberikan peningkatan penyisihan yang signifikan. Secara keseluruhan, kombinasi MBBR dan *Photocatalytic Disinfection* berbasis ZnO efektif digunakan sebagai sistem pengolahan lanjutan air limbah domestik.

Kata Kunci: air limbah domestik; MBBR; Kaldnes K3; fotokatalis ZnO; COD; fecal coliform

1. Pendahuluan

Permasalahan pengolahan air limbah domestik menjadi salah satu isu penting dalam pengelolaan lingkungan perkotaan karena meningkatnya aktivitas rumah tangga dan sanitasi masyarakat. Air limbah domestik yang tidak diolah secara optimal berpotensi mengandung bahan organik, padatan tersuspensi, serta mikroorganisme indikator pencemar seperti *Fecal Coliform*. Parameter seperti kekeruhan, *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan *Fecal Coliform* menjadi indikator penting dalam menilai kualitas air limbah karena berkaitan dengan beban pencemar organik, kejernihan air, serta potensi kontaminasi mikrobiologis. Di Indonesia, pengolahan air limbah domestik harus memperhatikan baku mutu sebagaimana diatur dalam

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Nomor 11 Tahun 2025 tentang baku mutu air limbah dan standar teknologi pengolahan air limbah domestik [9].

Salah satu teknologi biologis yang banyak digunakan dalam pengolahan air limbah adalah *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR). Teknologi ini bekerja dengan memanfaatkan mikroorganisme yang tumbuh melekat pada media bergerak di dalam reaktor, sehingga proses degradasi bahan organik dapat berlangsung lebih stabil. Media biofilm pada MBBR berfungsi sebagai tempat pertumbuhan mikroorganisme dan meningkatkan kontak antara air limbah, oksigen terlarut, serta biomassa aktif. Beberapa studi menjelaskan bahwa MBBR memiliki kemampuan dalam menyisihkan bahan organik dan nutrisi pada air limbah domestik maupun industri karena menggabungkan prinsip pertumbuhan tersuspensi dan melekat [10]. Penggunaan media Kaldnes juga mendukung peningkatan luas permukaan biofilm, sehingga dapat memperbesar peluang terjadinya proses biodegradasi dalam reaktor [15].

Meskipun demikian, proses biologis seperti MBBR masih memiliki keterbatasan, khususnya dalam menurunkan mikroorganisme patogen dan senyawa pencemar yang sulit terdegradasi secara biologis. Oleh karena itu, diperlukan proses lanjutan atau *polishing* untuk meningkatkan kualitas efluen sebelum dibuang ke lingkungan atau dimanfaatkan kembali. Salah satu teknologi yang dapat digunakan sebagai proses *polishing* adalah *Photocatalytic Disinfection*. Proses ini memanfaatkan fotokatalis yang diaktivasi oleh cahaya untuk menghasilkan spesies oksigen reaktif, seperti radikal hidroksil, yang mampu merusak struktur sel mikroorganisme dan membantu oksidasi senyawa organik. Zinc oxide (ZnO) merupakan salah satu fotokatalis yang banyak dikaji karena memiliki aktivitas fotokatalitik, sifat antibakteri, dan potensi aplikasi dalam proses desinfeksi air [17]. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa ZnO dapat memberikan kinerja inaktivasi bakteri yang baik dibandingkan fotokatalis konvensional tertentu seperti TiO₂ [14].

Selain dosis katalis dan intensitas cahaya, kekeruhan air limbah menjadi faktor penting yang harus diperhatikan sebelum air masuk ke reaktor fotokatalis. Kekeruhan yang tinggi dapat menghamburkan dan menyerap cahaya, terutama sinar UV, sehingga intensitas cahaya yang mencapai permukaan fotokatalis menurun. Kondisi tersebut dapat menimbulkan *shielding effect*, yaitu terhalangnya kontak antara cahaya, katalis, dan polutan, sehingga proses pembentukan radikal aktif menjadi kurang optimal. Menjelaskan bahwa agar laju reaksi fotokatalitik berlangsung dengan baik, kekeruhan air sebaiknya tidak melebihi 5 NTU, sedangkan kekeruhan di atas 30 NTU dapat menurunkan efisiensi fotokatalitik secara nyata akibat berkurangnya transmisi cahaya dalam media air [6]. Oleh karena itu, air limbah yang akan masuk ke reaktor fotokatalis perlu melalui tahap pra-perlakuan, seperti koagulasi, flokulasi, dan sedimentasi, untuk menurunkan partikel tersuspensi. Pada penelitian ini, nilai kekeruhan setelah proses koagulasi-flokulasi-sedimentasi berada pada rentang 0,58–0,70 NTU, sehingga telah memenuhi syarat operasional sebagai influen reaktor fotokatalis dan memungkinkan proses *Photocatalytic Disinfection* berbasis ZnO berlangsung lebih efektif.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja kombinasi reaktor MBBR dan *Photocatalytic Disinfection* berbasis ZnO dalam menurunkan parameter kekeruhan, COD, dan *Fecal Coliform* pada air limbah IPLT Keputih Surabaya. Reaktor MBBR dioperasikan menggunakan media Kaldnes K3 dengan variasi isian media 20% dan 40%, serta variasi waktu tinggal 12, 24, dan 36 jam. Selanjutnya, proses *Photocatalytic Disinfection* dilakukan menggunakan variasi dosis ZnO sebesar 0; 0,5; 1; dan 1,5 g/L untuk menentukan dosis optimum dalam penyisihan *Fecal Coliform*. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi teknis mengenai efektivitas integrasi proses biologis dan fotokatalitik sebagai alternatif pengolahan lanjutan air limbah domestik yang lebih efektif, efisien, dan ramah lingkungan. Bagian variabel dan fokus penelitian ini disesuaikan dengan dokumen skripsi yang memuat tujuan, lingkup, serta parameter penelitian berupa kekeruhan, COD, dan *Fecal Coliform*.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental skala laboratorium untuk menguji kinerja kombinasi *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) dan *photocatalytic disinfection* berbasis ZnO dalam menurunkan parameter kekeruhan, COD, dan *fecal coliform* pada air limbah IPLT. Sampel air limbah diambil dari outlet oxidation ditch IPLT Keputih Surabaya menggunakan metode grab sampling. Unit MBBR digunakan sebagai proses biologis utama, sedangkan reaktor *photocatalytic disinfection* digunakan sebagai tahap *polishing* untuk menurunkan kontaminasi mikrobiologis yang masih tersisa setelah pengolahan biologis. Parameter utama yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi kekeruhan, *Chemical Oxygen Demand* (COD), dan *fecal coliform*.

Tabel 1. Variasi Perlakuan Penelitian

Unit Pengelolaan	Variabel Perlakuan	Unit
MBBR	Volume media Kaldness K3	20% dan 40%
MBBR	Waktu Tinggal	12 jam, 24 jam, dan 36 jam
<i>Photocatalytic Disinfection</i>	Konsentrasi ZnO	0 g/L, 0,5 g/L, 1 g/L dan 1,5 g/L

Tahapan penelitian dilakukan secara bertahap agar proses biologis pada MBBR berjalan stabil sebelum efluen dialirkan ke unit *photocatalytic disinfection*. Secara umum, tahapan penelitian ini meliputi persiapan alat dan bahan, pengambilan sampel, proses seeding, aklimatisasi, penelitian utama, serta analisis kualitas air limbah.

- Tahap Persiapan

Tahap persiapan dilakukan dengan menyiapkan seluruh alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian. Alat yang disiapkan meliputi reaktor MBBR, reaktor *photocatalytic disinfection*, aerator, pompa sirkulasi, lampu UV-C, *magnetic stirrer*, pipa, serta peralatan pendukung analisis laboratorium. Bahan yang digunakan meliputi air limbah IPLT, media Kaldnes K3, katalis ZnO, dan bahan kimia untuk analisis parameter kualitas air limbah. Pada tahap ini juga dilakukan pengambilan sampel air limbah dari outlet *oxidation ditch* IPLT Keputih Surabaya menggunakan metode *grab sampling*.

Tabel 2. Uji Karakteristik Awal

Parameter	Satuan	Hasil Uji	Baku Mutu
COD	(Mg/L)	768	300
Kekeruhan	NTU	124	-
<i>Fecal Coliform</i>	<i>MPN/100ml</i>	1544	1000

Sumber: Hasil Uji Laboratorium

- Tahap *Seeding*

media lekat Kaldnes K3 sebelum reaktor digunakan pada penelitian utama. Pada tahap ini, air limbah asli dialirkan ke dalam reaktor yang telah diisi media Kaldnes K3 hingga terbentuk lapisan biofilm pada permukaan media. Proses *seeding* dilakukan secara alami selama ± 20 hari. Seeding diperlukan karena mikroorganisme perlu beradaptasi dengan karakteristik limbah dan membentuk komunitas biofilm yang aktif sehingga proses degradasi bahan organik dapat berlangsung lebih stabil pada tahap operasi utama. Dalam penelitian ini, perbandingan limbah cair dengan media lekat Kaldnes K3 digunakan sebesar 1:1, yaitu 14 L limbah cair IPLT Surabaya dan 14 L media Kaldnes K3. Tahap ini mengacu pada prinsip bahwa mikroorganisme perlu beradaptasi terlebih dahulu agar kinerja pengolahan menjadi lebih optimal [5].

- Tahap Aklimatisasi

Tahap aklimatisasi dilakukan secara batch untuk menyesuaikan mikroorganisme hasil *seeding* terhadap kondisi operasi dan karakteristik air limbah yang akan diolah. Aklimatisasi dilakukan pada variasi isian media Kaldnes K3 sebesar 20% dan 40%. Air limbah dimasukkan secara bertahap ke dalam reaktor, dimulai dari 30%, kemudian dinaikkan menjadi 60%, dan selanjutnya 90% dari volume air limbah. Pola bertahap ini digunakan untuk mencegah terjadinya *shock loading* akibat beban organik yang masuk secara mendadak. Aklimatisasi dinyatakan selesai apabila kondisi reaktor telah stabil (*Steady State*), yang ditunjukkan oleh fluktuasi efisiensi penyisihan COD tidak melebihi 10% [8].

- Tahap *Running* utama

Setelah proses aklimatisasi selesai, penelitian dilanjutkan ke tahap *running* utama menggunakan rangkaian reaktor MBBR, koagulasi–flokulasi–sedimentasi, dan *Photocatalytic Disinfection*. Reaktor MBBR berkapasitas 10 L dengan volume kerja 8 L dioperasikan secara aerobik menggunakan media Kaldnes K3 dengan variasi isian 20% dan 40% serta waktu tinggal 12, 24, dan 36 jam untuk mengetahui pengaruh jumlah media dan waktu kontak terhadap penurunan COD dan kekeruhan. Efluen MBBR kemudian diolah melalui unit koagulasi–flokulasi–sedimentasi menggunakan PAC untuk menurunkan kekeruhan agar penetrasi sinar UV pada tahap fotokatalitik tidak terhambat. Selanjutnya, efluen dimasukkan ke reaktor *Photocatalytic Disinfection*

berkapasitas 2 L yang dilengkapi lampu UV-C 13 watt dan sistem pengadukan, kemudian ditambahkan ZnO dengan variasi dosis tertentu. Tahap ini bertujuan menurunkan *fecal coliform* serta mengoksidasi senyawa organik tersisa sehingga kualitas akhir efluen menjadi lebih baik.

- *Running data*

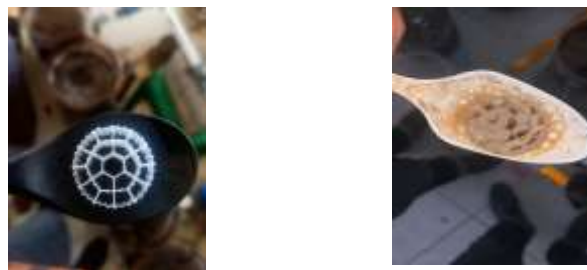
Parameter yang dianalisis dalam penelitian ini meliputi kekeruhan, COD, dan *fecal coliform*. Kekeruhan dianalisis menggunakan metode nefelometri berdasarkan SNI 06-6989.25-2005 dan dinyatakan dalam satuan NTU. COD dianalisis menggunakan metode titrasi berdasarkan SNI 6989.73:2019 untuk mengetahui jumlah oksigen yang diperlukan dalam oksidasi senyawa organik terlarut maupun tersuspensi. *Fecal coliform* dianalisis menggunakan metode *Most Probable Number* melalui teknik fermentasi tabung ganda berdasarkan SM APHA 23rd Edition 2017, metode 9221 A dan 9221 C. Hasil analisis digunakan untuk membandingkan kualitas air sebelum dan sesudah pengolahan, sekaligus menentukan efektivitas kombinasi MBBR dan *photocatalytic disinfection* dalam menurunkan parameter pencemar air limbah domestik.

3. Hasil dan Pembahasan

Air limbah yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari *outlet oxidation ditch* IPLT Keputih Surabaya. Pengujian awal dilakukan untuk mengetahui kondisi awal parameter pencemar sebelum proses pengolahan menggunakan kombinasi MBBR, koagulasi, flokulasi, sedimentasi, dan *Photocatalytic Disinfection*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai COD sebesar 768 mg/L, *fecal coliform* sebesar 1564 MPN/100 mL, dan kekeruhan sebesar 124 NTU. Nilai COD dan *fecal coliform* tersebut masih melebihi baku mutu air limbah domestik berdasarkan Permen LH/BPLH No. 11 Tahun 2025, yaitu COD sebesar 300 mg/L dan *fecal coliform* sebesar 1000 MPN/100 mL. Kondisi ini menunjukkan bahwa efluen *outlet oxidation ditch* masih memerlukan pengolahan lanjutan untuk menurunkan beban organik, partikel tersuspensi, dan kontaminasi mikrobiologis sebelum dilepas ke lingkungan.

Tahap Seeding dan Aklimatisasi

Tahap seeding dilakukan untuk menumbuhkan mikroorganisme pada media Kaldnes K3 sebelum reaktor MBBR digunakan pada proses pengolahan utama. Pada penelitian ini, seeding dilakukan secara alami dengan mengalirkan air limbah domestik IPLT ke dalam reaktor yang telah berisi media lekat Kaldnes K3 selama ± 20 hari. Tahap ini bertujuan membentuk biofilm pada permukaan media sehingga mikroorganisme tidak hanya berada dalam kondisi tersuspensi, tetapi juga melekat pada media sebagai biomassa aktif. Mekanisme ini penting karena sistem MBBR bekerja berdasarkan prinsip attached growth, yaitu mikroorganisme tumbuh pada permukaan media dan memanfaatkan senyawa organik dalam air limbah sebagai substrat. Media pada MBBR berfungsi sebagai tempat melekatnya mikroorganisme sekaligus memperluas kontak antara air limbah, oksigen, dan biomassa [16]. Media Kaldnes dirancang untuk menyediakan ruang pertumbuhan biofilm agar proses biologis dapat berlangsung lebih stabil [15].



Gambar 2. Tahap Seeding

Setelah tahap seeding selesai, proses dilanjutkan dengan aklimatisasi untuk menyesuaikan mikroorganisme terhadap karakteristik limbah yang akan diolah. Aklimatisasi dilakukan secara batch pada dua variasi isian media Kaldnes K3, yaitu 20% dan 40%. Konsentrasi limbah dinaikkan secara bertahap dari 30%, 60%, hingga 90% untuk menghindari shock loading atau beban organik mendadak yang dapat mengganggu aktivitas mikroorganisme. Pada konsentrasi 30%, campuran dibuat dari 2,4 L air limbah dan 5,6 L aquadest; pada konsentrasi 60%, digunakan 4,8 L air limbah dan 3,2 L aquadest; sedangkan pada konsentrasi 90%, digunakan 7,2 L air limbah dan 0,8 L aquadest. Pola peningkatan bertahap ini memberi waktu bagi mikroorganisme untuk menyesuaikan aktivitas metabolismenya terhadap kenaikan beban organik. Proses biologis dalam pengolahan air limbah sangat dipengaruhi oleh kemampuan mikroorganisme dalam memanfaatkan bahan organik sebagai sumber energi dan pertumbuhan [11]. bahwa

aklimatisasi dapat dinyatakan stabil (*Steady State*) apabila fluktuasi efisiensi penyisihan COD tidak melebihi 10% [8].

Tabel 3. Data Aklimatisasi 30%

Konsentrasi Limbah (%)	Isian	Hari	Kadar (mg/L)	Removal per hari	Removal dari H0
30%	20%	0	225	-	-
		1	162	28%	28%
		2	138	15%	39%
		3	126	9%	44%
		4	115	9%	49%
		0	225	-	-
	40%	1	150	33%	33%
		2	126	16%	44%
		3	116	8%	48%
		4	107	8%	52%

Sumber: Hasil Analisis, 2026

Tabel 4. Data Aklimatisasi 60%

Konsentrasi Limbah (%)	Isian	Hari	Kadar (mg/L)	Removal per hari	Removal dari H0
60%	20%	0	457	-	-
		1	338	26%	26%
		2	253	25%	45%
		3	198	22%	57%
		4	162	18%	65%
		5	147	9%	68%
		6	134	9%	71%
		0	457	-	-
		40%	1	309	32%
	2		213	31%	53%
	3		154	28%	66%
	4		128	17%	72%
	5		116	9%	75%
	6		106	9%	77%

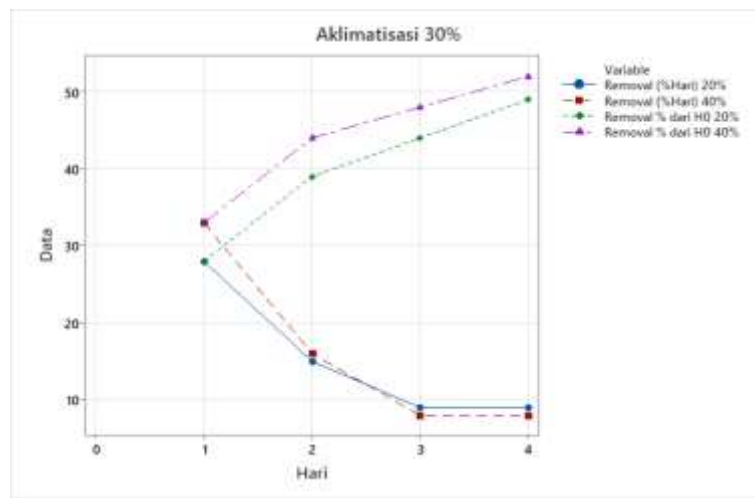
Sumber: Hasil Analisis, 2026

Tabel 5. Data Aklimatisasi 90%

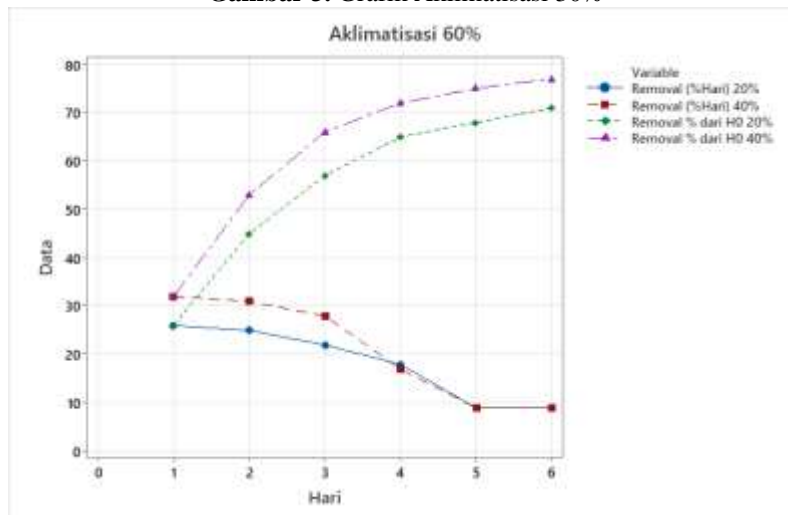
Konsentrasi Limbah (%)	Isian	Hari	Kadar (mg/L)	Removal per hari	Removal dari H0
90%	20%	0	597	-	-
		1	439	26%	26%
		2	328	25%	45%
		3	248	24%	58%
		4	187	25%	69%
		5	147	21%	75%
		6	128	13%	79%
		7	116	9%	81%
		8	107	8%	82%
	40%	0	597	-	-
		1	414	31%	31%
		2	278	33%	53%
		3	192	31%	68%
		4	138	28%	77%
		5	116	16%	81%
		6	104	10%	83%
		7	96	8%	84%
		8	88	8%	85%

Sumber: Hasil Analisis, 2026

Hasil aklimatisasi menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi limbah diikuti oleh kenaikan nilai COD awal, tetapi reaktor tetap mampu menurunkan COD pada setiap tahap pengamatan. Pada konsentrasi limbah 30%, nilai COD pada isian media Kaldnes 20% menurun dari 225 mg/L pada hari ke-0 menjadi 115 mg/L pada hari ke-4, sedangkan pada isian media Kaldnes 40% menurun dari 225 mg/L menjadi 107 mg/L. Pada konsentrasi limbah 60%, nilai COD pada isian media Kaldnes 20% menurun dari 457 mg/L pada hari ke-0 menjadi 134 mg/L pada hari ke-6, sedangkan pada isian media Kaldnes 40% menurun dari 457 mg/L menjadi 106 mg/L. Pola tersebut menunjukkan bahwa mikroorganisme dalam reaktor mampu beradaptasi terhadap peningkatan beban organik selama proses aklimatisasi. Selain itu, isian media Kaldnes 40% menghasilkan nilai COD akhir yang lebih rendah dibandingkan isian media 20% pada kedua konsentrasi limbah. Hal ini mengindikasikan bahwa jumlah media yang lebih besar menyediakan luas permukaan yang lebih luas bagi pertumbuhan biofilm, sehingga proses penguraian senyawa organik dapat berlangsung lebih optimal. Data aklimatisasi pada konsentrasi limbah 90% belum dicantumkan karena hasil pengujiannya masih belum tersedia.



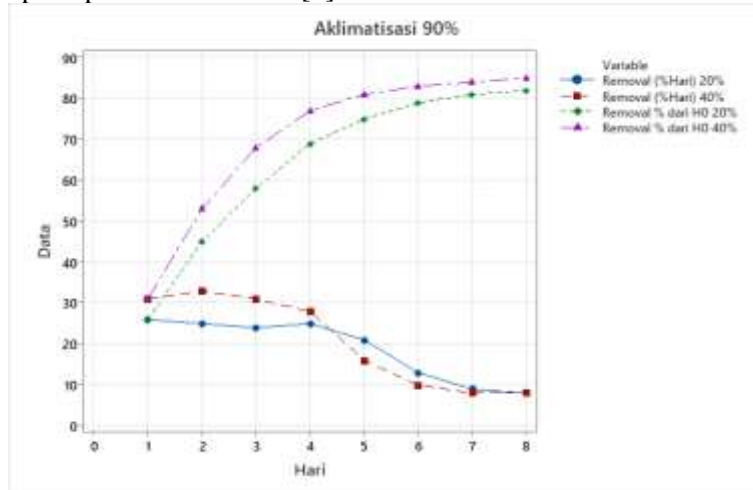
Gambar 3. Grafik Aklimatisasi 30%



Gambar 4. Grafik Aklimatisasi 60%

Perbandingan antara media Kaldnes K3 20% dan 40% menunjukkan bahwa reaktor dengan media 40% memiliki kinerja aklimatisasi yang lebih baik. Hal ini terlihat dari nilai COD akhir yang selalu lebih rendah pada media 40% dibandingkan media 20% di setiap konsentrasi limbah. Pada konsentrasi limbah 30%, media 40% menghasilkan COD akhir 83 mg/L, lebih rendah dibandingkan media 20% sebesar 101 mg/L. Pada konsentrasi 60%, media 40% menghasilkan COD akhir 104 mg/L, sedangkan media 20% masih sebesar 196 mg/L. Pada konsentrasi 90%, media 40% juga menunjukkan hasil lebih baik dengan COD akhir 272 mg/L dibandingkan media 20% sebesar 352 mg/L. Perbedaan ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah media memberikan luas permukaan yang lebih besar bagi mikroorganisme untuk melekat dan membentuk biofilm. Proses biakan melekat, jumlah bakteri sangat dipengaruhi oleh luas permukaan media

yang tersedia [12]. Media biocarrier berperan dalam mempertahankan biomassa di dalam sistem melalui pembentukan biofilm pada permukaan media [7].



Gambar 5. Grafik Aklimatisasi 90%

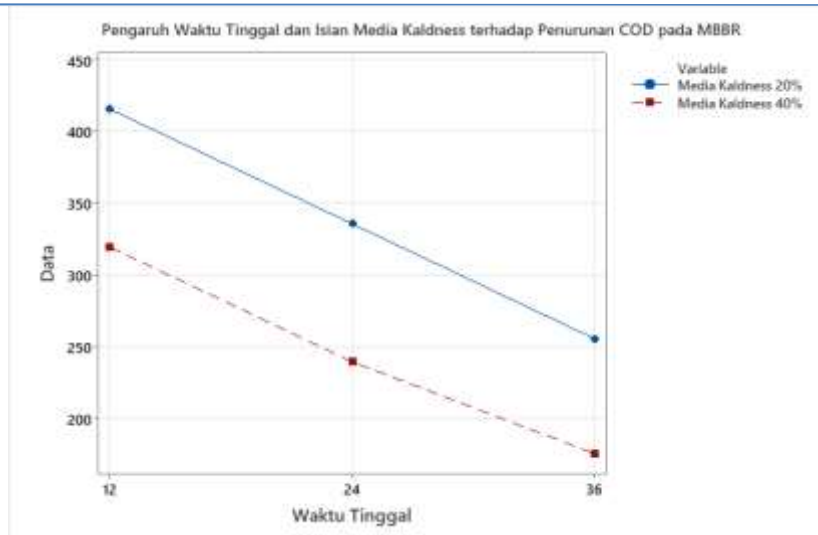
Berdasarkan hasil tersebut, tahap aklimatisasi dapat dinilai berhasil karena mikroorganisme mampu beradaptasi terhadap peningkatan konsentrasi limbah secara bertahap dan tetap menunjukkan kemampuan menurunkan COD. Media Kaldnes K3 40% memberikan respons biologis yang lebih baik dibandingkan media 20% karena menghasilkan COD akhir yang lebih rendah pada seluruh variasi konsentrasi limbah. Dengan demikian, aklimatisasi berperan sebagai tahap transisi yang penting antara seeding dan running utama. Tahap ini memastikan bahwa biofilm yang terbentuk pada media telah cukup stabil, mikroorganisme telah mampu menerima beban organik yang lebih tinggi, dan reaktor MBBR siap digunakan pada proses pengolahan utama.

Pengaruh Waktu Tinggal dan Isian Media Kaldness terhadap Penurunan COD pada MBBR

Penurunan *Chemical Oxygen Demand* (COD) merupakan salah satu indikator penting dalam menilai keberhasilan proses pengolahan biologis air limbah, karena parameter ini menggambarkan besarnya kandungan bahan organik yang masih terdapat di dalam air limbah. Proses *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) memanfaatkan mikroorganisme yang tumbuh melekat pada media bergerak untuk mendegradasi senyawa organik, sehingga efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh waktu tinggal dan jumlah media yang digunakan. Semakin lama waktu tinggal, semakin besar peluang terjadinya kontak antara air limbah, biofilm, dan oksigen terlarut. Selain itu, peningkatan volume media Kaldness juga dapat memperbesar luas permukaan tempat tumbuhnya biofilm, sehingga kemampuan reaktor dalam menurunkan COD menjadi lebih optimal [15].

Tabel 6. Pengaruh Waktu Tinggal dan Isian Media Kaldness terhadap Penurunan COD pada MBBR

Waktu Tinggal	Isian Media	Hasil Uji
12 Jam	20%	416
12 Jam	40%	320
24 Jam	20%	336
24 Jam	40%	240
36 Jam	20%	256
36 Jam	40%	176



Gambar 6. Grafik Pengaruh Waktu Tinggal dan Isian Media Kaldness terhadap Penurunan COD pada MBBR

Pada penggunaan media Kaldness 20%, konsentrasi COD mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya waktu tinggal. COD tercatat sebesar 416 mg/L pada waktu tinggal 12 jam, kemudian menurun menjadi 336 mg/L pada waktu tinggal 24 jam, dan kembali turun menjadi 256 mg/L pada waktu tinggal 36 jam. Pola ini menunjukkan bahwa waktu tinggal yang lebih lama memberikan kesempatan lebih besar bagi mikroorganisme dalam biofilm untuk menguraikan senyawa organik yang terdapat pada air limbah. Dengan demikian, proses biodegradasi berlangsung lebih efektif karena kontak antara substrat organik dan biomassa aktif terjadi dalam durasi yang lebih Panjang [13].

Pola penurunan yang lebih baik terlihat pada penggunaan media Kaldness 40%. Pada variasi ini, COD menurun dari 320 mg/L pada waktu tinggal 12 jam menjadi 240 mg/L pada 24 jam, kemudian mencapai 176 mg/L pada 36 jam. Efisiensi penyisihan tertinggi diperoleh pada media Kaldness 40% dengan waktu tinggal 36 jam, yaitu sebesar 77,08% berdasarkan COD awal 768 mg/L. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan volume media mampu mendukung pertumbuhan biofilm yang lebih banyak, sehingga jumlah mikroorganisme aktif dalam proses degradasi bahan organik juga meningkat. Kondisi operasi yang memenuhi baku mutu COD diperoleh pada media 20% selama 36 jam serta media 40% selama 24 dan 36 jam, sehingga MBBR dapat dinilai efektif dalam menurunkan beban organik air limbah [11].

Pengaruh Koagulasi–Flokulasi–Sedimentasi terhadap Kekeruhan

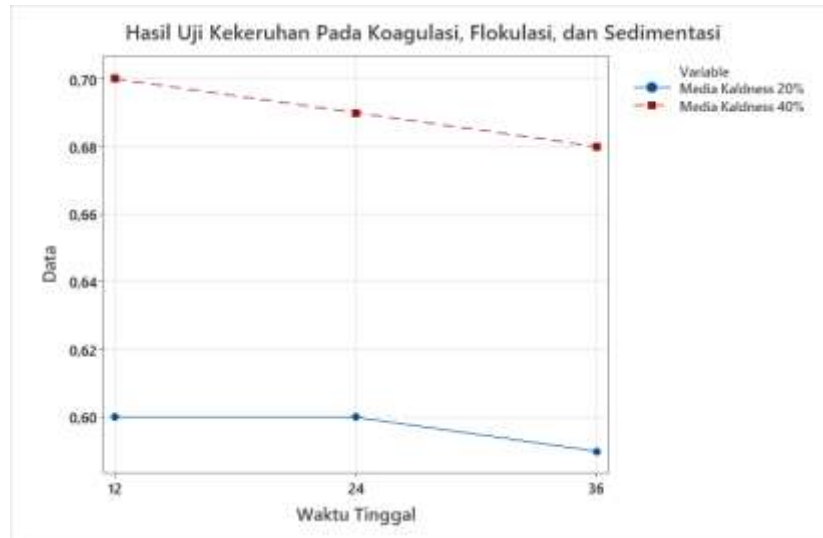
Setelah proses MBBR, efluen diolah melalui proses koagulasi–flokulasi–sedimentasi menggunakan PAC untuk menurunkan kandungan partikel koloid dan padatan tersuspensi yang masih tersisa. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai kekeruhan setelah proses tersebut berada pada kisaran 0,59–0,70 NTU. Pada isian media Kaldnes 20%, nilai kekeruhan sebesar 0,60 NTU pada waktu tinggal 12 jam, tetap sebesar 0,60 NTU pada waktu tinggal 24 jam, dan menurun menjadi 0,59 NTU pada waktu tinggal 36 jam. Sementara itu, pada isian media Kaldnes 40%, nilai kekeruhan sebesar 0,70 NTU pada waktu tinggal 12 jam, kemudian menurun menjadi 0,69 NTU pada waktu tinggal 24 jam dan 0,68 NTU pada waktu tinggal 36 jam.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan waktu tinggal cenderung menurunkan nilai kekeruhan, meskipun penurunannya relatif kecil. Pada seluruh variasi waktu tinggal, isian media 20% menghasilkan nilai kekeruhan yang lebih rendah dibandingkan isian media 40%. Kondisi ini menunjukkan bahwa jumlah media yang lebih besar tidak selalu menghasilkan efluen yang lebih jernih karena peningkatan jumlah media dapat menyebabkan lebih banyak biofilm terlepas dan terbawa sebagai padatan tersuspensi. Meskipun demikian, proses koagulasi–flokulasi–sedimentasi mampu menghasilkan efluen dengan tingkat kekeruhan yang rendah sebelum memasuki proses fotokatalitik. Kondisi tersebut mendukung proses fotokatalitik karena kekeruhan yang rendah dapat mengurangi hamburan dan penyerapan sinar UV sehingga intensitas cahaya yang mencapai permukaan fotokatalis menjadi lebih optimal. Menurut referensi [6], proses fotokatalitik lebih efektif pada kondisi kekeruhan rendah, idealnya tidak lebih dari 5 NTU. Oleh karena itu, nilai kekeruhan sebesar 0,59–0,70 NTU telah memenuhi kondisi yang mendukung proses *photocatalytic disinfection*.

Tabel 7. Hasil Uji Kekeruhan setelah Koagulasi, Flokulasi, dan Sedimentasi

Waktu Tenggat	Isian Media	Hasil Uji
12 Jam	20%	0,60
12 Jam	40%	0,70
24 Jam	20%	0,60
24 Jam	40%	0,69
36 Jam	20%	0,59
36 Jam	40%	0,68

Sumber: Hasil Analisis, 2026



Gambar 7. Grafik Hasil Uji Kekeruhan Pada Koagulasi, Flokulasi dan Sedimentasi

Pengaruh Dosis ZnO terhadap Penurunan Fecal Coliform

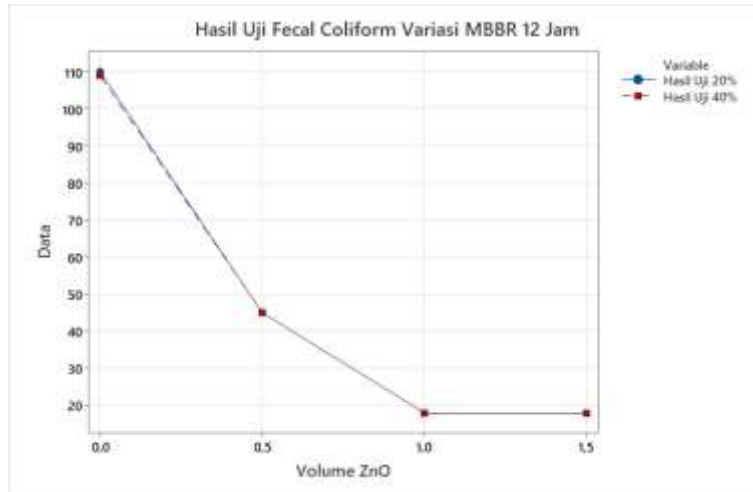
Tahap *Photocatalytic Disinfection* menunjukkan bahwa dosis ZnO berpengaruh terhadap penurunan *fecal coliform*. Tanpa penambahan ZnO, jumlah *fecal coliform* berada pada kisaran 109–110 MPN/100 mL. Pada penambahan ZnO 0,5 g/L, nilai tersebut menurun menjadi 44–45 MPN/100 mL. Penurunan paling optimal terjadi pada dosis ZnO 1 g/L, yaitu mencapai <17 hingga <18 MPN/100 mL. Peningkatan dosis menjadi 1,5 g/L tidak memberikan penurunan tambahan yang signifikan karena hasilnya tetap berada pada kisaran <17 hingga <18 MPN/100 mL. Hal ini menunjukkan bahwa dosis ZnO 1 g/L merupakan dosis optimum karena telah mampu memberikan penyisihan maksimum dengan penggunaan katalis yang lebih efisien. Mekanisme penurunan *fecal coliform* terjadi karena ZnO yang teraktivasi oleh sinar UV menghasilkan spesies oksidatif reaktif, seperti radikal hidroksil dan *superoksida*, yang dapat merusak membran sel, protein, dan materi genetik mikroorganisme [3].

Tabel 8. Tabel Uji Pengaruh Dosis ZnO terhadap Penurunan *Fecal Coliform*

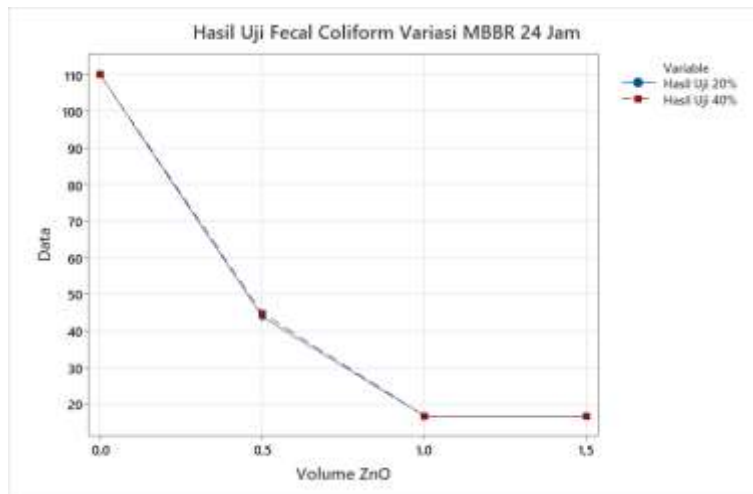
Waktu Tenggat	Isian Media	Volume ZnO	Hasil Uji
12 Jam	20%	0	110
		0,5	45
		1	<18
	40%	1,5	<18
		0	109
		0,5	45
24 Jam	20%	1	<18
		1,5	<18
		0	110
	40%	0,5	44
		1	<17
		1,5	<17
36 Jam	20%	0	110

Waktu Tinggal	Isian Media	Volume ZnO	Hasil Uji
		0,5	45
		1	<18
		1,5	<18
		0	109
	40%	0,5	44
		1	<18
		1,5	<18

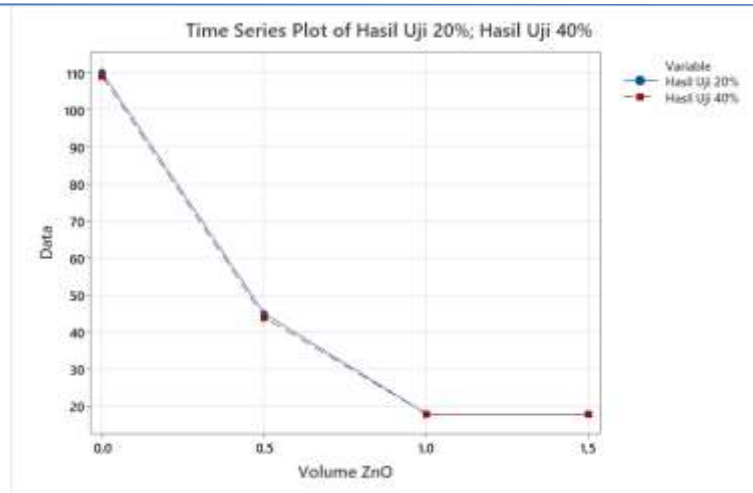
Sumber: Hasil Analisis 2026



Gambar 8. Grafik Hasil Uji *Fecal Coliform* Variasi 12 Jam



Gambar 9. Grafik Hasil Uji *Fecal Coliform* Variasi 24 Jam



Gambar 10. Grafik Hasil Uji Fecal Coliform Variasi 36 Jam

Kinerja Optimal Sistem Kombinasi MBBR dan Photocatalytic Disinfection

Kinerja optimal sistem kombinasi *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) dan *Photocatalytic Disinfection* ditentukan berdasarkan kemampuan rangkaian pengolahan dalam menurunkan parameter COD, kekeruhan, dan *fecal coliform* secara bertahap. Pada sistem ini, MBBR berfungsi sebagai unit pengolahan biologis utama untuk menurunkan beban organik, sedangkan *Photocatalytic Disinfection* berperan sebagai unit polishing untuk memperbaiki kualitas akhir efluen, khususnya dari aspek mikrobiologis. Kondisi optimal diperoleh pada penggunaan media Kaldnes K3 sebesar 40% dengan waktu tinggal 36 jam, kemudian dilanjutkan dengan proses fotokatalitik menggunakan ZnO sebesar 1 g/L. Kombinasi ini menunjukkan bahwa setiap unit pengolahan memiliki fungsi spesifik yang saling melengkapi.

Efektivitas MBBR pada variasi media 40% dan waktu tinggal 36 jam menunjukkan bahwa peningkatan jumlah media dan lama kontak berpengaruh terhadap penurunan COD. Media Kaldnes K3 menyediakan permukaan bagi mikroorganisme untuk melekat dan membentuk biofilm, sehingga semakin besar volume media yang digunakan, semakin besar pula area aktif untuk proses biodegradasi. Selain itu, waktu tinggal yang lebih lama memungkinkan kontak antara air limbah dan biofilm berlangsung lebih optimal. Oleh karena itu, penurunan COD tertinggi pada kondisi tersebut dapat dijelaskan sebagai akibat dari meningkatnya aktivitas mikroorganisme dalam menguraikan senyawa organik pada air limbah domestik IPLT.

Efluen dari proses MBBR selanjutnya melalui tahap koagulasi–flokulasi–sedimentasi untuk menurunkan kekeruhan sebelum masuk ke reaktor *Photocatalytic Disinfection*. Tahap ini penting karena kekeruhan yang tinggi dapat menghambat penetrasi sinar UV dan menurunkan efektivitas aktivasi ZnO. Dengan berkurangnya partikel tersuspensi dan koloid, sinar UV dapat menjangkau permukaan fotokatalis secara lebih efektif. Kondisi ini mendukung pembentukan spesies reaktif yang berperan dalam oksidasi senyawa organik tersisa dan inaktivasi mikroorganisme pada tahap fotokatalitik.

Pada tahap *Photocatalytic Disinfection*, dosis ZnO sebesar 1 g/L dinilai sebagai kondisi paling efisien karena mampu menurunkan *fecal coliform* secara optimal tanpa memerlukan penambahan katalis berlebih. Aktivasi ZnO oleh sinar UV-C menghasilkan spesies reaktif yang dapat merusak struktur sel mikroorganisme, termasuk membran, protein, dan komponen genetiknya. Secara keseluruhan, sistem kombinasi MBBR, koagulasi–flokulasi–sedimentasi, dan *Photocatalytic Disinfection* menunjukkan kinerja pengolahan yang lebih menyeluruh dibandingkan proses tunggal. Dengan demikian, kondisi optimal yang direkomendasikan adalah MBBR dengan media Kaldnes K3 40% selama 36 jam, dilanjutkan praperlakuan penurunan kekeruhan dan *Photocatalytic Disinfection* menggunakan ZnO 1 g/L.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, kombinasi reaktor *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) dan *Photocatalytic Disinfection* berbasis ZnO mampu meningkatkan kualitas air limbah domestik IPLT, terutama dalam menurunkan parameter COD, kekeruhan, dan *Fecal Coliform*. Pada proses MBBR, peningkatan waktu tinggal dan volume isian media Kaldnes K3 memberikan pengaruh terhadap penurunan COD, dengan hasil terbaik pada waktu tinggal 36 jam dan media Kaldnes 40%, yaitu menghasilkan COD

sebesar 176 mg/L dengan efisiensi penyisihan 77%. Nilai kekeruhan setelah proses koagulasi-flokulasi-sedimentasi berada pada kisaran 0,58–0,70 NTU, sehingga telah memenuhi syarat sebagai influen reaktor fotokatalis karena rendahnya kekeruhan dapat mendukung penetrasi cahaya dan mempercepat aktivitas fotokatalitik. Pada tahap *Photocatalytic Disinfection*, dosis ZnO optimum diperoleh pada 1 g/L, karena mampu menurunkan *Fecal Coliform* hingga <17–<18 MPN/100 mL, sedangkan peningkatan dosis menjadi 1,5 g/L tidak menunjukkan penurunan yang lebih signifikan. Dengan demikian, kondisi operasi paling optimal dalam penelitian ini adalah kombinasi waktu tinggal MBBR 36 jam, media Kaldnes 40%, dan ZnO 1 g/L, yang menunjukkan bahwa integrasi proses biologis dan fotokatalitik efektif digunakan sebagai alternatif pengolahan lanjutan air limbah domestik secara efisien dan ramah lingkungan.

5. Singkatan

APHA	American Public Health Association
COD	Chemical Oxygen Demand
IPLT	Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja
MBBR	Moving Bed Biofilm Reactor
MPN	Most Probable Number
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
PAC	Polyaluminium Chloride
SNI	Standar Nasional Indonesia
UV	Ultraviolet
ZnO	Zinc Oxide

6. References

- [1] Afrozi, D. (2010). Photocatalysis and the role of UV radiation in environmental applications: Mechanisms and challenges. *Journal of Environmental Science and Technology*, 42(2), 245–251.
- [2] Aliah, S., & Karima, L. (2015). Fotokatalisis dalam pengolahan air limbah: Teori dan aplikasi. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 14(2), 87–93.
- [3] Alikhani, M. Y., Lee, S., Yang, J., Shirzad-Sibooni, M., Peeni-Dogabeh, H., Khorasani, M. S., Nooshak, M., & Samarghandi, M. R. (2013). Photocatalytic removal of *Escherichia coli* from aquatic solutions using synthesized ZnO nanoparticles: A kinetic study. *Water Science and Technology*, 67(3), 557–563.
- [4] American Public Health Association. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). APHA.
- [5] Ananda, I. P., Wibowo, A., & Dwi, S. (2017). Proses seeding dalam pengolahan limbah cair menggunakan sistem moving bed biofilm reactor (MBBR). *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 15(2), 134–141.
- [6] Bodzek, M., & Rajca, M. (2012). Photocatalysis in the treatment and disinfection of water. Part I: Theoretical backgrounds. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 19(4), 489–512. <https://doi.org/10.2478/v10216-011-0036-5>
- [7] Di Biase, A., Kowalski, M. S., Devlin, T. R., & Oleszkiewicz, J. A. (2019). Moving bed biofilm reactor technology in municipal wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 247, 849–866.
- [8] Helard, D. (2010). Pengaruh variasi rasio waktu reaksi terhadap waktu stabilisasi pada penyisihan senyawa organik dari air buangan pabrik minyak kelapa sawit dengan sequencing batch reactor aerob. *Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Andalas*.
- [9] Kementerian Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. (2025). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Nomor 11 Tahun 2025 tentang Baku Mutu Air Limbah dan Standar Teknologi Pengolahan Air Limbah untuk Air Limbah Domestik. KLH/BPLH.
- [10] 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, 141. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01662-y>
- [11] Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and resource recovery* (5th ed.). McGraw-Hill.
- [12] Nusa, I. S., & Dinda, R. K. H. (2015). Pengolahan air limbah dengan proses biakan melekat dalam sistem biofilter.

- [13] Ødegaard, H. (2006). Innovations in wastewater treatment: The moving bed biofilm process. *Water Science and Technology*, 53(9), 17–33.
- [14] O'Neill, S., Robertson, J. M. C., Héquet, V., Chazarenc, F., Pang, X., Ralphs, K., Skillen, N., & Robertson, P. K. J. (2023). Comparison of titanium dioxide and zinc oxide photocatalysts for the inactivation of *Escherichia coli* in water using slurry and rotating-disk photocatalytic reactors. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(45), 18952–18959. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00508>
- [15] Rusten, B., Eikebrokk, B., Ulgenes, Y., & Lygren, E. (2006). Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. *Aquacultural Engineering*, 34(3), 322–331. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2005.04.002>
- [16] Saidulu, P., Kumar, M., & Reddy, T. R. (2021). The role of media in moving bed biofilm reactors for wastewater treatment: A review. *Environmental Engineering Science*, 38(5), 314–320.
- [17] Sirelkhatim, A., Mahmud, S., Seeni, A., Kaus, N. H. M., Ann, L. C., Bakhori, S. K. M., Hasan, H., & Mohamad, D. (2015). Review on zinc oxide nanoparticles: Antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nano-Micro Letters*, 7(3), 219–242. <https://doi.org/10.1007/s40820-015-0040-x>