



## EVALUASI KELAYAKAN DAN STRATEGI PENINGKATAN PENGELOLAAN SISTEM REAKTOR GABUNGAN ANAEROB-AEROB UNTUK MENDUKUNG KUALITAS AIR LIMBAH

Gusmira

Universitas Andalas

E-mail: [umiduoputi@gmail.com](mailto:umiduoputi@gmail.com)

### ABSTRACT

*This study evaluates the feasibility and strategies for improving the management of anaerobic-aerobic combined reactor systems in communal-scale domestic wastewater treatment plants in urban areas. Using a descriptive-evaluative qualitative approach and case studies, the study combines in-depth interviews, field observations, and technical and social data documentation. Results indicate that the UASB-aerobic biofilter system with a capacity of 50 m<sup>3</sup>/day can reduce COD by 92-94%, BOD by 90%, TSS by 80-85%, ammonia by 78-85%, and phosphate by 81-90%, thereby meeting national quality standards. However, the system's effectiveness is significantly influenced by fluctuations in organic load, limitations in operator training, and funding constraints that cause delays in biofilter media replacement. Innovations such as the integration of automatic DO and pH monitoring have begun to be implemented but are not yet optimally systemic. Field observations highlight the importance of preventive maintenance, accessibility to control rooms, and the reliability of monitoring equipment to maintain process stability. Community participation and community-based education remain major challenges for the system's sustainability. Critical analysis confirms that the success of the system is highly dependent on reactor design adaptation, managerial capacity, and consistent institutional support. Recommended improvement strategies include optimizing reactor design and operation, strengthening IoT-based automatic monitoring systems, enhancing human resource capacity, diversifying funding through private partnerships, and intensifying participatory community education. This study underscores that the effectiveness and sustainability of the combined reactor system can only be achieved through the synergy of technological innovation, institutional strengthening, and sustained community participation. Therefore, evidence-based evaluation and improvement must be a top priority in the management of domestic wastewater in urban areas.*

**Keywords:** anaerobic-aerobic combined reactor, domestic wastewater treatment, pollutant reduction efficiency, IPAL technological innovation, system feasibility evaluation

### ABSTRAK

Penelitian ini mengevaluasi kelayakan dan strategi peningkatan pengelolaan sistem reaktor gabungan anaerob-aerob pada instalasi pengolahan air limbah domestik skala komunal di kawasan urban. Dengan pendekatan kualitatif deskriptif-evaluatif dan studi kasus, penelitian memadukan wawancara mendalam, observasi lapangan, dan dokumentasi data teknis serta sosial. Hasil menunjukkan bahwa sistem UASB-biofilter aerobik berkapasitas 50 m<sup>3</sup>/hari mampu menurunkan COD hingga 92-94%, BOD 90%, TSS 80-85%, amonia 78-85%, dan fosfat 81-90%, sehingga memenuhi baku mutu nasional. Namun, efektivitas sistem sangat dipengaruhi oleh fluktuasi beban organik, keterbatasan pelatihan operator, dan kendala pendanaan yang menyebabkan

### Article History

Received: Juni 2025

Reviewed: Juni 2025

Published: Juni 2025

Plagiarism Checker No  
235

Prefix DOI :

[10.8734/Kohesi.v1i2.36](https://doi.org/10.8734/Kohesi.v1i2.365)

5

Copyright : Author

Publish by : Kohesi



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



keterlambatan penggantian media biofilter. Inovasi seperti integrasi monitoring otomatis DO dan pH mulai diterapkan, tetapi belum optimal secara sistemik. Observasi lapangan menyoroti pentingnya pemeliharaan preventif, aksesibilitas ruang kontrol, dan keandalan alat monitoring untuk menjaga stabilitas proses. Partisipasi masyarakat dan edukasi berbasis komunitas masih menjadi tantangan utama dalam keberlanjutan sistem. Analisis kritis menegaskan bahwa keberhasilan sistem sangat ditentukan oleh adaptasi desain reaktor, kapasitas manajerial, dan dukungan kelembagaan yang konsisten. Strategi peningkatan yang direkomendasikan meliputi optimalisasi desain dan operasi reaktor, penguatan sistem monitoring otomatis berbasis IoT, peningkatan kapasitas SDM, diversifikasi pendanaan melalui kemitraan swasta, serta intensifikasi edukasi masyarakat secara partisipatif. Penelitian ini menegaskan bahwa efektivitas dan keberlanjutan sistem reaktor gabungan hanya dapat dicapai melalui sinergi inovasi teknologi, penguatan kelembagaan, dan partisipasi masyarakat yang berkelanjutan, sehingga evaluasi dan perbaikan berbasis bukti harus menjadi agenda utama dalam pengelolaan air limbah domestik di kawasan urban.

**Kata Kunci:** reaktor gabungan anaerob-aerob, pengolahan air limbah domestik, efisiensi penurunan polutan, inovasi teknologi IPAL, evaluasi kelayakan system

## 1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan populasi dan urbanisasi yang tidak terkontrol telah mendorong peningkatan produksi air limbah domestik dalam volume yang signifikan, yang pada akhirnya menimbulkan tekanan serius terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat. Di berbagai wilayah dengan keterbatasan sistem pengelolaan air limbah terintegrasi, air limbah seringkali langsung dibuang ke badan air tanpa melalui proses pengolahan yang memadai. Praktik ini tidak hanya merusak ekosistem akuatik, tetapi juga mencemari air tanah dan permukaan yang berpotensi menjadi sumber air baku. Oleh karena itu, kebutuhan terhadap sistem pengolahan air limbah yang efektif dan efisien menjadi semakin mendesak sebagai bagian dari pengendalian pencemaran yang berkelanjutan dan perlindungan lingkungan hidup.

Dalam ranah teknis, pendekatan pengolahan air limbah dengan sistem reaktor gabungan anaerob-aerob telah menjadi solusi yang banyak dieksplorasi. Sistem ini menggabungkan keunggulan proses anaerobik dalam mendegradasi bahan organik kompleks dan menghasilkan biogas, dengan efektivitas proses aerobik dalam menurunkan senyawa nitrogen dan senyawa residu toksik. Kelebihan ini menjadikan sistem gabungan sebagai alternatif yang menjanjikan untuk menangani beban pencemar yang beragam dalam air limbah domestik maupun industri kecil. Menurut Kavousi & Borghei (2023: 5), konfigurasi sistem gabungan memiliki keunggulan dari sisi fleksibilitas pengoperasian dan potensi efisiensi penurunan pencemar lebih dari 85%.



Meskipun demikian, sejumlah penelitian menunjukkan bahwa efektivitas sistem gabungan ini masih sangat bergantung pada konteks lokal, karakteristik beban air limbah, dan konsistensi pengelolaan operasional. Da Silva et al. (2020: 6) dalam studi mereka terhadap sistem tandem anaerob-aerob pada air limbah domestik menemukan bahwa meskipun terjadi penurunan signifikan terhadap senyawa farmasetik, dinamika degradasi antar senyawa sangat bervariasi, mengindikasikan bahwa efisiensi sistem tidak dapat digeneralisasi.

Lebih lanjut, Ranieri et al. (2021: 9) mengemukakan bahwa salah satu kendala utama dalam pengoperasian sistem reaktor gabungan adalah tingginya konsumsi energi pada unit aerasi dan kebutuhan pemeliharaan sistem yang kompleks, terutama pada sistem berbasis teknologi tinggi di negara berkembang. Dalam studi lainnya, Ribeiro da Silva et al. (2018: 533) mengamati bahwa penerapan sistem reaktor gabungan di komunitas berpenghasilan rendah menghadapi kendala teknis dalam menjaga kestabilan reaktor akibat fluktuasi beban organik harian dan kualitas air masuk yang tidak konsisten.

Ketiga hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi reaktor gabungan sangat dipengaruhi oleh konteks sosial, ekonomi, dan teknis yang spesifik di masing-masing lokasi. Oleh karena itu, terdapat kebutuhan untuk melakukan evaluasi mendalam terhadap kelayakan sistem pengelolaan reaktor gabungan tidak hanya dari sisi teknis, tetapi juga mencakup aspek manajerial, operasional, serta strategi perbaikan berbasis pada kondisi aktual di lapangan.

Sebagai respons terhadap persoalan ini, penelitian ini diarahkan untuk menelaah secara komprehensif bagaimana pengelolaan sistem reaktor gabungan anaerob-aerob dijalankan dalam praktiknya. Kajian dilakukan dengan menyoroti aspek kinerja operasional, kesiapan infrastruktur, persepsi pelaksana teknis, serta strategi yang mungkin diterapkan untuk meningkatkan efektivitas pengolahan air limbah. Penelitian ini tidak hanya berfokus pada data teknis, tetapi juga pada realitas pelaksanaan di lapangan serta hambatan-hambatan non-teknis yang memengaruhi keberhasilan sistem tersebut.

Dengan mempertimbangkan kompleksitas tantangan dalam pengelolaan sistem reaktor gabungan anaerob-aerob, mulai dari ketidakkonsistenan kinerja teknis, hambatan operasional di tingkat lapangan, hingga keterbatasan kapasitas institusional dan sosial dalam pengelolaan air limbah, maka menjadi krusial untuk melakukan kajian evaluatif yang menelaah secara mendalam aspek kelayakan serta strategi peningkatan sistem tersebut. Penelitian ini secara khusus diarahkan untuk mengkaji bagaimana pengelolaan sistem reaktor gabungan anaerob-aerob dijalankan dalam konteks yang nyata, serta mengidentifikasi faktor-faktor kunci yang mendukung maupun menghambat keberhasilannya. Oleh karena itu, kajian ini diangkat dalam



sebuah penelitian yang berjudul “Evaluasi Kelayakan dan Strategi Peningkatan Pengelolaan Sistem Reaktor Gabungan Anaerob-Aerob untuk Mendukung Kualitas Air Limbah” sebagai upaya untuk menghasilkan pemahaman yang kontekstual, aplikatif, dan berbasis pada kondisi aktual pengelolaan air limbah di lapangan.

## 2. METODE PENELITIAN

### Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan jenis penelitian deskriptif-evaluatif dan strategi studi kasus. Pemilihan pendekatan ini didasarkan pada kebutuhan untuk memahami secara mendalam dan kontekstual tentang pelaksanaan, tantangan, serta strategi peningkatan pengelolaan sistem reaktor gabungan anaerob-aerob di lapangan, sebagaimana disarankan oleh Kavousi & Borghei (2023: 5) dan didukung oleh kerangka konseptual. Penelitian deskriptif-evaluatif bertujuan menggambarkan secara sistematis, faktual, dan akurat mengenai fenomena yang terjadi serta mengevaluasi efektivitas implementasi sistem, sehingga dapat memberikan rekomendasi berbasis bukti untuk perbaikan atau pengembangan sistem di masa mendatang. Pendekatan studi kasus dipilih agar penelitian dapat menggali secara intensif dinamika, faktor teknis, manajerial, dan sosial yang memengaruhi keberhasilan sistem di lokasi tertentu.

### Tahapan Penelitian

Penelitian ini mengikuti tahapan sistematis yang dimulai dari identifikasi masalah dan penentuan lokasi studi, dilanjutkan dengan penetapan populasi dan sampel secara purposive pada sistem reaktor gabungan anaerob-aerob yang telah beroperasi minimal satu tahun. Setelah itu, dilakukan pengumpulan data primer melalui wawancara mendalam, observasi lapangan, dan dokumentasi visual, serta pengumpulan data sekunder dari dokumen teknis dan laporan bulanan. Instrumen penelitian berupa pedoman wawancara, lembar observasi, dan format dokumentasi dikembangkan berdasarkan indikator kinerja sistem yang telah tervalidasi dalam studi sebelumnya (Kavousi & Borghei, 2023: 7; da Silva et al., 2020: 533; Sun et al., 2021: 2). Seluruh data kemudian dianalisis secara kualitatif dengan pendekatan tematik, dikodekan, dan dikategorikan untuk mengidentifikasi pola, tema utama, serta hubungan antar faktor teknis, manajerial, dan sosial yang memengaruhi efektivitas sistem. Validitas hasil dijaga melalui triangulasi sumber data dan teknik, serta diskusi tim peneliti untuk memastikan rekomendasi yang dihasilkan benar-benar berbasis bukti lapangan (Kavousi & Borghei, 2023: 5).



## Pengumpulan Data dengan Pelaksanaan Sampling

Pengumpulan data dilakukan secara komprehensif dengan melibatkan data primer dan sekunder. Sampel dipilih secara purposive, yakni sistem reaktor gabungan yang memenuhi kriteria operasional minimal satu tahun dan aksesibilitas operator serta dokumentasi teknis, mengikuti pendekatan Ribeiro da Silva et al. (2018: 531). Data primer diperoleh melalui wawancara semi-terstruktur dengan operator, manajer fasilitas, dan pemangku kepentingan untuk menggali persepsi, tantangan, dan strategi pengelolaan. Observasi lapangan dilakukan untuk mendokumentasikan kondisi fisik reaktor, proses operasional harian, dan potensi masalah teknis. Dokumentasi teknis meliputi logbook operasional, hasil uji laboratorium, dan laporan bulanan kualitas air limbah. Data sekunder mencakup dokumen operasional, konsumsi energi, serta rekam jejak pemeliharaan sistem, yang digunakan untuk triangulasi dan validasi hasil. Proses sampling dan pengumpulan data ini memastikan keberagaman karakteristik limbah, skala operasional, dan kondisi sosial-ekonomi komunitas terwakili secara kritis dan relevan (Ribeiro da Silva et al., 2018: 531; Ranieri et al., 2021: 757).

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### Gambaran Umum Sistem dan Lokasi

Penelitian dilakukan pada IPAL domestik kawasan urban yang menggunakan sistem reaktor gabungan anaerob-aerob (UASB diikuti biofilter aerobik) berkapasitas 50 m<sup>3</sup>/hari dan melayani sekitar 500 kepala keluarga. Sistem ini dipilih karena secara teoritis dan empiris mampu mengombinasikan keunggulan proses anaerobik dalam mendegradasi bahan organik kompleks dan menghasilkan biogas, serta efektivitas proses aerobik dalam menurunkan nitrogen dan residu toksik, sebagaimana dikonfirmasi oleh Kavousi & Borghei (2023: 5). Struktur organisasi pengelolaan terdiri dari operator, supervisor teknis, dan manajer fasilitas, namun pelatihan operator masih terbatas pada pelatihan dasar.

### Aspek Teknis: Efektivitas dan Efisiensi

Sistem terdiri dari zona anaerobik (UASB) dan aerobik (biofilter), dengan pemantauan parameter rutin meliputi COD, BOD, TSS, amonia, fosfat, pH, dan suhu. Berikut adalah data efektivitas dan efisiensi sistem reaktor gabungan anaerob-aerob dalam bentuk tabel berdasarkan hasil pemantauan enam bulan terakhir:

Parameter	Inlet (mg/L)	Outlet (mg/L)	Efisiensi Penurunan (%)
COD	800-1200	60-80	92-94
BOD	400-600	40-60	90
TSS	200-350	30-60	80-85
Amonia	30-50	5-12	78-85
Fosfat	8-15	2-4	81-90
pH	6,8-7,5	7,0-7,6	-
Suhu (°C)	28-32	28-32	-



Hasil enam bulan terakhir menunjukkan COD inlet 800-1200 mg/L, BOD 400-600 mg/L, TSS 200-350 mg/L, amonia 30-50 mg/L, fosfat 8-15 mg/L, dengan efisiensi penurunan: COD 92-94%, BOD 90%, TSS 80-85%, amonia 78-85%, fosfat 81-90%. Data ini konsisten dengan temuan Kavousi & Borghei (2023: 7) dan Sun et al. (2021: 4). Efisiensi penurunan stabil di musim kemarau, namun turun 5-8% di musim hujan akibat peningkatan debit dan beban organik. Kendala utama adalah fluktuasi beban organik, akumulasi VFA di zona anaerobik, serta kebutuhan pemeliharaan aerasi biofilter. Inovasi seperti penambahan media biofilter khusus dan monitoring otomatis DO serta pH telah diterapkan, namun belum optimal (Sun et al., 2021: 3).

### Aspek Manajerial dan Operasional

Struktur organisasi formal dan SOP tersedia, tetapi pelatihan operator hanya dilakukan setahun sekali. Monitoring dilakukan manual dan digital, namun sistem monitoring otomatis belum terintegrasi penuh sehingga respons terhadap gangguan proses masih lambat. Biaya operasional bulanan Rp 8.500.000, dengan 45% untuk energi aerasi; kendala utama adalah keterlambatan dana yang menyebabkan penundaan penggantian media biofilter. Hal ini sejalan dengan temuan Ranieri et al. (2021: 757) yang menyoroti pentingnya efisiensi energi dan keberlanjutan pendanaan pada sistem reaktor gabungan.

### Aspek Sosial dan Kelembagaan

Pada aspek sosial dan kelembagaan terdapat dari aspek manajerial dan operasional sistem reaktor gabungan anaerob-aerob dalam bentuk tabel data:

Aspek	Keterangan
Struktur Organisasi	Formal: Operator (2), Supervisor (1), Manajer (1)
SOP	Tersedia, namun pelatihan operator hanya setahun sekali
Monitoring	Manual dan digital; sistem monitoring otomatis belum terintegrasi penuh
Respons Gangguan Proses	Masih lambat akibat belum optimalnya sistem monitoring otomatis
Biaya Operasional Bulanan	Rp 8.500.000
Proporsi Energi Aerasi	45% dari total biaya operasional
Kendala Utama	Keterlambatan dana menyebabkan penundaan penggantian media biofilter

Terlihat bahwa sebanyak 70% warga puas terhadap penurunan bau dan peningkatan kualitas lingkungan, namun 40% menolak membayar retribusi bulanan. Partisipasi masyarakat dipengaruhi oleh tingkat pemahaman dan sosialisasi yang masih terbatas (Nur Maya Hidayah, 2021: 40). Dukungan pemerintah lokal cukup baik, namun kolaborasi eksternal dan



keberlanjutan pendanaan masih menjadi tantangan. Edukasi dilakukan melalui poster dan papan informasi, tetapi belum ada program edukasi komunitas yang intensif.

### **Hasil Observasi Lapangan**

Kondisi fisik reaktor baik, struktur beton bertulang kokoh, aksesibilitas ruang kontrol memadai, dan kebersihan area terjaga. Namun, akumulasi kerak tipis akibat presipitasi mineral perlu dibersihkan rutin agar tidak menurunkan efisiensi hidraulik, sesuai prinsip desain sistem gabungan (Kavousi & Borghei, 2023: 6; Ribeiro da Silva et al., 2018: 533). Pada debit puncak, terjadi bypass sebagian aliran yang menurunkan efisiensi polutan, menandakan perlunya evaluasi desain hidraulik (Ranieri et al., 2021: 757). Fasilitas monitoring cukup lengkap (flowmeter, DO meter, pH meter otomatis), namun beberapa alat mengalami drift dan perlu penggantian sensor. Monitoring yang akurat sangat krusial untuk deteksi dini gangguan proses (Sun et al., 2021: 3).

### **Dokumentasi Data Teknis dan Prosedur Pemeliharaan**

Dokumentasi parameter kualitas air limbah dilakukan rutin, diverifikasi laboratorium eksternal, dan mendukung evaluasi kinerja sistem (Kavousi & Borghei, 2023: 7). Prosedur pemeliharaan sesuai SOP, namun keterlambatan penggantian media akibat dana menyebabkan peningkatan TSS dan penurunan efisiensi. Penanganan gangguan proses dilakukan dengan penyesuaian laju alir, penambahan nutrisi, atau flushing sistem. Ketersediaan fasilitas pendukung seperti ruang kontrol dan laboratorium cukup baik, namun kenyamanan kerja operator terganggu pendingin yang tidak optimal.

### **Analisis Kritis dan Strategi Peningkatan**

Evaluasi kelayakan membuktikan sistem reaktor gabungan efektif menurunkan polutan utama sesuai baku mutu Permen LHK No. 68/2016, dengan efisiensi COD 92-94%, BOD 90%, dan fosfat 81-90% (Kavousi & Borghei, 2023: 7; Sun et al., 2021: 4). Namun, efisiensi amonia dan TSS masih fluktuatif pada debit puncak, mengindikasikan perlunya penyesuaian rasio COD:N:P dan waktu tinggal hidraulik. Faktor penentu keberhasilan adalah desain reaktor adaptif, kapasitas manajerial dan SDM, serta partisipasi masyarakat (Nur Maya Hidayah, 2021: 40). Strategi peningkatan meliputi optimalisasi desain dan operasi reaktor, penguatan monitoring otomatis (sensor IoT untuk DO, pH, suhu), pelatihan operator berbasis teknologi, diversifikasi pendanaan, dan intensifikasi edukasi masyarakat (Sun et al., 2021: 3).

## **PEMBAHASAN**

### **1. Gambaran Umum Sistem dan Lokasi**

Sistem reaktor gabungan anaerob-aerob (UASB-biofilter aerobik) yang diimplementasikan pada IPAL domestik kawasan urban dengan kapasitas 50 m<sup>3</sup>/hari



dan cakupan 500 KK menunjukkan pemilihan teknologi yang tepat secara teoritis dan empiris. Kombinasi proses anaerobik untuk degradasi bahan organik kompleks dan produksi biogas serta proses aerobik untuk penurunan nitrogen dan residu toksik telah terbukti efektif dalam berbagai studi (Kavousi & Borghei, 2023: 5). Namun, pelatihan operator yang hanya terbatas pada pelatihan dasar menjadi titik lemah manajerial yang dapat menghambat respons adaptif terhadap dinamika operasional di lapangan. Sehingga pemilihan sistem reaktor gabungan sudah tepat secara teknis dan adaptif terhadap kebutuhan urban, namun penguatan kapasitas SDM menjadi kebutuhan mendesak untuk memastikan keberlanjutan dan responsivitas sistem.

## 2. Aspek Teknis: Efektivitas dan Efisiensi

Efektivitas sistem sangat tinggi dengan efisiensi penurunan COD 92-94%, BOD 90%, TSS 80-85%, amonia 78-85%, dan fosfat 81-90% berdasarkan data enam bulan terakhir, konsisten dengan temuan Kavousi & Borghei (2023: 7) dan Sun et al. (2021: 4). Namun, efisiensi menurun 5-8% pada musim hujan akibat peningkatan debit dan beban organik, menandakan tantangan adaptasi desain hidraulik dan pengelolaan beban puncak. Kendala teknis utama adalah fluktuasi beban organik, akumulasi VFA di zona anaerobik, dan kebutuhan pemeliharaan aerasi biofilter. Inovasi seperti media biofilter khusus dan monitoring otomatis DO/pH sudah diterapkan, namun belum optimal dalam deteksi dini gangguan proses (Sun et al., 2021: 3). Secara teknis, sistem terbukti efisien dan stabil pada kondisi normal, namun masih rentan terhadap fluktuasi beban dan debit puncak. Optimalisasi inovasi monitoring dan penyesuaian desain hidraulik sangat diperlukan untuk menjaga konsistensi kinerja.

## 3. Aspek Manajerial dan Operasional

Struktur organisasi formal dan SOP tersedia, namun pelatihan operator hanya setahun sekali dan sistem monitoring otomatis belum terintegrasi penuh. Monitoring manual dan digital yang belum optimal menyebabkan respons terhadap gangguan proses masih lambat. Biaya operasional bulanan Rp 8.500.000, dengan 45% dialokasikan untuk energi aerasi, dan kendala utama adalah keterlambatan dana yang menyebabkan penundaan penggantian media biofilter. Hal ini sejalan dengan temuan Ranieri et al. (2021: 757) yang menekankan pentingnya efisiensi energi dan keberlanjutan pendanaan dalam sistem reaktor gabungan. Aspek manajerial dan operasional masih menjadi titik kritis, terutama terkait pelatihan SDM, integrasi monitoring otomatis, dan keberlanjutan pendanaan. Penguatan kapasitas manajerial dan inovasi sistem monitoring menjadi prioritas utama.



#### 4. Aspek Sosial dan Kelembagaan

Sebanyak 70% warga puas terhadap penurunan bau dan kualitas lingkungan, namun 40% menolak membayar retribusi bulanan. Partisipasi masyarakat masih dipengaruhi oleh tingkat pemahaman dan sosialisasi yang terbatas (Hidayah, 2021: 40). Dukungan pemerintah lokal cukup baik, namun kolaborasi eksternal dan keberlanjutan pendanaan masih menjadi tantangan. Edukasi yang dilakukan melalui poster dan papan informasi belum cukup efektif tanpa program komunitas yang intensif. Keberhasilan sistem sangat dipengaruhi oleh partisipasi masyarakat dan dukungan kelembagaan. Intensifikasi edukasi berbasis komunitas dan diversifikasi pendanaan sangat penting untuk meningkatkan keberlanjutan sosial dan finansial.

#### 5. Hasil Observasi Lapangan

Kondisi fisik reaktor baik, struktur beton kokoh, akses ruang kontrol memadai, dan kebersihan area terjaga. Namun, akumulasi kerak akibat presipitasi mineral harus dibersihkan rutin untuk menjaga efisiensi hidraulik (Kavousi & Borghei, 2023: 6; Ribeiro da Silva et al., 2018: 533). Pada debit puncak, bypass sebagian aliran menurunkan efisiensi polutan, menandakan perlunya evaluasi desain hidraulik (Ranieri et al., 2021: 757). Fasilitas monitoring cukup lengkap, namun beberapa alat mengalami drift dan perlu penggantian sensor. Monitoring akurat sangat krusial untuk deteksi dini gangguan proses (Sun et al., 2021: 3). Kondisi fisik dan fasilitas monitoring memadai, namun pemeliharaan preventif dan modernisasi alat monitoring harus diperkuat untuk menjaga efisiensi dan stabilitas sistem, terutama pada debit puncakbg.

#### 6. Dokumentasi Data Teknis dan Prosedur Pemeliharaan

Dokumentasi parameter kualitas air limbah dilakukan rutin dan diverifikasi laboratorium eksternal, mendukung evaluasi kinerja sistem (Kavousi & Borghei, 2023: 7). Prosedur pemeliharaan sesuai SOP, namun keterlambatan penggantian media akibat dana menyebabkan peningkatan TSS dan penurunan efisiensi. Penanganan gangguan proses dilakukan dengan penyesuaian laju alir, penambahan nutrisi, atau flushing sistem. Fasilitas pendukung cukup baik, namun kenyamanan kerja operator terganggu pendingin yang tidak optimal. Disiplin dokumentasi dan pemeliharaan sudah baik, namun keberlanjutan pendanaan dan kenyamanan fasilitas kerja operator perlu ditingkatkan untuk mencegah penurunan efisiensi sistem.

#### 7. Analisis Kritis dan Strategi Peningkatan

Evaluasi kelayakan membuktikan sistem reaktor gabungan efektif menurunkan polutan utama sesuai baku mutu Permen LHK No. 68/2016 (Kavousi & Borghei, 2023: 7; Sun et al.,



2021: 4). Namun, efisiensi amonia dan TSS masih fluktuatif pada debit puncak, mengindikasikan perlunya penyesuaian rasio COD:N:P dan waktu tinggal hidraulik. Faktor penentu keberhasilan adalah desain reaktor adaptif, kapasitas manajerial dan SDM, serta partisipasi masyarakat (Nur Maya Hidayah, 2021: 40). Strategi peningkatan meliputi optimalisasi desain dan operasi reaktor, penguatan monitoring otomatis (sensor IoT), pelatihan operator berbasis teknologi, diversifikasi pendanaan, dan intensifikasi edukasi masyarakat (Sun et al., 2021: 3). Sistem reaktor gabungan anaerob-aerob layak diterapkan pada skala komunal urban dengan efisiensi tinggi, namun keberlanjutan sangat bergantung pada adaptasi desain, kapasitas manajerial, partisipasi masyarakat, dan inovasi monitoring. Evaluasi dan strategi peningkatan berbasis bukti harus menjadi agenda utama agar sistem mampu menjawab tantangan pengelolaan air limbah domestik secara berkelanjutan dan kontekstual

## KESIMPULAN

Berdasarkan pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa sistem reaktor gabungan anaerob-aerob secara konsisten mampu menurunkan polutan utama air limbah domestik dengan efisiensi rata-rata di atas 85% untuk COD, BOD, dan fosfat, serta 78-85% untuk amonia dan TSS, namun efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh fluktuasi beban organik, kesiapan manajerial, dan partisipasi masyarakat yang hanya mencapai 60-70% dari target. Dari sisi metodologi, pendekatan kualitatif deskriptif-evaluatif dan studi kasus terbukti tepat dalam mengidentifikasi faktor teknis, sosial, dan manajerial yang memengaruhi keberhasilan sistem. Berdasarkan temuan tersebut direkomendasikan optimalisasi desain reaktor dan waktu tinggal hidraulik, penguatan sistem monitoring otomatis berbasis IoT, peningkatan pelatihan operator, diversifikasi pendanaan, serta intensifikasi edukasi masyarakat, agar keberlanjutan dan efektivitas sistem dapat tercapai secara konsisten di atas 90% pada seluruh parameter utama.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Shafy, H. I., Mansour, M. S. M., & Al-Sulaiman, A. M. (2019). Anaerobic/aerobic integration via UASB/enhanced aeration for greywater treatment and unrestricted reuse. *Water Practice and Technology*, 14(4), 837-850.
- Christgen, B., Yang, Y., Ahammad, S. Z., Li, B., Rodriguez, D. C., Zhang, T., & Graham, D. W. (2015). Metagenomics shows that low-energy anaerobic-aerobic treatment reactors reduce antibiotic resistance gene levels from domestic wastewater. *Environmental Science & Technology*, 49(4), 2577-2584.
- da Silva, T. H. G., de S. Furtado, R. X., Zaiat, M., & Azevedo, E. B. (2020). Tandem anaerobic-aerobic degradation of ranitidine, diclofenac, and simvastatin in domestic sewage. *Science of the Total Environment*, 721, 1-9.



- Du, B., Wang, R., Yang, Q., Hu, H., Li, X., & Duan, X. (2018). Impact of tetracycline on the performance, functional, and abundance of bacteria of a lab-scale anaerobic-aerobic treatment wastewater system. *Biochemical Engineering Journal*, 138, 98-105.
- Kavousi, R., & Borghei, S. M. (2023). An application of anaerobic-aerobic combined bioreactor efficiency. *Geomatics and Environmental Engineering*, 17(4), 5-13.
- Liu, M., Yao, B., Cong, S., Ma, T., & Zou, D. (2020). Optimization of wastewater phosphorus removal in winter temperatures using an anaerobic-critical aerobic strategy in a pilot-scale sequencing batch reactor. *Water*, 12(1), 110.
- Pognani, M., Barrena, R., Font, X., & Sánchez, A. (2012). A complete mass balance of a complex combined anaerobic/aerobic municipal source-separated waste treatment plant. *Waste Management*, 32, 799-805.
- Ranieri, E., Giuliano, S., & Ranieri, A. C. (2021). Energy consumption in anaerobic and aerobic based wastewater treatment plants in Italy. *Water Practice & Technology*, 16(3), 756-766.
- Sun, S., Gao, M., Wang, Y., Qiu, Q., Han, J., Qiu, L., & Feng, Y. (2021). Phosphate removal via biological process coupling with hydroxyapatite crystallization in alternating anaerobic/aerobic biofilter reactor. *Bioresource Technology*, 326, 124728.
- da Silva, G. H. R., Nour, E. A. A., & Feroso, F. G. (2018). Anaerobic-aerobic baffled reactor treating real municipal wastewater in a low-income community. 17(3), 529-535.