

Kombinasi Proses Anoxide – Oxide Menggunakan Tanaman Kayu Apu (*Pistia Stratiotes*) untuk Penyisihan COD dan Total Nitrogen Pada Limbah Cair Domestik

Aprilia Putri Ningrum*, Tuhu Agung Rachmanto

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

*Koresponden email: aprilyaputri002@gmail.com

Diterima: 16 Mei 2025

Disetujui: 21 Mei 2025

Abstract

The increase in population and urbanisation has led to an increased volume of domestic wastewater containing pollutants such as organic matter and nitrogen, which pose a significant risk to the environment and aquatic ecosystems. This study aims to evaluate the effectiveness of a combined anoxic–oxic process integrated with *Pistia stratiotes* (water lettuce) constructed wetland system for removing Chemical Oxygen Demand (COD) and total nitrogen from domestic wastewater. The experiment was conducted using wastewater concentrations of 20%, 40% and 60%, with a retention time of five days. The system operated under anoxic conditions for the first two days, followed by oxic conditions with aeration from days three to five. The results showed that the highest removal efficiency was achieved at a wastewater concentration of 20% and a five-day retention time. This resulted in COD and total nitrogen removal efficiencies of 63.16% and 70%, respectively. These findings suggest that the anoxic–oxic system combined with *Pistia stratiotes* is effective in enhancing the treatment performance of domestic wastewater. This is particularly evident at lower concentrations and optimal retention times.

Keywords: *domestic wastewater, pistia stratiotes, total nitrogen, constructed wetland, anoxic–oxic*

Abstrak

Peningkatan jumlah penduduk dan laju urbanisasi menyebabkan volume limbah domestik terus meningkat, dengan kandungan polutan seperti bahan organik dan nitrogen yang berpotensi mencemari lingkungan perairan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas kombinasi proses anoksik–oksik dengan pemanfaatan tanaman kayu apu (*Pistia stratiotes*) dalam sistem *constructed wetland* untuk menyisihkan Chemical Oxygen Demand (COD) dan total nitrogen dari limbah cair domestik. Penelitian dilakukan dengan variasi konsentrasi limbah sebesar 20%, 40%, dan 60%, serta waktu tinggal selama lima hari. Selama dua hari pertama, sistem dioperasikan dalam kondisi anoksik, sedangkan pada hari ketiga hingga kelima kondisi diubah menjadi oksik dengan tambahan aerasi. Hasil menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan tertinggi diperoleh pada konsentrasi limbah 20% dan waktu tinggal lima hari, dengan penurunan COD sebesar 63,16% dan total nitrogen sebesar 70%. Temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi sistem anoksik–oksik dengan keberadaan tanaman kayu apu efektif dalam meningkatkan efisiensi pengolahan limbah cair domestik, terutama pada konsentrasi rendah dan waktu tinggal yang optimal.

Kata kunci: *limbah cair domestik, pistia stratiotes, total nitrogen, constructed wetland, anoksik–oksik*

1. Pendahuluan

Menurut Badan Pusat Statistik Surabaya, jumlah penduduk Surabaya akan mencapai 3,01 juta jiwa pada tahun 2023, dengan laju pertumbuhan sebesar 0,42% [1]. Pertumbuhan penduduk dan urbanisasi yang pesat telah menyebabkan peningkatan yang signifikan dalam produksi limbah domestik. Limbah ini mengandung berbagai polutan seperti bahan organik, nutrisi (nitrogen dan fosfor), dan patogen, yang berpotensi mencemari sumber air dan berdampak negatif terhadap kesehatan masyarakat dan ekosistem perairan [2]. Sejumlah usaha telah dilakukan untuk mengurangi pengaruh dari pencemaran limbah rumah tangga, namun masih terdapat beberapa tantangan. Salah satu masalahnya adalah harga alat atau sistem pengolahan limbah yang tinggi, sehingga sulit bagi masyarakat untuk mengaksesnya. Mengingat biaya operasional Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) di kota Surabaya yang cukup tinggi serta sistem pengoperasianya yang kompleks, maka dalam pelaksanaan pengelolaan limbah sebaiknya digunakan teknologi yang berbiaya rendah dan mudah dioperasikan. Untuk mencapai tujuan ini, sistem pengolahan air limbah menggunakan sistem lahan basah buatan direkomendasikan untuk pengolahan limbah ekologis karena sifat limbah domestik yang dapat terurai secara hayati.

Salah satu jenis *floating plant* yang berpotensi untuk melakukan penurunan kadar kontaminan air pada *constructed wetland* adalah kayu apu (*Pistia Stratiotes*). Kayu apu dikenal sebagai gulma yang bisa dimanfaatkan untuk tujuan *constructed wetland*. Tanaman ini memiliki akar yang panjang, lebat, bercabang halus, serta sistem perakarannya yang luas. Tanaman ini juga dapat membantu mengurangi kandungan senyawa organik dan anorganik dalam limbah cair [3]. Selain itu, kayu apu juga berfungsi sebagai pembersih untuk air sungai yang tercemar, karena akarnya mampu menangkap lumpur yang ada di sungai. Morfologi kayu apu biasanya menunjukkan tinggi antara 5 hingga 10 cm. Akar tanaman ini lebat, panjang, dan mengapung di permukaan air. Tanaman kayu apu tidak memiliki batang, dan memiliki daun tunggal yang berbentuk seperti bunga. Daun memiliki ujung yang membulat dan pangkal yang meruncing, serta memiliki tepian yang melengkung dengan ukuran 2 hingga 10 cm. Daun kayu apu tidak memiliki lapisan lilin, memiliki warna hijau kebiruan, memiliki tulang daun yang sejajar, dan tergolong dalam kelompok tanaman monokotil [4].

Kecepatan penyerapan dipengaruhi oleh kondisi lingkungan di mana tanaman tumbuh. Sebagai adaptasi sebagai tanaman air, kayu apu hanya memiliki stomata di bagian atas (abaksial), berbeda dengan enceng gondok yang memiliki stomata di bagian atas dan bawah (adaksial). Kayu apu memiliki permukaan daun yang lebar untuk meningkatkan laju transpirasi, semakin lebar daunnya, semakin banyak stomata yang terdapat di daun, sehingga proses transpirasi menjadi lebih cepat. Daun dari kayu apu tidak memiliki lapisan lilin, karena lapisan tersebut dapat menghambat transpirasi [5].

Lahan basah buatan, yang juga disebut sebagai *constructed wetland* merupakan sebuah sistem pengelolaan air limbah yang dirancang dan diatur dengan baik, yang dibuat dengan memanfaatkan proses alami yang melibatkan tanaman, bahan media, dan mikroba untuk mengolah limbah [7]. Salah satu inovasi dalam *constructed wetland* adalah dengan menerapkan kombinasi proses *anoxide – oxide* dimana pada kondisi *oxide* terdapat penambahan oksigen berupa aerator. Proses *anoxide – oxide* memungkinkan degradasi polutan yang lebih efektif melalui pembagian zona oksigen tinggi (*oxide*) untuk nitrifikasi dan zona oksigen rendah (*anoxide*) untuk denitrifikasi [8].

Reaktor lahan basah (*constructed wetland*) yang dilengkapi dengan aerasi dapat meningkatkan penghilangan BOD dibandingkan dengan sistem lahan basah buatan tanpa aerasi tambahan. Dengan waktu detensi 4 hari, kemampuan penyisihan pencemar organik dapat mencapai antara 91,2 – 94,9%, menghasilkan kualitas affluent sebesar 4,1 – 7,1 mg/l [9]. Berdasarkan kajian literatur yang ada, penelitian sebelumnya belum mengeksplorasi lebih jauh mengenai efektifitas kombinasi tanaman kayu apu dan aerasi dalam menurunkan kadar COD dan total nitrogen dalam limbah cair domestik. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian untuk mengevaluasi sejauh mana kombinasi ini efektif.

2. Metode Penelitian

Bahan – bahan yang digunakan dalam penelitian ini mencakup air limbah domestik, tanaman kayu apu (*Pistia stratiotes*), air isi ulang, air bebas mineral, larutan kalium dikromat $K_2Cr_2O_7$ (*digestion solution*) 0,1 N, larutan pereaksi asam sulfat – perak sulfat, larutan ferro ammonium sulfat $(Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$) 0,05 N, larutan indikator ferroin, tablet kjedahl (serbuk katalis), asam sulfate pekat 98%, larutan natrium hidroksida 32%, larutan asam borax 4 %, larutan asam sulfat (H_2SO_4) 1 N, larutan asam sulfat (H_2SO_4) 0,02 N, larutan natrium carbonate 0,05 N, dan indicator bromotimol biru 0,04 %. Alat – alat yang digunakan untuk penelitian ini adalah bak container ukuran (34cm x 21cm x 21cm), stereofoam, aerator, kran, gelas ukur 1000 ml, timbangan, cutter, pH meter, termometer, ATK, COD heating reactor, buret 25 ml, erlenmeyer 100 ml, pipet ukur 5 ml, labu ukur 50ml, pipet pump, peralatan digestion, peralatan destilasi, labu ukur 100 ml, labu ukur 1000 ml, beaker glass 100 ml, gelas ukur 25 ml, tabung destruksi, erlenmeyer 250 ml, dan pipet tetes.

Sampel limbah cair domestik diambil dari Rusunawa Penjaringan Sari 3, Jl. Penjaringan Timur, Penjaringan Sari, Kec. Rungkut, Surabaya yang diambil pada bak pengumpul air limbah. Tanaman kayu apu dibeli melalui online shop yang berada di daerah Surabaya. Penelitian dilakukan di Laboratorium Riset Program Studi Teknik Lingkungan UPN “Veteran” Jawa Timur untuk aklimatisasi tanaman, uji *range finding test* dan penelitian utama *constructed wetland*, serta di Laboratorium Air Program Studi Teknik Lingkungan UPN “Veteran” Jawa Timur untuk analisis uji COD dan Total Nitrogen pada sampel limbah cair domestik. Penelitian dilakukan selama 4 bulan mulai dari bulan Januari tahun 2025 hingga April tahun 2025.

Penelitian ini menggunakan sistem *constructed wetland* dengan menerapkan kombinasi proses *anoxide – oxide* menggunakan tanaman kayu apu. Parameter yang akan diuji adalah penurunan kadar COD dan Total Nitrogen. Penelitian dilakukan dengan melakukan pengamatan terhadap efek dari kombinasi proses *anoxide – oxide* pada *constructed wetland* terhadap pengurangan parameter limbah cair domestik.

Variabel bebas yang digunakan terdiri dari lama waktu tinggal, dan konsentrasi air limbah sedangkan variabel tetap yaitu air limbah berasal dari limbah cair domestik, volume air limbah yang digunakan, jumlah tanaman yg digunakan pada setiap reactor dan ukuran reactor yang digunakan pada saat penelitian. Parameter utama yang diamati adalah penurunan COD dan total nitrogen

Aklimatisasi

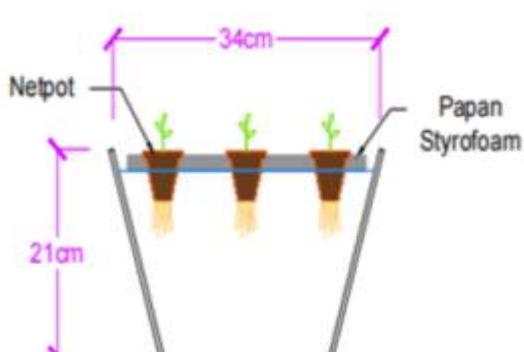
Proses aklimatisasi dilakukan selama 7 hari dengan menggunakan air dari PDAM sebagai media adaptasi awal. Tahap ini berfungsi untuk memberikan waktu bagi tanaman agar dapat menyesuaikan diri terhadap lingkungan baru yang berbeda dari habitat asalnya, sehingga dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kondisi uji coba yang akan datang. Secara prosedural, tanaman yang diperoleh dari tempat budidaya di mana sebelumnya tanaman tersebut hidup berdampingan dengan ikan di kolam segera dipindahkan ke dalam wadah plastik (container) yang telah diisi dengan ± 7 liter air PDAM. Wadah tersebut kemudian disimpan di lingkungan bersuhu stabil, sekitar $\pm 27^{\circ}\text{C}$, dan dijauhkan dari paparan sinar matahari langsung guna menjaga kestabilan kondisi lingkungan selama masa adaptasi. Tanaman didiamkan dalam kondisi tersebut selama tujuh hari penuh untuk memastikan bahwa proses aklimatisasi tersebut berjalan optimal.

Range Finding Test (RFT)

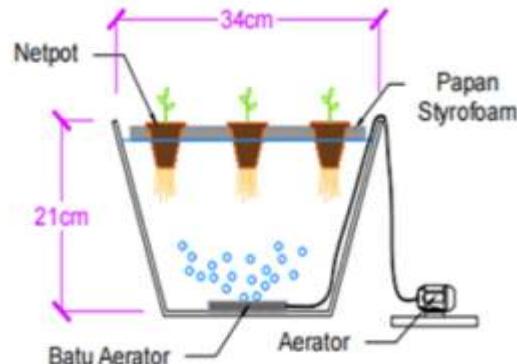
Setelah menjalani proses aklimatisasi selama 7 hari, dilakukan uji *Range Finding Test* selama 15 hari untuk mengukur ketahanan tanaman terhadap limbah dengan berbagai tingkat konsentrasi, yaitu 20%, 40%, 60%, 80%, dan 100%. Konsentrasi air limbah tersebut akan diganti setiap 3 hari sekali dari konsentrasi yang rendah sampai ke konsentrasi yang tinggi. Volume air yang digunakan adalah 7 liter pada setiap box container, dengan menggunakan perbandingan volume antara air limbah dan air isi ulang sesuai dengan persentase yang ditentukan.

Tahap Penelitian Utama

Penelitian utama pada tahap ini dilaksanakan setelah melewati serangkaian tahapan persiapan dan penyesuaian, termasuk adaptasi kondisi tanaman serta analisis karakteristik limbah yang akan digunakan. Pada tahap ini, konsentrasi air limbah yang telah ditetapkan berdasarkan hasil uji rentang (range finding test) diterapkan dalam eksperimen utama guna mengevaluasi pengaruhnya terhadap pertumbuhan tanaman. Masing-masing reaktor diisi dengan 25 gram tanaman dan ditempatkan dalam wadah berisi 7 liter larutan, dengan variasi konsentrasi air limbah sebesar 20%, 40%, dan 60%. Pengambilan sampel dilakukan secara periodik pada hari ke-0, ke-1, ke-2, ke-3, ke-4, dan ke-5 pada kondisi okside untuk memantau dinamika perubahan selama masa penelitian. Penelitian ini menggunakan metode sistem batch, yaitu seluruh larutan dalam reaktor dijaga dalam satu siklus tertutup tanpa aliran masuk maupun keluar selama masa observasi, agar kondisi lingkungan tetap konsisten sepanjang eksperimen. Berikut merupakan rancangan reaktor yang akan digunakan untuk running penelitian.



Rancangan Reaktor Free Floating Plant
Pada Proses Anoxide



Rancangan Reaktor Free Floating Plant
Pada Proses Okside

Gambar 1. Rancangan Reaktor Penelitian

Sumber : Hasil Penelitian, 2025

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Air Limbah

Uji awal terhadap air limbah domestik juga sangat penting dilakukan sebagai dasar informasi mengenai konsentrasi parameter serta kondisi air limbah sebelum dimanfaatkan dalam proses penelitian. Hasil dari pengujian awal tersebut disajikan pada berikut ini.

Tabel 1. Hasil Uji Awal Limbah Cair Domestik

No.	Konsentrasi Air Limbah (%)	Parameter	Satuan	Hasil Uji Awal	Standar Baku Mutu
1	20	pH	-	7,50	6 – 9
		Suhu	°C	25°C	-
		DO	mg/L	7,07	-
		COD	mg/L	115,52	100
		Total N	N mg/L	70,00	-
		pH	-	7,65	6 – 9
2	40	Suhu	°C	26°C	-
		DO	mg/L	7,49	-
		COD	mg/L	133,76	100
		Total N	N mg/L	91,00	-
		pH	-	7,69	6 – 9
		Suhu	°C	27°C	-
3	60	DO	mg/L	8,32	-
		COD	mg/L	139,84	100
		Total N	N mg/L	98,00	-

Sumber : Hasil Analisa, 2025

3.2 Tahap Aklimatisasi

Hasil observasi selama masa aklimatisasi menunjukkan bahwa hampir seluruh tanaman mampu bertahan hidup dengan baik tanpa menunjukkan gejala stres atau kerusakan jaringan. Hal ini mengindikasikan bahwa tanaman berhasil beradaptasi dengan lingkungan air PDAM yang digunakan selama proses tersebut. Dari segi struktur dan morfologi, tidak terlihat adanya perubahan signifikan pada tanaman setelah aklimatisasi, yang menunjukkan bahwa tanaman memiliki kemampuan fisiologis yang baik dalam menyesuaikan diri terhadap kondisi media baru. Dengan demikian, tanaman dinyatakan siap untuk digunakan dalam tahapan penelitian selanjutnya yang melibatkan media limbah domestik.

3.3 Tahap Range Finding Test (RFT)

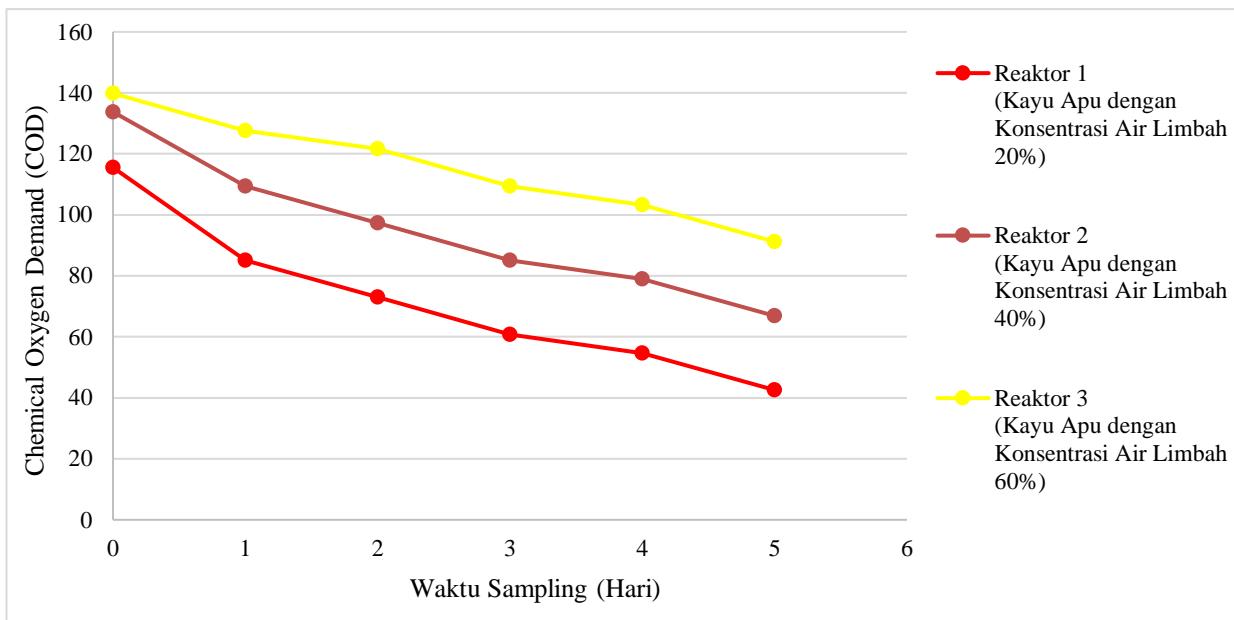
Berdasarkan pengamatan pada proses *Range Finding Test* yang dilakukan selama 15 hari, terdapat beberapa perubahan pada morfologi dan fisiologi tanaman Kayu Apu (*Pistia stratiotes*) dengan variasi konsentrasi air limbah (20%, 40%, 60%, 80%, dan 100%), terlihat bahwa peningkatan konsentrasi air limbah memberikan dampak signifikan terhadap kesehatan morfologi dan fisiologi tanaman. Pada konsentrasi 20%, tanaman menunjukkan kondisi optimal dengan warna daun hijau segar, struktur daun lebar, dan akar yang tumbuh panjang serta lebat. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi tersebut masih dalam batas toleransi tanaman, di mana kandungan nutrien seperti nitrogen dan fosfat bermanfaat bagi pertumbuhan tanpa menimbulkan toksisitas (Supriyanto & Nurhasanah, 2020; Astuti & Hadi, 2019).

Namun, pada konsentrasi 40%, mulai tampak gejala awal stres tanaman seperti perubahan warna daun menjadi kekuningan dan penyusutan ukuran daun. Meskipun pertumbuhan masih berlangsung, akumulasi senyawa toksik mulai menghambat aktivitas metabolisme tanaman (Fitriani et al., 2020). Pada konsentrasi 60%, gejala kerusakan menjadi lebih nyata dengan daun menguning, bercak kecokelatan, dan akar mulai berkurang. Ini menandakan bahwa senyawa toksik seperti amonia dan logam berat mulai mengganggu fungsi enzimatik dan fotosintesis tanaman (Nugroho et al., 2022). Pada konsentrasi 80% dan 100%, tanaman menunjukkan kondisi sangat buruk dengan daun mengkerut, warna pucat hingga kecokelatan, banyak bagian yang mati, dan akar sangat sedikit. Ini mengindikasikan bahwa tingkat pencemaran telah melampaui ambang toleransi biologis tanaman, menyebabkan proses fitoremediasi menjadi tidak efektif (Yuliani et al., 2019; Wahyuni et al., 2021). Dengan demikian, semakin tinggi konsentrasi air limbah, semakin besar pula tekanan lingkungan yang menghambat pertumbuhan tanaman dan menurunkan efektivitas fitoremediasi. Oleh karena itu, penggunaan *Pistia stratiotes* paling efektif

diterapkan pada konsentrasi air limbah 20%, 40% dan 60% untuk menjaga efektivitas penyerapan nutrien dan aktivitas mikroorganisme di zona akar (Arifin et al., 2021; Madigan et al., 2018).

3.4 Pengaruh Waktu Tinggal dan Konsentrasi Air Limbah Terhadap Parameter COD

Pada **Gambar 2** menunjukkan adanya pengaruh waktu tinggal dan konsentrasi air limbah terhadap parameter COD. Penurunan COD terbesar terjadi pada konsentrasi 20% dengan waktu tinggal ke-5. Pada konsentrasi air limbah dan waktu tinggal tersebut penurunan mencapai 63,16%. Pada kurun waktu ke-1 hari penurunan COD sebesar 26,32%. Dilihat dari penurunan tersebut dapat terlihat kesimpulan bahwa semakin rendah konsentrasi air limbah dan semakin lama waktu tinggal, maka akan semakin efisien dalam menurunkan kadar COD. Di konsentrasi air limbah 20% waktu tinggal ke-1 hari penurunan kadar COD mencapai 26,32% dan di waktu tinggal ke-5 penurunan dapat mencapai 63,16%. Di konsentrasi limbah 40% dengan kurun waktu ke-1 hari penurunan kadar COD sebesar 18,18% dan pada waktu tinggal ke-5 hari penurunan dapat mencapai 50,00%. Di konsentrasi air limbah 60% dengan kurun waktu tinggal ke-1 hari penurunan COD sebesar 8,70% lebih sedikit dibandingkan dengan penurunan pada konsentrasi limbah lainnya. Dan pada waktu tinggal ke-5 hari penurunan kadar COD sebesar 34,78%. Pada kesimpulan diatas dengan variasi konsentrasi air limbah, konsentrasi yang semakin kecil akan semakin meningkat penurunan kadar COD yang terjadi pada tanaman Kayu Apu.



Gambar 2. Grafik Pengaruh Waktu Tinggal dan Konsentrasi Air Limbah Terhadap Parameter COD

Berdasarkan dari hasil tersebut didapatkan penurunan COD terbesar terjadi pada reaktor 1 (tanaman kayu apu dengan konsentrasi limbah 20%) di waktu tinggal hari ke-5. Hal tersebut dikarenakan pada waktu tinggal hari ke-0, ke-1 dan ke-2 berada dalam kondisi anoxide sedangkan pada waktu tinggal hari ke-3, ke-4 dan ke-5 berada dalam kondisi okside dimana terdapat perbedaan perlakuan yaitu pada kondisi okside terdapat supply oksigen tambahan dari aerator. Sehingga, penurunan COD terbesar terjadi pada waktu tinggal hari ke-5 karena untuk dapat menurunkan kadar organik dan anorganik di dalam air dibutuhkan supply oksigen yang mencukupi untuk membantu mikroorganisme mendegradasi kadar organik dan mengoksidasi bahan anorganik di dalam air sehingga parameter COD dapat turun.

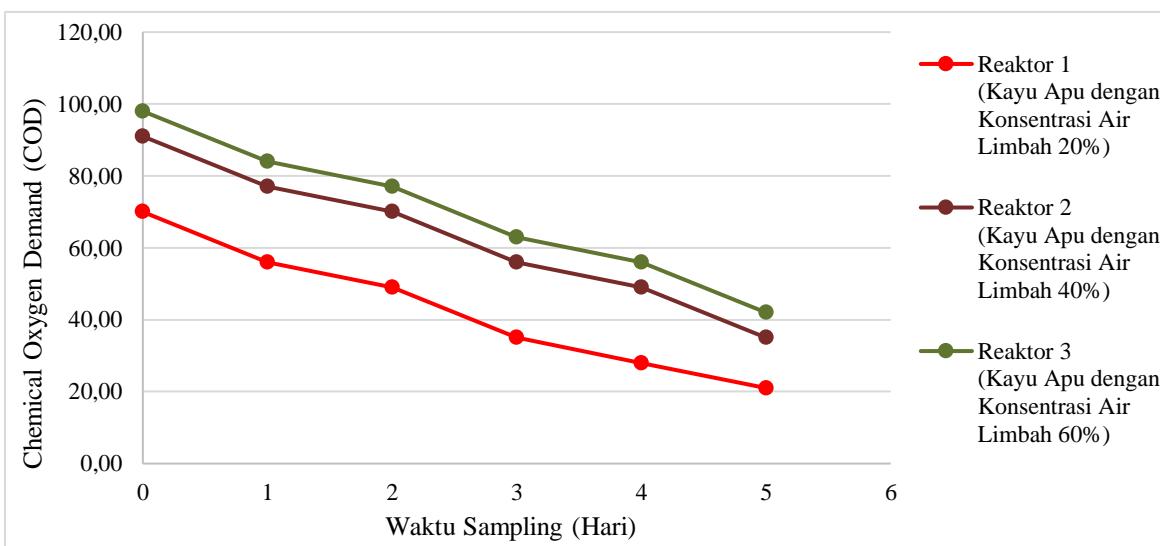
Senyawa organik dan anorganik yang telah terurai menjadi senyawa yang lebih sederhana, dapat di serap oleh tanaman dan menjadi nutrient bagi tanaman tersebut untuk dapat tetap hidup (Rahmawan et al., 2023). Penguraian kadar tersebut untuk dapat menjadi senyawa yang lebih sederhana terjadi pada bagian rizosphere, disana lah bakteri dan mikroorganisme dapat berkembang, dan oksigen terlepas atau di keluarkan dari tanaman untuk membantu proses penguraian. Bagian akar tanaman pula lah yang menjadi bagian untuk melakukan plant uptake atau phytoadsorption dan menyisihkan kadar organik dalam limbah (Mangkoedihardjo, 2010).

Selain itu konsentrasi air limbah juga berpengaruh terhadap parameter COD, dimana penurunan kadar COD terbesar terjadi pada konsentrasi limbah 20%. Hal tersebut terjadi karena pada konsentrasi limbah 20% kandungan beban organiknya tidak terlalu tinggi dibandingkan dengan konsentrasi 40% dan

60%. sehingga proses degradasi organik menjadi lebih mudah dan tidak membutuhkan waktu yang lama. Menurut Madera-Parra et al. (2015), konsentrasi awal bahan organik sangat mempengaruhi efisiensi sistem *constructed wetland*. Sistem akan bekerja optimal pada konsentrasi yang lebih rendah karena mikroorganisme dan tanaman tidak terbebani oleh zat toksik atau beban organik yang tinggi. Dalam kondisi konsentrasi tinggi, tanaman dan mikroba mungkin mengalami stress, menghambat aktivitas biologis, dan menurunkan efisiensi penurunan COD. Dengan demikian, konsentrasi air limbah yang lebih tinggi berhubungan dengan nilai COD yang lebih tinggi dan penurunan yang lebih lambat, dibandingkan dengan konsentrasi air limbah rendah yang menunjukkan penurunan COD lebih cepat dan signifikan.

3.5 Pengaruh Waktu Tinggal dan Konsentrasi Air Limbah Terhadap Parameter Total Nitrogen

Penurunan kadar Total Nitrogen selama proses pengolahan limbah mencerminkan efektivitas kerja mikroorganisme dalam menguraikan senyawa nitrogen di bawah dua kondisi lingkungan yang berbeda: *anoxide* dan *oxide*. Pada fase awal (hari ke-0 hingga ke-2), sistem beroperasi dalam kondisi *anoxide*, yaitu lingkungan tanpa oksigen bebas. Dalam situasi ini, proses denitrifikasi berlangsung dengan dominasi mikroorganisme fakultatif anaerobik yang menggunakan nitrat sebagai akseptor elektron dan mengubahnya menjadi gas nitrogen (N_2) yang dilepaskan ke udara. Berdasarkan hasil pengamatan, kadar nitrogen total pada hari ke-2 menunjukkan penurunan sebagai berikut: Reaktor 1 (dengan konsentrasi limbah 20%) dari sekitar 70 menjadi 50 mg/L, Reaktor 2 (40%) dari 90 menjadi 70 mg/L, dan Reaktor 3 (60%) dari 100 menjadi 78 mg/L. Penurunan ini menandakan bahwa proses denitrifikasi berjalan secara aktif, dengan tingkat efisiensi tertinggi terjadi pada reaktor dengan beban organik terendah. Hal ini sejalan dengan pernyataan Tchobanoglous et al. (2003) yang menyatakan bahwa keberhasilan denitrifikasi dalam kondisi anoksik sangat dipengaruhi oleh ketersediaan senyawa karbon sebagai donor elektron serta minimnya oksigen terlarut, yang mendorong mikroorganisme untuk memanfaatkan nitrat sebagai akseptor elektron alternatif.



Gambar 3. Grafik Pengaruh Waktu Tinggal dan Konsentrasi Air Limbah Terhadap Parameter Total N

Pada hari ke-3 hingga hari ke-5, sistem dijalankan dalam kondisi *oxide* dengan bantuan aerator sebagai sumber suplai oksigen terlarut. Dalam fase ini, aktivitas mikroorganisme aerob mulai mendominasi proses biologis. Tahapan utama yang terjadi adalah nitrifikasi, yaitu proses oksidasi amonia (NH_4^+) menjadi nitrit (NO_2^-) oleh bakteri *Nitrosomonas*, yang kemudian diubah menjadi nitrat (NO_3^-) oleh bakteri *Nitrobacter*. Hasil pemantauan menunjukkan bahwa kadar nitrogen total mengalami penurunan yang lebih tajam dibandingkan fase sebelumnya. Reaktor 1 menunjukkan penurunan dari 50 menjadi 22 mg/L, Reaktor 2 dari 70 menjadi 35 mg/L, dan Reaktor 3 dari 78 menjadi 45 mg/L. Penurunan ini mengindikasikan bahwa suplai oksigen dari aerator meningkatkan efisiensi proses nitrifikasi, khususnya pada reaktor dengan beban organik rendah hingga sedang. Namun, Reaktor 3 yang memiliki konsentrasi limbah tertinggi memperlihatkan laju penurunan yang lebih lambat. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh tingginya rasio karbon terhadap nitrogen (C/N) dan akumulasi senyawa penghambat seperti amonia bebas, yang dapat menghambat pertumbuhan bakteri nitrifikasi (Metcalf & Eddy, 2003; Rittmann & McCarty, 2001).

Kombinasi antara fase anoxide (denitrifikasi) dan fase oxide (nitrifikasi) mencerminkan strategi penghilangan nitrogen total yang umum digunakan dalam sistem pengolahan biologis modern, seperti *Sequencing Batch Reactor* (SBR) maupun sistem biofilm aerob. Kemampuan mikroorganisme untuk menyesuaikan diri terhadap perubahan kondisi lingkungan, dari tanpa oksigen menuju lingkungan yang kaya oksigen, ditambah dengan dukungan aerasi mekanis, terbukti mampu meningkatkan efisiensi pengurangan nitrogen dari air limbah secara signifikan. Reaktor 1 kembali menunjukkan performa terbaik, mengindikasikan bahwa sistem dengan beban organik rendah lebih ideal untuk penerapan proses nitrifikasi-denitrifikasi bertahap. Hal ini terutama berlaku dalam sistem yang memanfaatkan media bioaktif seperti tanaman kayu apu, yang berperan sebagai penyerap sekaligus pendukung pertumbuhan mikroorganisme (Kadlec & Wallace, 2009).

4. Kesimpulan

Waktu tinggal (*retention time*) sangat mempengaruhi efektivitas pengolahan dalam menyisihkan beban organic pada limbah cair domestik menggunakan *free floating plant*. Dimana nilai terbaik untuk parameter COD dan TN dicapai pada hari ke-5 dengan sistem beroksigen (*oxic*), yang mendukung proses biologis tanaman dan mikroorganisme secara optimal. Konsentrasi air limbah juga berpengaruh terhadap kombinasi proses *anoxide – oxide* menggunakan *free floating plant* untuk menyisihkan beban organik pada air limbah domestik, terutama pada konsentrasi air limbah 20% dan waktu tinggal selama 5 hari. Penurunan COD tertinggi tercapai pada Reaktor 1 (Kayu Apu, 20%) dengan efisiensi sebesar 63,16%, sedangkan penurunan Total Nitrogen tertinggi juga dicapai oleh reaktor yang sama dengan efisiensi 70%.

5. Referensi

- [1] Badan Pusat Statistik Kota Surabaya. (2023). *Badan Pusat Statistik Kota Surabaya Dalam Angka 2024*
- [2] Fachrerozi, M., Utami, L. B. & Suryani, D., 2014. Pengaruh Variasi Biomassa *Pistia stratiotes* L. Terhadap Penurunan Kadar BOD, COD, dan TSS Limbah Cair Tahu Di Dusun Klero Sleman Yogyakarta. *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 4(1), pp. 1–16.
- [3] Muhsinin, N. (2019). Pengolahan Air Limbah Domestik secara Fitoremediasi Sistem Constructed Wetland dengan Tanaman *Pandanus amaryllifolius* dan *Azolla microphilla*. Tesis, 1-65.
- [4] Sari, W. D. P. & Herkules., 2017. Analisis Struktur Stomata pada Daun Beberapa Tumbuhan Hidrofit sebagai Materi Bahan Ajar Mata Kuliah Anatomi Tumbuhan. *Jurnal Biosains*, 3(3), pp. 156–161. Taurisna, T. L., 2020. Pemanfaatan T
- [5] Taurisna, T. L., 2020. Pemanfaatan Tanaman Kayu Apu (*Pistia stratiotes* L.) untuk Menurunkan Kadar COD, BOD, TSS pada Limbah Cair Industri Tempe dengan Menggunakan Fitoremediasi Sistem Batch. Surabaya: Universitas Islam Negeri Sunan Ampel.
- [6] UNEP (2016). *A Snapshot of the World's Water Quality*. United Nations Environment Programme.
- [7] Kadlec, R.H., & Wallace, S.D. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press.
- [8] Rahman, M.A., et al. (2020). "Application of Aquatic Plants in Wastewater Treatment." *Environmental Technology Reviews*.
- [9] Metcalf & Eddy. (1993). *Wastewater engineering: Treatment, disposal and reuse* (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
- [10] Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater engineering: Treatment and reuse* (4th ed.). New York: McGraw-Hill.
- [11] Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering*:
- [12] Rittmann, B. E., & McCarty, P. L. (2001). *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*. McGraw-Hill.
- [13] Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. McGraw-Hill.
- [14] Kadlec, R. H., & Wallace, S. D. (2009). *Treatment Wetlands*. 2nd Edition. CRC Press.
- [15] Madigan, M. T., Martinko, J. M., Bender, K., Buckley, D., & Stahl, D. (2018). *Brock biology of microorganisms* (15th ed.). Pearson.