Pengolahan Limbah Cair dari Kegiatan Budidaya Perikanan menggunakan Proses Anaerob dengan Media Bambu

Latifa Mirzatika Al-Rosyid[1*], Muhtar[1,2], Yuvita Dian Siswanti[1], Yomi Febriyanti Hijriyah Sari[1], Nur Hafifah[1]

[1]Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember, Jember, Jawa Timur 68121
[2]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Jember, Jember, Jawa Timur 68121

*Korespondensi: latifa@unmuhjember.ac.id

Abstrak. Kegiatan budidaya ikan di darat menghasilkan air limbah yang berasal dari sisa pakan, metabolisme ikan (urin dan feses), serta pencucian peralatan. Limbah cair ini umumnya mengandung bahan organik tinggi dan berpotensi mencemari lingkungan apabila dibuang tanpa pengolahan. Oleh karena itu, diperlukan teknologi pengolahan limbah yang efektif dan ramah lingkungan. Proses biologi secara anaerob menjadi salah satu alternatif karena tidak memerlukan aerasi, menghasilkan lumpur relatif sedikit, serta dapat diterapkan pada lahan terbatas. Pada reaktor anaerob tipe pertumbuhan melekat, media penyangga diperlukan untuk tempat berkembangnya mikroorganisme. Bambu dipilih sebagai media karena memiliki luas permukaan yang besar, permukaan kasar, mudah diperoleh, serta ekonomis, sehingga sesuai digunakan oleh pembudidaya skala kecil maupun menengah. Penelitian ini bertujuan mengkaji efektivitas media bambu dalam reaktor anaerob terhadap penurunan kadar BOD, COD, dan amonia pada limbah budidaya ikan. Media menggunakan bambu dengan rasio luas permukaan 30, 40 dan 50 m^2/m^3. Analisis dilakukan berdasarkan waktu tinggal 7 hari dengan variasi luas permukaan media pada tiga drum reaktor. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi penyisihan BOD_5 masing-masing sebesar 82,79%, 75,10%, dan 75,78%. Efisiensi penurunan COD berturut-turut adalah 24,79%, 38,23%, dan 22,88%, sedangkan penurunan amonia mencapai 50,82%, 35,98%, dan 42,90%. Efisiensi penyisihan tertinggi dicapai pada waktu tinggal 7 hari, dengan nilai penyisihan BOD_5 masing-masing sebesar 82,79% (drum 1), 75,10% (drum 2), dan 75,78% (drum 3). Temuan ini membuktikan bahwa pemanfaatan bambu dalam reaktor anaerob mampu meningkatkan kualitas air limbah budidaya ikan dan berpotensi mendukung pengelolaan limbah berkelanjutan berbasis energi terbarukan.

Kata Kunci: anaerob, budidaya perikanan, limbah cair, media bambu

1. PENDAHULUAN

Pengolahan limbah cair pada berbagai sektor usaha, termasuk budidaya perikanan, kerap dianggap sebagai beban biaya yang cukup tinggi, terutama bagi pelaku usaha kecil dan menengah. Biaya pengolahan yang signifikan berdampak langsung pada meningkatnya biaya produksi, sehingga sebagian besar pembudidaya skala kecil dan menengah memilih untuk membuang limbah tanpa melalui proses pengolahan terlebih dahulu. Salah satu solusi yang dapat ditempuh untuk mengatasi

kendala biaya tersebut adalah dengan merancang unit pengolahan limbah sederhana yang terjangkau dan mudah diterapkan (Al-Rosyid dkk., 2024).

Penggunaan air dalam budidaya ikan darat (kolam, bak, dan akuarium) menghasilkan limbah cair sebagai produk sampingan. Limbah ini terutama berasal dari air pemeliharaan ikan dan pencucian peralatan, dengan porsi terbesar dari aktivitas pemeliharaan. Kandungan bahan organik yang tinggi dalam limbah tersebut disebabkan oleh sisa pakan serta hasil metabolisme ikan berupa urin dan feses. Apabila dibuang langsung ke lingkungan, limbah cair berpotensi menimbulkan pencemaran. Oleh karena itu, diperlukan pengolahan agar air buangan yang dihasilkan dapat memenuhi baku mutu.

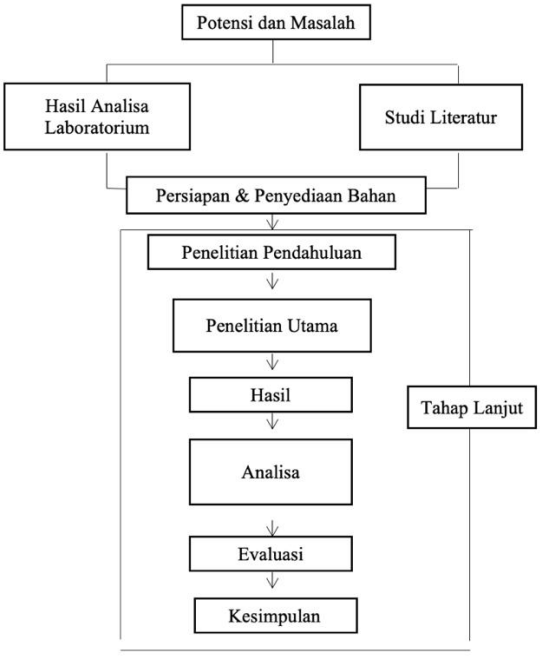
Salah satu metode dalam teknologi pengolahan limbah cair adalah proses biologis yang memanfaatkan aktivitas mikroorganisme. Proses ini dapat dilakukan secara aerob, anaerob, maupun kombinasi keduanya. Pengolahan anaerob memiliki sejumlah keunggulan, antara lain tidak memerlukan suplai oksigen tambahan (aerasi), menghasilkan volume lumpur yang lebih sedikit, serta dapat diaplikasikan pada lahan terbatas. Selain itu, proses ini juga berpotensi menghasilkan biogas sebagai sumber energi alternatif. Namun demikian, kelemahan utama pengolahan anaerob adalah laju pertumbuhan mikroorganisme yang lebih lambat dibandingkan dengan proses aerob (Indriyati, 2017).

Pertumbuhan mikroorganisme dalam reaktor anaerob dapat dibedakan menjadi tiga tipe, yaitu pertumbuhan melekat, tersuspensi, dan hibrid (Indriyati, 2017). Pada reaktor anaerob dengan sistem pertumbuhan melekat, dibutuhkan media penyangga yang berfungsi sebagai tempat mikroorganisme berkembang biak. Media dengan luas permukaan besar dan tingkat kekasaran tinggi dianggap paling efektif sebagai tempat melekatnya mikroorganisme. Beberapa material yang memenuhi kriteria tersebut dan telah digunakan dalam bioreaktor anaerob antara lain bambu muda (Colin dkk., 2017), tempurung kelapa (Torres dkk., 2013 dalam Fia dkk., 2022), serta busa poliuretan (*polyurethane foam*) (Fia dkk., 2022).

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui tiga tahapan utama. Tahap pertama adalah perancangan dan pembuatan bioreaktor anaerob skala percobaan, kemudian dilanjutkan dengan proses penumbuhan bakteri. Tahap berikutnya adalah pengujian kualitas air limbah untuk menilai efektivitas kinerja reaktor. Kegiatan penelitian direncanakan berlangsung selama kurang lebih empat bulan, dengan lokasi pelaksanaan meliputi Kolam Percobaan Perikanan, Tempat Pelelangan Ikan (TPI) Puger, Laboratorium Terpadu Universitas Muhammadiyah Jember, serta UPTD Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Mojokerto. Diagram alir penelitian disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2 Pembuatan Bioreaktor Anaerob

2.2.1 Persiapan Unit Drum Bioreaktor

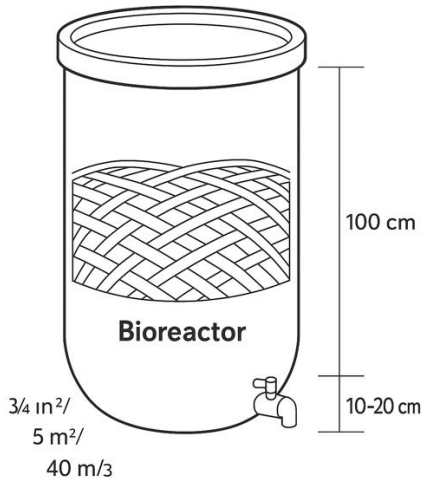
Bioreaktor yang digunakan berupa drum plastik berkapasitas 150 L. Drum dirancang dengan perbandingan tinggi (h) dan diameter (d) sebesar 2,5:1 (100 cm : 40 cm), sesuai dengan referensi Jagani dkk. (2020). Pada bagian bawah drum, dipasang pipa berdiameter ¾ inci lengkap dengan dop pada jarak 5 cm dari dasar, yang berfungsi sebagai saluran pembuangan air. Selanjutnya, pipa berdiameter 0,5 inci dilengkapi keran dipasang pada posisi 10–20 cm di bawah pipa ¾ inci, dan digunakan sebagai saluran pengambilan sampel.

2.2.2. Persiapan Media Lekat Bambu

Media lekat yang digunakan dalam penelitian ini adalah bambu tali (*Gigantochloa apus* Kurtz). Hingga saat ini, belum terdapat informasi pasti mengenai perbandingan luas permukaan media lekat dengan volume optimum pada proses pengolahan limbah budidaya ikan. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan pendekatan yang mengacu pada Indriyati (2017), dengan rasio luas permukaan bambu terhadap volume reaktor sebesar 30 m^2/m^3, 40 m^2/m^3, dan 50 m^2/m^3. Untuk memperoleh luas permukaan sesuai kebutuhan, bambu dipotong dengan panjang 23–25 cm. Selanjutnya dilakukan penyortiran dengan kriteria lebar bilah bambu 3–4 cm dan ketebalan 0,5 cm. Proses penyortiran bertujuan untuk mendapatkan ukuran bilah bambu yang seragam sehingga efektif digunakan sebagai media lekat bagi mikroorganisme.

2.2.3. Konfigurasi Drum Bioreaktor

Media lekat berupa bilah bambu dimasukkan ke dalam drum bioreaktor. Penyusunan dilakukan dengan pola menyerupai anyaman untuk memperluas area kontak dan memaksimalkan ruang pertumbuhan mikroorganisme. Bilah bambu kemudian ditata secara bertumpuk mulai dari dasar hingga sebagian besar volume bioreaktor terisi (Gambar 2).



Gambar 2. Drum Bioreaktor

2.3 Penumbuhan Bakteri

Pada penelitian ini, bakteri eksogen digunakan sebagai agen dalam proses degradasi limbah organik. Penumbuhan bakteri dilakukan dengan mencampurkan air limbah budidaya ikan nila dari kolam percobaan FPIK dengan cairan rumen pada perbandingan 1:150 (Cesaria dkk., 2024). Setelah dicampur, bioreaktor ditutup rapat untuk mencegah masuknya oksigen. Proses inkubasi berlangsung selama satu bulan hingga bakteri tumbuh. Setelah tahap ini selesai, campuran dibuang dan diganti dengan air limbah uji coba yang baru.

2.4 Uji Kualitas Air Hasil Bioreaktor

2.4.1. Pengujian Kualitas Air Berdasarkan Interval Waktu

Pengujian kualitas air dilakukan sebanyak tiga kali sesuai dengan lama waktu tinggal air limbah di dalam reaktor anaerob. Pengambilan sampel dilakukan pada hari ke-0, hari ke-3, dan hari ke-7. Parameter yang dianalisis meliputi indikator pencemar organik, yaitu Chemical Oxygen Demand (COD), Biochemical Oxygen Demand (BOD), dan amonia (NH_3-N). Selain itu, untuk mengetahui populasi mikroorganisme dalam reaktor, dilakukan uji *Total Plate Count* (TPC) sebagai data pendukung (Madigan dkk., 2023). Metode analisis yang digunakan untuk setiap parameter kualitas air adalah COD menggunakan refluks tertutup, BOD menggunakan pengenceran dan titrasi iodimetry dan amonia (NH_3-N) menggunakan Fenate (APHA, 2012).

2.4.2 Efisiensi Pengurangan Bahan Organik

Untuk mengetahui sejauh mana kontribusi aktivitas bakteri dalam mempengaruhi perubahan kualitas air, dilakukan perhitungan efisiensi penyisihan. Efisiensi penyisihan konsentrasi parameter pencemar dihitung menggunakan persamaan yang mengacu pada Yusuf (2022) berikut.

$$Eff - C = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan:
Eff-C = Persentase penyisihan (penyisihan) konsentrasi zat (%)
C_{in} = Konsentrasi zat dalam titik masuk (mg/L)
C_{out} = Konsentrasi zat dalam titik keluar (mg/L)
$C_{in} - C_{out}$ = Konsentrasi penyisihan (mg/L)

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Pengukuran Kualitas Limbah Cair Awal

Nilai awal kualitas limbah cair budidaya ikan (Tabel 1) menunjukkan bahwa konsentrasi pencemar telah melampaui baku mutu sesuai PP No. 82 Tahun 2001. Batas maksimum BOD dan COD pada mutu air kelas 4 masing-masing adalah 12 mg/L dan 100 mg/L, sedangkan untuk amonia digunakan acuan mutu air kelas 1 sebesar 0,5 mg/L karena tidak tersedia batas pada kelas 4.

Tabel 1. Konsentrasi Awal Parameter Kualitas Limbah Cair Hasil Budidaya Ikan

Bioreaktor	BOD_5 (mg/L)	COD (mg/L)	Amonia (mg/L)
Drum 1	73,42	123,56	4,244
Drum 2	50,73	154,19	3,741
Drum 3	52,15	123,51	1,902

3.2 Total Bakteri dalam Bioreaktor

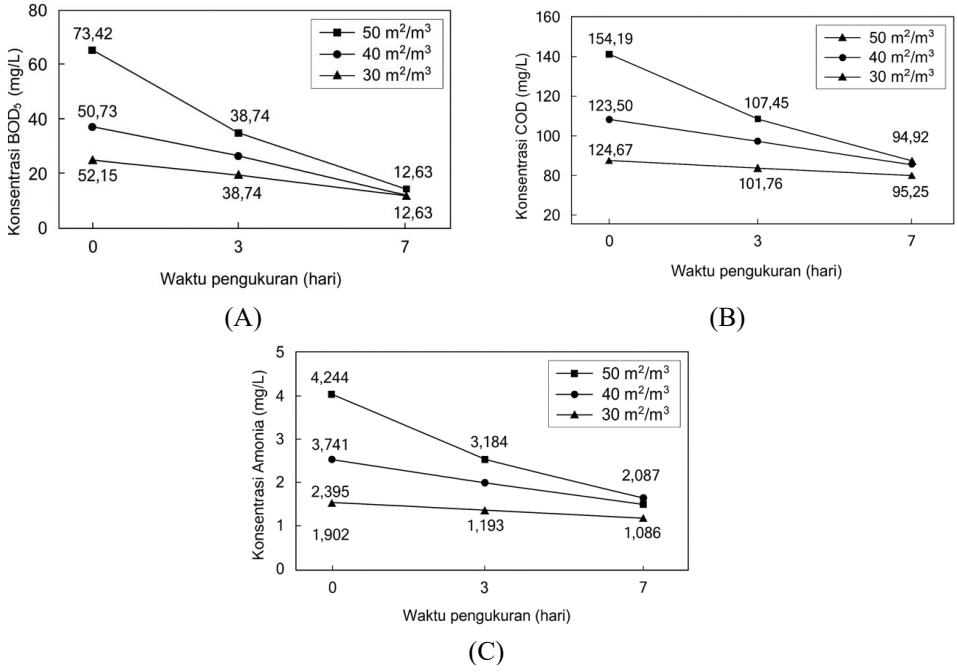
Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi BOD_5, COD, dan amonia mengalami penurunan akibat aktivitas mikroorganisme di dalam bioreaktor. Jumlah bakteri pada fase supernatan (Tabel 2) menurun dari 590×10^4 pada hari ke-3 menjadi 30×10^3 pada hari ke-7. Penurunan ini terjadi karena bakteri mulai menempel pada media bambu dan dinding bioreaktor, yang ditandai dengan terbentuknya lapisan biofilm.

Tabel 2. Jumlah Bakteri Tersuspensi Pada Bioreaktor (Cfu/Ml) Menurut Waktu Pengamatan

Bioreaktor	0	3	7
Drum 1	630×10^3	590×10^4	30×10^3
Drum 2	0	50×10^3	170×10^3
Drum 3	30×10^3	30×10^3	30×10^3

3.3 Pengukuran Kualitas Air pada Waktu Pengamatan

Pengukuran konsentrasi BOD_5 dilakukan pada sampel air limbah pada hari ke-0, ke-3, dan ke-7, serta metode serupa diterapkan untuk parameter COD dan amonia. Hasil pada Gambar 3 menunjukkan adanya penurunan konsentrasi BOD_5, COD, dan amonia di seluruh bioreaktor. Nilai BOD_5 pada drum 1 menurun dari 73,42 mg/L (hari ke-0) menjadi 38,74 mg/L (hari ke-3) dan 12,63 mg/L (hari ke-7). Pada drum 2, nilai BOD_5 berturut-turut sebesar 50,73 mg/L, 38,74 mg/L, dan 12,63 mg/L, sedangkan pada drum 3 tercatat 52,15 mg/L, 38,74 mg/L, dan 12,63 mg/L.



Gambar 3. Penurunan Konsentrasi BOD_5 (A), COD (B), Amonia (C) berdasarkan waktu pengamatan

Penurunan kandungan bahan organik di dalam bioreaktor mencerminkan efektivitas aktivitas mikroorganisme dalam biofilm untuk mendegradasi substrat. Sesuai dengan temuan Indriyati (2007), semakin lama waktu tinggal, semakin besar jumlah bahan organik yang dapat disisihkan karena bakteri memiliki waktu lebih panjang untuk memanfaatkan senyawa organik dalam air limbah. Data efisiensi pada Tabel 3 menunjukkan bahwa bioreaktor dengan rasio luas permukaan media bambu terhadap volume 50 m^2/m^3 mampu menurunkan nilai BOD_5 hingga 47,23% pada hari ke-3 dan meningkat menjadi 82,79% pada hari ke-7. Hal ini menegaskan bahwa perpanjangan waktu tinggal tidak hanya meningkatkan kinerja bioreaktor, tetapi juga berpotensi menghasilkan kualitas efluen yang lebih mendekati baku mutu, sehingga sistem ini efektif untuk pengolahan limbah organik.

Hasil penelitian menunjukkan adanya penurunan konsentrasi COD pada seluruh bioreaktor seiring waktu pengukuran. Pada drum 1, COD menurun dari 123,5 mg/L (hari ke-0) menjadi 107,45 mg/L (hari ke-3) dan 94,92 mg/L (hari ke-7). Penurunan serupa terjadi pada drum 2, dari 154,19 mg/L menjadi 146,25 mg/L dan 95,25 mg/L, serta pada drum 3 dari 124,67 mg/L menjadi 101,76 mg/L dan 95,25 mg/L. Colin dkk. (2007) melaporkan efisiensi penyisihan COD hingga

87% setelah waktu operasi 140–180 hari dengan menggunakan bambu sebagai media pendukung pada pengolahan limbah singkong. Dibandingkan dengan penelitian tersebut, hasil ini menunjukkan bahwa bahkan dalam waktu tinggal yang relatif singkat (7 hari), bioreaktor dengan media bambu sudah mampu menurunkan COD secara signifikan. Hal ini menegaskan bahwa penggunaan bambu sebagai media biofilm memiliki potensi untuk mempercepat proses degradasi bahan organik melalui mekanisme acidogenesis dan metanogenesis, serta meningkatkan efisiensi pengolahan limbah dalam durasi yang lebih singkat.

Tabel 3. Nilai konsentrasi serta tingkat efisiensi penyisihan pencemar menurut waktu pengamatan

Parameter	Waktu pengamatan (hari)	Drum								
		1			2			3		
		C_{in} (mg/L)	C_{out} (mg/L)	Eff (%)	C_{in} (mg/L)	C_{out} (mg/L)	Eff (%)	C_{in} (mg/L)	C_{out} (mg/L)	Eff (%)
BOD_5	0	73,42	73,42	0	50,73	50,73	0	52,15	52,15	0
	3	73,42	38,74	47,23	50,73	38,74	22,64	52,15	38,74	25,71
	7	73,42	12,63	82,79	50,73	12,63	75,10	52,15	12,63	75,78
COD	0	123,56	123,56	0	154,19	154,19	0	123,51	123,51	0
	3	123,56	107,45	13,04	154,19	146,25	5,15	123,51	101,76	17,6
	7	123,56	94,92	24,79	154,19	95,25	38,23	123,51	95,25	22,88
Amonia	0	4,244	4,244	0	3,741	3,741	0	1,902	1,902	0
	3	4,244	3,184	24,98	3,741	3,182	14,94	1,902	1,193	37,28
	7	4,244	2,087	50,82	3,741	2,395	35,98	1,902	1,086	42,90

Terjadi penyimpangan pada persentase penyisihan COD antara drum 1 dan drum 2 pada hari ke-3, masing-masing sebesar 13,04% dan 5,15%. Hal ini kemungkinan besar dipengaruhi oleh keberadaan bambu yang mengalami pembusukan pada drum 2, sehingga senyawa kimia penyusunnya terlepas ke dalam air limbah. Fatriasari dan Hermiati (2008) menyebutkan bahwa bambu tali memiliki kandungan holoselulosa (selulosa dan hemiselulosa) yang tinggi, yaitu 73,32%. Ketika komponen tersebut, khususnya selulosa, terdegradasi, maka beban oksidasi kimia meningkat dan berdampak pada naiknya konsentrasi COD. Dengan demikian, bambu busuk berperan sebagai variabel pengganggu pada awal proses. Namun, hasil pada hari ke-7 menunjukkan bahwa drum 2 mampu mencapai efisiensi penyisihan tertinggi sebesar 38,23% (Tabel 3), yang mengindikasikan bahwa meskipun sempat mengalami penurunan, sistem tetap memiliki potensi untuk memulihkan kinerja dan meningkatkan efektivitas pengolahan seiring bertambahnya waktu tinggal.

Penurunan konsentrasi amonia teramati pada seluruh bioreaktor, meskipun tingkat penurunannya bervariasi. Pada drum 1, nilai amonia berkurang dari 4,244 mg/L (hari ke-0) menjadi 3,184 mg/L (hari ke-3) dan 2,087 mg/L (hari ke-7). Drum 2 menunjukkan penurunan dari 3,741 mg/L menjadi 3,182 mg/L dan 2,395 mg/L, sedangkan drum 3 mencatat penurunan lebih signifikan, yaitu dari 1,902 mg/L menjadi 1,193 mg/L dan 1,086 mg/L. Variasi ini menunjukkan adanya perbedaan efektivitas bioreaktor dalam mendukung aktivitas mikroorganisme. Proses nitrifikasi berperan penting dalam penguraian amonia menjadi senyawa sederhana yang kemudian dimanfaatkan sebagai sumber nutrien bagi pembentukan biomassa sel. Namun, perbedaan kondisi media dan kemampuan mikroorganisme dalam membentuk biofilm pada masing-masing drum

dapat memengaruhi laju penurunan amonia, sehingga efektivitas bioreaktor tidak sepenuhnya seragam.

Mikroorganisme autotrof dan heterotrof berperan penting dalam proses degradasi amonia di dalam bioreaktor (Wisjnuprapto, 1995 dalam Yusuf, 2012). Hasil penelitian menunjukkan bahwa bioreaktor dengan luas permukaan media lekat 50 m^2/m^3 mampu mencapai efisiensi penyisihan amonia hingga 50,82% dalam waktu 7 hari (Tabel 3). Temuan ini mengindikasikan bahwa kinerja bioreaktor tidak hanya ditentukan oleh keberadaan mikroorganisme, tetapi juga oleh rancangan media lekat yang menyediakan ruang optimal bagi pertumbuhan dan pembentukan biofilm. Peningkatan luas permukaan media memungkinkan populasi mikroorganisme berkembang lebih besar, sehingga kapasitas pemanfaatan substrat organik (BOD, COD, dan amonia) sebagai sumber energi dan nutrien juga meningkat. Namun, efisiensi penyisihan tidak hanya bergantung pada luas permukaan, melainkan juga pada waktu tinggal air di dalam bioreaktor. Waktu tinggal yang lebih panjang memberi kesempatan bagi mikroorganisme untuk menguraikan senyawa organik secara lebih maksimal. Dengan demikian, keberhasilan sistem pengolahan limbah ini merupakan hasil sinergi antara desain media lekat dan pengaturan waktu tinggal, sehingga keduanya harus dipertimbangkan secara bersamaan dalam optimalisasi kinerja bioreaktor.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa bakteri dalam reaktor mampu menurunkan konsentrasi parameter pencemar pada limbah sisa pemeliharaan ikan. Penurunan konsentrasi BOD_5, COD, dan amonia terjadi pada seluruh variasi luas permukaan media lekat dan waktu pengukuran. Efisiensi penyisihan tertinggi dicapai pada waktu tinggal 7 hari, dengan nilai penyisihan BOD_5 masing-masing sebesar 82,79% (drum 1), 75,10% (drum 2), dan 75,78% (drum 3). Untuk parameter COD, efisiensi penyisihan berturut-turut sebesar 24,79%, 38,23%, dan 22,88%, sedangkan pada parameter amonia masing-masing sebesar 50,82%, 35,98%, dan 42,90%. Hasil ini menegaskan bahwa efektivitas bioreaktor sangat dipengaruhi oleh luas permukaan media lekat dan lamanya waktu tinggal, sehingga semakin memperkuat peran biofilm mikroorganisme dalam proses pengolahan limbah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada LPPM Universitas Muhammadiyah Jember yang telah mendanai penelitian ini pada nomor kontrak 384/II.3.AU/LPPM/Riset/2024.

REFERENSI

Al-Rosyid, L.M., Komarayanti, S., Arifin, P.R. & Guritno, W. (2024) ‘Bioremediation of fishery waste using water lettuce (Pistia stratiotes L.)’, Ecological Chemistry and Engineering S, 31(3), pp. 329–338. doi:10.2478/eces-2024-0022.

American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) & Water Environment Federation (WEF) (2023) Standard methods for the examination of water and wastewater. 24th edn. Washington, DC: APHA Press. Edited by W.C. Lipps, E.B. Braun-Howland and T.E. Baxter.

Cesaria, R.Y., Wirosoedarmo, R. & Suharto, B. (2024) 'Pengaruh penggunaan starter terhadap kualitas fermentasi limbah cair tapioka sebagai alternatif pupuk cair', Jurnal Sumber Daya Alam dan Lingkungan, 1(2), pp. 15–24.

Colin, X., Farinet, J.L., Rojas, O. & Alazard, D. (2017) 'Anaerobic treatment of cassava starch extraction wastewater using a horizontal flow filter with bamboo as support', Journal of Bioresource Technology, 98, pp. 1602–1607. doi:10.1016/j.biortech.2006.06.020.

Fia, F.R.L., Matos, A.T., Borges, A.C., Fia, R. & Cecon, P.R. (2022) 'Treatment of wastewater from coffee bean processing in anaerobic fixed bed reactors with different support materials: performance and kinetic modeling', Journal of Environmental Management, 108, pp. 14–21. doi:10.1016/j.jenvman.2012.04.033.

Indriyati (2017) 'Unjuk kerja reaktor anaerob lekat diam terendam dengan media penyangga potongan bambu', Jurnal Teknik Lingkungan, 8(3), pp. 217–222.

Jagani, H., Hebbar, K., Gang, S.S., Raj, P.V., Chandrashekhar, R.H. & Rao, J.V. (2020) 'An overview of fermenter and the design considerations to enhance its productivity', [Journal name missing], 1(27), pp. 261–301.

Madigan, M.T., Martinko, J.M. & Parker, J. (2023) Brock biology of microorganisms. 10th edn. Indiana, USA: Prentice-Hall Inc.

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia (PPRI) Nomor 82 Tahun 2001 (2001) tentang pengelolaan kualitas air dan pengendalian pencemaran lingkungan. Jakarta: Pemerintah Republik Indonesia.

Yusuf, M.A. (2022) Pra–perlakuan air sungai sebagai air baku dengan teknologi fixed bed reactor [Tesis]. Bogor, Indonesia: Institut Pertanian Bogor.