

Optimasi Variasi Laju Aerasi dan Rasio Resirkulasi terhadap Penurunan COD dan NH₃-N Menggunakan Biofilter Aerob Sistem *Oxic-Anoxic*

Andini Virgiana Rahmawati*, Rizka Novembrianto

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

*Koresponden email: virgiana.andien@gmail.com

Diterima: 19 Juni 2026

Disetujui: 24 Juni 2026

Abstract

Domestic wastewater from the Universitas Pembangunan Nasional (UPN) "Veteran" Jawa Timur Dormitory contains a considerable amount of organic pollutants and therefore requires treatment before being discharged into the environment. The effect of varying aeration rate together with recirculation ratio on Chemical Oxygen Demand (COD) and ammonia (NH₃-N) removal was examined in this research, employing an oxic-anoxic aerobic biofilter configuration. The study was conducted at laboratory scale using a 1:1 mixture of blackwater and greywater. Aeration rates of 0.5, 1.0, and 1.5 L/min were applied, while recirculation ratios of 40%, 60%, and 80% were evaluated. Each operational cycle of the reactor spanned 8 hours, divided into four sequential 2-hour stages, oxic I, anoxic I, oxic II, and anoxic II. The results showed that increasing the aeration rate and recirculation ratio reduced COD and NH₃-N concentrations. The lowest COD concentration was obtained at an aeration rate of 1.5 L/min and a recirculation ratio of 80%, reaching 65 mg/L, while the lowest NH₃-N concentration was 5.39 mg/L under the same operating conditions. The findings indicate that the combination of an aeration rate of 1.5 L/min and a recirculation ratio of 80% resulted in the highest reduction of COD and NH₃-N compared to the other treatment conditions.

Keywords: *aerobic biofilter, aeration rate, recirculation ratio, oxic-anoxic, domestic wastewater*

Abstrak

Kadar bahan organik pada air limbah domestik dari Asrama Universitas Pembangunan Nasional (UPN) "Veteran" Jawa Timur tergolong masih tinggi, sehingga pengolahan diperlukan sebelum air tersebut dibuang ke lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi laju aerasi dan rasio resirkulasi terhadap penurunan *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan amoniak (NH₃-N) menggunakan biofilter aerob sistem *oxic-anoxic*. Penelitian dilakukan pada skala laboratorium menggunakan campuran *blackwater* dan *greywater* dengan rasio 1:1. Variasi laju aerasi yang digunakan adalah 0,5; 1; dan 1,5 L/menit, sedangkan rasio resirkulasi yang diterapkan yaitu 40%, 60%, dan 80%. Reaktor dioperasikan selama 8 jam yang terdiri atas fase *oxic I*, *anoxic I*, *oxic II*, dan *anoxic II*, masing-masing selama 2 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan laju aerasi dan rasio resirkulasi menyebabkan penurunan konsentrasi COD dan NH₃-N. Konsentrasi COD terendah diperoleh pada laju aerasi 1,5 L/menit dan rasio resirkulasi 80%, yaitu sebesar 65 mg/L, sedangkan konsentrasi NH₃-N terendah sebesar 5,39 mg/L diperoleh pada kondisi yang sama. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi laju aerasi 1,5 L/menit dan rasio resirkulasi 80% menghasilkan penurunan COD dan NH₃-N tertinggi dibandingkan perlakuan lainnya.

Kata Kunci: *biofilter aerob, laju aerasi, rasio resirkulasi, oxic-anoxic, air limbah domestik*

1. Pendahuluan

Air limbah domestik adalah air buangan yang dihasilkan dari kegiatan rumah tangga sehari-hari, misalnya kegiatan mandi, mencuci, memasak, serta kakus. Air limbah ini umumnya masih mengandung bahan organik yang cukup tinggi sehingga dapat mencemari lingkungan jika tidak diolah dengan baik. Selain bahan organik, air limbah domestik juga mengandung amonia. Meskipun konsentrasinya tidak selalu melampaui baku mutu, tetapi tetap berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan apabila terus-menerus dibuang tanpa pengolahan, seperti eutrofikasi dan efek toksik terhadap organisme akuatik [1]. Di Indonesia, pengolahan air limbah domestik umumnya masih menggunakan *septic tank* sebagai pengolahan utama. Namun, *septic tank* hanya berfungsi sebagai pengolahan awal secara anaerob sehingga belum mampu menurunkan kadar pencemar secara optimal [2]. Kondisi serupa juga ditemukan pada sistem

pengolahan air limbah di Asrama Universitas Pembangunan Nasional (UPN) “Veteran” Jawa Timur yang masih menggunakan *septic tank* sebagai unit pengolahan utama sehingga diperlukan pengolahan lanjutan.

Biofilter aerob merupakan salah satu opsi teknologi pengolahan lanjutan yang dapat diterapkan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Biofilter aerob memanfaatkan mikroorganisme yang tumbuh pada media filter untuk menguraikan bahan organik dan amonia dengan bantuan oksigen [3]. Dibandingkan dengan proses lumpur aktif, biofilter aerob memiliki beberapa keunggulan, seperti tidak memerlukan unit sedimentasi dan lebih sederhana dalam pengoperasiannya [4]. Pada penelitian ini digunakan sistem aliran air *upflow* dan media *bioball* karena memiliki luas permukaan spesifik yang besar, yaitu sekitar 200–240 m²/m³, sehingga mampu mendukung pertumbuhan *biofilm* [5].

Kinerja biofilter aerob dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk laju aerasi dan rasio resirkulasi. Aerasi berperan dalam menyediakan oksigen yang dibutuhkan mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik dan mengoksidasi amonia, sedangkan resirkulasi dapat memperpanjang waktu kontak antara air limbah dan *biofilm* sehingga meningkatkan kadar penyisihan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa biofilter aerob dengan aerasi mampu menurunkan COD hingga 93,5% [6], sedangkan sistem biofilter aerob mampu menurunkan amonia hingga 99% [7]. Namun, penelitian mengenai kombinasi variasi laju aerasi dan rasio resirkulasi pada biofilter aerob untuk pengolahan air limbah domestik masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi laju aerasi dan rasio resirkulasi terhadap penyisihan COD dan amonia pada air limbah Asrama UPN “Veteran” Jawa Timur menggunakan biofilter aerob *upflow* dengan sistem *oxic-anoxic*.

2. Metode Penelitian

Penelitian terdiri atas tiga tahapan yang dilakukan secara berurutan untuk memastikan mikroorganisme yang digunakan dalam proses pengolahan telah tumbuh, menempel pada media, dan beradaptasi dengan baik terhadap karakteristik air limbah yang akan diolah sebelum data utama penelitian diambil. Tahap *seeding* dilakukan selama 31 hari dengan tujuan menumbuhkan dan membentuk *biofilm* mikroorganisme pada permukaan media *bioball* di dalam reaktor. Keberhasilan tahap *seeding* ditentukan berdasarkan nilai MLSS yang terbentuk pada media, yaitu hingga mencapai ≥ 2.000 mg/L yang mengindikasikan *biofilm* telah cukup tumbuh untuk proses pengolahan pada tahap berikutnya [8].

Tahap aklimatisasi dilakukan selama 10 hari untuk membantu mikroorganisme beradaptasi dengan karakteristik air limbah yang akan diolah pada penelitian utama. Selama proses ini, konsentrasi air limbah dinaikkan secara bertahap mulai dari 25%, 50%, 75%, hingga 100%. Setiap variasi konsentrasi dioperasikan sampai diperoleh nilai penurunan COD yang stabil, kemudian dilanjutkan ke konsentrasi berikutnya. Pengamatan terhadap penurunan COD dilakukan untuk mengetahui kemampuan mikroorganisme dalam menyesuaikan diri terhadap peningkatan beban organik sebelum reaktor dioperasikan menggunakan air limbah 100% pada tahap penelitian utama [9].

Tahap penelitian utama dilakukan setelah mikroorganisme berhasil beradaptasi pada tahap aklimatisasi. Pada tahap ini, setiap reaktor dioperasikan dengan variasi laju aerasi dan rasio resirkulasi yang berbeda. Penelitian ini menggunakan variasi laju aerasi 0,5; 1,0; dan 1,5 L/menit serta rasio resirkulasi 40%, 60%, dan 80%. Penelitian utama dilakukan menggunakan 3 unit reaktor biofilter aerob yang dioperasikan secara kontinu dengan rasio resirkulasi tetap pada masing-masing reaktor. Setiap reaktor kemudian dioperasikan secara bergantian pada tiga variasi laju aerasi. Reaktor menggunakan sistem *oxic-anoxic* yang terdiri dari empat tahap berurutan, yaitu *Oxic I*, *Anoxic I*, *Oxic II*, dan *Anoxic II*. Masing-masing tahap berlangsung selama 2 jam sehingga total waktu operasi dalam satu siklus adalah 8 jam (HRT 8 jam). Sampel untuk analisis COD dan NH₃-N diambil pada akhir siklus operasi, yaitu setelah fase *Anoxic II* selesai.

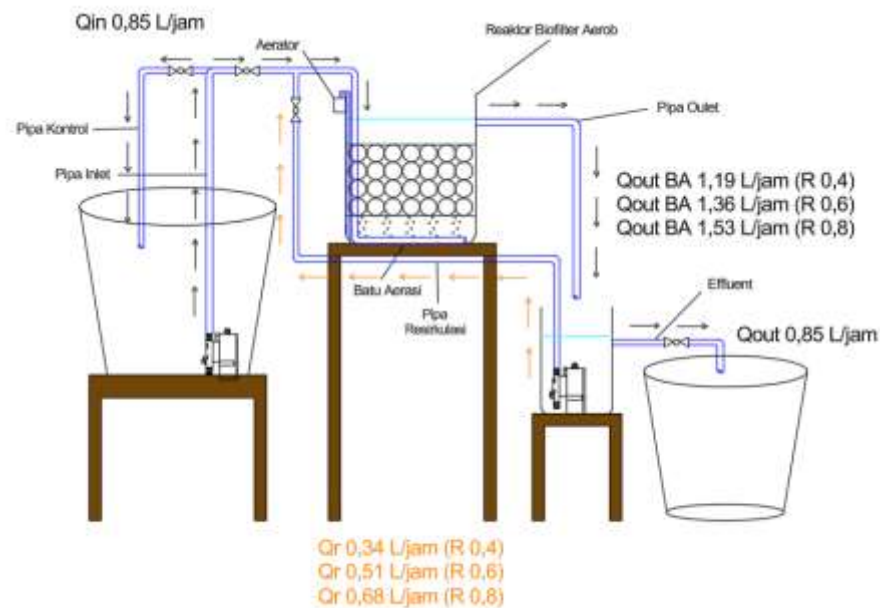
Alat dan Bahan

Sampel yang digunakan pada penelitian ini merupakan air limbah domestik yang berasal dari Asrama UPN “Veteran” Jawa Timur yang berupa campuran *blackwater* dan *greywater* dengan perbandingan 1:1. Pemilihan jenis air limbah ini didasarkan pada kondisi eksisting di lokasi penelitian, dimana *blackwater* hanya melalui pengolahan awal berupa septic tank sebelum dialirkan ke saluran drainase, sedangkan *greywater* dibuang langsung ke drainase tanpa melalui proses pengolahan apa pun sehingga berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak diolah lebih lanjut.

Reaktor yang digunakan memiliki volume air 6,8 L dan dioperasikan menggunakan sistem aliran *upflow*, yaitu air limbah dialirkan dari bagian bawah menuju bagian atas reaktor [10]. Media yang digunakan berupa *bioball* dengan jumlah sebesar 50% dari volume reaktor. *Bioball* dipilih karena memiliki luas permukaan yang besar, sekitar 200–240 m²/m³, sehingga dapat mendukung pertumbuhan *biofilm* dan meningkatkan kontak antara mikroorganisme dengan zat pencemar [4]. Air limbah dialirkan ke dalam

reaktor dengan debit influen sebesar 0,85 L/jam yang disesuaikan dengan volume reaktor untuk menghasilkan HRT selama 8 jam.

Sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 1**, sistem reaktor dilengkapi dengan pipa kontrol dan pipa inlet pada bagian penampung awal, aerator yang dipasang pada bagian dasar reaktor melalui batu aerasi untuk mensuplai oksigen selama fase *oxic*, serta bak resirkulasi yang mengalirkan kembali sebagian efluen menuju bagian bawah reaktor untuk meningkatkan waktu kontak antara air limbah dengan *biofilm*. Debit aliran balik (Q_r) yang diterapkan pada masing-masing reaktor disesuaikan dengan rasio resirkulasi yang diujikan, yaitu sebesar 0,34 L/jam untuk rasio resirkulasi 40%, 0,51 L/jam untuk rasio resirkulasi 60%, dan 0,68 L/jam untuk rasio resirkulasi 80%. Debit keluaran biofilter aerob ($Q_{out\ BA}$) pada masing-masing rasio resirkulasi tersebut secara berurutan adalah 1,19 L/jam; 1,36 L/jam; dan 1,53 L/jam, sedangkan debit efluen akhir (Q_{out}) yang keluar tetap setara dengan debit influen, yaitu 0,85 L/jam



Gambar 1. Desain Reaktor
 Sumber: Hasil Penelitian, 2026

Metode Analisis

Parameter yang dianalisis dalam penelitian ini adalah COD dan $\text{NH}_3\text{-N}$ pada air limbah sebelum pengolahan (influen) dan setelah pengolahan (effluen). Analisis COD dilakukan menggunakan metode refluks tertutup secara titrimetri [11], sedangkan analisis $\text{NH}_3\text{-N}$ dilakukan menggunakan metode fenat secara spektrofotometri [12]. Data hasil pengukuran COD dan $\text{NH}_3\text{-N}$ kemudian dianalisis dengan menghitung efisiensi penyisihan untuk mengetahui kemampuan reaktor dalam mengurangi konsentrasi pencemar menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Efisiensi penyisihan (\%)} = \left[\frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \right] \times 100\%$$

C_0 = Konsentrasi awal (mg/L)

C_t = Konsentrasi akhir (mg/L)

Nilai efisiensi penyisihan digunakan untuk menentukan kombinasi variasi laju aerasi dan rasio resirkulasi yang memberikan hasil penurunan COD dan $\text{NH}_3\text{-N}$ terbaik (kondisi optimum).

3. Hasil dan Pembahasan Karakteristik awal air limbah

Pada **Tabel 1** menunjukkan bahwa konsentrasi COD air limbah pada masing-masing reaktor berturut-turut sebesar 258 mg/L, 266 mg/L, dan 253 mg/L. Nilai tersebut melampaui baku mutu air limbah domestik sebesar 100 mg/L. Sementara itu, konsentrasi $\text{NH}_3\text{-N}$ awal berturut-turut sebesar 13,71 mg/L; 12,88 mg/L; dan 12,37 mg/L yang masih berada di bawah baku mutu sebesar 20 mg/L berdasarkan

Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 11 Tahun 2025 [13]. Meskipun konsentrasi $\text{NH}_3\text{-N}$ awal belum melampaui baku mutu, kandungan amonia tersebut tetap berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan, seperti eutrofikasi pada badan air penerima serta bersifat toksik terhadap organisme akuatik apabila terus terakumulasi [14]. Berdasarkan karakteristik tersebut, air limbah Asrama UPN “Veteran” Jawa Timur tergolong air limbah dengan beban organik tinggi namun beban nitrogen sedang, sehingga diperlukan pengolahan lanjutan yang dapat menyisahkan kedua parameter tersebut, salah satunya menggunakan biofilter aerob sistem *oxic-anoxic*.

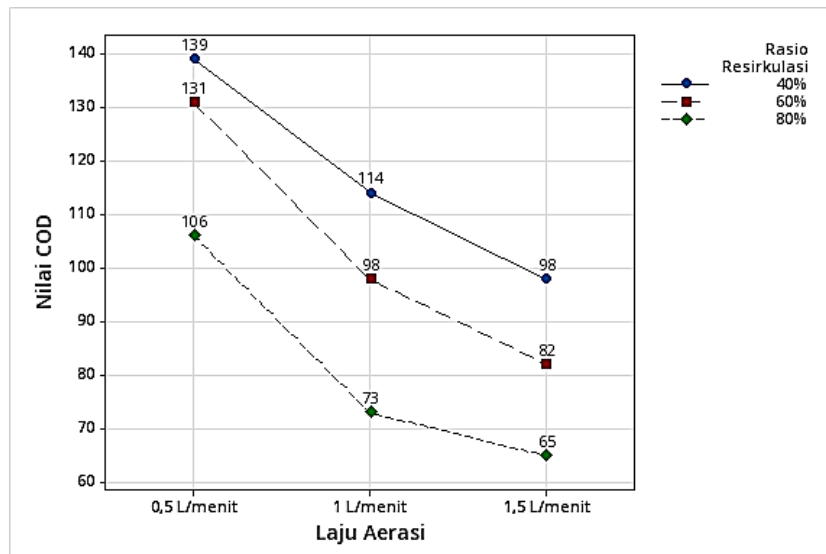
Tabel 1. Karakteristik Awal Air Limbah

Parameter	Hasil	Baku mutu8)
COD (mg/L)	258	100
	266	
	253	
Amonia $\text{NH}_3\text{-N}$ (mg/L)	13,71	20
	12,88	
	12,37	

*) Permen LHK No. 11 Tahun 2025
Sumber: Data Hasil Penelitian, 2026

Penurunan kadar COD

Gambar 2 menunjukkan bahwa peningkatan laju aerasi dan rasio resirkulasi cenderung menurunkan konsentrasi COD efluen. Konsentrasi COD tertinggi diperoleh pada laju aerasi 0,5 L/menit dan rasio resirkulasi 40%, yaitu sebesar 139 mg/L, sedangkan konsentrasi COD terendah diperoleh pada laju aerasi 1,5 L/menit dan rasio resirkulasi 80%, yaitu sebesar 65 mg/L. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan aerasi dan resirkulasi dapat meningkatkan kinerja reaktor dalam menyisahkan bahan organik.



Gambar 2. Grafik Penurunan Kadar COD

Sumber: Hasil Penelitian, 2026

Tabel 2. Efisiensi Penyisihan COD

Rasio Resirkulasi	Laju Aerasi			EP (%)
	0,5 L/menit	1 L/menit	1,5 L/menit	
80%	106	73	65	38,46%
60%	131	98	82	37,50%
40%	139	114	98	29,41%

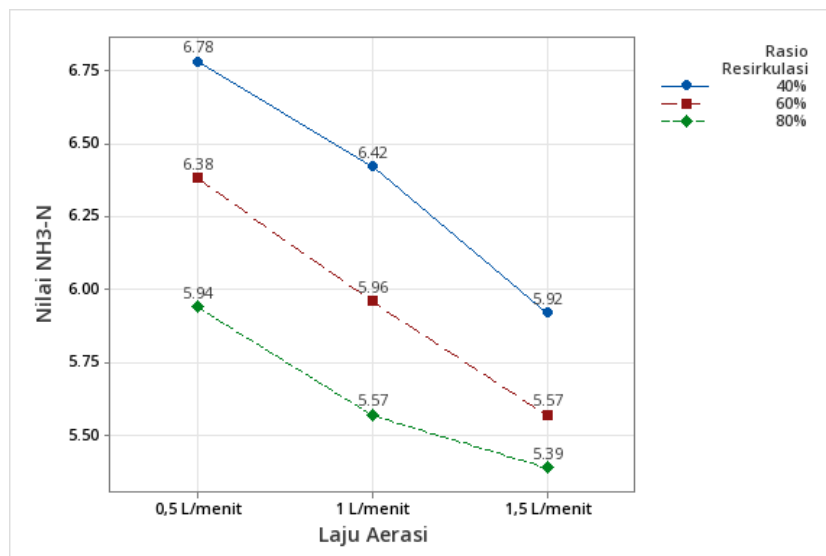
Sumber: Hasil Penelitian, 2026

Tabel 2 menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan COD meningkat dengan bertambahnya laju aerasi dan rasio resirkulasi. Efisiensi penyisihan COD terendah diperoleh pada laju aerasi 0,5 L/menit dan rasio resirkulasi 40%, yaitu sebesar 46,1%. Sedangkan efisiensi tertinggi diperoleh pada laju aerasi 1,5

L/menit dan rasio resirkulasi 80%, yaitu sebesar 74,3%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan suplai oksigen melalui aerasi serta peningkatan rasio resirkulasi mampu meningkatkan kontak antara mikroorganisme dan bahan organik sehingga proses biodegradasi bahan organik berjalan dengan baik. Hal tersebut menyebabkan konsentrasi COD efluen semakin menurun seiring dengan meningkatnya laju aerasi dan rasio resirkulasi. Berdasarkan baku mutu COD sebesar 100 mg/L, tidak semua kombinasi perlakuan menghasilkan efluen yang memenuhi standar. Efluen yang memenuhi baku mutu diperoleh pada laju aerasi 1,5 L/menit dengan rasio resirkulasi 40%, serta pada laju aerasi 1,0 dan 1,5 L/menit dengan rasio resirkulasi 60% dan 80%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi laju aerasi dan rasio resirkulasi yang lebih tinggi memberikan kinerja penyisihan COD yang lebih baik. Hal ini sejalan dengan penelitian Sasmita dkk. [6] yang menunjukkan bahwa peningkatan aerasi dan resirkulasi dapat meningkatkan penyisihan COD pada pengolahan *greywater* menggunakan media *honeycomb*.

Penurunan kadar Amonia (NH₃-N)

Gambar 3 menunjukkan bahwa peningkatan laju aerasi dan rasio resirkulasi cenderung menurunkan konsentrasi NH₃-N efluen. Konsentrasi NH₃-N terendah diperoleh pada kombinasi laju aerasi 1,5 L/menit dan rasio resirkulasi 80%, yaitu sebesar 5,39 mg/L. Sedangkan konsentrasi tertinggi diperoleh pada laju aerasi 0,5 L/menit dan rasio resirkulasi 40%, yaitu sebesar 6,78 mg/L. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan laju aerasi mampu menyediakan oksigen yang cukup bagi bakteri nitrifikasi untuk mengoksidasi amonia menjadi nitrit dan nitrat. Selain itu, rasio resirkulasi yang lebih tinggi membantu meningkatkan kontak antara mikroorganisme dengan air limbah. Oleh karena itu, konsentrasi NH₃-N efluen semakin menurun seiring dengan meningkatnya laju aerasi dan rasio resirkulasi. Hasil ini sejalan dengan penelitian Zhou et al. [15] yang menunjukkan bahwa peningkatan oksigen terlarut akibat aerasi yang lebih baik dapat meningkatkan proses nitrifikasi dan efisiensi penyisihan nitrogen pada reaktor *biofilm*. Kondisi tersebut menyebabkan konsentrasi NH₃-N efluen semakin menurun seiring dengan meningkatnya ketersediaan oksigen.



Gambar 3. Grafik Penurunan Kadar Amonia (NH₃-N)
Sumber: Hasil Penelitian, 2026

Tabel 3. Efisiensi Penyisihan NH₃-N

Rasio Resirkulasi	Laju Aerasi			EP (%)
	0,5 L/menit	1 L/menit	1,5 L/menit	
80%	106	73	65	38,46%
60%	131	98	82	37,50%
40%	139	114	98	29,41%

Sumber: Hasil Penelitian, 2026

Tabel 3 menunjukkan bahwa perbedaan efisiensi penyisihan NH₃-N pada setiap variasi rasio resirkulasi lebih kecil dibandingkan efisiensi penyisihan COD. Pada laju aerasi 1,5 L/menit, efisiensi

penyisihan $\text{NH}_3\text{-N}$ pada ketiga rasio resirkulasi hanya berkisar antara 56,4–56,8%, sedangkan efisiensi penyisihan COD berada pada rentang 62,0–74,3%. Hal ini menunjukkan bahwa penurunan $\text{NH}_3\text{-N}$ lebih dipengaruhi oleh laju aerasi yang menentukan ketersediaan oksigen bagi bakteri nitrifikasi, sementara penyisihan COD dipengaruhi oleh kombinasi laju aerasi dan rasio resirkulasi. Jika dibandingkan dengan penelitian Tao dkk. [6] yang memperoleh efisiensi penyisihan amonia hingga 99%, efisiensi penyisihan $\text{NH}_3\text{-N}$ pada penelitian ini masih lebih rendah. Perbedaan tersebut kemungkinan disebabkan oleh perbedaan HRT, kondisi *biofilm* pada media *bioball*, karakteristik air limbah yang diolah, serta waktu fase *oxic* yang hanya berlangsung selama 4 jam dari total waktu operasi 8 jam.

4. Kesimpulan

Variasi laju aerasi dan rasio resirkulasi memengaruhi penurunan COD dan $\text{NH}_3\text{-N}$ pada air limbah domestik menggunakan biofilter aerob sistem *oxic-anoxic*. Semakin tinggi laju aerasi dan rasio resirkulasi yang digunakan, maka semakin rendah konsentrasi COD dan $\text{NH}_3\text{-N}$ efluen yang diperoleh. Hasil menunjukkan efisiensi penyisihan COD berkisar antara 46,1–74,3% dan efisiensi penyisihan $\text{NH}_3\text{-N}$ berkisar antara 50,5–56,8% pada seluruh kombinasi perlakuan yang diujikan. Kondisi optimum pada penelitian ini yaitu pada laju aerasi 1,5 L/menit dan rasio resirkulasi 80%, dengan konsentrasi COD dan $\text{NH}_3\text{-N}$ efluen masing-masing sebesar 65 mg/L dan 5,39 mg/L, yaitu sebesar 74,3% dan 56,4%.

5. Daftar Singkatan

<i>COD</i>	<i>Chemical Oxygen Demand</i>
$\text{NH}_3\text{-N}$	Amoniak
%	Persentase
<i>Seeding</i>	Menumbuhkan mikroorganisme
<i>Oxic</i>	Kondisi ada oksigen
<i>Anoxic</i>	Kondisi minim oksigen
<i>HRT</i>	<i>Hydraulic Retention Time</i>
MLSS	<i>Mixed Liquor Suspended Solids</i>
R	Rasio resirkulasi
Q_{in}/Q_{out}	Debit influen / debit efluen
Q_r	Debit aliran resirkulasi (recycle)
$Q_{out\ BA}$	Debit yang keluar dari biofilter aerob menuju bak resirkulasi
EP	Efisiensi penyisihan

6. Referensi

- [1] Khan, N. A., et al. (2022). *Characteristics and treatment technologies of domestic wastewater: A review. Journal of Water Process Engineering*, 49, 103042.
- [2] Lesmana, R. Y. (2018). Perencanaan *Septic Tank* Skala Rumah Tangga untuk Penanganan Air Limbah. *Media Ilmiah Teknik Lingkungan*, 3(2), 21–24.
- [3] Meilufi, S. (2018). Kajian Kinerja Biofilter Aerobik dalam Penurunan Kandungan Organik Limbah Tinja. *Jurnal Teknik Mesin Cakram*, 1(1), 1.
- [4] Qiu, J., & Yin, K. (2023). *Characteristics and Comparison of Biofilm and Activated Sludge Sewage Treatment Technologies. Highlights in Science, Engineering and Technology*, 80, 320–326.
- [5] Apema, F. D., Rahayu, D. E., Adnan, F., & Waryati, W. (2023). Penggunaan Media Sarang Tawon dan Bioball pada Biofilter Aerob pada Pengolahan Limbah Cair Laundry. *Jurnal Teknologi Lingkungan UNMUL*, 7(1), 81.
- [6] Sasmita, A., Asmura, J., & Maharani, F. (2024). Pengaruh Resirkulasi dan Aerasi Terhadap Penurunan Konsentrasi BOD dan COD dari Air Limbah *Grey Water* dengan Media *Honeycom*. *JEN: Journal of Environmental Engineering Waste Management*, 09(01), 34–35.
- [7] Tao, W., et al. (2016). *The Feasibility of an Up-Flow Partially Aerated Biological Filter (U-PABF) for Nitrogen and COD Removal from Domestic Wastewater. Bioresource Technology*, 214, 511–519.
- [8] Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery (5th ed.)*. McGraw-Hill.
- [9] Tiwari, B., Sellamuthu, B., Piché-Choquette, S., Drogui, P., Tyagi, R. D., Vaudreuil, M. A., Sauvé, S., Buelna, G., & Dubé, R. (2021). *Acclimatization of Microbial Community of Submerged Membrane Bioreactor Treating Hospital Wastewater. Bioresource Technology*, 319.

- [10] Reynolds, T. D., & Richards, P. A. (1996). *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering (2nd ed.)*. Boston: PWS Publishing Company.
- [11] Badan Standardisasi Nasional. SNI 6989.73:2019 Air dan Air Limbah – Bagian 73: Cara Uji Kebutuhan Oksigen Kimiawi (Chemical Oxygen Demand/COD) dengan Refluks Tertutup Secara Titrimetri. Jakarta: BSN, 2019.
- [12] Badan Standardisasi Nasional. SNI 06-6989.30-2005 Air dan Air Limbah – Bagian 30: Cara Uji Kadar Amonia dengan Spektrofotometer Secara Fenat. Jakarta: BSN, 2005.
- [13] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 11 Tahun 2025 tentang Baku Mutu Air Limbah Domestik. Jakarta: KLHK, 2025.
- [14] Liu, Y., Zhang, X., Wang, H., & Chen, Z. (2025). *A Review of Ammonia Toxicity on Aquatic Organisms: Species-Specific Responses, Microbial Shifts, and Environmental Interactions. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 287, 110388.
- [15] Zhou, J. H., Yu, H. C., Ye, K. Q., Wang, H. Y., Ruan, Y. J., & Yu, J. M. (2019). Optimized Aeration Strategies for Nitrogen Removal Efficiency: Application of End Gas Recirculation Aeration in The Fixed Bed Biofilm Reactor. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(27), 28216–28227.