

Pengolahan Limbah Cair Tempe Menggunakan Teknologi *Hybrid Anoxic Reactor-Sequencing Batch Reactor*

Naura Nisrine Hidayatullah, Novirina Hendrasarie*

Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional Veteran, Surabaya

*Koresponden email: novirina@upnjatim.ac.id

Diterima: 12 November 2024

Disetujui: 26 Desember 2024

Abstract

Tempeh wastewater with high organic content requires special treatment to meet environmental standards. This waste has a concentration of BOD₅ 13,000 mg/L, COD 16,000 mg/L and total nitrogen 2,800 mg/L, which are far above the quality standards. This study aims to determine the effectiveness of the Sequencing Batch Reactor (SBR) in removing pollutants in tempeh liquid waste by adding anoxic reactor as pre-treatment and settling tank as post-treatment. Variations in HRT, aeration rate and settling time were tested to optimise system performance. The results showed that the Anoxic Reactor pre-treatment increased total nitrogen removal up to 45% at HRT 12 hours. In the SBR unit, optimum conditions occurred at HRT 32 hours with an aeration flow of 14 L/min, resulting in removal of 84% BOD₅, 98% COD and 96% total nitrogen. Post-treatment of the clarifier increased the efficiency to 91% BOD₅, 87% COD and 85% total nitrogen. The combination of anoxic reactor, SBR and settling tank proved to be more effective than without pre-treatment, with the final effluent meeting the quality standards of PermenLHK No. 5 of 2014 and PP No. 22 of 2021, viz: BOD₅ 133 mg/L, COD 160 mg/L and total nitrogen 21 mg/L.

Keywords: *tempeh wastewater, anoxic reactor, sequencing batch reactor, settling basin*

Abstrak

Limbah cair tempe dengan kandungan organik tinggi memerlukan pengolahan khusus agar memenuhi standar lingkungan. Limbah ini memiliki konsentrasi BOD₅ 13.000 mg/L, COD 16.000 mg/L, dan Total Nitrogen 2.800 mg/L, jauh melebihi baku mutu. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas *Sequencing Batch Reactor* (SBR) dalam menyisihkan pencemar pada limbah cair tempe dengan menambahkan *Anoxic Reactor* sebagai *pre-treatment* dan Bak Pengendap sebagai *post-treatment*. Variasi HRT, debit aerasi, dan waktu pengendapan diuji untuk mengoptimalkan kinerja sistem. Hasil menunjukkan *pre-treatment Anoxic Reactor* meningkatkan penyisihan Total Nitrogen hingga 45% pada HRT 12 jam. Pada unit SBR, kondisi optimal terjadi pada HRT 32 jam dengan debit aerasi 14 L/menit, menghasilkan penyisihan 84% BOD₅, 98% COD, dan 96% Total Nitrogen. Post-treatment Bak Pengendap meningkatkan efisiensi hingga 91% BOD₅, 87% COD, dan 85% Total Nitrogen. Kombinasi *Anoxic Reactor*, SBR, dan Bak Pengendap terbukti lebih efektif dibandingkan tanpa *pre-treatment*, dengan efluen akhir memenuhi baku mutu PermenLHK Nomor 5 Tahun 2014 dan PP Nomor 22 Tahun 2021 yaitu: BOD₅ 133 mg/L, COD 160 mg/L, dan Total Nitrogen 21 mg/L.

Kata Kunci: *limbah cair tempe, reaktor anoksik, sequencing batch reactor, bak pengendap*

1. Pendahuluan

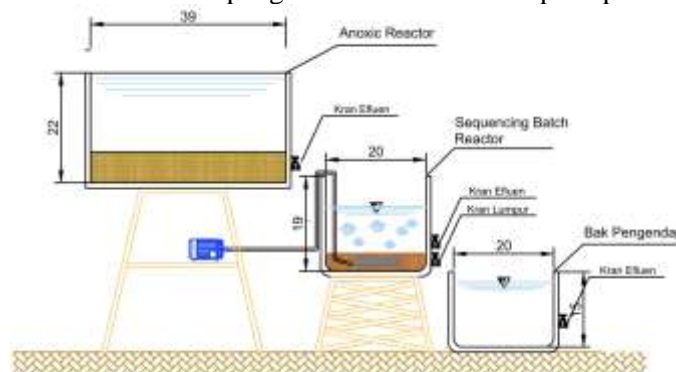
Industri tempe tradisional telah lama menjadi bagian dari kehidupan dan pemanfaatan masyarakat Indonesia, namun pengelolaan limbahnya masih kurang optimal, sehingga berdampak negatif terhadap kesehatan dan kelangsungan hidup biota air [1]. Limbah cair tempe memiliki kandungan organik tinggi sehingga memerlukan pengolahan khusus karena dapat menurunkan kadar oksigen dalam air serta menimbulkan bau. Limbah hasil proses produksi tempe termasuk dalam limbah *biodegradable*, yaitu limbah atau bahan sisa yang dapat diuraikan oleh mikroorganisme [2]. Unit pengolahan biologis adalah sistem pengolahan limbah yang memanfaatkan mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik dalam limbah.

Beberapa unit pengolahan yang ada saat ini membutuhkan lahan yang luas, sehingga dalam penelitian ini dipilih unit pengolahan yaitu *Sequencing Batch Reactor* (SBR) yang dapat beroperasi pada lahan sempit [3]. *Sequencing Batch Reactor* (SBR) merupakan unit penggabungan semua langkah proses pengolahan lumpur aktif dalam satu bak atau tangki [4], menggunakan mikroorganisme untuk menurunkan kontaminan seperti BOD₅ dan COD. Proses ini sangat efisien, hemat biaya, dan cocok digunakan pada lahan sempit. SBR bekerja melalui lima tahap: pengisian, reaksi, pengendapan, pengeluaran, dan persiapan.

Beberapa modifikasi telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi, seperti penambahan impeller yang dapat meningkatkan penyisihan BOD₅, PO₄, dan nitrogen hingga lebih dari 90% [5]. Penambahan Sludge Zone juga meningkatkan penyisihan COD, nitrogen, fosfor, TSS, dan minyak lemak dengan efisiensi hingga 97% [3]. Variasi waktu siklus pada AOA-SBR meningkatkan efisiensi penyisihan Total Nitrogen dan Total Fosfat hingga 90% [6]. Variasi waktu siklus pada Anoksik-Aerobik SBR meningkatkan efisiensi penyisihan Total Nitrogen dan Total Fosfat hingga 80% [7]. Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan diatas, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penyisihan parameter pencemar limbah cair tempe menggunakan unit *Sequencing Batch Reactor* (SBR) dengan modifikasi penambahan reaktor anoksik sebagai *pre-treatment* dan bak pengendap sebagai *post-treatment*.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan air limbah tempe yang diperoleh dari industri rumahan tempe di Bangkalan. Peralatan yang dipakai dalam penelitian meliputi reaktor Anoksik, reaktor SBR, reaktor Bak Pengendap, serta diffuser. Gambar reaktor pengolahan air limbah tempe dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Sketsa Reaktor Pengolahan

Sumber: Penelitian (2024)

Parameter yang diuji mencakup BOD₅, COD, dan Total Nitrogen. Penelitian pendahuluan dalam studi ini meliputi pengujian awal karakteristik limbah cair tempe serta proses *seeding* yang diikuti dengan aklimatisasi biomassa. Hasil analisis karakteristik awal air limbah tempe disajikan dalam **Tabel 1**.

Tabel 1. Karakteristik Awal Air Limbah Tempe

No	Parameter	Hasil Uji	Satuan	Baku Mutu
1	BOD ₅	13000	mg/L	150 Peraturan Menteri
2	COD	16000	mg/L	300 Lingkungan Hidup nomor 5 tahun 2014
3	N Total	2800	mg/L	25 PP Nomor 22 Tahun 2021

Seeding dilakukan dengan menambahkan gula dapur sebanyak satu sendok/hari ke dalam lumpur aktif sebagai nutrisi [8]. Proses pemberian nutrisi ini dilakukan dengan mempertimbangkan rasio C : N : P yang sesuai dengan kebutuhan awal mikroorganisme dalam kondisi aerob adalah 100:5:1 [9]. Lalu mengkondisikan MLSS (*Mixed Liquor Suspended Solids*) agar berada pada rentang sebesar 2.000 – 5.000 mg/L pada lumpur aktif [10].

Proses aklimatisasi adalah penambahan air limbah dengan konsentrasi yang berbeda-beda [8]. Proses ini dilakukan secara bertahap dengan meningkatkan konsentrasi air limbah menjadi 30%, 60%, dan 90%. Tahapan dimulai dengan mencampur 30% air limbah dan 70% air suling dari total volume, dilanjutkan dengan campuran 60% air limbah dan 40% air suling, kemudian 90% air limbah dan 10% air suling [9].

Penelitian utama dapat dilakukan setelah penelitian pendahuluan telah berhasil dan selesai dilakukan. Limbah cair tempe yang akan diolah, dialirkan ke dalam reaktor anoksik sebagai *pre-treatment*, dilanjutkan ke unit utama yaitu *Sequencing Batch Reactor* (SBR) lalu masuk ke unit terakhir yaitu bak pengendap sebagai *post-treatment*. Limbah yang digunakan dalam *pre-treatment* reaktor anoksik adalah limbah tempe dengan konsentrasi 100%.

Reaktor anoksik memiliki HRT yang telah ditentukan yaitu 12 jam tanpa aerasi dengan volume 18 Liter. Kadar oksigen terlarut (DO) dijaga dalam rentang 0,5-1 mg/L untuk memastikan kondisi anoksik serta menciptakan lingkungan optimal bagi bakteri anammox, sehingga memungkinkan mereka untuk secara efektif menghilangkan bahan organik, NH₃-N, dan Total Nitrogen (TN) [11].

Tahapan selanjutnya, air limbah masuk kedalam unit SBR dengan variasi HRT 18, 24, dan 32 jam serta debit aerasi sebesar 10 L/m dan 14 L/menit. Tahap *fill* (pengisian) dilakukan selama 10 menit tanpa aerasi. Setelah itu, dilanjutkan dengan tahap reaksi yang berlangsung dalam dua kondisi berbeda, yaitu kondisi anaerobik dan aerobik. Kondisi anaerobik dan aerobik ini menghasilkan efisiensi penyisihan yang tinggi pada konsentrasi nitrogen [9]. Terakhir, limbah akan memasuki post-treatment yaitu bak pengendap dengan *settling time* selama 1 jam. Bak pengendap akhir berfungsi untuk memisahkan bakteri dengan air hasil olahan [12].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Seeding dan Aklimatisasi

Dalam penelitian ini, *seeding* dilakukan selama 14 hari secara aerob dengan mengalirkan udara ke dalam 60 Liter air limbah dengan debit aerasi 114 liter per menit. Selama proses *seeding*, lumpur aktif diberikan nutrisi berupa gula sebanyak satu sendok makan dan air limbah segar sebanyak 100 mL setiap hari. Pada hari ke-7 dan ke-14 *seeding* dilakukan pengecekan untuk memastikan bahwa nilai MLSS sudah mencukupi. Didapatkan hasil sebesar 1810 mg/L pada *seeding* hari ke-7 dan mengalami peningkatan pada hari ke-14 sebesar 2310 mg/L. Selanjutnya dilakukan aklimatisasi karena nilai MLSS sudah memenuhi rentang 2000-5000 mg/L. Hasil analisis proses aklimatisasi disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Pengaruh Peningkatan Konsentrasi Limbah Terhadap Konsentrasi COD

Nilai COD	Peningkatan Konsentrasi Limbah							
	30%	pH	50%	pH	75%	pH	90%	pH
Awal	7040	5.2	9000	4.9	9600	4.7	10400	4.5
Akhir	3200	7.4	3400	7.8	2800	8.3	2200	8.6
% Removal	55%		62%		71%		79%	

Aklimatisasi dilakukan secara bertahap yaitu 30%, 50%, 75%, dan 90% selama 3 hari berturut-turut. Pada konsentrasi air limbah 30%, diketahui bahwa terjadi penyisihan terhadap kadar COD sebesar 55%. Pada konsentrasi air limbah 50% terjadi penyisihan parameter COD sebesar 62%, serta stabil dalam menyisihkan parameter pada konsentrasi air limbah 70% dan 90% mencapai nilai 71% dan 79%. Tanda proses aklimatisasi selesai adalah ketika penyisihan COD mencapai persen penyisihan 50% dan konstan [13].

3.2 Waktu Retensi Hidraulik yang Optimal pada Unit *Anoxic Reactor*

Pada proses penelitian, digunakan anoksik sebagai sistem pengolahan air limbah yang beroperasi di lingkungan dengan kadar oksigen terlarut yang sangat rendah atau hampir nol. Reaktor ini dirancang untuk mendukung proses biologis tertentu yang dilakukan oleh mikroorganisme yang tidak memerlukan oksigen bebas untuk bertahan hidup, seperti denitrifikasi. Limbah yang digunakan dalam reaktor pre-treatment reaktor anoksik adalah limbah tempe dengan konsentrasi 100%. Reaktor anoksik memiliki HRT yang telah ditentukan yaitu 8 jam, 10 jam dan 12 jam tanpa aerasi.

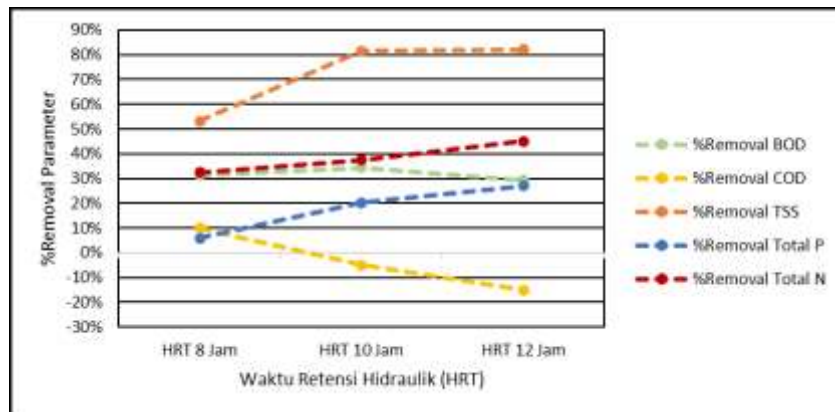
Tabel 3. Karakteristik Effluent pada Setiap HRT

Variabel	Kode Sampel Parameter					
	BOD ₅	Baku Mutu	COD	Baku Mutu	Total N	Baku Mutu
HRT 0 jam	13000		16000		2800	
HRT 8 jam	8922	150	14400	300	1890	25
HRT 10 jam	8523	mg/L	16800	mg/L	1750	mg/L
HRT 12 jam	9189		18400		1540	

Pada tabel di atas dapat diketahui bahwa hasil uji effluent tidak memenuhi baku mutu untuk masing-masing parameter pencemar, baik itu pada waktu HRT 8, 10, maupun 12 jam. Akan tetapi, terjadi penurunan pada parameter Total Nitrogen jika dilihat dari HRT 0 sampai dengan HRT 12, yang menunjukkan adanya penurunan meskipun masih belum mencapai baku mutu yang ditentukan.

Grafik Hubungan HRT Terhadap Penyisihan Parameter

Berdasarkan **Gambar 2** di bawah, terlihat bahwa terdapat pengaruh signifikan terhadap beban pencemar dalam air limbah tempe seiring dengan variasi HRT (*Hydraulic Retention Time*). Semakin lama waktu HRT, terjadi penurunan pada parameter Total Nitrogen sebesar 45% untuk HRT 12 jam yang mengindikasikan peningkatan efisiensi pengendapan partikel tersuspensi dan penyerapan fosfor serta nitrogen. Namun, terdapat peningkatan nilai COD seiring bertambahnya waktu HRT. Peningkatan COD ini dapat disebabkan oleh kondisi air yang semakin keruh akibat akumulasi bahan organik yang tidak terurai sepenuhnya.



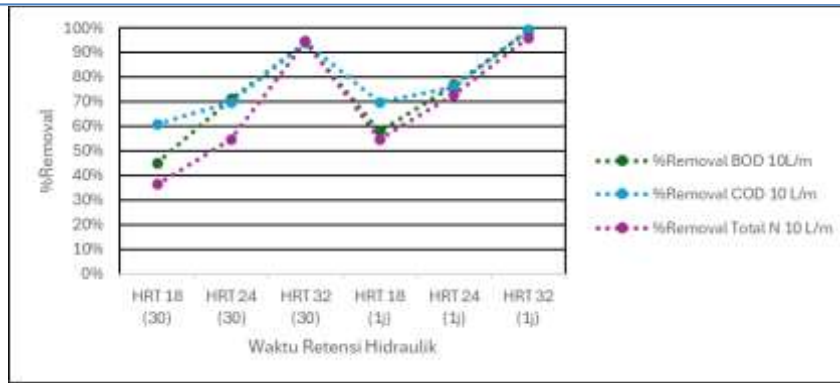
Gambar 2. Grafik Hubungan HRT terhadap Penyisihan Parameter
 Sumber: Penelitian (2024)

Kadar amonia yang tinggi juga dapat menyebabkan air menjadi keruh dan memiliki bau yang tidak enak [14]. Peningkatan COD juga dapat terjadi akibat lisis, yaitu pecahnya sel mikroorganisme yang mati dan melepaskan cairan sel ke dalam larutan. Cairan sel tersebut mengandung senyawa organik yang terukur sebagai COD, sehingga menyebabkan nilai COD dalam larutan meningkat. Hal ini mungkin terjadi karena efisiensi penguraian bahan organik oleh mikroorganisme menurun pada waktu HRT yang lebih lama, sehingga sebagian bahan organik tetap berada dalam air limbah. Pada Total N, penurunan utamanya disebabkan oleh proses denitrifikasi, di mana mikroorganisme anoksik menggunakan nitrat (NO_3^-) sebagai akseptor elektron pengganti oksigen. Dalam proses ini, nitrat diubah menjadi gas nitrogen (N_2), yang kemudian dilepaskan ke atmosfer. Denitrifikasi terjadi ketika terdapat sumber karbon organik yang cukup sebagai donor elektron, sehingga terjadi proses respirasi anoksik oleh mikroorganisme [9].

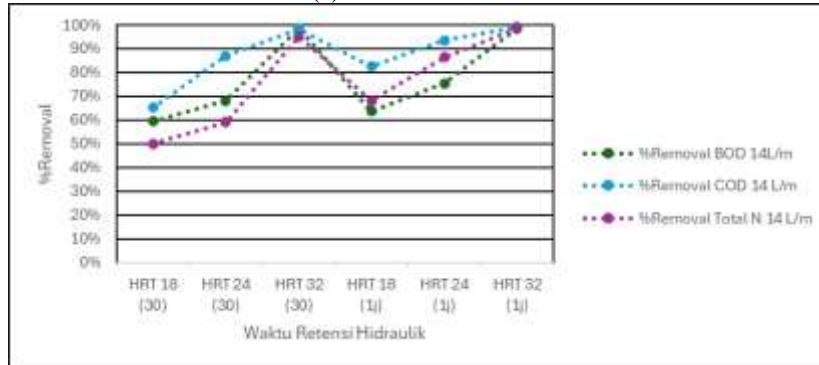
3.3 Waktu Retensi Hidraulik yang Optimal Pada Unit *Sequencing Batch Reactor*

3.3.1 Waktu Retensi Hidraulik yang Optimal dalam Penyisihan Parameter BOD_5

Berdasarkan **Gambar 3**, terdapat hubungan kuat antara waktu retensi hidraulik (HRT) dan debit aerasi terhadap penyisihan parameter pada unit SBR. Pada reaktor anoksik, HRT 12 jam optimal karena memberikan waktu yang cukup untuk proses denitrifikasi dan pelepasan fosfor biologis. Selanjutnya, HRT 32 jam pada unit *Sequencing Batch Reactor* (SBR) menunjukkan penyisihan yang paling efektif untuk semua parameter pencemar dengan tingkat efisiensi tertinggi. Pada unit SBR, HRT 32 jam memungkinkan proses aerasi dan sedimentasi bekerja lebih maksimal, meningkatkan penyisihan polutan kompleks seperti BOD_5 dan COD. Hal ini membuktikan bahwa penggunaan kombinasi HRT optimal pada kedua tahap pengolahan, yaitu 12 jam untuk reaktor anoksik dan 32 jam untuk SBR, memberikan hasil penyisihan beban pencemar terbaik. Kombinasi waktu HRT pada reaktor anoksik dan reaktor SBR mampu menurunkan parameter pencemar hingga mendekati baku mutu yang ditetapkan, sehingga memperbaiki kualitas air limbah tempe secara signifikan. Penurunan nilai BOD terjadi karena sebagian bahan organik yang sebelumnya tidak terurai dalam proses anaerob mengalami degradasi, menghasilkan sel-sel baru yang tersuspensi dan kemudian dipisahkan melalui proses sedimentasi [15].



(a) Debit Aerasi 10 L/m



(b) Debit Aerasi 14 L/m

Gambar 3. Grafik Hubungan HRT, Waktu Pengendapan dan Debit Aerasi Terhadap Penyisihan Parameter
Sumber: Penelitian (2024)

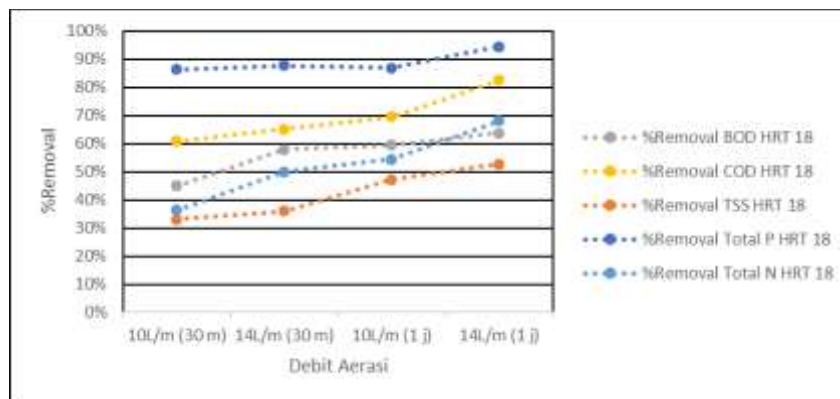
Pada HRT 18 jam, penyisihan BOD₅ mencapai rentang 45-64% dengan variasi debit aerasi dan waktu pengendapan. Ketika HRT diperpanjang menjadi 24 jam, efisiensi penyisihan meningkat menjadi rentang 71-75%. Pada HRT 32 jam, penyisihan BOD₅ mencapai puncaknya yaitu mencapai rentang 94-99%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama HRT, semakin besar kesempatan bagi bakteri untuk memecah bahan organik, sehingga meningkatkan efektivitas pengolahan limbah. Proses penyisihan BOD₅ ini terjadi karena aktivitas mikroorganisme yang mampu memecah zat organik dalam air limbah. Pada penyisihan COD, HRT 18 jam memiliki nilai penyisihan beban pencemar mencapai rentang 61-83% dengan variasi debit aerasi dan waktu pengendapan. Ketika HRT diperpanjang menjadi 24 jam, efisiensi penyisihan meningkat menjadi rentang 70-93%. Pada HRT 32 jam, penyisihan COD mencapai puncaknya yaitu mencapai rentang 94-99%. Semakin lama waktu tinggal mikroorganisme, semakin panjang pula waktu kontak antara mikroorganisme dan bahan organik dalam limbah cair, sehingga proses degradasi senyawa organik menjadi lebih efektif [16].

Pada penyisihan Total Nitrogen, HRT 18 jam memiliki nilai penyisihan beban pencemar mencapai rentang 36-68% dengan variasi debit aerasi dan waktu pengendapan. Ketika HRT diperpanjang menjadi 24 jam, efisiensi penyisihan meningkat menjadi rentang 55-86%. Pada HRT 32 jam, penyisihan Total Nitrogen mencapai puncaknya yaitu mencapai rentang 95-99%. HRT yang lebih panjang memberikan peluang bagi bakteri nitrifikasi dan denitrifikasi untuk bekerja lebih optimal dalam kondisi aerob dan anaerob, sehingga mendukung penguraian Total Nitrogen [5]. Penurunan Total Nitrogen yang signifikan disebabkan oleh proses denitrifikasi, dimana nitrogen berubah menjadi gas nitrogen yang dilepaskan ke atmosfer oleh mikroorganisme dalam kondisi anoksik. Dapat disimpulkan bahwa semakin lama waktu retensi hidraulik, semakin lama waktu kontak air limbah dengan mikroorganisme sehingga meningkatkan efisiensi penyisihan yang tinggi.

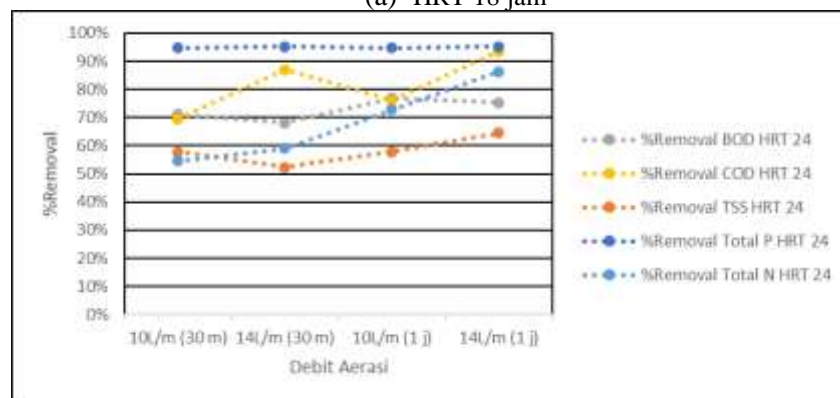
3.3.2 Debit Aerasi yang Optimal dalam Penyisihan Parameter

Berdasarkan Gambar 4, terdapat hubungan signifikan antara HRT dan debit aerasi terhadap penyisihan BOD₅, COD, dan Total Nitrogen pada unit SBR. Pada HRT 18 jam, debit aerasi 10 L/m menghasilkan penyisihan BOD₅ 45-58%, sedangkan pada 14 L/m meningkat menjadi 59-64%. Pada HRT 24 jam, penyisihan BOD₅ mencapai 71-77% dengan debit aerasi 10 L/m dan 68-75% dengan debit 14 L/m. Pada HRT 32 jam, penyisihan mencapai puncak, yaitu 95-96% dengan debit aerasi 10 L/m dan 95-99% dengan 14 L/m. Debit aerasi yang lebih tinggi (14 L/m) memberikan penyisihan BOD₅ lebih baik karena

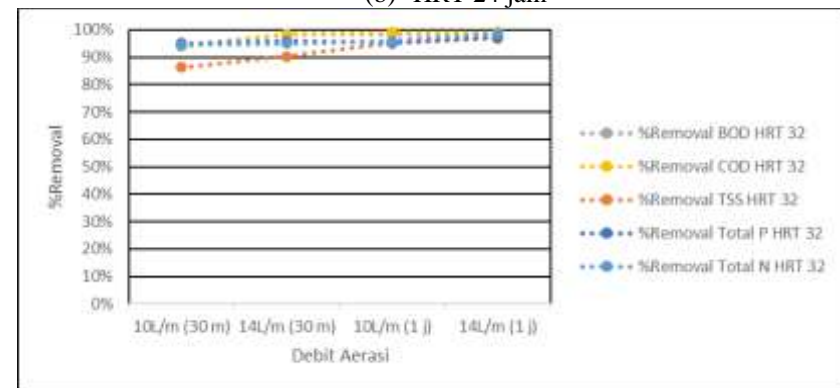
meningkatkan oksigen terlarut, mempercepat degradasi bahan organik oleh mikroorganisme. Kondisi aerob yang tercipta dari injeksi udara memungkinkan mikroorganisme aerobik memecah zat organik dalam air limbah [5].



(a) HRT 18 jam



(b) HRT 24 jam



(c) HRT 32 jam

Gambar 4. Grafik Hubungan Debit Aerasi, Waktu Pengendapan dan HRT terhadap Penyisihan
Sumber: Penelitian (2024)

Pada penyisihan COD, HRT 18 jam dengan debit aerasi 10 L/m menghasilkan penyisihan COD 61–70%, sedangkan pada 14 L/m meningkat menjadi 65–83%. Pada HRT 24 jam, penyisihan COD mencapai 70–76% dengan debit aerasi 10 L/m dan 87–93% dengan debit 14 L/m. Pada HRT 32 jam, penyisihan mencapai puncak, yaitu 94–99% dengan debit aerasi 10 L/m dan 98–99% dengan 14 L/m. Debit aerasi yang lebih tinggi meningkatkan ketersediaan oksigen, yang diperlukan oleh mikroorganisme aerobik untuk memecah senyawa organik penyebab COD, sehingga meningkatkan efektivitas penyisihan. Kombinasi antara HRT yang lebih lama memungkinkan proses penguraian yang lebih menyeluruh, sedangkan debit aerasi yang lebih tinggi menyediakan oksigen yang cukup untuk mendukung aktivitas mikroorganisme, yang sangat penting dalam penguraian senyawa organik penyebab COD.

Penyisihan Total Nitrogen dipengaruhi oleh HRT dan debit aerasi. Pada HRT 18 jam, debit aerasi 10 L/m menghasilkan penyisihan 36–55%, sedangkan 14 L/m meningkat menjadi 50–68%. Dengan HRT 24 jam, penyisihan Total Nitrogen mencapai 55–73% pada debit 10 L/m dan 59–86% pada debit 14 L/m. HRT

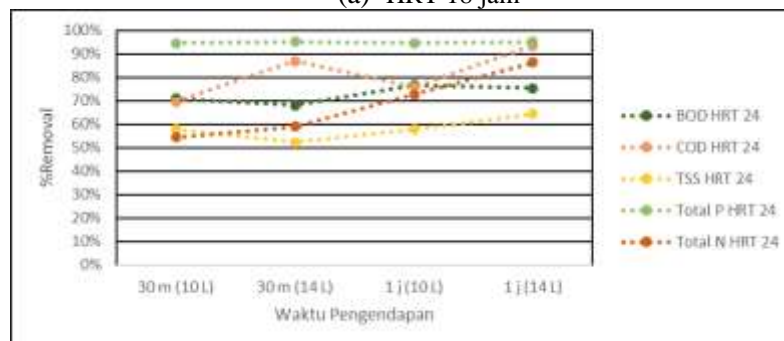
32 jam menunjukkan efisiensi tertinggi, yaitu 95-96% pada debit 10 L/m dan 95-99% pada debit 14 L/m. Penurunan signifikan Total Nitrogen disebabkan oleh denitrifikasi, di mana mikroorganisme dalam kondisi anoksik mengubah nitrat menjadi gas nitrogen yang dilepaskan ke atmosfer [10]. Proses nitrifikasi dan denitrifikasi yang seimbang, didukung oleh HRT yang panjang dan debit aerasi optimal, memungkinkan penghilangan nitrogen secara maksimal.

3.3.3 Waktu Pengendapan yang Optimal dalam Penyisihan Parameter

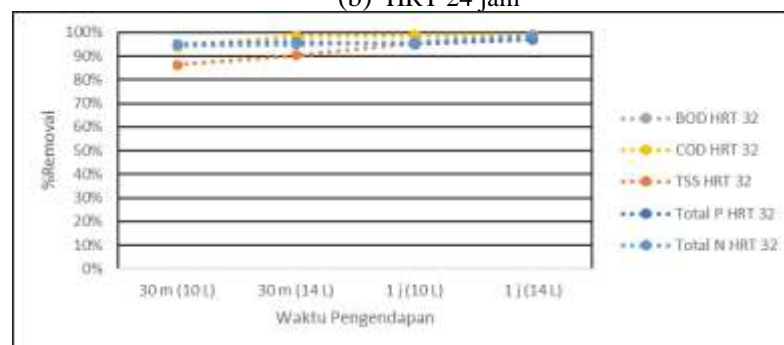
Berdasarkan Gambar 5, terlihat adanya hubungan antara *Hydraulic Retention Time* (HRT) dan debit aerasi 10 L/m terhadap waktu pengendapan pada proses pengolahan air limbah dengan durasi pengendapan 30 menit dan 1 jam. Pada kedua grafik (pengendapan 30 menit dan 1 jam), persentase penyisihan BOD₅ meningkat secara signifikan. Pada HRT 18 jam, penyisihan BOD₅ relatif rendah untuk semua debit aerasi, namun mulai meningkat pada HRT 24 jam, terutama pada debit aerasi 14 L/m dengan waktu pengendapan 1 jam. Penyisihan BOD₅ mencapai nilai tertinggi pada HRT 32 jam, dengan hasil terbaik diperoleh pada debit aerasi 14 L/m dan waktu pengendapan 1 jam sebesar 99%, diikuti oleh debit 14 L/m dan waktu pengendapan 30 menit sebesar 95%.



(a) HRT 18 jam



(b) HRT 24 jam



(c) HRT 32 jam

Gambar 5. Grafik Hubungan Waktu Pengendapan, HRT dan Debit Aerasi terhadap Penyisihan
Sumber: Penelitian (2024)

Secara keseluruhan, kombinasi HRT yang lebih lama (32 jam) dan debit aerasi yang lebih tinggi (14 L/m) dengan waktu pengendapan 1 jam menghasilkan penyisihan BOD₅ paling efektif karena memberikan kondisi optimal untuk proses biologis dan fisik. HRT yang panjang memastikan mikroorganisme memiliki waktu cukup untuk mendegradasi senyawa organik kompleks dalam air limbah. Proses sedimentasi yang

mengakibatkan pengendapan zat organik turut berkontribusi pada penurunan kadar BOD₅ [17]. Sedimentasi adalah metode fisik dalam pengolahan limbah cair yang menggunakan gaya gravitasi untuk memisahkan partikel padatan tersuspensi dari air. Peningkatan debit aerasi memastikan pasokan oksigen yang lebih besar, sehingga mempercepat aktivitas metabolisme mikroorganisme aerobik. Waktu pengendapan 1 jam memastikan padatan tersuspensi dapat dipisahkan dengan baik, menghasilkan efluen dengan kandungan BOD₅ yang sangat rendah.

Pada penyisihan COD, HRT 18 jam memiliki persentase penyisihan untuk semua debit aerasi masih rendah, terutama pada debit aerasi 14 L/m dengan waktu pengendapan 30 menit. Seiring peningkatan HRT menjadi 24 jam, penyisihan COD mulai menunjukkan kenaikan yang signifikan, terutama pada debit aerasi 10 L/m dengan waktu pengendapan 1 jam. Pada HRT 32 jam, terjadi peningkatan yang paling signifikan dengan penyisihan COD tertinggi diperoleh pada debit aerasi 14 L/m dengan waktu pengendapan 1 jam, yang mencapai 99% diikuti oleh debit 14 L/m dan waktu pengendapan 30 menit sebesar 98%. Debit aerasi yang lebih tinggi (14 L/m) meningkatkan penyisihan COD karena menyediakan oksigen yang cukup untuk aktivitas mikroorganisme aerob. Dengan ketersediaan oksigen yang optimal, mikroorganisme dapat memecah senyawa organik kompleks menjadi karbon dioksida dan air secara lebih efisien. Semakin panjang waktu pengendapan, semakin banyak partikel yang dapat mengendap, sehingga persentase penyisihan COD mengalami peningkatan [18]. Kombinasi ini, terutama pada HRT 32 jam, memastikan bahwa proses biologis dan fisik berjalan dengan maksimal.

Pada penyisihan Total N, HRT 18 persentase penyisihan Total N masih rendah untuk semua debit aerasi, terutama pada debit aerasi 14 L/m dengan waktu pengendapan 30 menit. Seiring peningkatan HRT menjadi 24 jam, terjadi peningkatan penyisihan Total N secara bertahap, terutama pada debit aerasi 14 L/m dengan waktu pengendapan 1 jam. Pada HRT 32 jam, terjadi penyisihan Total N yang sangat signifikan, dengan hasil tertinggi mencapai hampir 99% pada debit aerasi 14 L/m dan waktu pengendapan 1 jam diikuti oleh debit 14 L/m dan waktu pengendapan 30 menit sebesar 95%. Debit aerasi tinggi (14 L/m) dan waktu pengendapan lebih lama (1 jam) meningkatkan efisiensi penyisihan total nitrogen, terutama pada waktu tinggal hidraulik (HRT) yang panjang, seperti 32 jam. Pasokan oksigen yang cukup mendukung proses nitrifikasi, di mana bakteri nitrifikasi mengubah amonia menjadi nitrit dan nitrat secara efisien [9]. Sementara itu, waktu pengendapan yang lebih lama memungkinkan flok mikroorganisme/mikroba mengendap dengan baik dan mampu menyokong proses denitrifikasi di zona anoksik untuk mengubah nitrat menjadi nitrogen gas [10]. Kombinasi oksigen cukup, waktu reaksi panjang, dan pengendapan optimal menciptakan kondisi ideal bagi proses nitrifikasi dan denitrifikasi, sehingga meningkatkan penyisihan nitrogen secara keseluruhan.

3.3.4 Analisis Data Regresi Linear Pengaruh HRT, Debit Aerasi, dan Waktu Pengendapan Terhadap Efisiensi Penyisihan Parameter

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
544.029	92.33%	89.46%	83.75%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	28519920	9506640	32.12	0.000
HRT	1	9786754	9786754	33.07	0.000
LAJU AERASI	1	17881845	17881845	60.42	0.000
PENGENDAPAN	1	851322	851322	2.88	0.128
Error	8	2367743	295968		
Total	11	30887663			

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	14249	1261	11.30	0.000	
HRT	-157.5	27.4	-5.75	0.000	1.00
LAJU AERASI	-610.4	78.5	-7.77	0.000	1.00
PENGENDAPAN	-17.8	10.5	-1.70	0.128	1.00

Gambar 6. Hasil Uji Regresi Linear HRT, Debit Aerasi dan Waktu Pengendapan Terhadap Konsentrasi BOD₅
 Sumber: Penelitian (2024)

Hipotesis:

H0 = HRT tidak mempengaruhi konsentrasi BOD₅ (mg/L)

H1 = HRT mempengaruhi konsentrasi BOD₅ (mg/L)

H0 = Debit aerasi tidak mempengaruhi konsentrasi BOD₅ (mg/L)

H1 = Debit aerasi mempengaruhi konsentrasi BOD₅ (mg/L)

Daerah Penolakan Data:

P-value < 0,05, maka H0 ditolak

P-value > 0,05, maka H0 gagal ditolak

Data yang digunakan sebagai variabel pada uji Regresi Linear adalah waktu retensi hidraulik (HRT), debit aerasi, dan waktu pengendapan sebagai variabel bebas/predictor, konsentrasi BOD₅ (mg/L) sebagai variabel terikat/respons. Hasil analisis data menunjukkan bahwa R-sq memiliki nilai sebesar 92,3% yang berarti waktu retensi hidraulik (HRT), debit aerasi, dan waktu pengendapan mempengaruhi konsentrasi BOD₅ (mg/L) sebesar 92,3% sedangkan sisanya dipengaruhi oleh lainnya. Hasil *Analysis of Variance Regresi* didapat hasil waktu retensi hidraulik (HRT) dan debit aerasi P-value < 0,05, maka H0 ditolak, sehingga memiliki pengaruh secara signifikan terhadap konsentrasi BOD₅ (mg/L). Sementara itu, hasil waktu pengendapan memiliki nilai P-value > 0,05, maka H0 gagal ditolak, sehingga tidak memiliki pengaruh secara signifikan terhadap konsentrasi BOD₅ (mg/L). Jika dilihat dari T-value, diantara waktu retensi hidraulik (HRT), debit aerasi, dan waktu pengendapan yang memiliki pengaruh paling tinggi berada pada debit aerasi dengan nilai sebesar -7,77 yang berarti memiliki arah hubungan berbanding terbalik yang mana semakin tinggi debit aerasi maka konsentrasi BOD₅ (mg/L) semakin kecil.

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
725.519	94.38%	92.27%	88.46%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	70698847	23566282	44.77	0.000
HRT	1	4000180	4000180	7.60	0.025
LAJU AERASI	1	60930133	60930133	115.75	0.000
PENGENDAPAN	1	5768533	5768533	10.96	0.011
Error	8	4211020	526377		
Total	11	74909867			

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	21230	1682	12.62	0.000	
HRT	-100.7	36.5	-2.76	0.025	1.00
LAJU AERASI	-1127	105	-10.76	0.000	1.00
PENGENDAPAN	-46.2	14.0	-3.31	0.011	1.00

Gambar 7. Hasil Uji Regresi Linear HRT, Debit Aerasi dan Waktu Pengendapan Terhadap Konsentrasi COD
 Source: Penelitian (2024)

Hipotesis:

H0 = HRT tidak mempengaruhi konsentrasi COD (mg/L)

H1 = HRT mempengaruhi konsentrasi COD (mg/L)

H0 = Debit aerasi tidak mempengaruhi konsentrasi COD (mg/L)

H1 = Debit aerasi mempengaruhi konsentrasi COD (mg/L)

Daerah Penolakan Data:

P-value < 0,05, maka H0 ditolak

P-value > 0,05, maka H0 gagal ditolak

Data yang digunakan sebagai variabel pada uji Regresi Linear adalah waktu retensi hidraulik (HRT), debit aerasi, dan waktu pengendapan sebagai variabel bebas/predictor, konsentrasi COD (mg/L) sebagai variabel terikat/respons. Hasil analisis data menunjukkan bahwa R-sq memiliki nilai sebesar 94,4% yang berarti waktu retensi hidraulik (HRT), debit aerasi, dan waktu pengendapan mempengaruhi konsentrasi

COD (mg/L) sebesar 94,4% sedangkan sisanya dipengaruhi oleh lainnya. Hasil *Analysis of Variance* Regresi didapat hasil waktu retensi hidraulik (HRT), debit aerasi, dan waktu pengendapan P-value < 0,05, maka H0 ditolak, sehingga memiliki pengaruh secara signifikan terhadap konsentrasi COD (mg/L). Jika dilihat dari T-value, diantara waktu retensi hidraulik (HRT), debit aerasi, dan waktu pengendapan yang memiliki pengaruh paling tinggi berada pada debit aerasi dengan nilai sebesar -10,76 yang berarti memiliki arah hubungan berbanding terbalik yang mana semakin tinggi laju aerasi maka konsentrasi COD (mg/L) semakin kecil.

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
140.302	88,27%	83,87%	74,47%

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	1154781	384927	20,08	0,000
HRT	1	217479	217479	11,05	0,010
LAJU AERASI	1	832555	832555	42,29	0,000
PENGENDAPAN	1	134747	134747	6,85	0,031
Error	8	157477	19685		
Total	11	1342257			

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	2891	325	8,89	0,000	
HRT	-23,47	7,06	-3,32	0,010	1,00
LAJU AERASI	-131,7	20,3	-6,50	0,000	1,00
PENGENDAPAN	-7,06	2,70	-2,62	0,031	1,00

Gambar 8. Hasil Uji Regresi Linear HRT, Debit Aerasi dan Waktu Pengendapan Terhadap Konsentrasi Total Nitrogen
Sumber: Penelitian (2024)

Hipotesis:

H0 = HRT tidak mempengaruhi konsentrasi Total Nitrogen (mg/L)

H1 = HRT mempengaruhi konsentrasi Total Nitrogen (mg/L)

H0 = Debit aerasi tidak mempengaruhi konsentrasi Total Nitrogen (mg/L)

H1 = Debit aerasi mempengaruhi konsentrasi Total Nitrogen (mg/L)

Daerah Penolakan Data:

P-value < 0,05, maka H0 ditolak

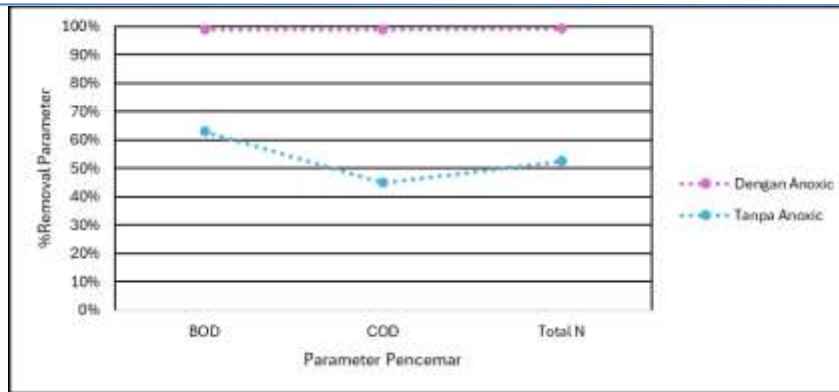
P-value > 0,05, maka H0 gagal ditolak

Data yang digunakan sebagai variabel pada uji Regresi Linear adalah waktu retensi hidraulik (HRT), debit aerasi, dan waktu pengendapan sebagai variable bebas/predictor, konsentrasi Total Nitrogen (mg/L) sebagai variable terikat/respons. Hasil analisis data menunjukkan bahwa R-sq memiliki nilai sebesar 88,3% yang berarti waktu retensi hidraulik (HRT), debit aerasi, dan waktu pengendapan mempengaruhi konsentrasi Total Nitrogen (mg/L) sebesar 88,3% sedangkan sisanya dipengaruhi oleh lainnya. Hasil *Analysis of Variance* Regresi didapat hasil waktu retensi hidraulik (HRT), debit aerasi, dan waktu pengendapan P-value < 0,05, maka H0 ditolak, sehingga memiliki pengaruh secara signifikan terhadap konsentrasi Total Nitrogen (mg/L). Jika dilihat dari T-value, diantara waktu retensi hidraulik (HRT), debit aerasi, dan waktu pengendapan yang memiliki pengaruh paling tinggi berada pada debit aerasi dengan nilai sebesar -6,50 yang berarti memiliki arah hubungan berbanding terbalik yang mana semakin tinggi debit aerasi maka konsentrasi Total Nitrogen (mg/L) semakin kecil

3.4 Pengaruh Penambahan Reaktor Anoksik dan Bak Pengendap

Perbandingan Antara Penggunaan Reaktor Anoksik dan Tanpa Anoksik

Berdasarkan hasil analisis grafik pada **Gambar 9**, terlihat jelas bahwa penggunaan metode dengan penambahan reaktor anoksik memberikan pengaruh yang signifikan dalam meningkatkan penyisihan beban pencemar dibandingkan dengan metode tanpa reaktor anoksik. Penambahan reaktor anoksik menciptakan kondisi anaerobik yang memungkinkan proses dekomposisi bahan organik lebih efektif, sehingga meningkatkan efisiensi penyisihan.



Gambar 9. Grafik Perbandingan Pengolahan dengan Anoksik dan Tanpa Anoksik
 Sumber: Penelitian (2024)

Secara keseluruhan, grafik menunjukkan bahwa perlakuan dengan reaktor anoksik mampu memberikan hasil yang lebih konsisten dan lebih tinggi dalam penyisihan parameter pencemar seperti BOD₅, COD, dan Total Nitrogen.

Pada parameter BOD₅, hasil penyisihan dengan penggunaan reaktor anoksik sebagai pre-treatment mencapai tingkat yang sangat tinggi, yaitu 99%, lebih baik dibandingkan metode tanpa reaktor anoksik sebagai pre-treatment yang hanya mencapai sekitar 63%. Meski selisihnya tidak terlalu besar, peningkatan ini menunjukkan bahwa reaktor anoksik sebagai pre-treatment membantu dalam mengoptimalkan proses penguraian bahan organik yang berkontribusi pada pengurangan BOD₅ dalam air limbah. Hal ini dikarenakan kondisi anoksik yang mendukung aktivitas mikroorganisme dalam menguraikan bahan organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana.

Perbedaan yang lebih mencolok terlihat pada parameter COD. Penggunaan reaktor anoksik sebagai pre-treatment meningkatkan penyisihan COD hingga 99%, sedangkan metode tanpa reaktor anoksik sebagai pre-treatment hanya mampu menyisihkan sekitar 45%. Selisih yang signifikan ini menunjukkan bahwa reaktor anoksik memiliki peran penting dalam memecah senyawa organik kompleks yang berkontribusi pada tingginya nilai COD. Proses penguraian dalam kondisi anoksik ini memberikan dampak positif yang besar terhadap pengurangan beban COD dalam air limbah, membuat pengolahan limbah lebih efisien.

Selain itu, pada parameter Total Nitrogen, penambahan reaktor anoksik sebagai pre-treatment juga menunjukkan peningkatan efisiensi yang signifikan. Penyisihan Total Nitrogen dengan reaktor anoksik sebagai pre-treatment mencapai 99%, lebih tinggi dibandingkan tanpa reaktor anoksik sebagai pre-treatment yang hanya mencapai sekitar 53%. Kondisi anoksik memungkinkan terjadinya proses denitrifikasi yang lebih baik, di mana senyawa nitrogen diubah menjadi nitrogen gas dan dikeluarkan dari sistem [9]. Adapun perbandingan hasil pengolahan menggunakan pre-treatment dan tidak menggunakan pre-treatment disajikan pada **Tabel 4**

Tabel 4. Pengaruh Penambahan Pre-treatment Terhadap Hasil Penyisihan

No	Parameter	Hasil Uji		Satuan	Baku Mutu
		Pre-treatment	Tanpa Pre-treatment		
1	BOD ₅	133	266	mg/L	150
2	COD	160	2400	mg/L	300
3	Total Nitrogen	21	70	mg/L	25

Berdasarkan hasil analisis diatas, dapat dilihat bahwa penambahan reaktor anoksik sebagai pre-treatment sangat efektif dalam meningkatkan penyisihan beban pencemar pada semua parameter, terutama saat dikombinasikan dengan sistem *Sequencing Batch Reactor* dan post-treatment untuk hasil optimal. Hasil uji juga menunjukkan bahwa nilai kadar BOD₅, COD, dan Total Nitrogen pada efluen penambahan reaktor anoksik sebagai pre-treatment telah memenuhi baku mutu dibandingkan dengan hasil efluen tanpa penambahan reaktor anoksik sebagai pre-treatment.

4. Kesimpulan

Kesimpulan dari analisis menunjukkan bahwa penambahan reaktor anoksik sebagai pre-treatment, waktu retensi hidraulik (HRT), debit aerasi dan waktu pengendapan yang lebih lama secara signifikan

meningkatkan efisiensi penyisihan beban pencemar dalam air limbah. Penggunaan reaktor anoksik sebagai pre-treatment secara konsisten menghasilkan penyisihan BOD₅, COD, dan Total Nitrogen yang lebih tinggi pada efluen dibandingkan metode tanpa bak anoksik sebagai pre-treatment. Pada parameter BOD₅, COD, dan Total Nitrogen, peningkatan HRT hingga 32 jam dan debit aerasi 14 L/m dengan waktu pengendapan 1 jam memberikan hasil penyisihan yang optimal, dengan efisiensi mencapai rentang 98-99%. HRT yang lebih lama memberikan waktu lebih bagi mikroorganisme untuk mendegradasi senyawa organik serta debit aerasi yang lebih tinggi meningkatkan ketersediaan oksigen, yang mempercepat proses penguraian. Sedangkan waktu pengendapan yang lama semakin lebih banyak waktu untuk flok mengendap dan terpisah dari air hasil olahan, sehingga meningkatkan persentase penyisihan. Kombinasi optimal antara ketiga faktor ini sangat penting untuk mencapai hasil penyisihan beban pencemar yang maksimal.

5. Referensi

- [1] Winda and Ign. Suharto, "Pengolahan Air Limbah Tempe dengan Metode Sequencing Batch Reactor Skala Laboratorium dan Industri Kecil Tempe," *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan,"* 2015.
- [2] D. Sari and A. Rahmawati, "Analisis Kandungan Limbah Cair Tempe Air Rebusan dan Air Rendaman Kedelai," *Jurnal Ilmiah Kesehatan Media Husada*, vol. 9, no. 1, pp. 47–54, Apr. 2020, doi: 10.33475/jikmh.v9i1.210.
- [3] N. Hendrasarie *et al.*, "Efektivitas Penambahan Sludge Zone Pada Sequencing Batch Reactor untuk Mengolah Limbah Cair Rumah Makan," *Journal of Research and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 121–131, 2022.
- [4] Hendrasarie, Novirina, and Fransiska Febrina. "Efektivitas Penambahan Serabut Kelapa Dan Kulit Buah Siwalan Sebagai Adsorben Dan Media Lekat Biofilm Pada Pengolahan Limbah Domestik Menggunakan Sequencing Batch Reactor." *ENVIROTEK: Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan* 14.1 (2022): 98-105.
- [5] Hendrasarie, Novirina, Kabul Fadilah, and M. R. Ranno. "Sequencing Batch Reactor to Treatment Tofu Wastewater Using Impeller Addition." *Journal of Ecological Engineering* 23.11 (2022).
- [6] S. Liu, G. T. Daigger, B. Liu, W. Zhao, and J. Liu, "Enhanced performance of simultaneous carbon, nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater in an anaerobic-aerobic-anoxic sequencing batch reactor (AOA-SBR) system by alternating the cycle times," *Bioresour Technol*, vol. 301, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.biortech.2020.122750.
- [7] D. Luo, L. Yuan, L. Liu, Y. Wang, and W. Fan, "The mechanism of biological phosphorus removal under anoxic-aerobic alternation condition with starch as sole carbon source and its biochemical pathway," *Biochem Eng J*, vol. 132, pp. 90–99, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.bej.2018.01.007.
- [8] Anisa, Ana, and Welly Herumurti. "Pengolahan Limbah Domestik Menggunakan Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) dengan Proses Aerobik-Anoksik untuk Menurunkan Konsentrasi Senyawa Organik dan Nitrogen." *Jurnal Teknik ITS* 6.2 (2017): F361-F366.
- [9] Hendrasarie, Novirina, and Firdinsyah Iqdam Zarfandi. "Integrated Anoxic-Oxic Sequencing Batch Reactor Combined with Coconut Fiber Waste as Biofilm and Adsorbent Media." *Journal of Ecological Engineering* 24.11: 176-189.
- [10] Sekarani, F. A., and N. Hendrasarie. "Reduction of organic parameters in apartment wastewater using sequencing batch reactor by adding activated carbon powder." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 506. No. 1. IOP Publishing, 2020.
- [11] Riffat, Rumana, and Taqsim Husnain. *Fundamentals of wastewater treatment and engineering*. Crc Press, 2022.
- [12] G. Supriyanto, D. Trisna, and R. Issa, *Inovasi Dan Pengembangan Teknologi Moving Bed Bioreactor (MBBR) Untuk Pengolahan Limbah Cair Domestik, Rumah Sakit Dan Industri*. 2017.
- [13] Metcalf and Eddy. (2014). Metcalf and Eddy, AECOM - Wastewater Engineering_ Treatment and Resource Recovery (2014, McGraw-Hill).pdf (p. 2044).
- [14] Badrah, Sitti, Resti Putri Aidina, and Andi Anwar. "Pemanfaatan Effective Microorganisms 4 (EM4) Menggunakan Media Biofilm untuk Menurunkan Amonia dan Fosfat pada Limbah Cair Rumah Sakit." *Faletehan Health Journal* 8.02 (2021): 102-108.
- [15] Kurniawan, Didik. *Perancangan Unit Pengolahan Air Sebagai Upaya Reused Buangan Air Limbah Domestik Menjadi Air Bersih di PT Madhani Talatah Nusantara Site 060C SMO Project B-West Kabupaten Berau, Kalimantan Timur*. Diss. UPN Veteran Yogyakarta, 2024.

-
- [16] Sartunus, Phivi Andriza, and Adrianto Ahmad. *Efisiensi Penyisihan Chemical Oxygen Demand (COD) Limbah Cair Pabrik Sagu Menggunakan Bioreaktor Hibrid Anaerob Dua Tahap dengan Variabel Laju Pembebanan Organik*. Diss. Riau University.
- [17] Sahani, Wahyuni, and Andi Muh Alfian. "Kombinasi Constructed Wetland Dan Koagulasi Dalam Menurunkan Kadar BOD Dan TSS Air Limbah Domestik." *Media Kesehatan Politeknik Kesehatan Makassar* 19.1 (2024): 48-52.
- [18] Safitri, Putri Destia, Satriananda Satriananda, and Adriana Adriana. "Sintesa Biokoagulan dari Chitosan dan Biji Kelor (*Moringa Oleifera*) untuk Menurunkan Kandungan Senyawa Organik dalam Limbah Cair Tahu." *Jurnal Teknologi* 24.1 (2024): 29-34.