Efektivitas Proses MBBR (*Moving Bed Biofilm Reactor*) Menggunakan Media Paranet Berlapis PVA Gel dalam Menurunkan Polutan Organik dan Amonia dari Air Limbah Domestik

Sabina Zagad Aryani[1], Putri Anggun Sari[1], Martin Darmasetiawan[1], Azhar Firdaus[1], Tyas Ismi Trialfhianty[1]

[1] Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Pelita Bangsa, Bekasi, Jawa Barat 17530

*Korespondensi: tyasismi@pelitabangsa.ac.id

Abstrak. Air limbah domestik merupakan salah satu sumber pencemar utama yang berdampak negative terhadap lingkungan akibat tingginya kandungan bahan organik dan amonia. Pengolahan biologis menggunakan teknologi Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) menjadi alternatif yang efektif dan ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan media paranet 75% yang dilapisi polyvinyl alcohol (PVA) gel dalam sistem MBBR untuk menurunkan konsentrasi amonia dari air limbah domestik. Reaktor dioperasikan secara aerob dengan variasi volume media (20%, 40%, dan 60%) serta waktu tinggal hidraulik (Hydraulic Retention Time/HRT) selama 6, 12, dan 24 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan media paranet berlapis PVA gel menghasilkan efisiensi penurunan ammonia tertinggi sebesar 99,40%, setara dengan penurunan konsentrasi 33,847 mg/L dari nilai awal 34,05 mg/L. Sebagai pembanding, media tanpa pelapisan PVA gel mencapai efisiensi maksimal sebesar 98,83%. Peningkatan volume media dan HRT terbukti secara signifikan meningkatkan efisiensi proses nitrifikasi. Temuan ini menunjukkan bahwa media paranet berlapis PVA gel mampu meningkatkan performa biologis sistem MBBR dan berpotensi diterapkan sebagai teknologi pengolahan air limbah yang efisien, murah, dan ramah lingkungan. Untuk mendukung penerapan dalam skala lebih luas, diperlukan penelitian lanjutan pada kondisi operasional yang lebih kompleks, termasuk beban pencemar fluktuatif, keberadaan polutan lain, serta evaluasi efektivitas jangka panjang dan aspek keekonomian sistem. Konsentrasi 2% dapat menjadi alternatif media penyimpanan yang efektif dalam menjaga kelangsungan hidup dan pertumbuhan isolat bakteri selama penyimpanan.

Kata Kunci: air limbah domestik, *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR), paranet, *polyvinyl alcohol* (PVA) gel, nitrifikasi, waktu tinggal hidraulik (HRT)

1. PENDAHULUAN

Air limbah domestik memiliki kandungan bahan organik dan anorganik seperti B*iochemicalOxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solid* (TSS), dan Amonia (Pamungkas & Rosariawari, 2024). Hal ini menyebabkan urgensi pengolahan limbah cair semakin mendesak dengan peningkatan volume limbah, resiko kesehatan, dampak ekologis, serta adanya regulasi yang semakin ketat (Kusuma et al., 2019). Kadar pencemar dalam air limbah domestik dapat dikurangi menggunakan pengolahan biologis, dengan menambahkan *Nitrosomonas* secara suspensi dan terlekat dengan membentuk biofilm pada reaktor *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) Pamungkas & Rosariawari (2024).

Sejumlah penelitian terdahulu telah menunjukkan performa MBBR yang sangat baik dengan variasi jenis media, waktu tinggal hidrolik (HRT), serta karakteristik air limbah yang berbeda. Pada limbah industri pangan, penelitian Alisa & Purnomo (2020) menunjukkan bahwa kombinasi

media terisi 40 % dan aerasi gelembung halus mampu menurunkan COD, BOD_5, TSS, NH_3, dan PO_4 secara optimum dalam waktu delapan jam pada air limbah tempe. Hasil serupa juga terjadi pada penelitian yang dilakukan oleh Dickdoyo & Cahyonugroho (2021) dimana air buangan rumah makan dengan komposisi 100 % media Kaldnes K3 dan waktu tinggal 15 jam menghasilkan penurunan TOC 97,84 % dan TSS 76,84 %.

Dalam upaya menurunkan bahan pencemar dalam air limbah, penelitian ini menggunakan teknologi simulasi reaktor MBBR dan mengantinkan media biofilter dengan media alternatif berupa Paranet dengan kerapatan 75% berbahan HDPE yang dilapisi PVA Gel dengan menambahkan bakteri nitrifikasi (*Nitrosomonas)*. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Said & Santoso (2015), penggunaan metode MBBR dengan Media plastik *(biocarrier)* dan waktu tinggal 4 jam efluen, hasil pengolahan air limbah domestik dapat menurunkan nilai COD sebesar 81,07%, BOD sebesar 87,88%, TSS sebesar 94,86%. Astuti & Rahmadnegara (2021) juga memperkuat temuan ini, yaitu semakin lama waktu kontak dan semakin besar rasio media-*fill fraction*, semakin tinggi efisiensi penyisihan COD, TSS, dan NH_3-N; reaktor terbaik (waktu kontak 4 jam, rasio 0,5) mencapai removal tertinggi di antara enam konfigurasi.

Berdasarkan permasalahan diatas, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji dan mengetahui efektivitas *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) menggunakan media pengganti alternatif dan membandingkannya dengan media yang sudah ada, dengan fokus penelitian pada peran media biofilm dan bakteri nitrifikasi (*Nitrosomonas)* pada MBBR dalam mendukung pengolahan air limbah yang lebih efektif serta mampu menyisihkan persentase konsentrasi polutan (terutama COD dan Amonia) pada air limbah domestik.

2. METODOLOGI PENELITIAN

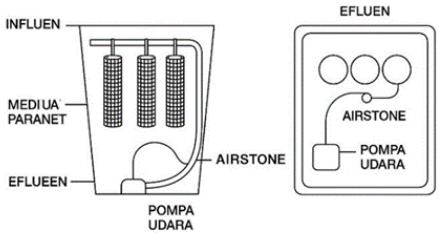
2.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen laboratorium untuk mengkaji efektivitas sistem *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) dalam menurunkan konsentrasi polutan organik dan amonia dari air limbah domestik. Media biofilm yang digunakan berupa paranet dengan kerapatan 75% berbahan HDPE, yang dibedakan menjadi dua jenis yaitu tanpa pelapisan dan dengan pelapisan PVA (*Polyvinyl Alcohol*) gel.

2.2 Tahapan Penelitian

Pada penelitian ini, reaktor dirancang secara *batch* dan dioperasikan dalam kondisi aerobik. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah volume pengisian media (20%, 40%, dan 60%) serta waktu tinggal hidrolik (HRT) selama 6, 12, dan 24 jam. Pada penelitian ini menggunakan 6 reaktor bak plastik sebagai reaktor ulangan 1 sampai 6 dengan dimensi 40 cm X 30 cm X 25 cm dengan jumlah volume reaktor sebanyak 20 liter/bak. Rancangan reaktor penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

Sebelum pengoperasian reaktor, proses pengembangbiakan mikroorganisme dilakukan (*seeding)* dan aklimatisasi mikroorganisme selama ±14 hari, untuk menumbuhkan mikroorganisme secara alami pada media lekat Paranet dan Pva Gel dengan penambahan bakteri nitrifikasi dominan (*Nitrosomonas*) sebagai bioagen utama dan bantuan aerator sebagai suplai oksigen didalam reaktor. Selama proses *seeding* dan aklimatisasi diukur kadar pH, suhu dan DO pada reaktor.



Gambar 1. Rancangan Reaktor Penelitian MBBR

Setelah *seeding* dan aklimatisasi dilakukan, tahap penelitian dilanjutkan dengan variasi waktu kontak pengambilan sampel pada jam ke-6, jam ke-12, dan jam ke-24 untuk mengetahui seberapa besar penurunan dan efektivitas sistem pengolahan dengan metode MBBR terhadap parameter Amonia (NH_3-N), *Chemical Oxygen Demand* (COD), nitrat dan nitrit.

2.3 Analisis Data

Data hasil pengukuran dianalisis menggunakan pendekatan statistik deskriptif dan inferensial. Uji normalitas dilakukan menggunakan metode Shapiro-Wilk, dilanjutkan dengan uji Two-Way ANOVA untuk melihat pengaruh volume media dan waktu tinggal terhadap efektivitas penyisihan. Uji lanjut (post-hoc) Tukey HSD digunakan untuk mengidentifikasi perbedaan signifikan antar perlakuan.

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Efektivitas *Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)* dalam mengurangi Zat Pencemar pada Air Limbah

3.1.1 Karakteristik Limbah Awal

Uji pendahuluan dilakukan pada sampel air limbah untuk mendapatkan data awal kondisi air limbah berdasarkan parameter pH, suhu, DO, amonia, nitrat dan nitrit. Peraturan yang digunakan sebagai standar kualiatas air limbah domestik yaitu Permen LHK No.68 Tahun 2016. Hasil uji karateristik limbah awal (Tabel 1) menunjukkan adanya beberapa parameter air limbah yang masih di atas baku mutu.

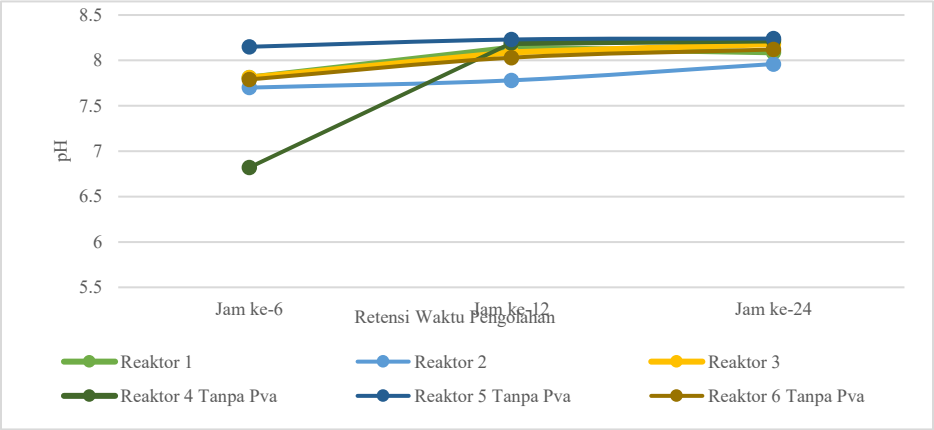
Tabel 1. Kualitas Awal Air Limbah Buatan dibandingkan dengan PerMen LHK No.68 Tahun 2016

Parameter	Satuan	Nilai	Syarat Baku Mutu	Metode Pengukuran
pH	-	6,56	6,5 – 9	SNI 06-6989.11:2019
Suhu	ºC	24,1	-	SNI 06-6989.23:2005
DO	mg/L	2,4	-	SNI 6989.2:2019
COD	mg/L	2000	100	SNI 6989.2:2019
Amonia	mg/L	34,05	10	SNI 6989.30:2005
Nitrat	mg/L	6,1	<10	SNI 6989.79:2011
Nitrit	mg/L	2,627	<1	SNI 06-6989.9-2004

3.1.2 Pengukuran pH dan Suhu

Lamanya proses *seeding* dan aklimatisasi mikroorganisme pada penelitian ini yaitu selama 14 hari dengan tambahan *starter* Nitrosomonas pada air limbah. menunjukkan nilai pH selama *seeding* dan aklimatisasi hari ke-0 didapat sebesar rata-rata 8,2. Sementara itu, pH di akhir masa *seeding* dan aklimatisasi yaitu rata-rata mendekati pH 8.

Hal ini mengindikasikan mikroorganisme yang hidup di dalam reaktor adalah kelompok mikroorganisme mesofilik yaitu kelompok mikroorganisme yang dapat hidup pada pH 6,5-8,5. Tahap *running* penelitian selama 6 jam didapat nilai pH sebesar 8,3. Tingginya nilai pH dikarenakan air limbah yang digunakan merupakan limbah baru. Penurunan dan peningkatan pH saat *running* penelitian berkisar antara 7,7–8,2 (Gambar 2).



Gambar 2. Peningkatan Parameter pH

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Kusuma et al. (2019) nilai pH mengalami peningkatan dapat diakibatkan asam organik diuraikan menjadi metana dan karbon dioksida selain itu dapat diakibatkan dari perubahan bentuk ammonianitrogen menjadi bentuk ion yang berupa ammonium jika terlarut di dalam air. Tahap oksidasi ion ammonium ($NH4^+$) menjadi ion nitrit (NO_2^-) yang dilaksanakan oleh bakteri *nitrosomonas* sebagaimana reaksi berikut:

$$NH_4^+ + ½O_2 + OH^- \rightarrow NO_2^- + H^+ + 2H_2O + 59{,}4\ Kcal$$

Nitrosomonas

Selain itu, nilai pH di dalam reaktor juga dapat mengalami penurunan jika terjadi proses pembentukan nitrat oleh bakteri *nitrobacter* , dengan reaksi:

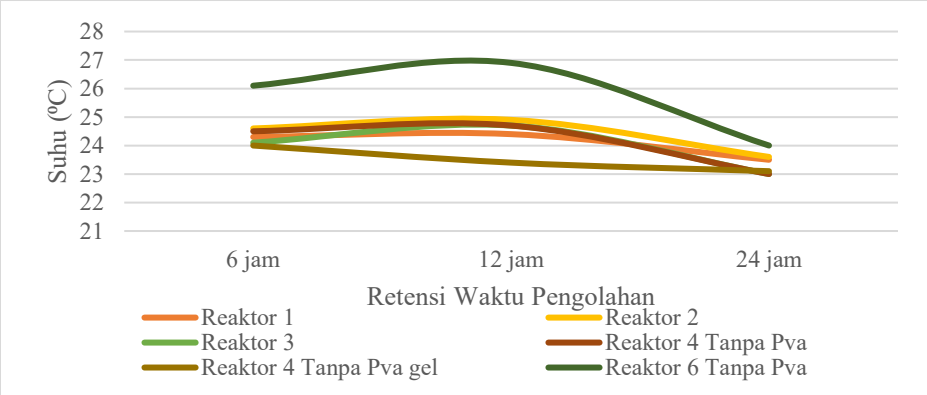
$$NH_4^+ + 2O_2 \rightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O$$

Nitrobacter

Reaksi di atas menunjukkan bahwa setiap mol ammonium yang dioksidasi akan memproduksi 2 mol ion hidrogen, yang hasilnya akan menurunkan nilai pH pada lingkungan yang nilai buffernya rendah. Nilai ini menandakan mikroorganisme yang telah tumbuh dan membentuk biofilm mampu menurunkan pH limbah domestik buatan oleh aktivitas metabolisme mikroorganisme aerob.

Menurut Pratiwi (2008) apabila mikroba dihadapkan pada suhu tinggi diatas suhu maksimum, akan memberikan beberapa macam reaksi. Titik kematian thermal, adalah suhu yang dapat mematikan spesies mikroba dalam waktu 10 menit pada kondisi tertentu. Waktu kematian thermal, adalah waktu yang diperlukan untuk membunuh suatu spesies mikroba pada suatu suhu yang tetap. Faktor-faktor yang mempengaruhi titik kematian thermal ialah waktu, suhu, kelembaban, spora, umur mikroba, pH dan komposisi medium. Apabila mikroba dihadapkan pada suhu rendah dapat menyebabkan gangguan metabolisme, yaitu seperti *cold shock*, penurunan suhu yang tiba-tiba menyebabkan kematian bakteri, terutama pada bakteri muda atau pada fase logaritmik. Pembekuan (*freezing*), adalah rusaknya sel dengan adanya kristal es di dalam air intraseluler.

Selama pengoperasian atau running dari keenam reaktor, nilai suhu masih termasuk dalam rentang suhu optimum bagi mikroorganisme mesofilik, yang umumnya tumbuh dan bekerja paling baik pada kisaran suhu 25–37°C (Gambar 3). Hal ini ditunjukkan dengan efisiensi penurunan konsentrasi amonia dan parameter lainnya yang tetap tinggi.

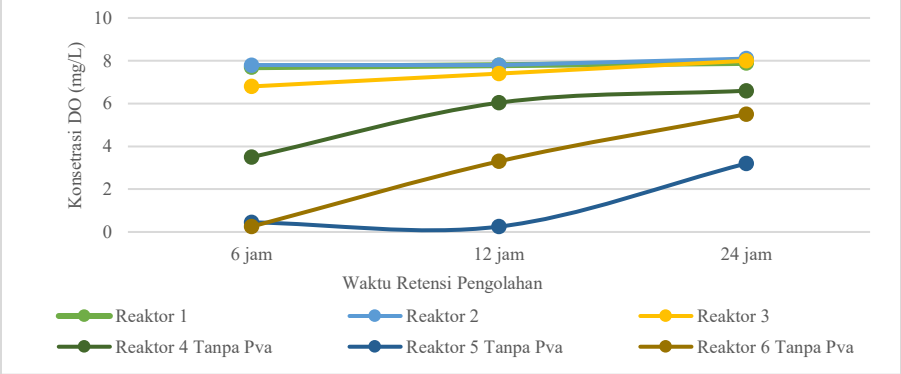


Gambar 3. Nilai Suhu Pengolahan Air Limbah

3.1.3 Hasil dan Analisis Parameter Oksigen Terlarut (Dissolved Oxygen)

Nilai yang didapat rata-rata oksigen terlarut pada keenam reaktor MBBR adalah sebesar 6,85 mg/L. Semakin lama reaktor running, nilai oksigen terlarut meningkat secara perlahan menjadi 8,1 mg/L. Namun, pada jam ke 12 nilai oksigen terlarut mengalami penurunan paling rendah sebesar 0,45 mg/L. Penurunan nilai oksigen terlarut tidak berlangsung lama, karena pada pengukuran interval waktu running selanjutnya, terjadi kembali peningkatan pada nilai oksigen terlarut. Hingga pada waktu running reaktor 24 jam, didapat nilai oksigen terlarut rata-rata pada reaktor sebesar 7,5 mg/L.

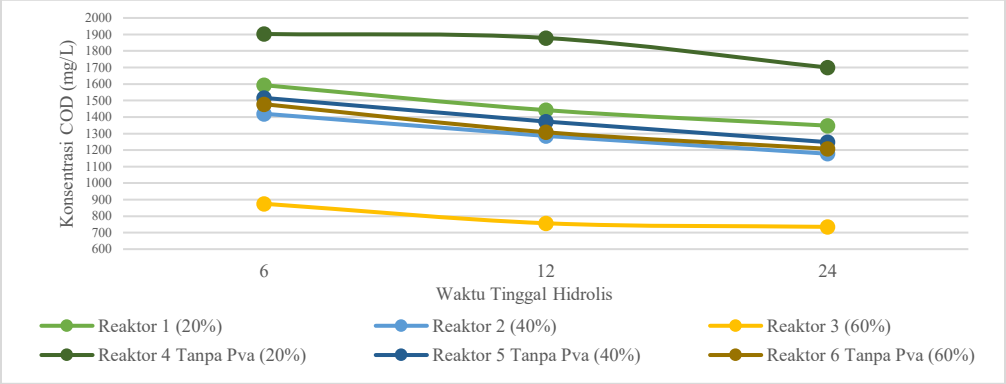
Hasil uji untuk nilai DO dari keenam reaktor berada dalam rentang optimal, yaitu sekitar 6–8 mg/L (Gambar 4), menunjukkan kondisi reaktor sangat kondusif untuk pertumbuhan dan aktivitas bakteri aerob. Ini juga menunjukkan bahwa desain sistem aerasi dalam reaktor MBBR yang digunakan dalam penelitian ini sudah sesuai dan efektif untuk mempertahankan kestabilan oksigen terlarut selama proses pengolahan limbah.



Gambar 4. Nilai Oksigen Terlarut (DO) Pengolahan Air Limbah

3.1.4 Hasil dan Analisis Parameter Polutan Organik (Chemical Oxygen Demand)

Hasil pengukuran polutan organik dengan konsentrasi yang besar pada air merupakan salah satu bentuk air dalam kondisi terkontaminasi dan berbahaya.



Gambar 5. Penurunan Nilai COD Pengolahan Air Limbah

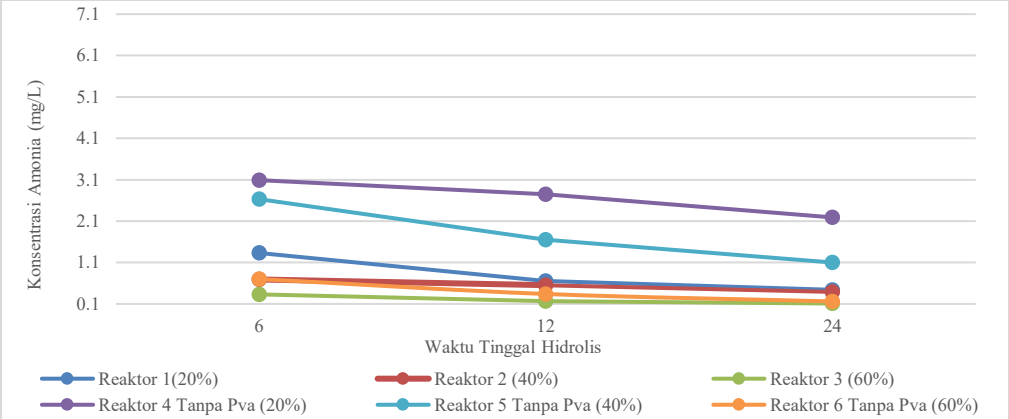
Data pada Gambar 5 menunjukkan bahwa semakin lama reaktor di *running*, maka semakin stabil nilai penurunan polutan organik. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama media melakukan kontak dengan air limbah, proses degradasi biologis aerob juga berlangsung dengan semakin baik, sehingga persentase penurunan polutan organik juga meningkat. Meski penurunannya belum mencapai target optimal 100% *removal* dan syarat baku mutu yang ada, namun hasil yang diperoleh tetap menunjukkan bahwa media terbanyak memiliki *removal* tertinggi. Reaktor dengan media 60% memberikan hasil paling efektif dalam penyisihan COD. Hal ini menjadi suatu indikasi bahwa semakin panjang lintasan media yang berkontak dan perlu dilalui oleh substrat organik dari mulai masuk reaktor menunjukkan semakin besar kesempatan antara air limbah dengan mikroorganisme aerob dalam biofilm.

Menurut Said dan Santoso (2015), media kaldenes K1 dapat memberikan luas permukaan yang cukup besar untuk melekatnya bakteri (±500 m^2 /m^3) dan perbandingan volume media yang kecil dibandingkan dengan volume air reaktor, menyebabkan pada reaktor akan terjadi gerakan random/turbulensi antar media yang terkena aerasi sehingga masing-masing media akan berada pada kondisi bergerak dan meningkatkan efektivitas removal COD sebesar 87 %.

3.1.5 Hasil dan Analisis Parameter Amonia (NH_3)

Hasil pengukuran konsentrasi Amonia dilihat dari media biofilter yang diteliti pada penelitian ini, media biofilter menampung bakteri nitrifikasi yang merupakan lokasi utama terjadinya nitrifikasi biologis.

Pengukuran konsentrasi amonia dilakukan pada waktu tinggal hidrolik (HRT) 6, 12, dan 24 jam. Hasil menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan meningkat seiring bertambahnya waktu tinggal dan volume media (Gambar 6). Pada media paranet yang dilapisi PVA gel, rata-rata konsentrasi amonia effluent pada HRT 6 jam adalah 32,59 mg/L, dengan efisiensi penyisihan sebesar 97,3%. Nilai ini meningkat menjadi 33,48 mg/L dengan efisiensi 98,3% pada HRT 12 jam, dan mencapai 33,70 mg/L atau 99,3% pada HRT 24 jam. Sementara itu, media paranet tanpa pelapisan PVA gel menunjukkan performa yang lebih rendah, dengan konsentrasi amonia effluent rata-rata sebesar 31,89 mg/L (93,6%) pada HRT 6 jam, 32,12 mg/L (94,3%) pada HRT 12 jam, dan 32,34 mg/L (95,0%) pada HRT 24 jam.



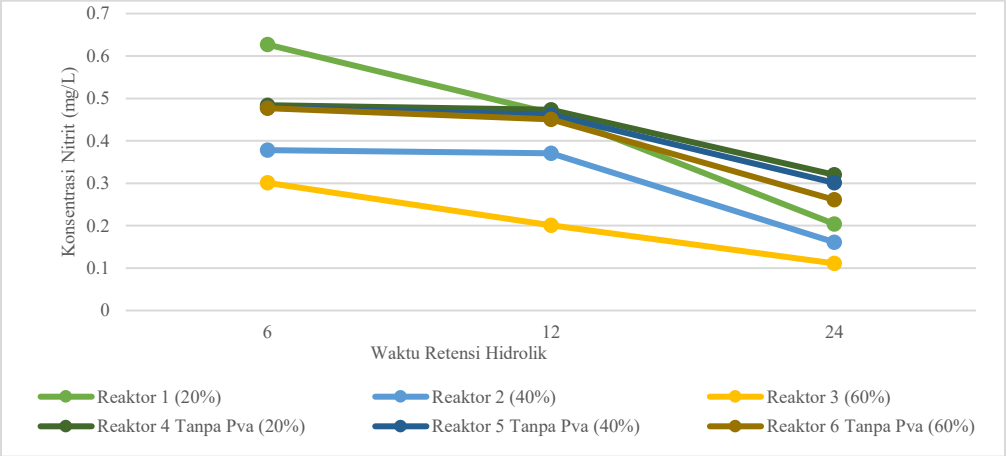
Gambar 6. Penurunan Nilai NH_3 Pengolahan Air Limbah

Reaktor dengan media 60% paranet berlapis PVA gel menunjukkan kinerja tertinggi secara konsisten, dengan nilai penyisihan amonia mencapai 100% pada HRT 12 dan 24 jam, menurunkan konsentrasi dari 34,05 mg/L menjadi hanya 0,203 mg/L. Hasil ini menegaskan bahwa pelapisan PVA gel mendukung pembentukan biofilm yang lebih stabil, sehingga meningkatkan laju nitrifikasi dan efisiensi pengolahan amonia dalam sistem MBBR.

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Ramadhanti & Purnomo (2020) juga menegaskan bahwa MBBR berisi 60 % media dan aerasi halus mampu mereduksi BOD 93,97 %, TSS 86,09 %, dan NH_3-N 87,52 % pada air limbah rumah potong hewan, menegaskan ketahanan proses terhadap beban organik tinggi.

3.1.6 Hasil dan Analisis Parameter Nitrit

Hasil pengukurann lanjutan zat pencemar juga dilakukan pada parameter nitrit, menimbang proses nitrifikasi yang berjalan dengan mengoksidasi amonia menjadi nitrit. Setelah diketahui adanya penurunan amonia, perlu dilakukan penelitian lanjutan, mengenai pengukuran nitrit. Hal ini untuk memastikan, apakah penurunan konsentrasi amonia benar terjadi karena proses nitrifikasi yang mengoksidasi amonia menjadi nitrit atau tidak.



Gambar 7. Penurunan Nilai Nitrit Pengolahan Air Limbah

Pada media paranet yang dilapisi PVA gel, konsentrasi rata-rata nitrit *effluent* adalah 0,435 mg/L pada HRT 6 jam, menurun menjadi 0,346 mg/L pada HRT 12 jam, dan mencapai 0,159 mg/L pada HRT 24 jam (Gambar 7). Reaktor dengan media 60% menunjukkan performa terbaik dengan konsentrasi nitrit akhir sebesar 0,111 mg/L. Sementara itu, pada media paranet tanpa pelapisan PVA gel, konsentrasi rata-rata nitrit *effluent* masing-masing adalah 0,480 mg/L (HRT 6 jam), 0,462 mg/L (HRT 12 jam), dan 0,294 mg/L (HRT 24 jam). Reaktor terbaik dari kelompok ini mencatat konsentrasi nitrit 0,261 mg/L pada HRT 24 jam.

Secara umum, penurunan konsentrasi nitrit berlangsung secara progresif pada seluruh reaktor, namun pola penurunannya tidak sejelas amonia karena nitrit merupakan senyawa antara dalam proses nitrifikasi. Hasil ini mengindikasikan bahwa setelah konversi amonia menjadi nitrit (oleh *Nitrosomonas*), terjadi lanjutan reaksi oksidasi nitrit menjadi nitrat oleh *Nitrobacter*. Reaktor dengan media berlapis PVA gel, khususnya pada volume 60%, menunjukkan efisiensi konversi tertinggi, menegaskan bahwa media ini mendukung pertumbuhan komunitas mikroba nitrifikasi secara lebih optimal. Studi sebelumnya oleh Said dan Santoso (2015) menekankan efektivitas. MBBR dalam menghilangkan beban organik dan padatan tersuspensi, meskipun tidak secara spesifik meneliti konversi nitrit.

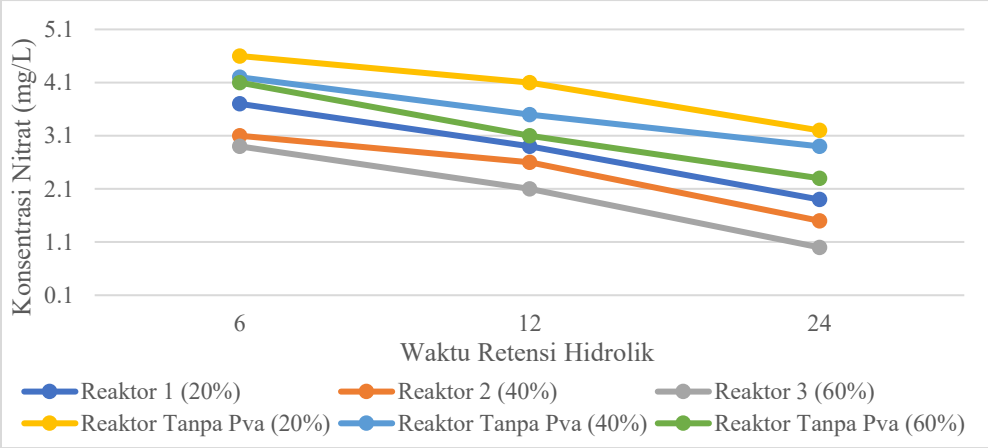
3.1.7 Hasil dan Analisis Parameter Nitrit

Pengukuran lanjutan yang dilakukan pada parameter selanjutnya yaitu pengukuran konsentrasi nitrat. Pengukuran konsentrasi nitrat dapat dilakukan setelah diketahui kadar amonia dan nitrit pada sampel limbah yang akan diuji.

Pengukuran konsentrasi nitrat dilakukan pada waktu tinggal 6, 12, dan 24 jam. Hasil menunjukkan bahwa semua reaktor menghasilkan effluen dengan kadar nitrat di bawah baku mutu 6,1 mg/L (Gambar 8). Pada media paranet berlapis PVA gel, konsentrasi rata-rata nitrat effluent menurun dari 3,23 mg/L (6 jam) menjadi 2,53 mg/L (12 jam) dan 1,47 mg/L (24 jam). Reaktor terbaik, yaitu dengan media 60% berlapis PVA gel, mencatatkan konsentrasi akhir hanya 1,0 mg/L.

Sementara itu, reaktor dengan media paranet tanpa PVA gel menunjukkan konsentrasi nitrat *effluent* lebih tinggi, yaitu 4,3 mg/L (6 jam), 3,57 mg/L (12 jam), dan 2,8 mg/L (24 jam). Penurunan konsentrasi nitrat ini mencerminkan proses konversi nitrit menjadi nitrat yang lebih optimal pada media berlapis PVA gel, seiring dengan efisiensi nitrifikasi yang meningkat dalam sistem MBBR.

Hasil ini mendukung pentingnya stabilitas proses pengolahan seperti yang juga diidentifikasi oleh Lestari dan Rohaeni (2020), yang menyatakan bahwa kinerja reaktor MBBR dapat menurun jika tidak dilakukan pemeliharaan media dan sistem aerasi secara rutin.



Gambar 8. Nilai Penurunan Nitrat Pengolahan Air Limbah

3.2 Komparasi Media Filter Paranet dengan PVA Gel Vs Tanpa PVA Gel

Hasil uji efektivitas konsentrasi amonia yang antar reaktor dengan menggunakan media PVA gel dan tanpa PVA gel, penggunaan PVA gel pada media biofilter lebih efektif dan efisien dalam menguraikan amonia dibandingkan media tanpa PVA gel. Media dengan PVA gel memperlihatkan kenaikan efektivitas amonia yang lebih cepat dan stabil, yang membedakan proses penguraian yang lebih baik. Ini menunjukkan bahwa penggunaan PVA gel dapat meningkatkan kinerja MBBR dalam pengolahan air limbah.

3.2.1 Analisis Statistik Pengaruh Media Paranet + Pva Gel Vs Tanpa PVA gel

Hasil uji ANOVA dua arah (Tabel 2) menunjukkan bahwa jenis media dan waktu tinggal hidrolik (HRT) memberikan pengaruh signifikan terhadap efektivitas penyisihan amonia. Faktor media memiliki nilai $F = 23{,}684$ dengan $p < 0{,}001$, dan faktor waktu memiliki nilai $F = 13{,}579$ dengan $p < 0{,}001$. Selain itu, terdapat interaksi yang signifikan antara faktor media dan waktu dengan nilai $F = 4{,}105$ dan $p = 0{,}044$, yang berarti pengaruh media tergantung pada durasi HRT.

Berdasarkan data deskriptif, media paranet + PVA gel menunjukkan nilai rata-rata penyisihan amonia yang lebih tinggi dan konsisten dibandingkan media tanpa PVA. Rata-rata efektivitas tertinggi dicapai pada HRT 24 jam sebesar 1,017, dengan koefisien variasi (CV) sangat rendah (0,006), menandakan kestabilan hasil antar ulangan. Sebaliknya, media tanpa PVA menunjukkan efektivitas lebih rendah dan variasi hasil yang lebih besar, terutama pada HRT 12 jam dengan CV mencapai 0,026.

Analisis post hoc menggunakan uji Tukey dan Dunn dilakukan untuk mengetahui perbedaan antar kelompok. Perbandingan antar waktu (Tabel 3) menunjukkan bahwa perbedaan signifikan terjadi antara HRT 6 jam vs 24 jam ($p < 0{,}05$) dan 12 jam vs 24 jam ($p = 0{,}02$). Namun, tidak terdapat perbedaan signifikan antara 6 jam vs 12 jam ($p = 0{,}158$). Sementara itu, perbandingan antara media (Tabel 4) menunjukkan bahwa media paranet + PVA gel memiliki efektivitas yang secara signifikan lebih tinggi dibandingkan media tanpa PVA gel ($p < 0{,}001$), dengan nilai efek (Cohen's d) sebesar 2,294 yang tergolong besar.

Tabel 2. Uji Two Way ANOVA Penyisihan Kaar NH_3

Media	Waktu (jam)	N	Mean	SD	SE	Coefficient of Variation
Paranet + PVA Gel	6	3	0,997	0,015	0,009	0,015
	12	3	1,007	0,006	0,003	0,006
	24	3	1,017	0,006	0,003	0,006
Tanpa PVA Gel	6	3	0,943	0,015	0,009	0,016
	12	3	0,967	0,025	0,015	0,026
	24	3	1,010	0,010	0,006	0,010

Tabel 3. Uji Post Hoc Perbandingan HRT Terhadap penyisihan NH_3

Post Hoc Comparisons - Waktu							
		Mean Difference	SE	df	t	Cohen's d	p_{tukey}
6	12	-0,017	0,008	12	-1,987	-1,147	0,158
	24	-0,043	0,008	12	-5,166	-2,982	<0,001
2	24	-0,027	0,008	12	-3,179	-1,835	0,020

Tabel 4. Uji Post Hoc Perbandingan 2 Media Terhadap Penyisihan NH_3

Post Hoc Comparisons - Media							
		Mean Difference	SE	df	t	Cohen's d	p_{tukey}
(Paranet + PVA Gel)	Tanpa PVA Gel	0,033	0,007	12	4,867	2,294	< 0,001

Berdasarkan hasil seluruh uji statistik, dapat disimpulkan bahwa jenis media dan waktu tinggal berpengaruh signifikan terhadap penurunan konsentrasi polutan organik dan amonia (NH_3). Media paranet yang dilapisi PVA gel menunjukkan efektivitas penyisihan yang lebih tinggi secara statistik dibandingkan media tanpa pelapisan. Waktu tinggal 24 jam juga memberikan hasil terbaik, secara signifikan lebih efektif dibandingkan HRT 6 dan 12 jam.

3.2.2 Komporasi Nilai SALR Media Filter paranet + PVA Gel Vs Tanpa PVA Gel

Surface Area Loading Rate (SALR) yaitu ukuran yang digunakan untuk menentukan laju aplikasi suatu zat per unit luas permukaan media tertentu. SALR sering digunakan dalam bidang pengolahan air. Penelitian menggunakan reaktor mbbr yang dilakukan juga merupakan salah satu bagian dari pengolahan air, untuk itu penelitian ini juga dapat menghasilkan data nilai dari SALR media filter terhadap degradasi kandungan pencemar amonia di dalam air limbah grafik terkait nilai SALR media filter yang dapat dilihat pada Tabel 5.

Perhitungan luas permukaan media biofilm merupakan komponen penting dalam sistem MBBR, karena berkaitan langsung dengan kapasitas pertumbuhan mikroorganisme yang berperan dalam proses biodegradasi polutan. Namun, perlu diperhatikan bahwa semakin tinggi packing rasio, potensi gangguan sirkulasi udara dan air dalam reaktor juga meningkat, sehingga pemilihan rasio yang optimal menjadi penting dalam desain sistem MBBR agar proses biologis dalam reaktor MBBR dapat berlangsung secara maksimal.

Tabel 5. Nilai SALR Media Biofilter MBBR

Volume (m^3)	Vol media	Ukuran Paranet (m2)	Jumlah Gulungan	Luas spesifik (m^2/m^3)
0,03	0,0006875	0,0875	3	381,82
0,03	0,0006875	0,0875	3	381,82
0,03	0,0006875	0,0875	3	381,82
Jml media (set)	**Total Vol media**	**Packing Rasio**	**Luas Total (m^2)**	
3	0,00206	0,07	0,79	
6	0,00413	0,14	1,58	
9	0,00619	0,21	2,36	

3.3 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Kinerja *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) dalam Mengurangi Konsentrasi Zat Pencemar Pada Air Limbah

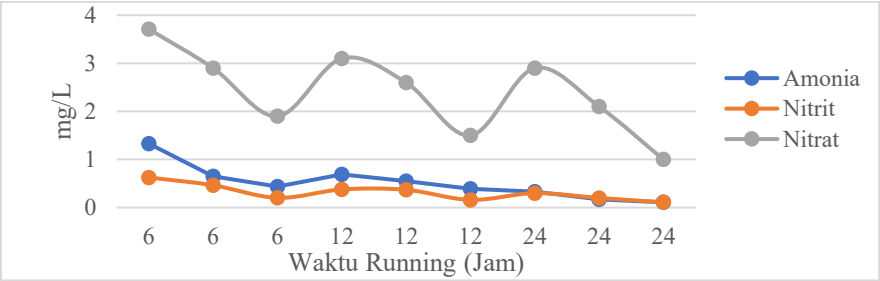
Kinerja sistem *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) dalam mengolah air limbah domestik dipengaruhi oleh sejumlah faktor yang saling terkait, di antaranya seperti jenis dan karakteristik media biofilm**,** rasio volume media**,** waktu tinggal hidrolik (HRT)**,** konsentrasi oksigen terlarut (DO)**,** serta parameter lingkungan seperti suhu dan pH.

3.3.1 Proses Aerasi Reaktor MBBR

Aerasi merupakan tahap krusial dalam pengoperasian *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR), terutama dalam mendukung proses biologis nitrifikasi. Keberadaan oksigen dalam sistem juga penting untuk menjaga kestabilan lingkungan mikroorganisme pada permukaan media biofilter. Berdasarkan hasil uji efektivitas, diketahui bahwa peningkatan efisiensi penurunan amonia sejalan dengan optimalnya proses aerasi. Konsentrasi oksigen terlarut yang mencukupi memungkinkan konversi amonia berlangsung dengan lebih cepat dan konsisten.

3.3.2 Proses Nitrifikasi Reaktor MBBR

Proses nitrifikasi ini merupakan proses biologis yang melibatkan bakteri aerob, sehingga sistem yang diteliti terdapat aerasi yang berguna untuk memberikan oksigen untuk memenuhi kebutuhan hidup bakteri yang tumbuh pada biofilm di dalam reaktor MBBR. Berdasarkan grafik pada Gambar 9, dapat diketahui hubungan antara laju penurunan amonia, nitrit dan nitrat bahwa proses nitrifikasi benar terjadi di dalam reaktor MBBR yang diteliti.



Gambar 9. Komparasi Konsentrasi Amonia, Nitrit dan Nitrat

3.3.3 Proses Seeding dan Aklimatisasi Media Biofilter MBBR

Range syarat pemantauan selama proses *seeding* dan aklimatisasi (Tabel 6) berjalan disesuaikan dengan kondisi optimal pada pertumbuhan bakteri nitrifikasi. Hal ini dilakukan agar pada saat running reaktor sebenarnya mikroorganisme dapat melakukan tugasnya dengan baik.

Tabel 6. Range Pemantauan Seeding dan Aklimatisasi

Parameter	Syarat Pemantauan
Suhu	6,5-8,5
pH	20-35 ºC
DO	2-5 mg/L

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Efektivitas MBBR dalam Menurunkan Polutan Organik dan Amonia Terbukti efektif dalam menurunkan polutan organik (COD) dan amonia dari air limbah domestik. Reaktor yang dioperasikan secara aerob menunjukkan kemampuan pengolahan biologis yang optimal dalam mendukung proses nitrifikasi.
2. Perbandingan Media Paranet + PVA Gel Vs Paranet Tanpa PVA Gel Media paranet yang dilapisi PVA gel menunjukkan efektivitas lebih tinggi dibandingkan media paranet tanpa pelapisan, dengan efisiensi penurunan amonia tertinggi mencapai 99,40%. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi paranet dan PVA gel mampu menyediakan permukaan biofilm yang lebih baik bagi pertumbuhan bakteri nitrifikasi. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kinerja MBBR.
3. Volume media biofilter dan waktu tinggal hidrolik (HRT) merupakan faktor utama yang mempengaruhi kinerja MBBR. Semakin besar volume media dan semakin lama HRT, semakin tinggi efisiensi penurunan konsentrasi polutan, karena memberikan waktu dan ruang yang cukup untuk proses biologis berlangsung secara optimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis ucapkan kepada dosen pembimbing skripsi, Bapak Martin Darmasetiawan dan Ibu Putri Anggun Sari serta dosen penguji skripsi, Ibu Tyas Ismi Trialfhianty dan Bapak Azhar Firdaus, serta semua pihak yang terlibat dan membantu penulis selama proses pengerjaan penelitian yang tidak dapat diucapkan satu per satu.

REFERENSI

Alisa, N., & Purnomo, Y. S. (2020). Penurunan kandungan polutan pada air limbah industri tempe menggunakan moving bed biofilm reactor (MBBR). *EnviroUS, 1*(1), 42–47.

Astuti, U. P., & Rahmadnegara, M. (2021). Analisis efisiensi removal MBBR dalam mengolah air limbah domestik. *Jurnal Teknologi Lingkungan*.

Dickdoyo, A. T., & Cahyonugroho, H. (2021). Pengolahan limbah domestik rumah makan dengan moving bed biofilm reactor (MBBR). *Jurnal Teknologi Lingkungan*.

Kusuma, D. A., Fitria, L., & Kadaria, U. (2019). Pengolahan limbah laundry dengan metode moving bed biofilm reactor (MBBR). *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah, 2*(1), 15–22.

Lestari, D. S., & Rohaeni, A. Y. (2020). Evaluasi kinerja IPAL domestik MBBR untuk mengurangi tingkat pencemaran air di Waduk "X", Jakarta. *Jurnal Air dan Lingkungan*.

Pamungkas, L. A. S., & Rosariawari, F. (2024). Penurunan amonia pada air limbah domestik menggunakan moving bed biofilm reactor (MBBR) dengan penambahan mikroalga *Chlorella sp. Jurnal Komposit: Jurnal Ilmu-ilmu Teknik Sipil, 8*(2), 221–229.

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 68 Tahun 2016 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik.

Pratiwi, S. T. (2008). *Mikrobiologi farmasi*. Fakultas Farmasi Universitas Gadjah Mada.

Ramadhanti, Z. L., & Purnomo, Y. S. (2020). Penurunan kadar BOD, TSS dan NH_3-N pada air limbah rumah potong hewan dengan menggunakan moving bed biofilm reactor (MBBR). *EnviroUS, 2*(1), 55–62.

Said, N. I., & Santoso, T. I. (2015). Penghilangan polutan organik dan padatan tersuspensi di dalam air limbah domestik dengan proses moving bed biofilm reactor (MBBR). *Jurnal Air Indonesia, 8*(1), 245–250.

Sukumar, S., Arockiasamy, S., & Moothona, M. C. (2021). Optimization of cultural conditions of gellan gum production from recombinant *Sphingomonas paucimobilis* ATCC 31461 and its characterization. *Journal of Applied Biology and Biotechnology, 9*(1), 8–14. https://doi.org/10.7324/JABB.2021.9108

Suzuki, S. (2001). Establishment and use of gellan gum media for selective isolation and distribution survey of specific rare actinomycetes. *Actinomycetologica, 15*(1), 55–61. https://doi.org/10.3209/saj.15_55

Rahmah, W. N., Sartika, F., & Madureni, Y. E. S. (2023). Identifikasi bakteri pada nutrient agar plate di Laboratorium Mikrobiologi Universitas Muhammadiyah Palangka Raya. *Jurnal Mikrobiologi Terapan, 5*(2), 33–40.*

Suryani, Y. (2022). *Fisiologi mikroorganisme*. Guepedia.

Yoon, M. H., Ten, L. N., Im, W. T., & Lee, S. T. (2007). *Methylibium fulvum* sp. nov., a member of the Betaproteobacteria isolated from ginseng field soil, and emended description of the genus *Methylibium*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 57*, 2062–2066. https://doi.org/10.1099/ijs.0.64909-0

Zur, J., Wojcieszyńska, D., & Guzik, U. (2016). Metabolic responses of bacterial cells to immobilization. *Molecules, 21*(7), Article 958. https://doi.org/10.3390/molecules21070958