

Effect of Eco-Enzyme Dosage Variations in an Intermittent MBBR System on the Efficiency of Domestic Wastewater Treatment Pengaruh Variasi Penambahan Eco-Enzyme pada Sistem *Intermittent* MBBR terhadap Efisiensi Pengolahan Limbah Domestik

Adinda Permata Salsabila¹, *Praditya Sigit Ardisty Sitogasa¹

¹UPN "Veteran" Jawa Timur, Surabaya, Indonesia

*surel: praditya.s.tl@upnjatim.ac.id

ABSTRACT

This study aimed to analyze the effect of a Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) operated under oxic-anoxic conditions with the addition of an external carbon source in the form of eco-enzyme during the anoxic phase on the reduction of COD and BOD concentrations in domestic wastewater. The investigated variables included oxic-anoxic duration ratios (2:1, 4:1, and 6:1) within an 8-hour operational cycle and eco-enzyme dosages (0%, 0.5%, 1%, 1.5%, and 2%). The results showed that at an oxic-anoxic ratio of 6:1, the addition of 1.5% eco-enzyme achieved COD removal efficiency of up to 87%, while a 2% dosage resulted in BOD removal efficiency of 89%. These findings indicate that the appropriate eco-enzyme dosage enhances the biodegradation of organic compounds and supports biological organic removal in the intermittent MBBR system by creating optimal reactor environmental conditions.

Keywords:

Eco-enzyme,
Domestic wastewater,
Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR),
Oxic-anoxic process,
Organic matter removal

Received: February 02nd 2026

Reviewed: February 20th 2026

Published: July 18th 2026

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh proses Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) yang dioperasikan secara oxic-anoxic dengan penambahan sumber karbon eksternal berupa eco-enzyme pada kondisi anoxic-nya dalam menurunkan konsentrasi pencemar COD dan BOD pada limbah domestik. Variabel yang diteliti meliputi rasio durasi oxic-anoxic (2:1, 4:1, 6:1) selama 8 jam dan dosis eco-enzyme (0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2%). Hasil menunjukkan bahwa pada rasio durasi oxic-anoxic 6:1 dengan penambahan eco-enzyme sebesar 1,5% mampu menyisihkan parameter COD hingga 87% serta penambahan eco-enzyme sebesar 2% mampu menyisihkan parameter BOD sebesar 89%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan eco-enzyme pada dosis yang tepat berperan dalam meningkatkan aktivitas biodegradasi senyawa organik serta mendukung proses biologis penghilangan zat organik dalam sistem MBBR secara *intermittent* dengan menghasilkan kondisi lingkungan reaktor yang optimal.

Kata Kunci:

Eco-enzyme,
Limbah domestik,
Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR),
Proses oxic-anoxic,
Penyisihan bahan organik

Diterima: 02 Februari 2026

Direview: 20 Februari 2026

Dipublikasi: 18 Juli 2026



PENDAHULUAN

Peningkatan jumlah penduduk di daerah Surabaya berimplikasi pada bertambahnya volume limbah cair domestik yang mengandung bahan organik, nutrien, dan patogen berpotensi mencemari lingkungan. Pengelolaan yang tidak optimal dapat memicu eutrofikasi, penurunan kualitas air, serta risiko kesehatan masyarakat [1]. Pengolahan biologis menjadi alternatif yang efektif dan ramah lingkungan dalam menurunkan beban organik dan nitrogen, terutama melalui kombinasi proses *oxic-anoxic*. Salah satu teknologi yang banyak digunakan adalah *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR), yang menggabungkan sistem *attached growth* dan *suspended growth* [2]. Keunggulan MBBR meliputi kebutuhan lahan yang relatif kecil, fleksibilitas terhadap variasi debit, luas permukaan biofilm tinggi, serta tidak memerlukan resirkulasi lumpur seperti pada sistem lumpur aktif konvensional [3].

Salah satu metode MBBR yang sudah banyak dilakukan adalah MBBR secara *intermittent* (aerasi berulang) yang dijalankan secara *oxic* (aerobik) kemudian dilanjutkan dengan *anoxic* (anoksik). Sistem *intermittent Moving Bed Biofilm Reactor* menggabungkan fase aerobik dan anoksik dalam satu reaktor sehingga meningkatkan efisiensi degradasi bahan organik dengan kebutuhan energi yang lebih rendah. Selain itu, teknologi MBBR memiliki stabilitas tinggi terhadap fluktuasi beban organik berkat pertumbuhan biofilm pada media bergerak [4]. Pada sistem MBBR *oxic-anoxic*, bakteri heterotrof pada fase aerobik menguraikan senyawa organik yang terukur sebagai COD dan BOD dengan memanfaatkan oksigen terlarut. Sedangkan pada fase anoksik, tidak tersedia oksigen terlarut sehingga mikroorganisme tetap memanfaatkan sisa senyawa organik (COD/BOD) sebagai sumber energi dan donor elektron. Oleh karena itu, penambahan *eco-enzyme* sebagai sumber karbon eksternal dipertimbangkan untuk meningkatkan stabilitas penurunan COD dan BOD. Rasio durasi juga berpengaruh terhadap keseimbangan antara degradasi karbon. Proses denitrifikasi biologis perlu menyediakan sumber karbon yang cukup agar proses denitrifikasi dapat berjalan dengan lancar [5]. Dewasa ini, limbah domestik umumnya memiliki karakteristik sumber karbon yang tidak mencukupi dan menyebabkan proses denitrifikasi menjadi tidak optimal, sehingga mengurangi efisiensi penghilangan komponen pencemar secara keseluruhan.

Eco-enzyme merupakan hasil fermentasi limbah organik yang kaya senyawa karbon sederhana dan enzim hidrolitik [6]. Penambahan *eco-enzyme* dapat menjadi solusi inovatif untuk mengatasi masalah kebutuhan sumber karbon dalam proses denitrifikasi secara berkelanjutan [7]. Meskipun pemanfaatannya dalam pengolahan limbah domestik di Indonesia masih terbatas, pendekatan ini dinilai prospektif sebagai alternatif teknologi biologis yang ekonomis dan ramah lingkungan, sekaligus dapat menjadi referensi bagi pengelolaan limbah cair domestik berbasis MBBR.

METODOLOGI

Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan meliputi bak tabung dengan diameter dan tinggi sebagai reaktor, aerator untuk suplai oksigen, *wave maker* untuk sirkulasi aliran, media biofilm tipe Kaldnes (K5) yang diisi sebesar 20% dari total volume reaktor [8]. Untuk bahan yang digunakan antara lain air limbah domestik yang diperoleh dari bak pengumpul *greywater* rusunawa Gunung Anyar Sawah serta *eco-enzyme* komersial dari sayur dan buah.

Seeding dan Aklimatisasi

Tahap *seeding* bertujuan menumbuhkan dan memperbanyak mikroorganisme pada media biofilm Kaldnes K5 dalam kondisi *oxic* dengan suplai oksigen. Untuk mendukung pertumbuhan, ditambahkan sumber organik dari limbah dan sukrosa. Perkembangan biofilm dipantau secara visual (warna, bau, pembentukan lendir) serta melalui pengukuran MLSS guna memastikan konsentrasi biomassa mencapai kisaran optimal 2000–7000 mg/L [9]. Selain itu, pH dijaga pada rentang 6,5–8,5. Pada penelitian ini, proses *seeding* berlangsung selama 30 hari, ditandai dengan penebalan biofilm, peningkatan pH mendekati netral ($\pm 7,8$), dan suhu stabil pada 26,5–28,9°C.

Setelah *seeding*, dilakukan aklimatisasi untuk mengadaptasikan mikroorganisme terhadap karakteristik limbah yang akan diolah. Tahap ini dilakukan secara *batch* dengan variasi konsentrasi limbah 30%, 60%, dan 90%, melalui pencampuran air limbah dan air suling. Proses berlangsung selama 7 hari dengan aerasi dan pengadukan, serta pemantauan COD harian untuk mengevaluasi

kinerja biodegradasi. Kondisi *steady state* dinyatakan tercapai apabila konsentrasi COD efluen stabil dengan efisiensi penyisihan umumnya $\geq 80\%$ dari konsentrasi awal [6].

Penelitian Utama

Penelitian dilaksanakan secara *batch* dengan memvariasikan rasio durasi *intermittent* (*oxic-anoxic*) dan dosis penambahan *eco-enzyme* pada sistem MBBR. Variasi rasio durasi *intermittent* ditetapkan selama total 8 jam dengan perbandingan *oxic:anoxic* sebesar 2:1 (5,3 jam *oxic* dan 2,7 jam *anoxic*), 4:1 (6,4 jam *oxic* dan 1,6 jam *anoxic*), dan 6:1 (6,9 jam *oxic* dan 1,1 jam *anoxic*). Durasi *oxic* dibuat lebih panjang karena sebagian besar degradasi bahan organik dan proses nitrifikasi berlangsung pada fase ini. Fase *oxic* yang cukup mendukung hidrolisis senyawa organik kompleks oleh enzim dalam *eco-enzyme* menjadi molekul yang lebih sederhana, yang kemudian dimanfaatkan sebagai sumber karbon pada kondisi *anoxic* [5].

Penambahan *eco-enzyme* dilakukan pada fase *anoxic* dengan variasi penambahan 0% (0 mL), 0,5% (25 mL), 1% (50 mL), 1,5% (75 mL), dan 2% (100 mL). Kondisi *oxic* dicapai melalui aerasi kontinu dengan bantuan *wave maker* untuk menjaga distribusi oksigen dan pergerakan media, sedangkan penambahan *eco-enzyme* terdapat pada kondisi *anoxic* dengan kondisi aerator mati namun tetap mempertahankan pengadukan agar media tetap tersuspensi dengan tetap menyalakan *wave maker*. Parameter yang dianalisis meliputi COD (SNI 6989.2:2019) dan BOD (SNI 6989.72:2009) dengan pengambilan sampel sebelum proses (*influen*), setelah fase *oxic*, dan setelah fase *anoxic* (dengan penambahan *eco-enzyme*). Penelitian dilaksanakan dengan tiga kali siklus pengulangan. Pelaksanaan siklus 1, 2, dan 3 bertujuan untuk mengevaluasi konsistensi kinerja reaktor serta mengamati tren adaptasi dan stabilitas biofilm terhadap perubahan kondisi operasional. Melalui pengulangan siklus pada sistem Moving Bed Biofilm Reactor, diperoleh data yang lebih representatif untuk menilai efisiensi penyisihan parameter secara berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Awal Karakteristik Limbah Domestik

Karakterisasi awal limbah domestik *greywater* rusunawa Gunung Anyar Sawah dilakukan untuk mengetahui konsentrasi pencemar sebagai dasar penentuan variasi penelitian. Kemudian untuk menilai tingkat pencemaran, hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan standar baku mutu air limbah domestik sesuai dengan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 68 Tahun 2016. Sebelum perlakuan dilakukan, parameter kualitas air diuji terlebih dahulu untuk mengetahui tingkat pencemaran. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 1.

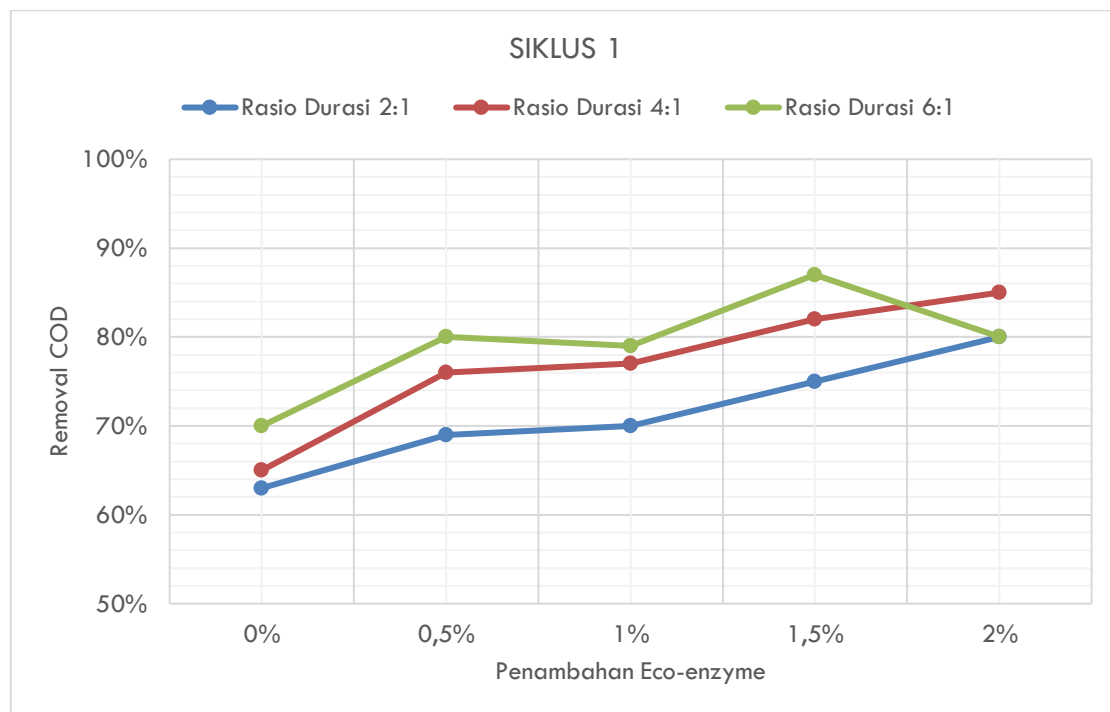
Tabel 1. Karakteristik air limbah domestik

No	Parameter	Satuan	Nilai	Baku Mutu
1	COD	mg/L	588	100
2	BOD	mg/L	130	30

Sumber: Hasil analisis, 2025

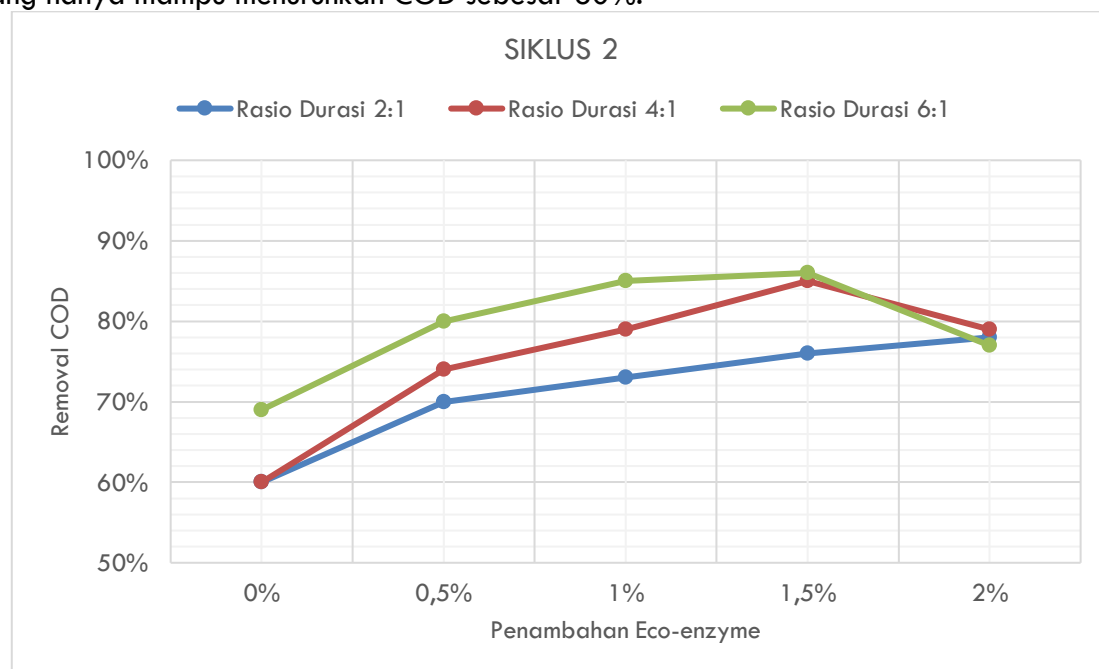
Efisiensi Penyisihan Parameter COD

COD (Chemical Oxygen Demand) adalah parameter kualitas air yang menunjukkan jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi bahan organik dalam air limbah secara kimia [10]. Fluktuasi penyisihan COD antar siklus mengindikasikan adanya perbedaan komposisi total senyawa organik, termasuk fraksi yang bersifat non-biodegradable atau lambat terdegradasi. Perkembangan ketebalan biofilm dari satu siklus ke siklus berikutnya berpotensi memengaruhi difusi substrat dan oksigen ke lapisan dalam biofilm, sehingga kinerja oksidasi senyawa organik tidak selalu menunjukkan pola yang konstan. Hasil pengujian parameter COD pada tiga siklus dapat dilihat pada Gambar 1, Gambar 2, hingga Gambar 3 berikut.



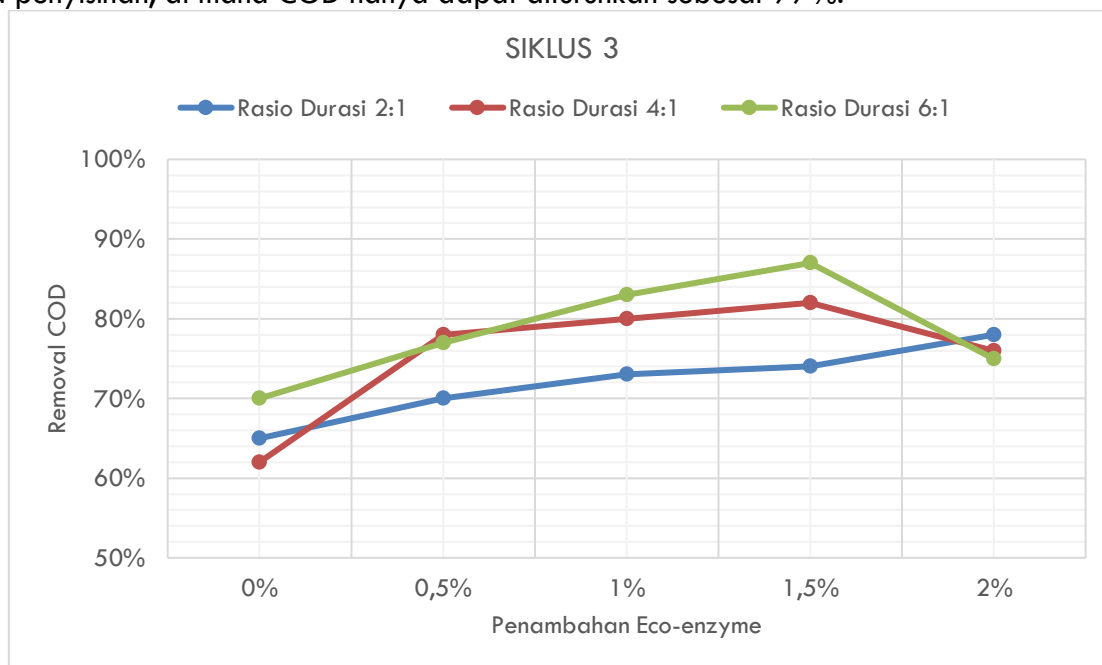
Gambar 1. Penyisihan COD pada siklus pertama

Penurunan COD dipengaruhi oleh keterbatasan aktivitas biologis awal dan kemungkinan masih tingginya fraksi senyawa organik kompleks. Oksidasi senyawa total belum berlangsung optimal karena sistem belum mencapai keseimbangan proses [11]. Pada rasio pengolahan 2:1 mampu meremoval COD sebesar 63% pada reaktor tanpa penambahan eco-enzyme kemudian meremoval COD sebesar 80% pada reaktor dengan penambahan eco-enzyme sebesar 2%. Pada rasio pengolahan 4:1 mampu meremoval COD sebesar 65% pada reaktor tanpa penambahan eco-enzyme kemudian meremoval COD sebesar 85% pada reaktor dengan penambahan eco-enzyme sebesar 2%. Sementara itu, pada rasio pengolahan 6:1 mampu meremoval COD sebesar 70% pada reaktor tanpa penambahan eco-enzyme kemudian meremoval COD sebesar 87% pada reaktor dengan penambahan eco-enzyme sebesar 1,5%. Terjadi penurunan efisiensi pada penambahan eco-enzyme 2% yang hanya mampu menurunkan COD sebesar 80%.



Gambar 2. Penyisihan COD pada siklus kedua

Efisiensi COD pada siklus 2 menunjukkan perbaikan seiring meningkatnya kapasitas degradasi biologis dan adaptasi mikroorganisme terhadap substrat [12]. Namun, keberadaan senyawa non-biodegradable tetap membatasi persentase penyisihan total. Pada rasio pengolahan 2:1, efisiensi penyisihan COD pada reaktor tanpa penambahan eco-enzyme sebesar 65%, kemudian meningkat menjadi 78% pada reaktor dengan penambahan eco-enzyme sebesar 2%. Pada rasio pengolahan 4:1, reaktor tanpa penambahan eco-enzyme menurunkan COD sebesar 60%, sedangkan penambahan eco-enzyme 1,5% mampu menurunkan COD dengan efisiensi mencapai 85%. Pada peningkatan dosis hingga 2% justru menurunkan kinerja penyisihan, di mana COD efisiensi penyisihan sebesar 79%. Sama dengan rasio pengolahan 4:1, pada rasio pengolahan 6:1 efisiensi penyisihan COD sebesar 69% pada kondisi tanpa penambahan eco-enzyme kemudian efisiensi meningkat menjadi 86% pada dosis eco-enzyme 1,5%. Namun, peningkatan dosis hingga 2% justru menurunkan kinerja penyisihan, di mana COD hanya dapat diturunkan sebesar 77%.



Gambar 3. Penyisihan COD pada siklus ketiga

Kinerja COD mendekati kondisi steady-state pada siklus 3, tetapi variasi masih terjadi akibat perubahan struktur biofilm yang lebih tebal sehingga memengaruhi transfer substrat dan oksigen [10]. akhir. Pada rasio pengolahan 4:1, reaktor tanpa penambahan eco-enzyme menurunkan COD dengan efisiensi 62%, sedangkan penambahan eco-enzyme 1,5% mampu menurunkan COD dengan efisiensi mencapai 82%. Pada peningkatan dosis hingga 2% justru menurunkan kinerja penyisihan, di mana COD hanya turun sebesar 82%. Pada rasio pengolahan 6:1 efisiensi penyisihan COD sebesar 70% pada kondisi tanpa penambahan eco-enzyme, kemudian efisiensi penyisihan pada dosis eco-enzyme 1,5% sebesar 87%. Namun, peningkatan dosis hingga 2% justru menurunkan kinerja penyisihan, di mana COD hanya dapat diturunkan sebesar 75%.

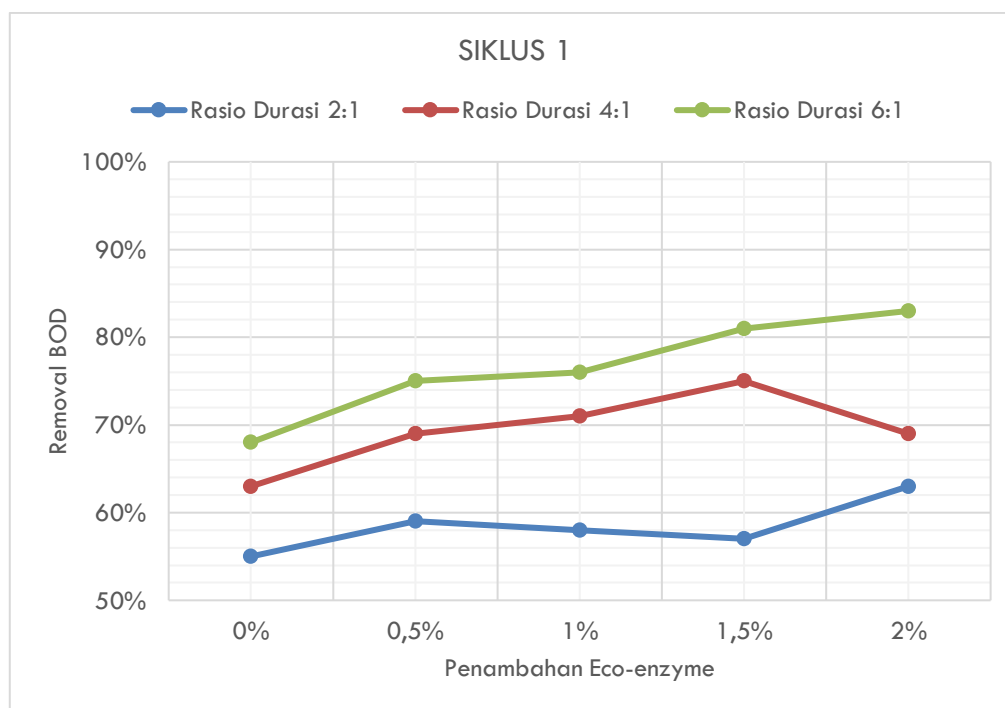
Berdasarkan hasil pengujian pada ketiga siklus yang telah dilakukan, penyisihan COD pada rasio pengolahan 6:1 (6,9 jam aerobik dan 1,1 jam anoksik) paling efektif dalam menurunkan kadar COD dibandingkan dengan rasio durasi pengolahan 2:1 (5,3 jam aerobik dan 2,7 jam anoksik) dan 4:1 (6,4 jam aerobik dan 1,6 jam anoksik). Rasio durasi pengolahan menentukan sejauh mana bahan organik dapat teroksidasi secara efektif, di mana dominasi fase aerobik memberikan kontribusi besar terhadap kestabilan dan tingkat penyisihan COD. Pada rasio 6:1, penambahan eco-enzyme sebesar 1,5% merupakan kondisi paling efektif akibat ketersediaan enzim dan senyawa bioaktif cukup untuk meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanpa menimbulkan kompetisi substrat atau inhibisi [12]. Sebaliknya, peningkatan dosis menjadi 2% tidak memberikan tambahan penurunan COD yang signifikan.

Penurunan konsentrasi yang tetap terjadi sepanjang siklus menunjukkan bahwa proses metabolisme tetap berlangsung meskipun melambat, yang didorong oleh sinergi antara enzim

sebagai pemutus rantai polimer dan kondisi *intermittent* yang mencegah kejenuhan substrat pada zona tertentu, memastikan bahwa setiap molekul organik yang dapat didegradasi secara bertahap teroksidasi hingga mencapai batas biodegradabilitas maksimumnya [13]. Dibuktikan pada rasio 4:1, terlihat perbedaan dosis optimum yang menunjukkan perubahan kebutuhan karbon. Pada siklus 1, dosis 2% lebih optimal karena mikroorganisme masih beradaptasi dan membutuhkan donor elektron lebih tinggi untuk mendukung aktivitas heterotrof dan denitrifikasi. Setelah diulang pada siklus 2 dan siklus 3, biomassa menjadi lebih stabil sehingga dosis 1,5% sudah cukup memenuhi kebutuhan metabolik. Penambahan karbon yang terlalu tinggi pada siklus berikutnya tidak meningkatkan penyisihan secara signifikan karena tidak seluruh substrat dimanfaatkan secara optimal.

Efisiensi Penyisihan Parameter BOD

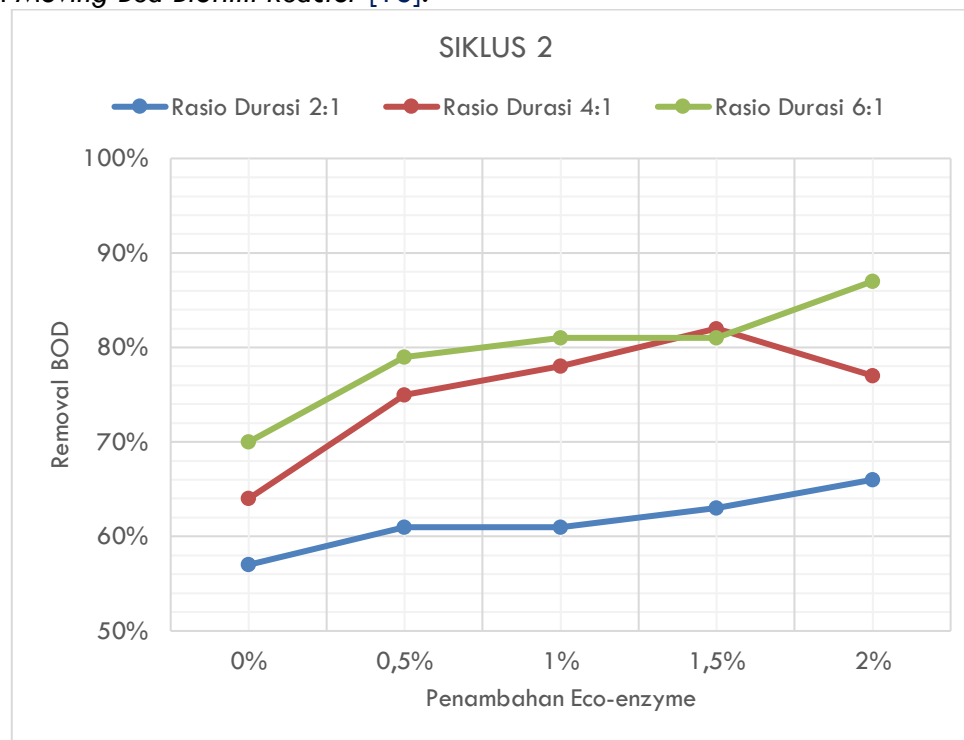
BOD (*Biological Oxygen Demand*) adalah jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk menguraikan materi organik yang dapat terdegradasi secara biologis dalam air. Tingginya nilai BOD menyebabkan penipisan oksigen terlarut (DO) di perairan, menyebabkan kematian biota akuatik, dan memproduksi bau busuk akibat dekomposisi anaerobik [14]. Variasi efisiensi penyisihan BOD pada setiap siklus menunjukkan adanya dinamika aktivitas mikroorganisme heterotrof dan perubahan ketersediaan fraksi organik biodegradable dalam air limbah. Pada tahap awal, proses degradasi cenderung dipengaruhi oleh fase adaptasi biofilm, sedangkan pada siklus berikutnya peningkatan atau penurunan efisiensi dapat terjadi akibat perubahan struktur biofilm, kompetisi substrat, serta kondisi transfer oksigen dalam reaktor *Moving Bed Biofilm Reactor*. Hasil pengujian parameter BOD pada tiga siklus dapat dilihat pada Gambar 4, Gambar 5, hingga Gambar 6 berikut.



Gambar 4. Penyisihan BOD pada siklus pertama

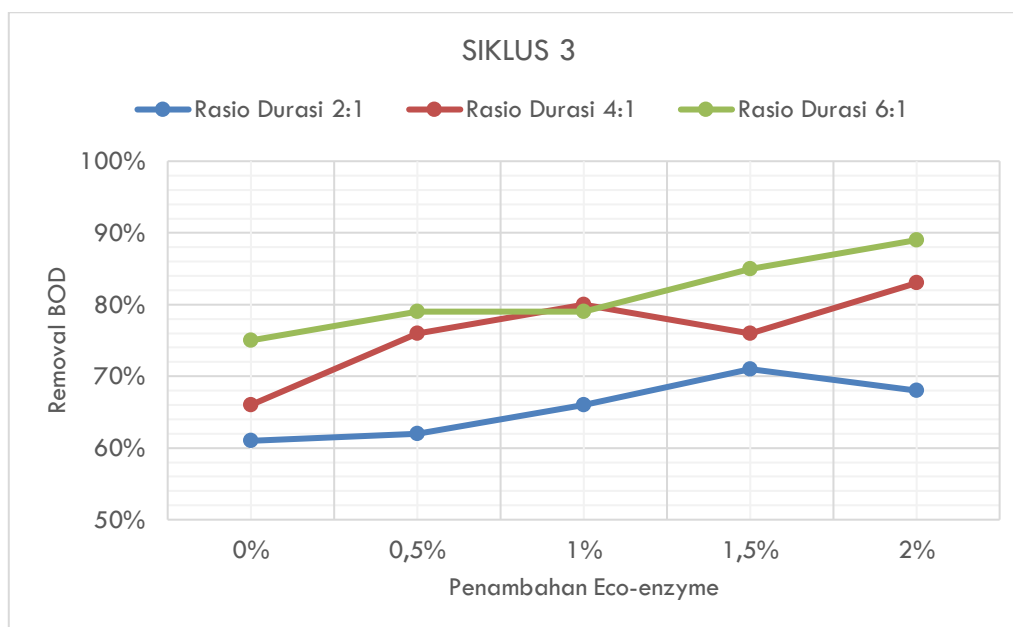
Berdasarkan hasil pengujian pada rasio pengolahan 2:1 mampu meremoval BOD sebesar 55% pada reaktor tanpa penambahan eco-enzyme kemudian meningkat hingga 63% pada reaktor dengan penambahan eco-enzyme sebesar 2%. Pada rasio pengolahan 4:1 mampu meremoval BOD sebesar 63% pada reaktor tanpa penambahan eco-enzyme kemudian meningkat hingga 75% pada reaktor dengan penambahan eco-enzyme sebesar 1,5%. Terlihat penurunan efisiensi pada rasio 4:1 dengan penambahan eco-enzyme 2% yang hanya mampu menurunkan BOD 69%. Kelebihan penambahan karbon pada fase anoksik dalam waktu pengolahan yang singkat berpotensi menciptakan mismatch antara ketersediaan substrat dan kapasitas metabolisme mikroba, yang pada akhirnya mengurangi efektivitas penggunaan karbon dalam proses biologis [15]. Sementara itu, pada rasio pengolahan 6:1 mampu meremoval BOD sebesar 68% pada reaktor tanpa penambahan eco-

enzyme kemudian meningkat hingga 83% pada reaktor dengan penambahan eco-enzyme sebesar 2%. Penyisihan BOD pada siklus 1 relatif belum maksimal karena mikroorganisme masih berada pada fase adaptasi terhadap karakteristik limbah dan pola aerasi-non-aerasi. Aktivitas degradasi fraksi organik mudah terurai belum berlangsung optimal akibat biofilm yang masih tipis dan belum stabil pada sistem Moving Bed Biofilm Reactor [13].



Gambar 5. Penyisihan BOD pada siklus kedua

Pada rasio pengolahan 2:1, pada reaktor tanpa penambahan eco-enzyme mampu menyisihkan BOD sebesar 57%, kemudian meningkat sebesar 66% pada penambahan eco-enzyme sebesar 2%. Pada rasio pengolahan 4:1, reaktor tanpa penambahan eco-enzyme menurunkan BOD dengan efisiensi 64%, sedangkan penambahan eco-enzyme 1,5% mampu menurunkan BOD hingga 82%. Pada peningkatan dosis hingga 2% justru menurunkan kinerja penyisihan, di mana BOD hanya turun sebesar 77%. Sama dengan rasio pengolahan 2:1, pada rasio pengolahan 6:1 efisiensi penurunan BOD sebesar 70% pada kondisi tanpa penambahan, kemudian meningkat hingga 87% pada dosis eco-enzyme 2%. Efisiensi BOD pada siklus 2 meningkat seiring dengan kematangan biofilm dan meningkatnya populasi bakteri heterotrof. Proses konsumsi *substrat biodegradable* menjadi lebih efektif karena luas permukaan aktif dan kestabilan komunitas mikroba bertambah [16].



Gambar 6. Penyisihan BOD pada siklus ketiga

Penyisihan BOD pada siklus 3 cenderung lebih stabil, namun dapat mengalami sedikit fluktuasi akibat penebalan biofilm yang memengaruhi difusi oksigen ke lapisan dalam. Pada rasio pengolahan 2:1, penurunan BOD pada reaktor tanpa penambahan eco-enzyme sebesar 61%, kemudian meningkat hingga 71% setelah penambahan eco-enzyme sebesar 1,5%. Pada peningkatan dosis hingga 2% justru menurunkan kinerja penyisihan, di mana BOD hanya turun sebesar 68%. Pada rasio pengolahan 4:1, reaktor tanpa penambahan eco-enzyme menurunkan BOD dengan efisiensi 66%, sedangkan penambahan eco-enzyme 2% mampu menurunkan BOD hingga 83%. Pada rasio pengolahan 6:1 efisiensi penurunan BOD sebesar 75% pada kondisi tanpa penambahan, kemudian meningkat hingga 89% pada dosis eco-enzyme 2%.

Penambahan eco-enzyme memengaruhi karakter BOD di dalam reaktor dengan mempercepat dekomposisi senyawa organik melalui enzim dan mikroorganisme yang terkandung di dalamnya. Kandungan enzim hidrolitik meningkatkan ketersediaan substrat mudah terdegradasi sehingga aktivitas bakteri heterotrof pada media MBBR menjadi lebih optimal [17]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dosis 2% menghasilkan penurunan BOD yang lebih cepat dan lebih besar dibandingkan dosis lebih rendah maupun kontrol tanpa penambahan.

Efisiensi tertinggi diperoleh pada rasio 6:1 dengan dosis 2% sebesar 89%, namun nilai ini masih di bawah potensi maksimum sistem MBBR pada umumnya dimana MBBR mampu menurunkan BOD hingga 94,2% [18]. Hal tersebut dipengaruhi oleh karakteristik limbah domestik yang kompleks yang tidak diteliti, terutama kandungan minyak, lemak, dan surfaktan yang dapat menghambat transfer oksigen, menutupi permukaan biofilm, serta memerlukan waktu degradasi lebih lama [19]. Akibatnya, sebagian fraksi BOD yang sulit terurai tetap tersisa sehingga membatasi capaian efisiensi penurunan.

KESIMPULAN

Penambahan sumber karbon eksternal berupa eco-enzyme pada *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) secara *intermittent* terbukti efektif dalam menurunkan parameter COD dan BOD pada air limbah domestik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan tertinggi untuk parameter COD dicapai pada dosis eco-enzyme sebesar 1,5% rasio pengolahan 6:1 (6,9 jam oxic dan 1,1 jam anoxic) dengan nilai penyisihan mencapai 87%. Sedangkan efisiensi tertinggi untuk parameter BOD dicapai pada dosis eco-enzyme sebesar 2% rasio pengolahan 6:1 (6,9 jam oxic dan 1,1 jam anoxic) dengan penyisihan sebesar 89%. Hal ini menunjukkan bahwa eco-enzyme berperan dalam meningkatkan aktivitas biodegradasi senyawa organik serta mendukung proses biologis penghilangan zat organik dalam sistem MBBR secara *intermittent*. Pemanfaatan eco-enzyme dari produksi mandiri dapat diteliti lebih lanjut.

REFERENSI

- [1] 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, Link: <https://doi.org/10.12962/j25983806.v22.i2.453>
- [2] A. Hajipour, N. Moghadam, M. Nosrati, and S. A. Shojaosadati, "Aerobic thermophilic treatment of landfill leachate in a moving-bed biofilm bioreactor," *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 3–14, 2011, Link: <https://ijehse.tums.ac.ir/index.php/ijehse/article/view/279>
- [3] Gulhane M. L and Kotangale A. J, "Moving Bed Biofilm Reactor – New Innovation in the Field of Conventional Biological Wastewater Treatment," *International Journal Scientific Research*, vol. 2, no. 12, pp. 167–170, 2012, Link: <https://doi.org/10.15373/22778179/DEC2013/54>
- [4] S. Waqas, N. Y. Harun, N. S. Sambudi, K. J. Abioye, M. H. Zeeshan, A. Ali, A. Abdulrahman, L. Alkhatabi, A. S. Alsaadi, "Effect of Operating Parameters on the Performance of Integrated Fixed-Film Activated Sludge for Wastewater Treatment," *membranes*, vol. 13, no. 8, pp. 1–22, 2023, Link: <https://doi.org/10.3390/membranes13080704>
- [5] M. A. Sanjrani, A. Nafees, S. Riaz, and X. Gue, "A review on application of external carbon sources for denitrification for wastewater treatment," *Global Nest Journal*, vol. 24, no. 1, pp. 105–118, 2022, Link: <https://doi.org/10.30955/gnj.004248>
- [6] X. Zhu and Y. Chen, "Reduction of N₂O and NO generation in anaerobic-aerobic (low dissolved oxygen) biological wastewater treatment process by using sludge alkaline fermentation liquid," *Environmental Science Technology*, vol. 45, no. 6, pp. 2137–2143, 2011, Link: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es102900h>
- [7] F. Nazim and V. Meera, "Treatment of Synthetic Greywater Using 5% and 10% Garbage Enzyme Solution," *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, vol. 3, no. 4, pp. 111–117, 2013, Link: <http://dx.doi.org/10.9756/BIJEMS.4733>
- [8] Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering - Treatment and Reuse - Metcalf & Eddy (4th Edition)*. 2003.
- [9] Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, 5th ed. New York, 2014.
- [10] A. Anisa and W. Herumurti, "Pengolahan Limbah Domestik Menggunakan Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) dengan Proses Aerobik-Anoksik untuk Menurunkan Konsentrasi Senyawa Organik dan Nitrogen," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 6, no. 2, 2017, Link: <https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i2.25166>
- [11] B. H. Hill, C. M. Elonen, A. T. Herlihy, T. M. Jicha, and G. Serenbetz, "Microbial coenzyme stoichiometry, nutrient limitation, and organic matter decomposition in wetlands of the conterminous United States," *Wetland Ecology Management*, vol. 26, no. 3, pp. 425–439, 2018, <https://doi.org/10.1007/s11273-017-9584-5>
- [12] T. Kunito, H. Moro, K. Mise, K. Sawada, S. Otsuka, K. Nagaoka, and K. Fujita, "Ecoenzymatic stoichiometry as a temporally integrated indicator of nutrient availability in soils," *Soil Science Plant Nutrition*, vol. 70, no. 4, pp. 246–269, 2024, Link: <https://doi.org/10.1080/00380768.2024.2341669>
- [13] Y. Pang and J. Wang, "Various electron donors for biological nitrate removal: A review," *Science of The Total Environment*, vol. 794, p. 148699, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148699>
- [14] Sisnayati, D. S. Dewi, R. Apriani, and M. Faizal, "Penurunan BOD, TSS, minyak dan lemak pada limbah cair pabrik kelapa sawit menggunakan proses aerasi plat berlubang," *Jurnal Teknik Kimia*, vol. 27, no. 2, pp. 38–45, 2021, Link: <https://doi.org/10.36706/jtk.v27i2.559>
- [15] T.-C. Lin, Y.-R. Yang, Q. K. Nguyen, M.-C. Chiu, H.-M. Yen, K.-H. Chen, S.-H. Chuang, "The significance of slowly biodegradable COD on denitrification in the OAO process," *Journal Environmental Management*, vol. 378, p. 124805, 2025, Link: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124805>
- [16] S. Widyastuti, J. Sutrisno, Y. Wiyarno, W. Gunawan, and I. Nurhayati, "Eco enzim untuk pengolahan air limbah tahu," *WAKTU Jurnal Teknik UNIPA*, vol. 21, no. 02, pp. 51–59, 2023,

- Link: <https://doi.org/10.36456/waktu.v21i02.7260>
- [17] F. D. Caupa, F. Pirozzi, P. N. L. Lens, and G. Esposito, "Electron donors for autotrophic denitrification," *Chemical Engineering Journal*, vol. 362, pp. 922–937, 2019, Link: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894719300920?via%3Dihub>
- [18] S. Salvi, R. Sabale, S. Bobade, and A. Dhawale, "Innovative Use of Eco-Enzymes for Domestic Wastewater Purification," *Journal Environmental Nanotechnology*, vol. 13, no. 3, pp. 435–439, 2024, Link: <https://doi.org/10.13074/jent.2024.09.242771>
- [19] A. Mahmoud, R. A. Hamza, and E. Elbeshbishy, "Enhancement of denitrification efficiency using municipal and industrial waste fermentation liquids as external carbon sources," *Science Total Environment*, vol. 816, p. 151578, 2022, Link: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151578>