Journal Purifikasi
DOI: https://doi.org/10.12962/purifikasi.v24i2.498

RESEARCH ARTICLE

OPEN ACCESS

Check for updates

ANALISIS JEJAK KARBON PENGOLAHAN LIMBAH AIR SKALA PERKOTAAN DENGAN PENDEKATAN LIFE CYCLE ASSESSMENT (STUDI KASUS: IPAL X, JAKARTA SELATAN)

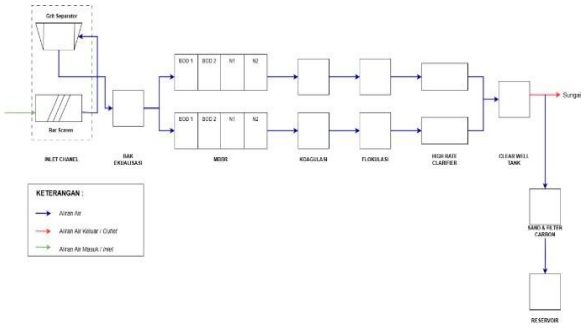
Ayu Ramadhona Ladiajanuarygusdi[1*)], dan Mindriany Syafila[1)]

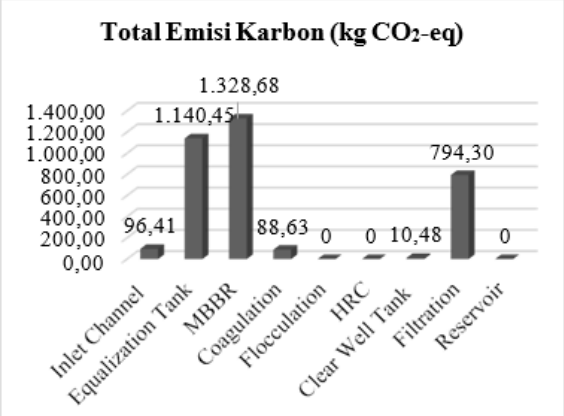
[1)]Magister Pengelolaan Infrastruktur Air bersih dan Sanitasi, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10, Bandung, Indonesia

Article history
Received
29 July 2025
Received in revised form
09 Augst 2025
Accepted
09 Augst 2025
Published online
8 December 2025

*Corresponding author
ayudhonal8@gmail.com

Graphical abstract





ABSTRAK

Peningkatan jumlah penduduk sering kali diikuti dengan melonjaknya volume limbah cair yang harus diolah. Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) memiliki peran dalam mengurangi pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh pembuangan limbah cair ke badan air. Meskipun IPAL berkontribusi dalam meminimalisirkan pencemaran lingkungan, di sisi lain, proses pengolahan limbah cair juga diketahui sebagai salah satu sumber utama emisi gas rumah kaca, termasuk karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dan dinitrogen oksida (N_2O). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi jejak karbon yang dihasilkan dari setiap 1 m^3 limbah cair domestick yang diolah pada unit IPAL X. Metode yang digunakan adalah dengan pendekatan Life Cycle Assessment (LCA) dengan batasan sistem gate to gate. Pengolahan data dilakukan dengan bantuan software OpenLCA. Berdasarkan hasil analisis LCA, unit Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR), Filtrasi, dan Bak Ekualisasi menghasilkan jejak karbon tertinggi yang mana berasal dari konsumsi listrik dan pengolahan biologi yang terjadi pada unit MBBR.

Kata Kunci: Emisi karbon, IPAL, Jejak karbon, OpenLCA, Life cycle assessment, WWTP.

Copyright ©2026 Institut Teknologi Sepuluh Nopember, All rights reserved

Corresponding Author: Ayu Ramadhona Ladiajanuarygusdi

ayudhonal8@gmail.com

Pengelolaan Infrastruktur Air bersih dan Sanitasi, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10, Bandung, Indonesia

1. PENDAHULUAN

Pertumbuh penduduk dan urbanisasi di kota - kota besar, termasuk Jakarta, mengalami peningkatan dalam beberapa dekade terakhir. Fenomena ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti peluang ekonomi, akses yang lebih baik terhadap pendidikan dan layanan kesehatan, serta infrastruktur yang lebih maju dibandingkan wilayah lainnya. Menurut Zaera dan Mochdar (2024), faktor utama yang mendorong adanya migrasi masyarakat ke Jakarta adalah karena faktor ekonomi, mengingat Jakarta memiliki pertumbuhan ekonomi yang stabil dan berada di atas rata-rata nasional. Berdasarkan Badan Pusat Statistik (2024), jumlah penduduk di Jakarta mencapai 10 juta jiwa dan angka ini terus meningkat setiap tahunnya. Pertumbuhan penduduk yang terus meningkat ini berbanding lurus dengan peningkatan produksi limbah, terutama air limbah domestik yang dihasilkan oleh jutaan penduduk Jakarta menjadi beban berat bagi lingkungan dan infrastruktur kota. Berdasarkan penelitian Saman dkk. (2023), yang merujuk pada hasil penelitian Tim Japan Internasional Cooperation Agency pada tahun 2020, diketahui bahwa rata-rata air limbah domestik yang dihasilkan oleh rumah tangga di Kota Jakarta mencapai 118 – 147 liter/hari/orang dengan total volume rata-rata keseluruhan air limbah yang dihasilkan mencapai 1.316.113 m3/hari.

Pengelolaan air limbah domestik yang aman merupakan salah satu target utama dalam Sustainable Development Goals (SDGs) (Sururi dkk., 2023). Dalam upaya mencapai target tersebut, Pemerintah Provinsi (Pemprov) DKI Jakarta terus meningkatkan sistem pengelolaan air limbah melalui pembangunan proyek Jakarta Sewerage System (JSS). Proyek ini dirancang dalam 15 zona, di mana Zona 0 merupakan zona eksisting yang telah berfungsi sebagai Sistem Pengelolaan Air Limbah Domestik Terpusat (SPALD-T) di DKI Jakarta. Salah satu hasil pengembangan Zona 0 adalah Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) X, yang memiliki kapasitas pengolahan sebesar 100 liter/detik atau 8.640 m3/hari dan beroperasi selama 24 jam. IPAL ini menggunakan teknologi Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR), yang dikenal memiliki efisiensi tinggi dalam mengolah air limbah dengan memanfaatkan media biofilm yang meningkatkan efektivitas proses biologis. Namun, meskipun teknologi pengolahan biologis seperti MBBR efektif dalam menghilangkan zat pencemar, proses ini juga memiliki potensi besar dalam menghasilkan emisi gas rumah kaca (GRK), terutama dalam bentuk me, meskipunan dinitrogen oksida (N_2O). Instalasi pengolahan air limbah (IPAL) merupakan salah satu sumber utama emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dan menyumbang sekitar 3% dari total emisi GRK global (Sun dkk.,2024). Menurut Singh dan Kansal (2018), emisi gas rumah kaca merupakan konsekuensi yang tak terhindarkan dari setiap tahap pengolahan air limbah, termasuk proses biologis, kimiawi, dan fisik, serta dari operasional peralatan pendukung. Mengingat pengolahan air limbah di IPAL X berkapasitas besar, maka pengolahan air limbah pada IPAL ini berpotensi untuk memberikan dampak negatif pada lingkungan berupa emisi karbon.

Untuk memastikan pengolahan air limbah yang berkelanjutan, penting dilakukan penilaian terhadap dampak lingkungan yang mungkin terjadi. Penelitian ini penting dilakukan untuk menganalisis jejak karbon (carbon footprint) yang disebabkan oleh Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) X. Metode Life Cycle Assessment (LCA) digunakan dalam penelitian ini untuk menganalisis jejak karbon dari proses pengolahan air. Selain itu, minimnya penelitian di Indonesia yang membahas secara mendalam kontribusi jejak karbon dari pengolahan air limbah skala besar menjadi salah satu alasan utama dilakukannya penelitian ini.

2. METODE

A. Lokasi Penelitian

Penelitian ini telah dilaksanakan di Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) X, Kota Jakarta Selatan, Daerah Khusus Ibukota Jakarta.

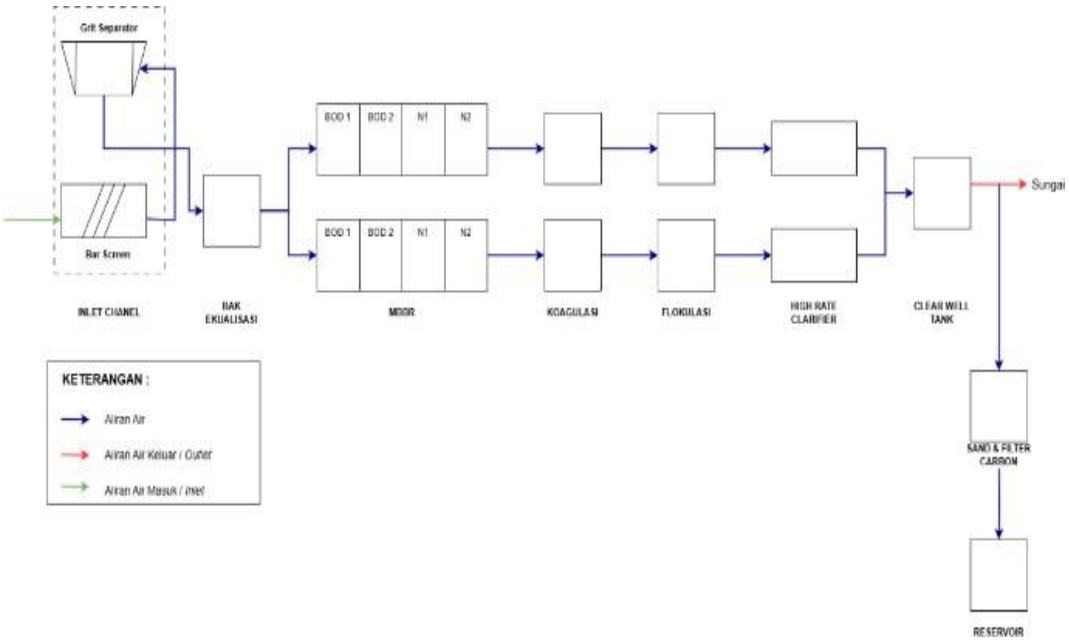
B. Metode Penelitian

Penelitian ini diawali dengan pengumpulan data primer melalui wawancara dan pengambilan sampel air untuk menguji kualitas air limbah berdasarkan parameter Chemical Oxygen Demand (COD). Selain itu, dilakukan pula pengumpulan data sekunder. Rincian jenis data primer dan sekunder yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Jenis Data Primer dan Sekunder yang Dibutuhkan

No	Jenis Data	Deskripsi
A	**Data Primer**	
1.	Wawancara	Wawancara dilakukan bersama pihak Pengelola IPAL X untuk memperoleh informasi mengenai kondisi eksisting IPAL, tantangan yang dihadapi dalam operasional, serta perspektif terkait keberlanjutan sistem IPAL.
2.	Kualitas Air Limbah untuk *Parameter Chemical Oxygen Demand*	Pengujian kualitas air limbah dilakukan pada IPAL X dengan parameter yang dianalisis meliputi *Chemical Oxygen Demand* (COD). IPAL X terdiri atas tujuh unit pengolahan air limbah dan dua unit bak penampungan, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 1. Pada unit pengolahan yang terdiri dari Bak Ekualisasi, MBBR *Line* A, MBBR *Line* B, Koagulasi *Line* A, Koagulasi *Line* B, Flokulasi *Line* A, Flokulasi *Line* B, *High Rate Clarifier Line* A, dan *High Rate Clarifier Line B*, pengambilan sampel dilakukan di tiga titik, yaitu pada tahap *inlet*, proses, dan *outlet*. Untuk unit *Inlet Channel* dan Filtrasi, sampel diambil pada dua titik, yaitu *inlet* dan *outlet*. Sementara itu, pada unit *Clear Well Tank* dan Reservoir, masing-masing diambil satu sampel. Secara keseluruhan, jumlah sampel yang diambil adalah 33 sampel air limbah. Pengambilan sampel dilakukan sebanyak dua kali pengulangan pada hari yang berbeda sehingga total sampel yang dianalisis berjumlah 66. Berdasarkan SNI, untuk volume limbah cair yang diambil adalah sebesar 1 Liter.
3.	Konsumsi Listrik Setiap Unit Pengolahan	Dikarenakan IPAL X tidak memiliki data konsumsi listrik untuk setiap unit pengolahan, maka diperlukan untuk menghitung konsumsi listrik setiap unit pengolahan berdasarkan peralatan pendukung, daya peralatan, jumlah peralatan, durasi penggunaan peralatan, dan *load factor.*
B	**Data Sekunder**	
1.	Alur proses pengolahan air	Sumber data: Pihak pengelola IPAL X
2.	Debit air limbah yang diolah setiap harinya	Sumber data: Pihak pengelola IPAL X
3.	Jenis dan jumlah material serta peralatan pendukung untuk setiap tahap proses	Sumber data: Pihak pengelola IPAL X

No	Jenis Data	Deskripsi
4.	Volume limbah yang diolah	Sumber data: Pihak pengelola IPAL X
5.	Jumlah konsumsi listrik yang digunakan pada setiap prosesnya	Sumber data: Pihak pengelola IPAL X
6.	Jumlah emisi yang dihasilkan	Sumber data: Pihak pengelola IPAL X
7.	Jumlah dan jenis pompa	Sumber data: Pihak pengelola IPAL X
8.	Durasi pompa berjalan	Sumber data: Pihak pengelola IPAL X
9.	Program lingkungan yang telah dilakukan	Sumber data: Pihak pengelola IPAL X



Gambar 1. Alur Proses Pengolahan

Setelah seluruh data terkumpul, analisis Life Cycle Assessment (LCA) dilakukan dengan bantuan software lunak OpenLCA dengan metode penilaian dampak IPCC 2021 dan kategori dampak yang dipilih adalah Global Warming Potential 100 Years (GWP 100). System boundaries yang diterapkan pada analisis LCA adalah “gate to gate”. Metode Life Cycle Assessment "gate to gate" pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) X adalah pendekatan yang digunakan untuk mengevaluasi dampak lingkungan berupa jejak karbon dari proses pengolahan air limbah dalam batas-batas tertentu, yaitu hanya fokus pada tahap operasi internal IPAL itu sendiri, tanpa memperhitungkan siklus penuh mulai dari sumber bahan baku hingga pembuangan akhir. Dalam pendekatan Life Cycle Assessment, terdapat 4 tahap utama, antara lain: Goal dan Scope; Life Cycle Inventory; Life Cycle Impact Assessment; Interpretation.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Goal and Scope

Pada penelitian ini, tujuan dari analisis LCA adalah untuk menilai besarnya jejak karbon (carbon footprint) yang ditimbulkan oleh sistem pengolahan air limbah dengan skala besar yaitu skala

perkotaan. Penilaian ini dilakukan dengan menghitung emisi karbon yang dilepaskan pada setiap tahapan dalam proses pengolahan air limbah tersebut. Untuk memastikan fokus penelitian tetap terarah dan tidak terlalu luas, maka ditetapkan system boundaries ataupun ruang lingkup pada analisis ini menggunakan pendekatan gate to gate. Artinya, analisis ini hanya mencakup proses inti pengolahan air limbah, yakni influen yang mengalir melalui saluran pipa menuju inlet channel, hingga air hasil pengolahan yang tertampung di Reservoir. Ruang lingkup penelitian tidak mencakup tahapan hulu, yaitu proses terbentuknya limbah cair, maupun tahapan hilir, seperti proses distribusi, pembuangan akhir, serta aktivitas perkantoran. Adapun alur proses pengolahan air limbah pada IPAL X disajikan pada Gambar 1 dimana IPAL X memiliki 2 Line yang disebut Line A dan Line B, terdiri dari unit MBBR, Koagulasi, Flokulasi dan HRC.

Functional Unit merupakan salah satu kunci utama dalam tahap awal dalam analisis Life Cycle Assessment (LCA) yang harus ditetapkan pada tahap awal analisis. Menurut Rahmawati (2022), functional unit merujuk pada suatu produk, layanan, atau sistem yang menjadi dasar perhitungan dampak lingkungan dalam analisis Life Cycle Assessment. Unit ini merepresentasikan fungsi dasar dari sistem yang dikaji dan berperan sebagai acuan untuk menormalkan seluruh data input dan output dalam studi. Dengan adanya functional unit, perbandingan antar sistem yang memiliki karakteristik berbeda secara mendasar dapat dilakukan secara objektif dan konsisten. Functional Unit yang digunakan pada penelitian ini adalah 1 meter kubik (1 m^3) air limbah domestik yang diolah dalam sehari.

B. Life Cycle Inventory

Inventarisasi Siklus Hidup (Life Cycle Inventory) mencakup kegiatan pengumpulan data yang relevan dengan penelitian. Data sekunder diperoleh dengan studi literature dokumen pendukung yang berkaitan dengan IPAL X, sedangkan data primer dikumpulkan secara langsung di lokasi penelitian dan perhitungan yang dilakukan oleh peneliti. Seluruh data yang diperoleh diklasifikasikan ke dalam dua jenis data, yaitu data input dan output. Kedua jenis data tersebut dapat membentuk suatu aliran (flow) yang menjadi dasar dalam proses pemodelan dan analisis menggunakan software OpenLCA. Aliran dasar dalam sistem IPAL meliputi aliran material atau energi yang masuk dan keluar dari proses pengolahan, perubahan komposisi material atau energi selama proses, serta aliran limbah yang dihasilkan. Berikut pada Tabel 2 merupakan data input dan output proses pengolahan air limbah pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) X.

Tabel 2. Data *Input* dan *Output*

No.	Unit	Parameter	*Input*	*Output*	Satuan
1	*Inlet Channel*	Listrik	100,50	-	kWH/hari
		COD	91,5	91	mg/L
			0,0915	0,091	kg/m^3
		bCOD	790,56	786,24	kg/hari
		Debit	8.640	8.640	m^3/hari
		Waste Disposal	-	75	liter/hari
			-	7	kg/hari
2	Bak Ekualisasi	Listrik	1.188,89		kWH/hari
		COD	176,5	141,5	mg/L
			0,1765	0,14	kg/m^3

No.	Unit	Parameter	*Input*	*Output*	Satuan
		bCOD	1.524,96	1.222,56	kg/hari
		Debit	8.640	8.640	m^3/hari
3	*Moving Bed Biofilm Reactor Line A dan B*	Listrik	1.336,41	-	kWH/hari
		Sludge	-	685,71	kg/hari
3.a	*Moving Bed Biofilm Reactor Line A*	COD	149	40,5	mg/L
			0,149	0,04	kg/m^3
		bCOD	643,68	174,96	kg/hari
		Debit	4.320	4.320	m^3/hari
		Methane	-	0,70	kg CH_4/hari
3.b	*Moving Bed Biofilm Reactor Line B*	COD	175,5	25,5	mg/L
			0,1755	0,03	kg/m^3
		bCOD	758,16	110,16	kg/hari
		Debit	4.320	4.320	m^3/hari
		Methane	-	0,97	kg CH_4/hari
4	Koagulasi Line A dan B	PAC	23.940	-	kg/tahun
			65,59	-	kg/hari
		Polimer Anionik	1080,00	-	kg/tahun
			2,96	-	kg/hari
4.a	Koagulasi Line A	Listrik	11,59	-	kWH/hari
		COD	56	31,5	mg/L
			0,0560	0,03	kg/m^3
		bCOD	241,92	136,08	kg/hari
		Debit	4.320	4.320	m^3/hari
4.b	Koagulasi Line B	Listrik	11,59	-	kWH/hari
		COD	23,5	8,5	mg/L
			0,0235	0,0085	kg/m^3
		COD	101,52	36,72	kg/hari
		Debit	4.320	4.320	m^3/hari
5.a	Flokulasi Line A	Debit	4.320	4.320	m^3/hari
		COD	24,5	28	mg/L
			0,0245	0,0280	kg/m^3
		bCOD	105,84	120,96	kg/hari
5.b	Flokulasi Line B	Debit	4.320	4.320	m^3/hari
		COD	18	12	mg/L
			0,0180	0,0120	kg/m^3
		bCOD	77,76	51,84	kg/hari
6.a	*High Rate Clarifier Line A*	Debit	4.320	4.320	m^3/hari
		COD	10	8,5	mg/L
			0,01	0,0085	kg/m^3
		bCOD	43,2	36,72	kg/hari

No.	Unit	Parameter	*Input*	*Output*	Satuan
6.b	*High Rate Clarifier Line B*	Debit	4.320	4.320	m^3/hari
		COD	20	19,5	mg/L
			0,0200	0,0195	kg/m^3
		bCOD	86,40	84,24	kg/hari
7	*Clear Well Tank*	Listrik	10,81	-	kWH/hari
		bCOD	9,5	9,5	mg/L
			0,0095	0,0095	kg/m^3
		bCOD	82,08	82,08	kg/hari
		Debit	8.640	8.640	m^3/hari
		Klorine	4963	-	kg/tahun
			13,60	-	kg/hari
8	Filter	Listrik	828,04	-	kWH/hari
		COD	19,5	8,5	mg/L
			0,0195	0,0085	kg/m^3
		bCOD	84,24	36,72	kg/hari
		Debit	4.320	4.320	m^3/hari
9	Reservoir	COD	11	11	mg/L
			0,011	0,011	kg/m^3
		bCOD	47,52	47,52	kg/hari
		Debit	**4.320**	**4.320**	m^3/hari

* Sumber: Hasil Perhitungan

C. Life Cycle Impact

a. Inlet Channel

Inlet Channel merupakan unit pertama dalam sistem Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) yang berfungsi menerima limbah cair dari berbagai sumber di wilayah Jakarta. Hasil pengolahan data menggunakan software OpenLCA, diketahui bahwa setiap 1 m^3 limbah cair yang masuk dan diproses pada unit Inlet Channel menghasilkan jejak karbon sebesar 0,011 kg CO_2-eq. Jejak karbon tersebut seluruhnya bersumber dari konsumsi energi listrik yang digunakan untuk mengoperasikan peralatan pada unit tersebut, seperti pumping screen, slurry pump, dan grit water separator. Berdasarkan hasil analisis konsentrasi Chemical Oxygen Demand (COD) influen dan effluen pada unit Inlet Channel yang disajikan pada Tabel 2, diketahui bahwa terjadi penurunan nilai COD pada tahap ini. Namun demikian, penurunan tersebut tidak selalu diartikan sebagai hasil dari proses degradasi biologis bahan organik yang menghasilkan emisi karbon. Penurunan COD yang terjadi kemungkinan besar disebabkan oleh terpisahnya fraksi COD dalam bentuk partikulat (particulate COD), terutama jenis slowly biodegradable particulate COD (SB-PCOD) dan non-biodegradable particulate COD (NB-PCOD), melalui proses penyaringan awal. Karena pengukuran COD dilakukan pada fase cair, partikel-partikel yang telah terpisah secara fisik tidak lagi terdeteksi dalam pengujian, sehingga nilai COD tampak menurun. Penjelasan ini sejalan dengan pendapat yang dikemukakan oleh Metcalf dan Eddy (2003), yang menyatakan bahwa nilai COD tidak hanya mencerminkan kandungan senyawa organik yang dapat terdegradasi secara biologis, tetapi juga mencakup senyawa non-biodegradable dan partikel organik tersuspensi.

This journal is © Ladiajanuarygusdi and Syafila, 2025

b. Bak Ekualisasi

Berdasarkan hasil pengolahan data menggunakan software OpenLCA, diketahui bahwa setiap 1 m^3 limbah cair yang masuk ke unit bak ekualisasi menghasilkan jejak karbon sebesar 0,132 kg CO2-eq. Emisi ini berasal dari konsumsi energi listrik yang digunakan dalam pengoperasian peralatan pada unit tersebut, khususnya pompa yang berfungsi untuk mengalirkan limbah ke unit *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) pada Line A dan Line B. Pada unit bak ekualisasi, berdasarkan Tabel 2, terdapat penurunan nilai *Chemical Oxygen Demand* (COD). Adanya penurunan nilai COD tidak selalu mengindikasikan bahwa terjadi degradasi organik secara biologi yang mana akan memberikan dampak emisi karbon. Limbah cair yang masuk ke unit ini memiliki waktu tinggal sekitar 6 jam, yang memungkinkan dalam kurun waktu 6 jam, partikel-partikel organik dengan massa jenis lebih berat terutama fraksi *slowly biodegradable particulate* COD (SB-PCOD) dan *non-biodegradable particulate* COD (NB-PCOD) mengendap ke dasar unit. Karena pengukuran COD umumnya dilakukan pada sampel fase cair, partikel yang telah mengendap tidak lagi terukur. Hal ini dapat menyebabkan penurunan nilai COD yang terdeteksi dalam sampel, meskipun secara substansi total kandungan organik belum mengalami degradasi.

c. *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR)

Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) merupakan unit inti pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) X yang berperan dalam menurunkan konsentrasi *Chemical Oxygen Demand* (COD) pada limbah cair. Proses ini menerapkan pengolahan biologis aerobik dengan menggunakan media biofilm yang disebut dengan *kaldness* untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme. Sistem inidioperasikan secara kontinu selama 24 jam dengan bantuan *blower*, yang berfungsi untuk menyuplai oksigen terlarut sekaligus menjaga pergerakan media di dalam reaktor agar kontak antara mikroorganisme dan senyawa organik dalam limbah cair berlangsung secara optimal. Berdasarkan hasil analisis OpenLCA, diketahui bahwa setiap 1 m^3 limbah cair yang diolah pada unit *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) menghasilkan jejak karbon sebesar 0,154 kg CO_2-eq. Dari jumlah tersebut, sekitar 0,148 kg CO_2-eq berasal dari konsumsi energi listrik, khususnya untuk pengoperasian *blower*. Sementara itu, sekitar 0,005409 kg CO_2-eq berasal dari proses degradasi senyawa organik melalui pengolahan biologis.

d. Koagulasi

Koagulasi merupakan proses pengolahan air yang melibatkan penambahan zat kimia tertentu dengan tujuan untuk menstabilkan muatan partikel tersuspensi. Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) X memiliki dua unit bak koagulasi yang masing-masing terletak pada *Line* A dan *Line* B, dengan kapasitas yang sama. Proses koagulasi pada unit ini memerlukan penambahan bahan kimia berupa *Poly Aluminium Chloride* (PAC) sebanyak 65,59 kg/hari serta polimer ionik sebanyak 2,96 kg/hari untuk mendukung proses pembentukan flok. Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan menggunakan *software* OpenLCA, diketahui bahwa pengolahan setiap 1 m^3 limbah cair pada unit koagulasi menghasilkan jejak karbon sebesar 0,010 kg CO_2-eq. Sebanyak 25,084% dari total emisi karbon tersebut berasal dari konsumsi energi listrik, yaitu sebesar 0,002574 kg CO_2-eq, yang terkait dengan pengoperasian peralatan penunjang pada unit ini. Selain itu, kontribusi emisi karbon terbesar berasal dari penggunaan bahan kimia dalam proses koagulasi, yakni sebesar 0,0076 kg CO_2-eq.

e. Flokulasi

Flokulasi merupakan proses penggabungan partikel partikel yang tidak stabil setelah proses koagulasi dengan pengadukan lambat menggunakan *baffled channel*, sehingga terbentuk flok yang

berukuran besar yang dapat mengendap pada tahap selanjutnya yaitu *High Rate Clarifier*. Berdasarkan hasil *Life Cycle Assessment*, setiap 1 m^3 air limbah yang terolah pada unit bak flokulasi tidak menghasilkan jejak karbon. Hal ini disebabkan pada unit bak flokulasi tidak menggunakan peralatan penunjang yang membutuhkan konsumsi energi listrik. Selain itu, walaupun pada unit bak flokluasi Line A dan B terjadi penurunan konsentrasi *Chemical Oxygen Demand* (COD), penurunan yang terjadi tidak signifikan karena penurunan konsentrasi COD pada unit ini bukan karena adanya reaksi biologi mikroorganisme.

f. High Rate Clarifier (HRC)

High Rate Clarifier (HRC) merupakan unit pengolahan limbah cair yang bekerja dengan menerapkan prinsip pemisahan fisik, yaitu memisahkan flok-flok hasil proses koagulasi–flokulasi dari air limbah melalui mekanisme sedimentasi/pengendapan. Unit *High Rate Clarifier* (HRC) dilengkapi dengan *plate settler*, yang berfungsi untuk memperpendek jarak tempuh partikel menuju dasar bak, sehingga proses pengendapan berlangsung lebih cepat serta efisien. Berdasarkan hasil analisis *Life Cycle Assessment*, setiap 1 m^3 limbah cair yang terolah pada unit ini, tidak memberikan jejak karbon. Hal ini disebabkan pada unit HRC tidak menggunakan peralatan penunjang yang membutuhkan konsumsi energi listrik. Selain itu penurunan konsentrasi *Chemical Oxygen Demand* juga tidaklah signifikan.

g. *Clear Well Tank*

Clear Well Tank merupakan unit penampungan sementara untuk limbah cair yang telah melalui proses pengolahan di Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) X. Sekitar 50% dari air limbah yang telah diolah akan langsung dibuang ke badan air penerima, yaitu sungai, sementara sisanya dialirkan ke dalam *Clear Well Tank* untuk selanjutnya menjalani tahapan pengolahan tambahan guna memenuhi standar kualitas sebagai air *re-use*. Pada unit ini juga, dilakukan penambahan klorin sebagai disinfektan untuk air. Berdasarkan *Life Cycle Assesment*, setiap 1 m3 air yang tertampung pada *Clear Well Tank* akan memberikan dampak jejak karbon sebesar 0,002428 kg CO_2-eq yang mana 0,001228 kg CO_2-eq berasal dari penggunaan klorin serta 0,001200 kg kg CO_2-eq berasal dari penggunaan konsumsi listrik.

h. Filtrasi

Unit filtrasi pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) X menggunakan media pasir dan karbon aktif dalam proses pengolahan air limbah. Kedua media tersebut berfungsi untuk mengurangi partikel tersuspensi berukuran kecil, sehingga meningkatkan kualitas air hasil pengolahan. Berdasarkan hasil analisis *Life Cycle Assessment*, setiap 1 m^3 limbah cair yang diolah melalui proses filtrasi menghasilkan jejak karbon sebesar 0,184 kg CO_2-eq yang mana berasal dari konsumsi energi listrik yang digunakan oleh peralatan penunjang proses filtrasi. Menurut Wang dkk. (2022), filtrasi merupakan salah satu unit pengolahan limbah cair yang menerapkan mekanisme fisikokimia, yaitu metode pengolahan yang menggabungkan proses fisika dan kimia untuk mengurangi kandungan kontaminan dalam limbah cair. Proses ini tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca. Dengan demikian, penurunan konsentrasi *Chemical Oxygen Demand* (COD) yang terjadi bukan disebabkan oleh degradasi senyawa organik secara biologis, melainkan akibat proses adsorpsi oleh karbon aktif dalam unit filtrasi.

i. Reservoir

Reservoir merupakan salah satu unit pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) X yang berfungsi sebagai tempat penampungan air limbah yang telah diolah dan akan digunakan kembali

This journal is © Ladiajanuarygusdi and Syafila, 2025

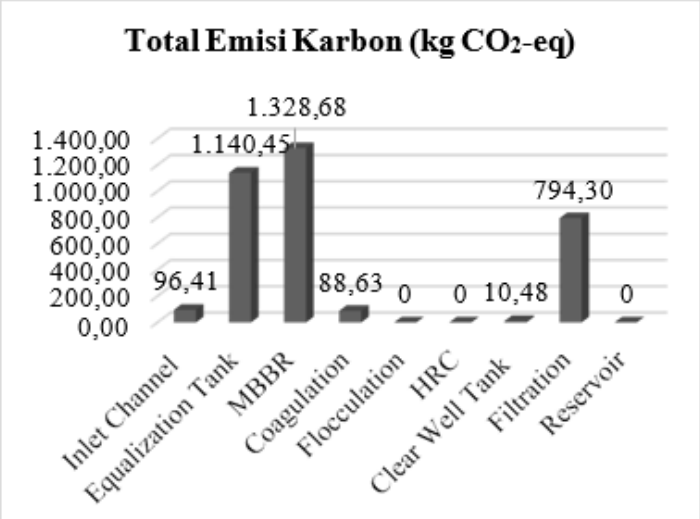
(*air re-use*), antara lain untuk kegiatan penyiraman tanaman di area IPAL X. Unit ini dilengkapi dengan distribution pump yang berperan dalam mengalirkan air dari reservoir ke titik pemanfaatan. Pengoperasian distribution pump memerlukan konsumsi energi listrik, yang berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca. Namun, karena ruang lingkup pada penelitian ini hanya berfokus pada kegiatan operasional IPAL, maka untuk distribusi air *re-use* menggunakan distribution pump tidak diperhitungkan. Karakteristik kimia bahan penyusun media tanam (*red mud* (RM), tanah kebun, dan pupuk kandang) serta media tanam pada uji rentang (reaktor S1-S5 dan kontrol) merupakan faktor penting yang menentukan ketersediaan hara yang mempengaruhi respons fisiologis tanaman selama uji rentang dosis RM. Data karakteristik ini dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi amandemen terhadap karakteristik kimia media tanam.

j. Interpretation

Interpretasi merupakan tahapan akhir dari analisis *Life Cycle Assessment* yang bertujuan untuk mengevaluasi ataupun menjelaskan kesimpulan dari *Life Cycle Inventori* (LCI) dan *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) yang telah dilakukan. Pada tahap ini, diperlukan analisis lebih lanjut untuk mengidentifikasi *hotspot*, yaitu unit proses yang memberikan kontribusi dampak lingkungan paling signifikan dalam keseluruhan sistem pengolahan air limbah di IPAL X.

D. Total Emisi Karbon (CO_2) IPAL X

Dampak *Global Warming Potential* (GWP) merupakan dampak lingkungan yang dianalisis pada penelitian ini. Pemilihan GWP sebagai dampak yang dianalisis didasarkan pada tujuan utama dari penelitian ini, yaitu untuk mengevaluasi jejak karbon pada setiap unit proses pengolahan pada IPAL X. Namun, sebelum mengevaluasi jejak karbon pada masing-masing unit proses pengolahan, perlu dilakukan analisis terhadap total emisi karbon yang dihasilkan pada setiap unit proses pengolahan. Besaran total emisi karbon (CO2) setiap harinya dinyatakan dalam satuan kilogram CO_2 ekuivalen (kg CO_2-eq). Berikut pada Grafik 1 merupakan grafik jumlah emisi karbon setiap harinya yang dihasilkan oleh masing-masing unit pengolahan limbah cair IPAL X.



Gambar 1. Total Emisi Karbon

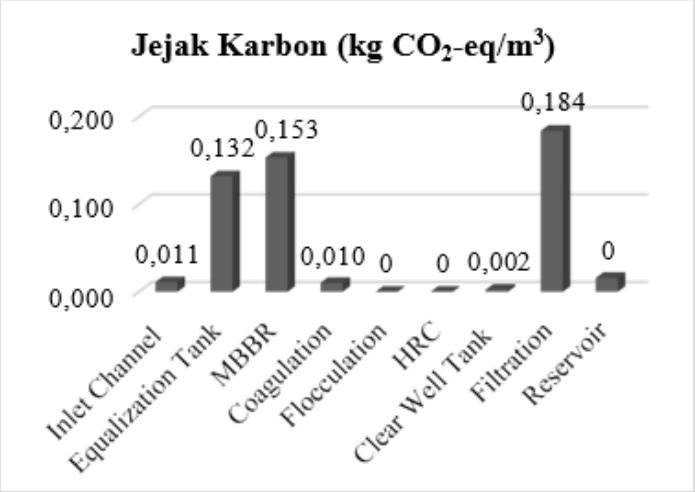
Unit *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) merupakan unit proses pada IPAL X yang memberikan kontribusi tertinggi terhadap emisi karbon. Total emisi karbon yang dihasilkan dalam satu hari oleh unit ini mencapai 1.328,68 kg CO_2-eq, yang terdiri atas 1.281,95 kg CO_2-eq dari konsumsi energi

listrik dan 46,73 kg CO_2-eq dari proses pengolahan biologis secara aerobik. Proses aerobik pada MBBR membutuhkan suplai oksigen yang kontinu, dimana disuplai melalui blower yang beroperasi selama 24 jam tanpa henti. Penggunaan energi listrik yang tinggi untuk operasional blower inilah yang menyebabkan unit MBBR menjadi sumber emisi karbon terbesar di antara seluruh unit pengolahan yang ada pada sistem IPAL X. Dapat disimpulkan bahwa konsumsi listrik pada unit proses pengolahan limbah cair IPAL X berperan besar dalam memberikan emisi karbon.

Selanjutnya, unit bak ekualisasi dan filtrasi ikut serta dalam memberikan emisi karbon dalam sehari yang cukup besar yaitu 1.140,45 kg CO_2-eq dan 794,30 kg CO_2-eq. Emisi ini berasal dari konsumsi energi listrik untuk operasional seperti pencampuran, atau pemompaan. Sementara itu, unit inlet channel, koagulasi, serta clear well tank menunjukkan emisi karbon sebesar 96,41 kg CO_2-eq; 88,63 kg CO_2-eq; 10,37 kg CO_2-eq yang mana secara umum berasal dari konsumsi listrik peralatan penunjang. Pada unit koagulasi, proses yang terjadi pada unit tersebut bersifat kimia dan secara langsung tidak menghasilkan emisi karbon dari reaksi penguraian, namun penggunaan bahan kimia dan konsumsi energi dalam proses tersebut yang menjadi sumber emisi. Unit lainnya seperti *high rate clarifier* (HRC), flokulasi serta reservoir menunjukkan emisi karbon diangka nol, baik secara langsung maupun tidak langsung. Secara keseluruhan, hasil ini menerangkan bahwa unit biologis seperti MBBR merupakan penyumbang utama emisi karbon dalam proses pengolahan air limbah, sementara emisi dari unit fisik dan kimia umumnya bersifat tidak langsung dan tergantung pada penggunaan energi atau bahan kimia tambahan.

E. Jejak Karbon (CO_2) IPAL X

Jejak karbon (carbon footprint) pada IPAL X merupakan total emisi gas rumah kaca (GRK) yang dihasilkan selama proses pengolahan air limbah, yang dinyatakan dalam satuan kilogram setara karbon dioksida per meter kubik (kg CO_2-eq/m^3) setiap harinya. Menurut Wu dkk. (2022), jejak karbon terbagi ke dalam tiga ruang lingkup emisi, yaitu: (1) ruang lingkup 1 yang mencakup emisi langsung (*direct*) yang dihasilkan dari aktivitas operasional internal; (2) ruang lingkup 2 yang mencakup emisi tidak langsung (*indirect*) akibat konsumsi energi listrik atau panas dari luar; dan (3) ruang lingkup 3 yang mencakup emisi tidak langsung lainnya yang berasal dari seluruh rantai nilai (*value chain*), seperti produksi bahan kimia, transportasi, serta pengelolaan limbah produk samping. Berikut pada Grafik 2 merupakan carbon *footprint* pada setiap unit proses pengolahan IPAL X.



Gambar 2. Jejak Karbon Unit Proses IPAL X

Berdasarkan Grafik 2, unit filtrasi memiliki jejak karbon tertinggi dengan total sebesar 0,1840 kg CO_2-eq/m^3, yang seluruhnya berasal dari emisi tidak langsung. Hal ini menunjukkan bahwa unit filtrasi merupakan proses dengan konsumsi energi listrik paling tinggi per satuan volume air limbah yang diolah. Hal ini disebabkan oleh penggunaan pompa bertekanan dan sistem pencucian balik (*backwash*) filter. Unit *Moving Bed Biofilm Reactor* menempati posisi kedua dengan jejak karbon sebesar 0,1534 kg CO_2-eq/m^3, terdiri dari emisi tidak langsung sebesar 0,1480 kg CO_2-eq/m^3 dan emisi langsung sebesar 0,0054 kg CO_2-eq/m^3. *Moving Bed Biofilm Reactor* merupakan unit biologis yang memerlukan suplai udara kontinu melalui *blower*, sehingga konsumsi energi listriknya relatif tinggi. Selanjutnya, unit bak ekualisasi memberikan kontribusi jejak karbon sebesar 0,1320 kg CO_2-eq/m^3, yang seluruhnya berasal dari emisi tidak langsung akibat konsumsi energi listrik. Hal ini disebabkan oleh kebutuhan energi yang tinggi untuk mengalirkan air limbah dari unit ini menuju unit *Moving Bed Biofilm Reactor Line* A dan B menggunakan *Lift Pump*. Proses pemompaan ini berlangsung secara terus-menerus selama 24 jam, dengan volume aliran air yang cukup besar, sehingga menghasilkan konsumsi energi yang signifikan dan berdampak terhadap peningkatan emisi karbon tidak langsung. Unit-unit lainnya, seperti *inlet channel*, koagulasi, dan *clear well tank*, menunjukkan kontribusi jejak karbon yang relatif kecil, yaitu berada dalam kisaran 0,01 hingga 0,02 kg CO_2-eq/m^3. Sementara itu, unit flokulasi, HRC dan reservoir menunjukkan nilai jejak karbon yang sangat rendah yaitu nol, baik dari sumber emisi langsung maupun tidak langsung. Rendahnya nilai emisi pada ketiga unit ini disebabkan oleh tidak adanya aktivitas operasional peralatan penunjang dalam menghasilkan emisi, seperti penggunaan energi listrik, maupun proses biologis.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis *Life Cyle Assessment*, diketahui bahwa pengolahan air limbah pada Instalasi Pengolahan Air Limbah Skala Pekotaan menghasilkan emisi karbon yang cukup besar, terutama dari konsumsi energi listrik pada berbagai unit pengolahan. Hasil analisis *hotspot* berdasarkan Grafik 1 dan Grafik 2 menunjukkan perbedaan unit proses yang paling dominan dalam menyumbang dampak negatif pada lingkungan. Berdasarkan Grafik 1, unit *Moving Bed Biofilm Reactor* merupakan penyumbang terbesar terhadap total emisi karbon, yaitu sebesar 1.328,68 kg CO_2-eq. Sementara itu, pada Grafik 2, unit filtrasi menunjukkan nilai jejak karbon tertinggi, yakni sebesar 0,1840 kg CO_2-eq/m^3. Perbedaan ini disebabkan oleh perbedaan satuan dan fokus analisis pada masing-masing grafik. Grafik 1 menampilkan total emisi karbon yang dihasilkan secara keseluruhan dalam satu hari proses pengolahan air limbah, sehingga unit yang memiliki volume pengolahannya lebih besar, seperti MBBR, dapat memberikan kontribusi emisi yang lebih besar secara akumulatif. Di sisi lain, Grafik 2 menunjukkan jejak karbon dalam satuan per meter kubik air limbah yang diolah, sehingga mencerminkan intensitas emisi per unit volume. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa analisis jejak karbon dan emisi total memberikan dua perspektif yang berbeda namun saling melengkapi dimana Grafik 1 penting untuk perencanaan pengurangan emisi karbon pada seluruh sistem pengolahan air limbah di IPAL X, sedangkan Grafik 2 berguna untuk mengidentifikasi unit proses yang paling tidak efisien dalam mengolah air limbah

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada Pengelola Instalasi Pengolahan Air Limbah X, Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP), serta *stakeholder* lainnya yang telah memberikan dukungan *material* dan *nonmaterial* untuk penelitian ini.

REFERENCES

Badan Pusat Statistik. (2024). Total Population of DKI Jakarta 2024. Badan Pusat Indonesia. https://sulut.bps.go.id/id/statistics-table/2/OTU4IzI=/number-of-population-by-province-in-indonesia.html

National Standardization Agency. (2008). Wastewater Sampling Method. SNI-6989.59.

Horne, Ralph, Tim Grant, Karli Verghese. (2009). Life Cycle Assessment Principles, Practice and Prospects. CSIRO Publishing.

Lui, Jade, Susan Lee, William T.Sloan, Siming You. (2025). Life Cycle Assessment of Drinking Water And Wastewater Treatment Works In Mainland Scotland. Science of the Total Environment, 958, 1-10.

Metcalf and Eddy. (2003). Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery - Fifth Edition. McGraw - Hill Education: United States of America.

Rahmawati, Ekky. (2022). Life Cycle Assessment Analysis to Determine the Environmental Impact of Tofu Production Process in Small Industry "UD. X" Sidojangkung Village, Menganti District, Gresik. Sunan Ampel State Islamic University Surabaya.

Sururi, Mohamad Rangga Sururi a, Mila Dirgawati , Wili Wiliana , Fauzi Fadlurrohman, Hardika, Nining Widiyati. (2023). Performance Evaluation of Domestic Waste Water Treatment System in Urban Indonesia Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 8.

Sun, Yiyue, Yi Zuo, Yanjun SHao, Lihua Wang, Lu an Jiang, Jiaming HU, Chuanting Zhou, Xi Lu, Song Huang, Zhen Zhou. (2024). Carbon Footprint Analysis of Wastewater Treatment Process Coupled With Sludge in Situ Reduction. Water Research, 10 (24), 1 - 10.

Saman, Samsudin, I Made Astra, Uswatun Hasanah. (2023). Review of Domestic Waste Management Model for DKI Jakarta Residents. Journal of Science and Technology, 16 (3), 330-336.

Singh, P., and Kansal, A. (2018). Energy and GHG Accounting for Wastewater Infrastructure. Resources, Conservation and Recycling, 128, 499-507.

Wang, Dan, Weili Ya, Guangxue Wu, Ruoq Li, Yuru Guan, Wei Zhang, Junxia Wang, Yuli Shan and Klaus Hubacek. (2022). Greenhouse Gas Emissions From Municipal Wastewater Treatment Facilities In China From 2006 to 2019, Sci Data 9 (317).

Wu, Ziping, Haoran Duan, Kaili Li, Liu Ya. (2022): A Comprehensive Carbon Footprint Analysis of Different Wastewater Treatment Plant Configurations. Environmental Research, 214.

Zaera, M. Rayhan Putra Zaera, Mochdar Soleman. (2023). Factors and Impacts of Increased Urbanization in DKI Jakarta in 2023. Journal of Wahana Bina Pemerintahan, 6 (1), 38 -42

This journal is © Ladiajanuarygusdi and Syafila, 2025