

# Siklus *Oxic-Anoxic* Pada *Moving Bed Biofilm Reactor* Dengan Penambahan Zeolit Untuk Penyisihan Amonia dan Nitrat Pada Limbah Tinja

Raden Reonald Adhi Wibowo, Rizka Novembrianto\*

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

\*Koresponden email: rizka.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 29 Juni 2026

Disetujui: 03 Juli 2026

## Abstract

Purely biological septage treatment is vulnerable to ammonia shock loading, which can cause biofilm toxicity and abrupt declines in nitrification performance. This study aims to analyze the effect of combining zeolite dosage, acting as a buffer against ammonia load fluctuations, with oxic-anoxic aeration cycles, intended to drive complete ammonia conversion into nitrogen gas ( $N_2$ ), on ammonia and nitrate removal efficiency using an intermittent Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR). Six reactors were operated with combinations of three zeolite doses (0, 25, and 50 g/L) and two aeration cycles (3:3:3:3 hours and 4:2:4:2 hours), treating septage with an initial ammonia concentration of 124.8 mg/L. Results showed ammonia removal efficiencies ranging from 60.5% to 81.1%, with the combination of 50 g/L zeolite dose and the 4:2:4:2-hour cycle achieving the highest efficiency. General Linear Model (GLM) analysis revealed that zeolite dose, aeration cycle, and operational phase significantly affected both ammonia removal ( $R\text{-sq} = 99.75\%$ ) and nitrate removal ( $R\text{-sq} = 98.11\%$ ). This study demonstrates that activated zeolite effectively buffers ammonia load fluctuations, while the oxic-anoxic cycle promotes more complete conversion of ammonia into nitrogen gas compared to nitrification systems lacking an anoxic phase.

**Keywords:** MBBR, zeolite, nitrification, denitrification, ammonia, nitrate, septage

## Abstrak

Pengolahan limbah tinja secara biologis murni rentan terhadap fluktuasi beban amonia yang dapat menyebabkan toksisitas dan menurunkan kinerja nitrifikasi secara tiba-tiba. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kombinasi dosis zeolit sebagai penyangga terhadap fluktuasi beban amonia, serta siklus aerasi *oxic-anoxic* untuk mendorong konversi amonia secara tuntas menjadi gas nitrogen ( $N_2$ ), terhadap efisiensi penyisihan amonia dan nitrat menggunakan reaktor *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) intermiten. Penelitian dilakukan menggunakan enam reaktor dengan kombinasi tiga dosis zeolit (0, 25, dan 50 g/L) dan dua siklus aerasi (3:3:3:3 jam dan 4:2:4:2 jam) terhadap limbah tinja dengan konsentrasi amonia awal 124,8 mg/L. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi penyisihan amonia berkisar antara 60,5% hingga 81,1%, dengan kombinasi dosis zeolit 50 g/L dan siklus 4:2:4:2 jam menghasilkan efisiensi tertinggi. Analisis *General Linear Model* (GLM) menunjukkan bahwa dosis zeolit, siklus aerasi, dan fase operasional berpengaruh signifikan terhadap penyisihan amonia ( $R\text{-sq} = 99,75\%$ ) maupun nitrat ( $R\text{-sq} = 98,11\%$ ). Penelitian ini membuktikan bahwa zeolit teraktivasi mampu meredam fluktuasi beban amonia, sementara siklus *oxic-anoxic* mendorong konversi amonia menjadi gas nitrogen secara lebih tuntas dibanding sistem nitrifikasi tanpa fase *anoxic*.

**Kata Kunci:** MBBR, zeolit, nitrifikasi, denitrifikasi, amonia, nitrat, limbah tinja

## 1. Pendahuluan

Instalasi pengolahan lumpur tinja yang mengandalkan sistem biologis murni sering menghadapi kendala dalam mempertahankan kestabilan kinerja akibat fluktuasi beban pencemar yang signifikan. Hal ini tercermin pada evaluasi kinerja unit *Oxidation Ditch* pada salah satu instalasi pengolahan lumpur tinja yang masih belum konsisten memenuhi baku mutu amonia [1]. Permasalahan serupa juga ditemukan pada evaluasi unit pengolahan limbah domestik di instalasi sejenis [2]. Kondisi ini turut diperburuk oleh karakteristik influen lumpur tinja yang fluktuatif dari waktu ke waktu [3]. Selain itu, apabila proses oksidasi amonia hanya berhenti pada pembentukan nitrat tanpa diikuti reduksi lanjutan menjadi gas nitrogen, maka polutan tersebut sebenarnya belum benar-benar tersisihkan dari sistem dan tetap berisiko mencemari badan air penerima [4].

Beberapa pendekatan telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan tersebut. *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) merupakan salah satu teknologi yang dikenal mampu mempertahankan biomassa aktif secara stabil melalui media biofilm bergerak [5], dengan media Kaldnes sebagai salah satu jenis media yang umum digunakan pada konfigurasi tersebut [6]. Zeolit alam maupun zeolit termodifikasi juga telah banyak diteliti memiliki kapasitas pertukaran ion yang tinggi terhadap amonium [7], dengan laju adsorpsinya yang relatif cepat menjadikannya berpotensi sebagai penyangga konsentrasi pada sistem pengolahan biologis [8]. Di sisi lain, penerapan sistem aerasi intermiten yang mengombinasikan fase *oxic* dan *anoxic* dalam satu reaktor telah terbukti efektif mendorong proses nitrifikasi-denitrifikasi simultan secara lebih optimal dibandingkan aerasi kontinu [9], sebagaimana ditunjukkan pula melalui pengamatan pembentukan biofilm pada berbagai mode aerasi intermiten [10]. Kombinasi antara adsorpsi zeolit dan proses biologis nitrifikasi-denitrifikasi pada sistem MBBR juga telah dapat meningkatkan efisiensi penyisihan amonia pada limbah dengan konsentrasi rendah [11].

Penelitian terdahulu pada instalasi pengolahan lumpur tinja umumnya membahas evaluasi kinerja unit eksisting atau penambahan unit pengolahan lanjutan secara terpisah dari rekayasa biofilm itu sendiri [12], sementara penelitian mengenai zeolit dan aerasi intermiten pada sistem MBBR umumnya dilakukan secara independen tanpa mengintegrasikan kedua pendekatan tersebut secara spesifik pada limbah tinja. Kebaruan dari penelitian ini terletak pada integrasi zeolit teraktivasi dengan sistem MBBR aerasi intermiten dalam satu unit reaktor untuk mengolah limbah tinja, sehingga zeolit berperan meredam fluktuasi beban amonia sekaligus siklus *oxic-anoxic* mendorong konversi amonia secara lebih tuntas menjadi gas nitrogen. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kombinasi dosis zeolit teraktivasi dan siklus aerasi terhadap efisiensi penyisihan amonia dan nitrat pada limbah tinja menggunakan reaktor MBBR intermiten.

## 2. Metode Penelitian

### Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan meliputi air limbah tinja, media biofilm Kaldnes K3 sebagai media pertumbuhan biofilm bergerak dan zeolit alam berukuran 6–8 mm. Alat utama yang digunakan terdiri atas enam unit reaktor MBBR berkapasitas 10 L dengan *volume* kerja 6 L, *wave maker*, aerator, serta kran sampling. Spesifikasi reaktor dan kebutuhan operasional ditampilkan pada **Tabel 1**.

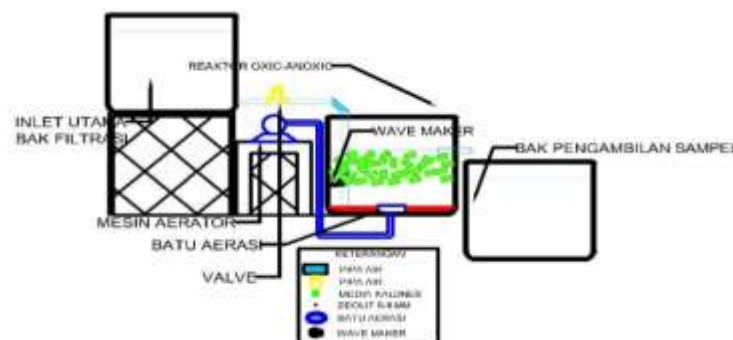
**Tabel 1.** Spesifikasi operasional reaktor

Parameter	Nilai
Volume reaktor	10 L (Volume kerja 6L)
Media biofilm	Kaldnes K3 45%
Waktu tinggal hidrolis (HRT)	12 Jam
Dosis zeolit	0, 25, 50 gr/L
Siklus aerasi	3:3:3:3 dan 4:2:4:2
Jumlah reaktor	6 buah

Sumber: Analisis, 2026

### Desain dan konfigurasi reaktor

Reaktor dirancang berbentuk silinder vertikal dengan volume kerja 6 L. Konfigurasi media dibagi menjadi dua zona, yaitu zona bawah berisi zeolit teraktivasi dan zona atas berisi media Kaldnes K3 yang bergerak bebas sebagai *moving bed* dengan rasio pengisian 45% dari volume kerja, sesuai rekomendasi desain media Kaldnes pada sistem MBBR [13]. Skema konfigurasi reaktor ditampilkan pada **Gambar 1**.



**Gambar 1.** Desain reaktor MBBR

Sumber: Analisis, 2026

### Analisis karakter awal limbah

Air limbah diambil dari salah satu IPLT yang ada di Jawa Timur dan digunakan sebagai sampel pada penelitian ini. Pengambilan sampel dilakukan pada bulan April 2026, pengambilan sampel dilakukan pada *outlet oxidation ditch*. Pada uji karakteristik awal dilakukan uji pada parameter Amonia dan Nitrat.

### Rancangan Perlakuan

Penelitian utama dioperasikan menggunakan sistem *batch* dengan enam reaktor yang dijalankan secara simultan, merepresentasikan kombinasi tiga dosis zeolit dan dua variasi siklus aerasi dengan total HRT 12 jam pada setiap reaktor. Strategi aerasi intermiten diterapkan dengan dua kali putaran dalam satu siklus, terdiri atas fase *oxic* untuk memicu nitrifikasi dan fase *anoxic* untuk mendorong denitrifikasi, mengikuti prinsip pemisahan temporal nitrifikasi-denitrifikasi yang umum diterapkan pada sistem aerasi intermiten. Rancangan kombinasi perlakuan ditampilkan pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Rancangan Kombinasi Perlakuan

Kode Reaktor	Dosis Zeolit (g/L)	Siklus Aerasi (Jam)
R1	0	3:3:3:3
R2	25	3:3:3:3
R3	50	3:3:3:3
R4	0	4:2:4:2
R5	25	4:2:4:2
R6	50	4:2:4:2

Sumber: Analisis, 2026

### Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan empat kali dalam setiap siklus HRT 12 jam, yaitu pada akhir setiap fase *oxic* dan *anoxic* (*Oxic 1*, *Anoxic 1*, *Oxic 2*, *Anoxic 2*). Sampel didiamkan singkat untuk fase pengendapan, kemudian disimpan dalam botol tertutup dan segera dianalisis di laboratorium.

### Analisis Parameter

Parameter amonia dan nitrat dianalisis menggunakan metode spektrofotometri, sedangkan parameter pendukung berupa pH, suhu, dan oksigen terlarut dipantau setiap hari sebagai variabel kontrol untuk memastikan kondisi lingkungan mendukung proses nitrifikasi dan denitrifikasi.

### Analisis Data

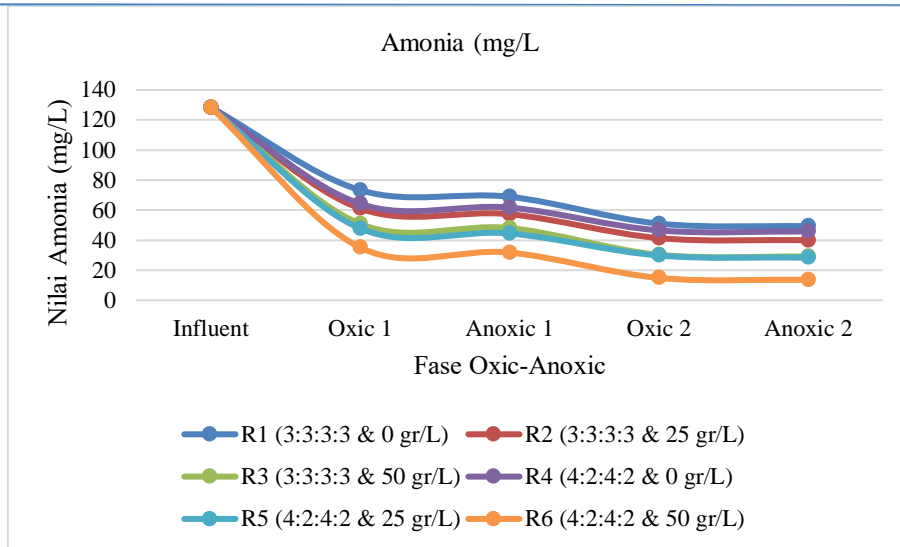
Data hasil pengujian dianalisis menggunakan metode *General Linear Model* tiga faktor, yaitu dosis zeolit, siklus aerasi, dan fase operasional, untuk mengetahui pengaruh masing-masing faktor serta interaksi antar faktor terhadap efisiensi penyisihan amonia dan nitrat. Hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk menentukan kombinasi perlakuan optimum.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### Efisiensi Penyisihan Amonia

Konsentrasi amonia awal pada limbah tinja yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 124,8 mg/L. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa keenam reaktor berhasil menyisihkan amonia dengan efisiensi yang bervariasi tergantung kombinasi dosis zeolit dan siklus aerasi yang diterapkan, sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 2** dan **Tabel 3**.

Berdasarkan **Tabel 3**, efisiensi penyisihan amonia meningkat secara konsisten seiring peningkatan dosis zeolit pada kedua siklus aerasi  $R1 < R2 < R3$  dan  $R4 < R5 < R6$ , yang mengindikasikan bahwa zeolit berkontribusi nyata terhadap penyisihan amonia melalui mekanisme pertukaran ion, sebagai tambahan terhadap proses nitrifikasi biologis yang dilakukan oleh biofilm pada media Kaldnes K3. Selain itu, pada dosis zeolit yang sama, siklus aerasi 4:2:4:2 jam secara konsisten menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan siklus 3:3:3:3 jam  $R4 > R1$ ,  $R5 > R2$ ,  $R6 > R3$ , karena durasi fase *oxic* yang lebih panjang memberikan waktu kontak lebih lama bagi bakteri nitrifikasi untuk mengoksidasi amonia [14]. Kombinasi dosis zeolit 50 g/L dengan siklus 4:2:4:2 jam pada reaktor R6 menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 81,1%, menunjukkan bahwa kombinasi durasi *oxic* terlama dan dosis zeolit tertinggi memberikan efek yang saling memperkuat satu sama lain.



Gambar 2. Tren Penurunan Amonia  
Sumber: Analisis, 2026

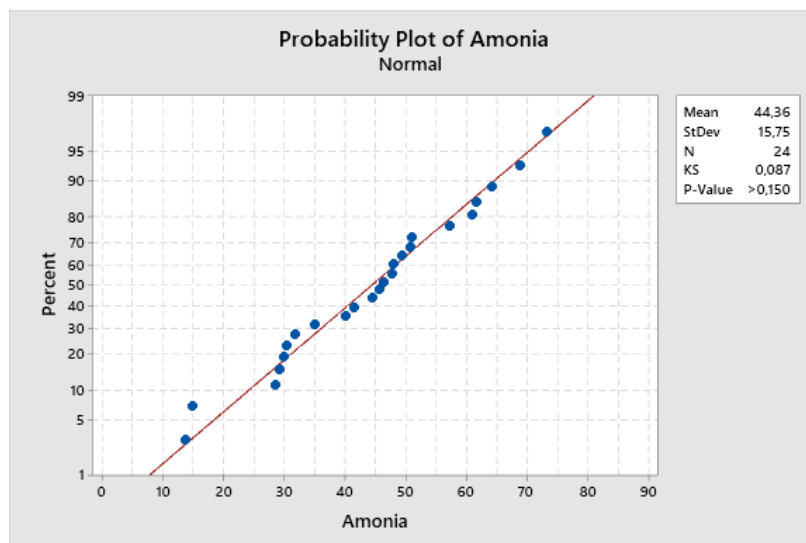
Tabel 3. Efisiensi penyisihan ammonia tiap reaktor

Kode Reaktor	Dosis Zeolit (g/L)	Siklus Aerasi (Jam)	Konsentrasi Akhir (mg/L)	Efisiensi Penyisihan
R1	0	3:3:3:3	49,3	60,5%
R2	25	3:3:3:3	40,0	68%
R3	50	3:3:3:3	29,1	76,6%
R4	0	4:2:4:2	45,8	63,3%
R5	25	4:2:4:2	28,4	77,2%
R6	50	4:2:4:2	13,6	81,1%

Sumber: Analisis, 2026

Pengaruh Dosis Zeolit, Siklus Aerasi, dan Fase Operasional Terhadap Amonia

Sebelum dilakukan uji ANOVA, terlebih dahulu dilakukan uji normalitas pada data amonia. Hasil analisis menunjukkan bahwa data amonia berdistribusi normal, ditandai dengan nilai P-value >0,150, sehingga dapat dilanjutkan ke tahap uji ANOVA. Hasil uji *General Linear Model* ditampilkan pada Gambar 4 dan Tabel 4.



Gambar 3. Uji normalitas data ammonia  
Sumber: Analisis, 2026

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Dosis Zeolit (g/L)	2	2683,07	1341,53	1415,31	0,000
Siklus Oxic-Anoxic	1	777,03	777,03	819,76	0,000
Fase	3	2137,19	712,40	751,57	0,000
Dosis Zeolit (g/L)*Siklus Oxic-Anoxic	2	95,64	47,82	50,45	0,000
Error	15	14,22	0,95		
Total	23	5707,13			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,973587	99,75%	99,62%	99,36%

Gambar 4. Uji *general linear model* pada ammonia

Tabel 4. Hasil uji GLM terhadap parameter amonia

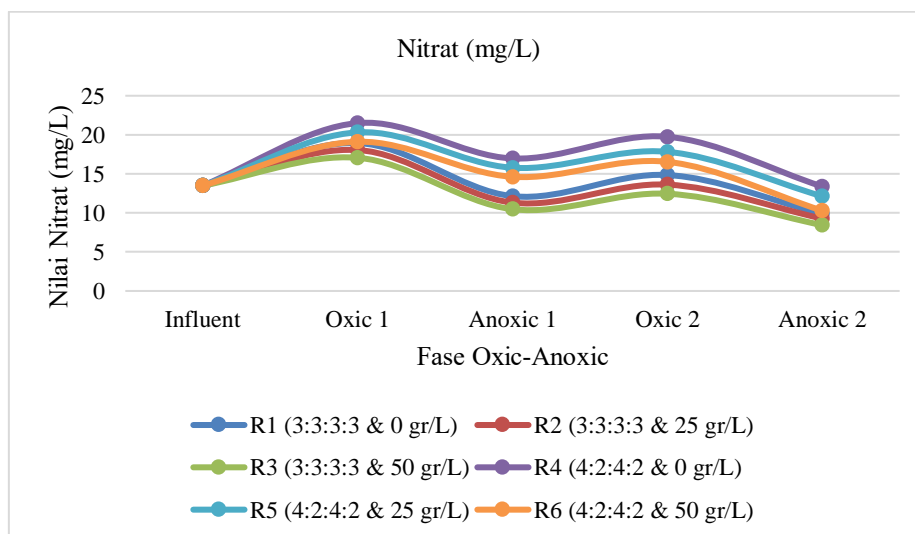
Faktor	F-Value	P-Value
Dosis zeolit	1415,31	0,000
Siklus aerasi	819,76	0,000
Fase operasional	751,57	0,000
Dosis zeolite dan siklus aerasi	50,45	0,000

Sumber: Analisis, 2026

Berdasarkan Gambar 4 dan Tabel 4, ketiga faktor yang diuji berpengaruh signifikan terhadap konsentrasi amonia ( $P < 0,05$ ). Hasil ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa pengaturan durasi fase aerasi pada sistem intermiten berperan penting dalam menentukan efisiensi penyisihan nitrogen [15]. Hasil uji interaksi antara dosis zeolit dan siklus aerasi juga menunjukkan pengaruh yang signifikan ( $F=50,45$ ;  $P=0,000$ ), yang berarti pengaruh dosis zeolit terhadap amonia tidak bersifat konsisten pada kedua siklus, sehingga kombinasi optimum harus ditentukan secara bersamaan. Model yang digunakan terbukti sangat baik dalam menjelaskan variasi data, ditunjukkan dengan nilai R-sq sebesar 99,75%

Efisiensi Penyisihan Nitrat

Konsentrasi nitrat awal pada limbah tinja yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 13,5 mg/L. Berbeda dengan amonia yang menunjukkan tren penurunan konsisten di setiap fase, konsentrasi nitrat menunjukkan pola fluktuatif seiring pergantian fase *oxic* dan *anoxic*, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 5 dan Tabel 5.



Gambar 5. Tren penurunan nitrat

Sumber: Analisis, 2026

**Tabel 5.** Efisiensi penyisihan nitrat tiap reaktor

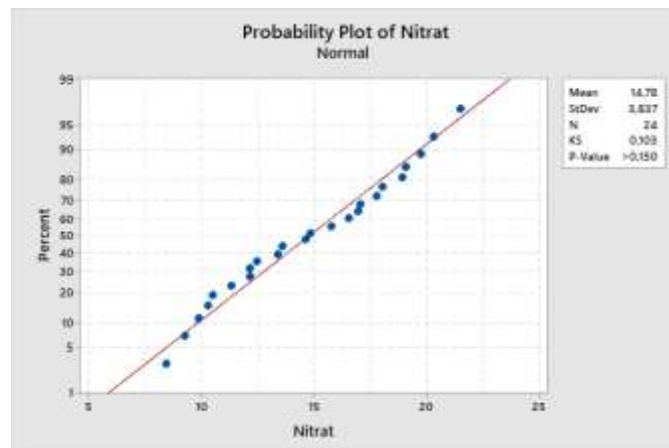
Kode Reaktor	Dosis Zeolit (g/L)	Siklus Aerasi (Jam)	Konsentrasi Akhir (mg/L)	Efisiensi Penyisihan
R1	0	3:3:3:3	9,89	26,7%
R2	25	3:3:3:3	9,27	31,3%
R3	50	3:3:3:3	8,43	36,6%
R4	0	4:2:4:2	13,38	0,9%
R5	25	4:2:4:2	12,13	10,1%
R6	50	4:2:4:2	10,29	23,8%

Sumber: Analisis, 2026

Berdasarkan **Tabel 5**, konsentrasi nitrat meningkat tajam pada fase *oxic* akibat proses nitrifikasi yang aktif mengoksidasi amonia menjadi nitrat, kemudian menurun pada fase *anoxic* akibat proses denitrifikasi yang mereduksi nitrat menjadi gas nitrogen. Pola ini konsisten terjadi pada keenam reaktor, membuktikan bahwa mekanisme nitrifikasi-denitrifikasi berlangsung sebagaimana yang diharapkan pada sistem aerasi intermiten. Terlihat bahwa siklus aerasi 3:3:3:3 jam pada R1 sampai R3 secara konsisten menghasilkan persentase penyisihan akhir yang lebih tinggi dibandingkan siklus 4:2:4:2 jam pada dosis zeolit yang sama yaitu R4 sampai R6, karena durasi fase *anoxic* yang lebih panjang (3 jam) memberikan waktu lebih memadai bagi bakteri denitrifikasi untuk mereduksi nitrat secara lebih tuntas dibandingkan durasi *anoxic* yang lebih singkat (2 jam) pada siklus 4:2:4:2 jam.

*Pengaruh Dosis Zeolit, Siklus Aerasi, dan Fase Operasional Terhadap Nitrat*

Hasil uji normalitas data nitrat menunjukkan distribusi normal dengan nilai P-value >0,150. Hasil uji GLM terhadap parameter nitrat ditampilkan pada **Gambar 7** dan **Tabel 6**.



**Gambar 6.** Uji normalitas data nitrat  
 Sumber: Analisis, 2026

**Analysis of Variance**

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Dosis Zeolit (g/L)	2	21,276	10,6380	24,89	0,000
Siklus Oxic-Anoxic	1	72,523	72,5233	169,68	0,000
Fase	3	237,614	79,2046	185,31	0,000
Dosis Zeolit (g/L)*Siklus Oxic-Anoxic	2	0,826	0,4131	0,97	0,403
Error	15	6,411	0,4274		
Total	23	338,650			

**Model Summary**

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,653764	98,11%	97,10%	95,15%

**Gambar 7.** Uji *general linear model* pada nitrat  
 Sumber: Analisis, 2026.

**Tabel 6.** Hasil uji GLM terhadap parameter nitrat

Faktor	F-Value	P-Value
Dosis zeolit	24,89	0,000
Siklus aerasi	169,68	0,000
Fase operasional	185,31	0,000
Dosis zeolite dan siklus aerasi	0,97	0,403

Sumber: Analisis, 2026

Berbeda dengan hasil pada parameter amonia, ketiga faktor utama tetap berpengaruh signifikan terhadap nitrat, namun interaksi antara dosis zeolit dan siklus aerasi tidak signifikan ( $F=0,97$ ;  $P=0,403$ ). Hal ini mengindikasikan bahwa pengaruh dosis zeolit terhadap nitrat bersifat konsisten pada kedua siklus, sehingga kombinasi optimum dapat ditentukan dengan menggabungkan level terbaik dari masing-masing faktor secara terpisah. Nilai F siklus aerasi (169,68) yang jauh lebih besar dibandingkan dosis zeolit (24,89) mengindikasikan bahwa durasi fase anoksik berperan lebih dominan dalam menentukan konsentrasi nitrat akhir dibandingkan dosis zeolit, sejalan dengan prinsip bahwa proses denitrifikasi hanya berlangsung pada kondisi *anoxic*. Model ini juga sangat baik dalam menjelaskan variasi data, dengan nilai R-sq sebesar 98,11%.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa dosis zeolit teraktivasi dan siklus aerasi oksik-anoksik sama-sama berpengaruh signifikan terhadap efisiensi penyisihan amonia, dengan efisiensi tertinggi sebesar 81,1% dicapai pada kombinasi dosis zeolit 50 g/L dan siklus aerasi 4:2:4:2 jam (R6). Hasil uji *General Linear Model* menunjukkan bahwa ketiga faktor yang diuji, yaitu dosis zeolit, siklus aerasi, dan fase operasional, berpengaruh signifikan terhadap konsentrasi amonia ( $R\text{-sq} = 99,75\%$ ), dengan interaksi yang signifikan antara dosis zeolit dan siklus aerasi, sehingga kombinasi optimum harus ditentukan secara bersamaan dan tidak dapat digabungkan secara terpisah.

Pada parameter nitrat, ketiga faktor juga berpengaruh signifikan ( $R\text{-sq} = 98,11\%$ ), namun dengan pola yang berbeda dari amonia. Siklus aerasi terbukti menjadi faktor yang lebih dominan dibandingkan dosis zeolit dalam menentukan konsentrasi nitrat akhir, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai F siklus aerasi (169,68) yang jauh lebih besar dibandingkan dosis zeolit (24,89). Tidak terdapat interaksi yang signifikan antara dosis zeolit dan siklus aerasi terhadap nitrat ( $P=0,403$ ), sehingga kombinasi optimum untuk parameter ini dapat ditentukan dengan menggabungkan level terbaik dari masing-masing faktor secara terpisah, yaitu dosis zeolit tertinggi pada siklus aerasi dengan durasi fase anoksik yang lebih panjang (3:3:3:3 jam).

Perbedaan pola pengaruh antara amonia dan nitrat ini menunjukkan bahwa tidak terdapat satu kombinasi operasional yang optimal untuk kedua parameter secara bersamaan, sehingga penentuan kondisi operasional pada aplikasi skala lanjutan perlu mempertimbangkan prioritas parameter yang ingin dicapai. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa integrasi zeolit teraktivasi pada sistem *Moving Bed Biofilm Reactor* dengan aerasi intermiten efektif meningkatkan efisiensi penyisihan amonia dan nitrat pada limbah tinja, dengan kontribusi mekanisme yang berbeda untuk masing-masing parameter zeolit lebih dominan pada penyisihan amonia melalui adsorpsi, sedangkan durasi fase *anoxic* lebih dominan pada penyisihan nitrat melalui proses denitrifikasi.

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] G. Dian and W. Herumurti, "Evaluasi kinerja instalasi pengolahan lumpur tinja (IPLT) keputih, Surabaya," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 1, pp. 1–6, 2016.
- [2] D. R. Pratama and N. S. Priambudi, "Evaluasi Unit Oxidation Ditch Pada Sub Koordinator Pengolahan Limbah Domestik Di Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja (IPLT) Keputih, Surabaya," 2023.
- [3] E. Nurhayati, A. Y. Bagastyo, F. Fathyah, D. P. Rahayu, and A. Yulikasari, "Karakterisasi Influen Lumpur Di Instalasi Pengolahan Lumpur Tinja (Iplt) Keputih Surabaya," *Jurnal Purifikasi*, vol. 22, no. 2, pp. 73–80, 2023.
- [4] Y. Ye *et al.*, "Research progress on biological denitrification process in wastewater treatment," *Water (Basel)*, vol. 17, no. 4, p. 520, 2025.
- [5] H. Ødegaard, B. Rusten, and T. Westrum, "A new moving bed biofilm reactor-applications and results," *Water Science and Technology*, vol. 29, no. 10–11, p. 157, 1994.

- [6] B. Rusten, B. Eikebrokk, Y. Ulgenes, and E. Lygren, "Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors," *Aquac. Eng.*, vol. 34, no. 3, pp. 322–331, 2006.
- [7] A. Alshameri, A. Ibrahim, A. M. Assabri, X. Lei, H. Wang, and C. Yan, "The investigation into the ammonium removal performance of Yemeni natural zeolite: Modification, ion exchange mechanism, and thermodynamics," *Powder Technol.*, vol. 258, pp. 20–31, 2014.
- [8] D. Wen, Y. S. Ho, and X. Tang, "Comparative sorption kinetic studies of ammonium onto zeolite," *J. Hazard. Mater.*, vol. 133, no. 1–3, pp. 252–256, May 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.10.020.
- [9] Y. Miao *et al.*, "Application of intermittent aeration in nitrogen removal process: development, advantages and mechanisms," *Chemical Engineering Journal*, vol. 430, p. 133184, 2022.
- [10] Y.-Q. Gu, T.-T. Li, and H.-Q. Li, "Biofilm formation monitored by confocal laser scanning microscopy during startup of MBBR operated under different intermittent aeration modes," *Process Biochemistry*, vol. 74, pp. 132–140, 2018.
- [11] L. Wang *et al.*, "Nitrogen Removal for Low Concentration Ammonium Wastewater by Adsorption, Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process in MBBR," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 7, Apr. 2023, doi: 10.3390/w15071334.
- [12] A. Munfaridah, S. P. Saraswati, and J. S. Mahathir, "Pengaruh Sistem Aerasi Intermittent terhadap Removal Organik dan Nitrogen pada Pengolahan Air Limbah Domestik Kamar Mandi Umum," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 20, no. 1, pp. 102–114, Jan. 2022, doi: 10.14710/jil.20.1.102-114.
- [13] A. U. Farahdiba, Y. S. Purnomo, S. N. Sakti, and M. F. Kamal, "Pengolahan limbah domestik rumah makan dengan proses moving bed biofilm reactor (MBBR)," *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, vol. 5, no. 1, 2019.
- [14] T. A. Rachmanto and V. R. Pradana, "Proses Oxic Anoxic Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) Untuk Meremoval Parameter COD," *ENVIROSAN: Jurnal Teknik Lingkungan*, vol. 6, no. 1, pp. 1–5, 2023.
- [15] T. A. Rachmanto and I. Ardiansyah, "The Effect of Oxic-Anoxic Process on Moving Bed Biofilm Reactor For The Reduction of Dissolved Organic Matter in The Slaughterhouse Industry," *Berkala Sainstek*, vol. 13, no. 4, pp. 199–205, 2025.