

Strategi Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca dari Pengolahan Limbah Cair Industri Pulp Secara Aerob (Studi Kasus di Perusahaan X)

Alfian Zurfi*, Desi Wiwin Sibarani

Program Studi Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sumatera, Lampung

*Koresponden email: alfian.zurfi@tl.itera.ac.id

Diterima: 20 Maret 2025

Disetujui: 26 Maret 2025

Abstract

The pulp industry is one of the sectors contributing to climate change, especially through greenhouse gas (GHG) emissions from wastewater treatment. This study aims to estimate the GHG emissions from the aerobic wastewater treatment applied by PT X using the IPCC method and to calculate the potential emission reduction by implementing anaerobic treatment. The results show that the COD concentration of the pulp industry effluent ranges from 500 to 600 mg/L. GHG emissions in the form of CH₄ are considered to be zero since the aerobic process does not produce CH₄, while CO₂ emissions from electricity consumption for the activated sludge aerator are 9.48 tons of CO₂/day. The implementation of anaerobic treatment is proposed as a solution to reduce GHG emissions by reducing electricity consumption and sludge production. Anaerobic treatment also has the potential to produce biogas, which can be used as an energy source for pulp production activities. The potential electrical energy from biogas utilization is estimated to be between 14.88 and 24.34 MWh, which is significant in reducing dependence on non-renewable energy sources while also reducing GHG and air pollutant emissions.

Keywords: *pulp industry, aerobic treatment, anaerobic treatment, greenhouse gas emissions, biogas*

Abstrak

Industri pulp merupakan salah satu sektor yang berkontribusi terhadap perubahan iklim terutama dari emisi gas rumah kaca sektor pengolahan limbah cair. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi emisi gas rumah kaca dari pengolahan limbah cair secara aerob yang diterapkan oleh PT X menggunakan metode IPCC dan menghitung potensi pengurangan emisi melalui penerapan pengolahan anaerob. Hasil penelitian menunjukkan rentang konsentrasi COD limbah cair industri pulp yang akan diolah berada pada rentang 500 hingga 600 mg/L. Emisi gas rumah kaca berupa CH₄ dianggap 0 karena proses aerob tidak menghasilkan metana dan emisi CO₂ dihasilkan dari penggunaan listrik untuk aerator pengolahan *activated sludge* sebesar 9,48 Ton CO₂/hari. Penerapan pengolahan anaerob diusulkan sebagai solusi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca melalui penggunaan listrik yang lebih minim serta produksi lumpur yang lebih sedikit. Pengolahan anaerob juga berpotensi menghasilkan biogas yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi. pemanfaatan CH₄ sebagai sumber energi bagi aktivitas produksi pulp. Besar potensi energi listrik dari pemanfaatan biogas diperkirakan sebesar 14,88 hingga 24,34 MWh sehingga cukup signifikan dalam mengurangi ketergantungan terhadap sumber energi tidak terbarukan dan menekan emisi gas rumah kaca serta polutan pencemaran udara.

Kata Kunci: *industri pulp, pengolahan aerob, pengolahan anaerob, emisi gas rumah kaca, biogas*

1. Pendahuluan

Perubahan iklim merupakan proses alami yang telah terjadi berulang kali sejak awal terbentuknya bumi. Di masa sekarang perubahan iklim terjadi dengan laju yang jauh lebih cepat dibanding masa-masa sebelumnya. Aktivitas manusia diketahui menjadi pendorong utama terjadinya fenomena tersebut. Emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari berbagai aktivitas manusia terlebih sejak masa revolusi industri di akhir abad ke-18 telah meningkatkan suhu permukaan bumi hingga mencapai 1,3°C [1].

Perkembangan industri di satu sisi berperan penting mendukung pertumbuhan ekonomi tetapi di sisi lain juga memberikan tekanan bagi lingkungan. Aktivitas industri merupakan sumber utama emisi gas rumah kaca. Emisi tersebut dapat dihasilkan dari proses penggunaan listrik maupun pengolahan limbah cair [2]. Salah satu industri yang berkontribusi besar terhadap emisi gas rumah kaca yaitu industri pulp. Industri pulp merupakan sektor strategis bagi Indonesia dengan Pulau Sumatera sebagai pusat utama produksinya. Pada tahun 2022 total produksi pulp Indonesia mencapai 60.349.583 metrik ton atau dengan kata lain menyumbang sekitar 16% dari total produksi kayu olahan nasional [3]. Proses produksi pulp tersebut

membutuhkan energi dalam jumlah besar selain juga dihasilkan limbah cair dalam volume dan kandungan bahan organik yang tinggi [4].

Pengolahan limbah cair dapat menjadi sumber emisi langsung gas rumah kaca (CO_2 , CH_4 , dan N_2O) maupun emisi tidak langsung dari penggunaan listrik [2]. Material organik terlarut pada limbah cair umumnya dihilangkan menggunakan proses biologis dengan memanfaatkan mikroorganisme secara aerob maupun anaerob. Mikroorganisme akan mengonsumsi material organik untuk perkembangan dan pertumbuhannya. Hasil dari metabolisme mikroorganisme tersebut akan berwujud biomassa dan padatan berupa lumpur yang akan dikeluarkan dari limbah cair sebelum dibuang ke badan air [5].

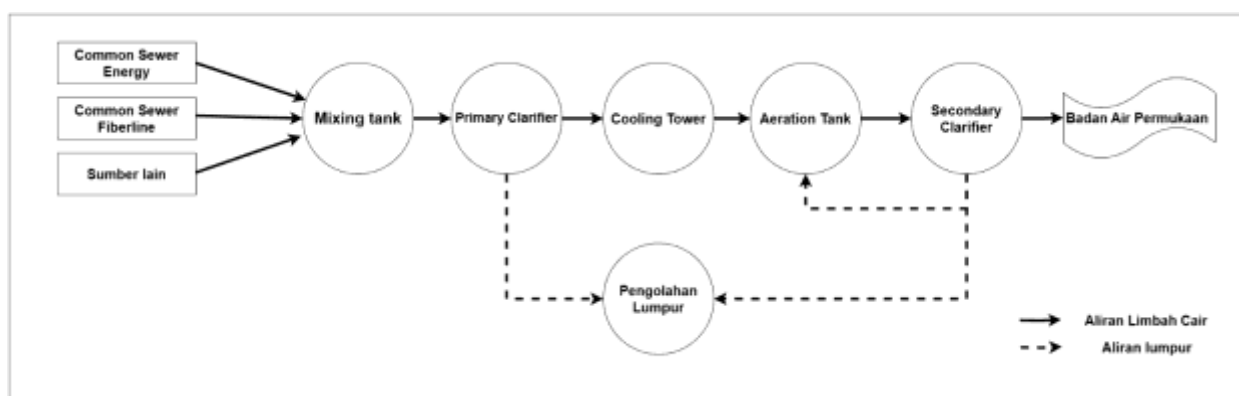
Pengolahan limbah cair secara aerob membutuhkan suplai oksigen yang terus menerus dalam jumlah yang tinggi. Akibatnya kebutuhan energi untuk menghasilkan kualitas limbah cair yang aman bagi lingkungan akan semakin besar [2]. Proses ini merupakan pengguna energi yang utama pada pengolahan limbah cair industri pulp. Sementara itu pengolahan anaerob merupakan suatu proses penguraian material organik pada limbah cair oleh mikroorganisme pada kondisi lingkungan tanpa adanya oksigen yang akan menghasilkan CH_4 dan CO_2 [4]. Meskipun CH_4 termasuk dalam gas rumah kaca dengan *global warming potential* 28 kali lebih tinggi dari CO_2 , pemanfaatannya menjadi sumber energi terbarukan yang dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil sekaligus menurunkan emisi CO_2 dari konsumsi energi listrik. Hal ini tentunya akan mengurangi *carbon footprint* dari pulp yang dihasilkan [5]. Sebagai contoh di Amerika Serikat, untuk produksi 1 ton kertas akan mengemisikan gas rumah kaca rata-rata sebesar 942 kg $\text{CO}_{2\text{eq}}$. Bahkan di beberapa industri pulp dan kertas bisa menghasilkan hingga 1.978 kg $\text{CO}_{2\text{eq}}$ [6].

Meskipun pengolahan anaerob memiliki potensi untuk dikembangkan pada industri pulp di Indonesia namun penerapannya masih terbatas. Oleh karena itu dilakukan penelitian ini dengan tuju untuk mengestimasi emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh PT X, salah satu perusahaan yang memproduksi pulp di Pulau Sumatera. Penelitian ini juga akan mengusulkan strategi pengurangan emisi gas rumah kaca melalui penerapan pengolahan anaerob yang memiliki potensi untuk menghasilkan CH_4 , sebagai sumber energi terbarukan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam mendukung pengurangan emisi pada industri pulp di Indonesia dan dalam pencapaian target pengurangan emisi nasional sesuai *Nationally Determined Contribution*.

2. Metode Penelitian

Lokasi Penelitian

Pada penelitian ini, akan menggunakan data dari PT X, salah satu industri pulp yang berada di Pulau Sumatera. PT X merupakan produsen pulp yang memiliki pengolahan limbah cair secara aerob untuk mengurangi kandungan organiknya. Sistem pengolahan yang digunakan berupa teknologi *activated sludge*. Adapun konfigurasi proses utama pengolahan limbah cair PT X dapat dilihat pada **Gambar 1** berikut:



Gambar 1. Diagram Alir Pengolahan Limbah Cair PT X

Limbah cair dari berbagai sumber akan dialirkan ke *mixing tank* untuk menstabilkan debit maupun kualitas alirannya. Selanjutnya padatan yang terdapat pada limbah cair akan diendapkan pada *primary clarifier* dimana lumpur yang terkumpul akan dialirkan ke fasilitas pengolahan lumpur. Sebelum masuk ke *aeration tank*, limbah cair akan didinginkan pada *cooling tower* agar suhu limbah cair sesuai dengan kondisi optimal bagi mikroorganisme. Setelah dilakukan aerasi maka limbah cair akan diendapkan kembali pada *secondary clarifier*. Adapun lumpur yang dihasilkan pada akan dikembalikan ke *aeration tank* untuk mempertahankan populasi mikroorganisme dan sebagiannya akan dialirkan ke fasilitas pengolahan lumpur. Air hasil proses pengolahan yang telah memenuhi baku mutu akan dibuang ke badan air.

Karakteristik Limbah Cair

Dalam penentuan emisi gas rumah kaca, maka akan menggunakan data karakteristik limbah cair yang mencakup: konsentrasi COD (mg/L) pada air limbah yang dihasilkan dan data debit (m³/jam) pada tahun 2022.

Emisi Gas Rumah Kaca Proses Pengolahan Limbah Cair Secara Aerob

Penelitian ini menggunakan metode IPCC [4] dalam mengestimasi emisi gas rumah kaca yang dihasilkan oleh industri pulp PT X. Adapun persamaan yang digunakan yaitu mencakup:

1. Emisi langsung gas rumah kaca (CH₄)

Emisi CH₄ dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$CH_4 \text{ Emissions} = \sum [(TOW_i - S_i) \cdot EF_i - R_i] \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

Dimana:

TOW = total material organik yang dapat teruraikan dari limbah cair industri (kg COD/tahun)

S_i = komponen organik yang disisihkan dari limbah cair (dalam wujud lumpur) (kg COD/tahun)

EF_i = faktor emisi (kg CH₄/kg COD)

R_i = jumlah CH₄ yang dimanfaatkan atau dibakar (kg CH₄/tahun)

10⁻⁶ = konversi kg ke Gg

2. Emisi tidak langsung (CO₂)

Emisi CO₂ dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$CO_2 \text{ Emissions} = \text{Aktivitas} \cdot EF \quad (2)$$

Dimana:

Aktivitas = Penggunaan listrik (kwh)

EF = faktor emisi (kg CO₂/tahun)

Potensi Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca dengan Proses Pengolahan Limbah Cair Secara Anaerob

Salah satu strategi yang dapat dilakukan dalam pengurangan emisi gas rumah kaca adalah dengan mengubah system pengolahan limbah cair dari proses aerob menjadi anaerob. Potensi pengurangan emisi gas rumah kaca berasal dari penurunan konsumsi energi listrik karena tidak memerlukan aerasi serta pengurangan emisi dari pemanfaatan biogas sebagai sumber energi alternatif.

Penentuan besar CH₄ yang dihasilkan dapat dihitung dengan menentukan seberapa besar COD yang akan disisihkan melalui pengolahan secara anaerob yang nantinya akan dikonversi menjadi biogas. Biogas yang dihasilkan terdiri dari CO₂ dan CH₄ dan akan digunakan untuk keperluan pemenuhan energi bagi PT X. Untuk perhitungan CH₄ akan menggunakan persamaan berikut [7]:

$$CH_4 \text{ Productions} = COD_{\text{removed}} \cdot \text{conversion of COD to biogas} \cdot CH_4 \text{ percentages} \quad (3)$$

Dimana:

COD_{removed} = COD yang disisihkan dari proses pengolahan (kg/hari);

conversion of COD = biogas yang diperoleh berdasarkan COD yang tersisihkan (m³/kgCOD);

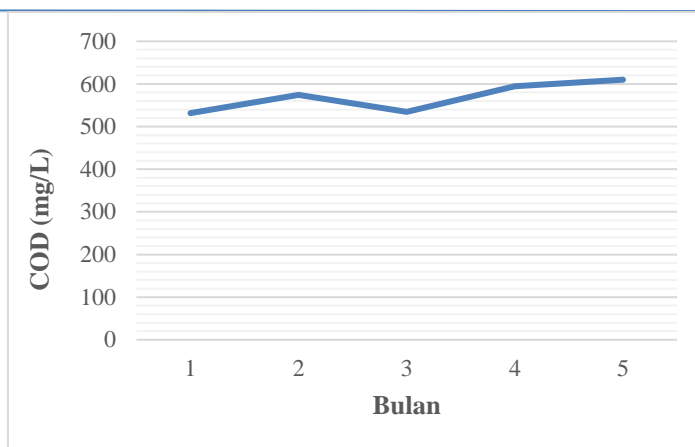
CH₄ percentages = Persentase CH₄ yang terdapat pada biogas (%).

Adapun rentang konversi COD menjadi biogas adalah 0,395 – 0,448 m³/kg COD.

3. Hasil dan Diskusi

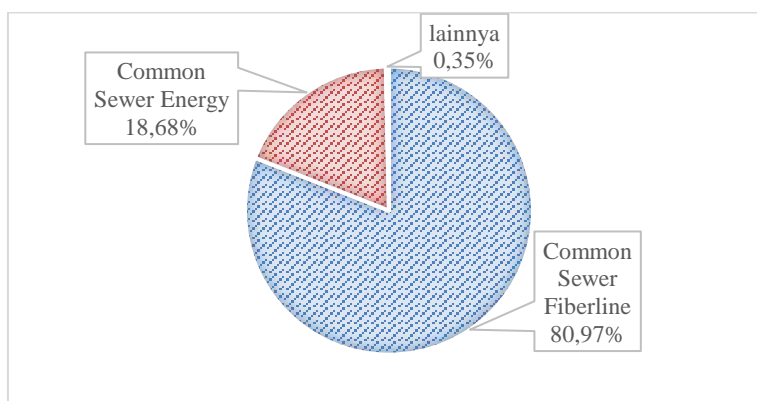
Karakteristik Limbah Cair

Berdasarkan data yang diperoleh dari pengukuran harian selama 5 bulan di PT X, diketahui kandungan COD pada limbah cairnya seperti pada **Gambar 2**. Konsentrasi COD selama waktu pengukuran berada pada rentang 530 – 630 mg/L dengan rata-rata yaitu 569 mg/L yang mana nilai tersebut di atas baku mutu yang ditetapkan sehingga perlu dilakukan pengolahan sebelum dibuang ke badan air. Nilai COD pada limbah cair industri pulp akan dipengaruhi terutama oleh jenis proses yang terdapat di dalam kegiatan produksinya [8].



Gambar 2. Nilai rata-rata bulanan parameter COD Limbah Cair PT X

Untuk debit air limbah yang masuk ke pengolahan yaitu sebesar $1.710 \text{ m}^3/\text{jam}$. Jumlah tersebut berasal dari berbagai aktivitas yang mencakup 3 sumber: proses produksi (pencucian dan pencincangan kayu, penyaringan, dan *pulp machine*) serta proses *chemical* (*bleaching*), proses energi (*evaporator*, *recovery boiler*, *recaustizing*, dan *sealing water*); dan dari aktivitas lainnya, seperti tampak pada **Gambar 3**. Masing-masing sumber memiliki karakteristik yang berbeda baik dalam hal COD, pH, TSS, maupun debit. Oleh karena itu sebelum masuk proses pengolahan akan digabungkan pada unit *mixing chamber* untuk memperoleh debit dan kandungan yang seragam sebelum masuk ke unit pengolahan limbah cair selanjutnya. Debit limbah cair akan bergantung pada kapasitas produksi serta efisiensi proses pengolahan sehingga dapat berbeda-beda antar industri pulp. Di Kanada misalnya untuk memproduksi setiap 1 ton *air-dried pulp* akan dihasilkan juga produk samping berupa limbah cair $20 - 100 \text{ m}^3$ [8].



Gambar 3. Proporsi Sumber Limbah Cair PT X

Emisi Gas Rumah Kaca Dari Proses Pengolahan Limbah Cair Eksisting

PT X menggunakan pengolahan aerobik untuk mengolah limbah cair yang dihasilkan. Teknologi yang digunakan yaitu *activated sludge* yang mana didahului oleh proses pengendapan awal pada *primary clarifier* baru selanjutnya masuk ke *aeration tank* dan kemudian dilanjutkan dengan proses pengendapan kedua pada *secondary clarifier*. Proses ini memiliki efektivitas yang cukup baik dalam menghilangkan kandungan organik pada air limbah yang mencapai 73%. Dengan adanya proses pengolahan tersebut menghasilkan air limbah dengan kualitas yang memenuhi baku mutu pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014.

Di sisi lain terdapat beberapa kekurangan dari proses pengolahan air limbah secara aerobik, yang mencakup: jumlah lumpur yang dihasilkan yang mana berjumlah cukup besar dibanding pengolahan lain dan juga penggunaan energi untuk keperluan aerasi yang cukup besar [9]. Pada panduan terbarunya, IPCC [4] menetapkan bahwa emisi gas rumah kaca dari proses pengolahan limbah cair industri dapat berasal langsung dari pengolahan tersebut maupun dari sumber tidak langsung yang salah satunya dari penggunaan energi. Emisi gas rumah kaca dalam bentuk CH_4 dan N_2O dapat dihasilkan juga dari aktivitas pengelolaan *sludge* yang dihasilkan baik dari proses pengendapan pada *primary clarifier*, *secondary clarifier*, penyaluran dan pengolahan lumpur, penyimpanan lumpur maupun disposasi akhir. Besarnya emisi yang dihasilkan tergantung dari bentuk pengelolaan dan teknologi yang dilakukan oleh industri. Dalam penelitian

ini dikarenakan kurangnya data yang tersedia terutama berkaitan dengan pengelolaan lumpur maka hanya difokuskan pada emisi gas rumah kaca dari aktivitas pengolahan limbah cair.

Oleh karena PT X menggunakan pengolahan limbah cair secara aerobik maka dianggap tidak ada emisi gas rumah kaca berupa CH_4 yang dihasilkan dan emisi CO_2 yang dihasilkan secara langsung merupakan hasil dari aktivitas biogenik (melalui proses biologis) dan dianggap bagian dari siklus karbon alami sehingga tidak perlu diperhitungkan dalam inventarisasi [4] [5]. Walaupun terdapat sejumlah penelitian [8] menyatakan bahwa dalam proses pengolahan limbah cair secara aerobik juga dapat dihasilkan gas rumah kaca tersebut terutama pada pengolahan yang tidak dikelola dengan baik. Akan tetapi IPCC baru mengatur terkait emisi gas rumah kaca (CH_4) dari pengolahan limbah cair aerobik dari sumber domestik sementara untuk sumber industri hanya memperhitungkan emisi dari pengolahan secara anaerob.

Dari emisi tidak langsung difokuskan pada penggunaan listrik sebagai sumber energi aktivitas aerasi maupun untuk penggunaan pompa. Oksigen pada tangki aerasi disuplai oleh aerator yang didistribusi menggunakan pipa-pipa berlubang. Berdasarkan perhitungan diketahui besar emisi CO_2 dari penggunaan listrik pengolahan limbah cair PT X yaitu sebesar: 9,48 Ton CO_2 /hari. Nilai ini diperoleh dari asumsi penggunaan listrik untuk pengolahan limbah cair dengan menggunakan *activated sludge* sebesar 0,3 kwh/ m^3 limbah yang diolah [10]. Jika pengolahan berjalan selama setahun penuh maka emisi yang dihasilkan akan mencapai 3.459,56 Ton CO_2 /tahun.

Potensi Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca dengan Proses Pengolahan Limbah Cair Secara Anaerob

Proses pengolahan anaerob memiliki rentang efisiensi penyisihan yang berbeda tergantung jenis teknologi yang digunakan. Pada penelitian ini menggunakan nilai 73% efisiensi penyisihan atau sama dengan nilai penyisihan COD oleh pengolahan eksisting yang menggunakan pengolahan aerob. Nilai ini juga berada pada rentang efisiensi pengolahan anaerob yang ada.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pengolahan anaerob limbah cair industri pulp PT X akan menghasilkan biogas sebesar 6.765,15 – 7.671,26 m^3 /hari. Konsentrasi CH_4 pada biogas berkisar antara 55 – 75% tergantung efisiensi dan desain proses pengolahan yang digunakan. CH_4 yang dihasilkan akan dimanfaatkan semuanya menjadi energi listrik sehingga jika dihitung menggunakan persamaan IPCC maka emisinya akan bernilai 0. Jika 1 m^3 CH_4 mampu menghasilkan energi setara 10 kWh dan dengan nilai *electric conversion efficiency* sebesar 40% maka potensi energi Listrik yang dihasilkan oleh pengolahan anaerob limbah cair PT X akan berkisar antara 14,83 hingga 24,34 MWh seperti tampak pada **Tabel 1**.

Tabel 1 CH_4 yang dihasilkan serta Nilai Energi listriknya

Biogas (m^3)	Kandungan CH_4		Energi Listrik (MWh)
	%	m^3	
6.765,15	55	3.720,83	14,88
	75	5.073,86	20,30
7.671,26	55	4.219,19	17,85
	75	5.753,44	24,34

Berdasarkan hasil yang diperoleh diketahui bahwa pengolahan anaerob dapat menghasilkan energi listrik yang dapat digunakan untuk aktivitas di PT X. Terlebih industri pulp merupakan salah satu jenis industri yang membutuhkan energi dalam jumlah besar tidak hanya untuk pengolahan limbah cair namun juga untuk aktivitas produksi seperti dalam proses *digester*. Konsumsi energi pada industri pulp umumnya dalam 2 bentuk, yaitu energi listrik (untuk pompa, kompresor, dan lainnya) maupun panas (dalam wujud uap). Konsumsi energi industri kertas dapat mencapai hingga 3 MWh/ton [11].

Proses pengolahan limbah cair secara anaerob akan menghasilkan biogas yang terdiri atas CH_4 dan CO_2 yang merupakan gas rumah kaca selain juga gas lainnya. Seperti pada pengolahan aerob, CO_2 yang dihasilkan dari pengolahan anaerob juga dianggap sebagai bagian dari proses siklus karbon alami sehingga tidak dihitung sebagai emisi gas rumah kaca. Sementara itu CH_4 akan dihitung sebagai emisi gas rumah kaca jika tidak dilakukan pembakaran ataupun pemanfaatannya. Dalam penelitian ini diketahui CH_4 yang diperoleh berkisar antara 3.720,83 - 5.753,44 m^3 per hari. Jika tidak ada pemanfaatan terhadap CH_4 yang dihasilkan dari pengolahan anaerob ini artinya akan diemisikan gas rumah kaca sebesar 2.664,11 - 4.119,46 kg CH_4 /hari (densitas kondisi STP= 0,716 kg/ m^3) atau 74,6 – 115,35 ton $\text{CO}_{2\text{eq}}$ /hari. Nilai ini menunjukkan emisi gas rumah kaca yang jauh lebih besar dibanding pengolahan secara aerob.

Beberapa industri pulp menggunakan pembakaran biomassa baik yang berasal dari sisa produksi maupun *sludge* dari pengolahan limbah cair. Metode ini dapat mengurangi limbah yang dihasilkan disamping mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil tidak ramah lingkungan. Akan tetapi kekurangannya adalah perlunya pemantauan dan pengendalian terhadap pencemaran udara yang dihasilkan. Dengan kata lain dibutuhkan biaya tambahan untuk teknologi pengendalian pencemaran udara pada unit

pembakaran serta pemantauan berkala dan pelaporan ke instansi terkait. Abu sisa proses pembakaran juga perlu dilakukan pengelolaan yang tepat agar tidak membahayakan lingkungan, pekerja, maupun masyarakat sekitar. Hal ini berbanding terbalik dengan pemanfaatan biogas yang minim limbah dan menghasilkan gas yang realtif tidak membahayakan seperti CO₂.

Terdapat kelebihan lain dari pengolahan anaerob diantaranya yaitu lumpur yang dihasilkan dari proses pengolahan jauh lebih rendah dibanding dari proses aerobik. Hal ini berdampak pada kebutuhan listrik untuk pemompaan lumpur menjadi berkurang serta beban pengolahan pada instalasi lumpur maupun penyimpanan dan pengangkutannya. Semua hal tersebut dapat menjadi sumber emisi gas rumah kaca baik berupa CH₄ maupun N₂O secara langsung maupun tidak langsung. Kelebihan lainnya dapat berupa [9]:

- Lebih sedikit membutuhkan nutrient dalam proses pengolahan limbah cair
- Dimensi bangunan pengolahan lebih kecil dibanding menggunakan bangunan pengolahan aerobik
- Mampu mengolah limbah cair dengan organic loading rate 5-10 kali dari pengolahan aerobik
- Membutuhkan energi yang lebih sedikit karena tidak ada proses aerasi
- Mampu mengubah beberapa senyawa pelarut berbahaya menjadi mudah teruraikan seperti: *chloroform*, *trichloroethylene* dan *trichloroethane*.

Di samping kelebihan di atas terdapat beberapa kekurangan dari pengolahan anaerob [9]:

- Waktu *start-up* yang lebih lama dibanding pengolahan aerobik
- Lebih rentan terhadap perubahan lingkungan seperti: pH, suhu, dan lainnya
- Perlu penyisihan sulfat dari limbah cair terlebih dahulu
- Perlu alkalinitas, dan nutrient untuk mikroorganisme metanotrof yang bekerja.

Kebutuhan alkalinitas pada pengolahan anaerob merupakan salah satu sumber emisi gas rumah kaca terutama dari sumber tidak langsung. Emisi gas rumah kaca dari penggunaan alkalin merupakan *off-site emissions*. Emisi ini mencakup yang dihasilkan dari proses produksi dan transportasi alkalin yang akan digunakan. Seperti pada penelitian lain [8] pada penelitian ini juga tidak menghitung emisi gas rumah kaca dari aktivitas *off-site emissions*. Di sisi lain penelitian ini juga tidak memperhitungkan emisi N₂O yang diemisikan dari *activated sludge* dikarenakan keterbatasan data. N₂O merupakan gas rumah kaca utama selain CO₂ dan CH₄ yang memiliki *global warming potential* 298 kali dari CO₂ [1].

Terdapat banyak jenis teknologi pengolahan limbah cair secara anaerob. Beberapa diantaranya: *fixed bed reactor*, *sludge contact process*, *anaerobic up-flow sludge blanket* (UASB), *expanded granular sludge blanket* (EGSB), dan *internal circulation* (IC) *reactors*. Alternatif lain dapat berupa kombinasi antara pengolahan limbah cair secara aerob-anaerob [11]. Masing-masingnya memiliki kelebihan, kekurangan, efisiensi penyisihan COD maupun kuantitas CH₄ yang dihasilkan. Perlu diperhatikan juga dalam penerapan teknologi pengolahan limbah cair yang terpilih terkait pendesainan dan konstruksi yang baik untuk menghindari munculnya emisi *fugitive* akibat kebocoran CH₄.

Kelebihan dan kekurangan tersebut dapat menjadi bahan pertimbangan terkait penggantian pengolahan limbah cair dari proses aerobik menjadi anaerob. Transisi secara langsung mungkin dapat menimbulkan masalah baru sehingga untuk solusi lain yang juga dapat dilakukan untuk pengurangan emisi gas rumah kaca dari pengolahan limbah cair PT X dapat dilakukan berupa optimasi proses aerasi [12] serta pemanfaatan lumpur atau *sludge* sebagai bahan biogas. Saat ini pengolahan lumpur yang dilakukan PT X mencakup: *thickener*, *dewatering* menggunakan *mechanical press*, *disposal* berupa pembakaran maupun aplikasi pada lahan. Semua tahapan proses ini potensial dalam menghasilkan gas rumah kaca, sebagai contoh proses *thickening* dan *dewatering* pada pengolahan lumpur merupakan proses yang dominan dalam mengemisikan gas rumah kaca bahkan hingga 60% [13].

Usaha yang dilakukan berupa pengurangan jumlah maupun menghindari dibuangnya lumpur pengolahan limbah cair industri pulp ke lingkungan termasuk dalam upaya mitigasi perubahan iklim karena akan mengurangi emisi gas rumah kaca ke lingkungan [14]. Begitu pula untuk lumpur yang dihasilkan oleh proses anaerob yang perlu untuk direncanakan penanganannya. Penelitian menunjukkan bahwa *carbon footprint* dari metode pengaplikasian ke lahan (*land application*) untuk lumpur lebih rendah dibanding dengan pemanfaatannya menjadi produk lain seperti pupuk maupun bata [15]. Namun demikian perlu penelitian lebih lanjut terkait seberapa besar emisi yang dihasilkan dari proses eksisting dan potensi pengurangan gas rumah kaca melalui pemanfaatan lumpur pengolahan limbah cair menjadi biogas.

4. Kesimpulan

Proses pengolahan limbah cair industri pulp PT X yang menggunakan pengolahan secara aerobik menghasilkan limbah cair hasil olahan yang telah memenuhi baku mutu dengan efektivitas mencapai 73%. Akan tetapi proses pengolahan menghasilkan gas rumah kaca berupa CO₂ dari emisi tidak langsung aktivitas pemberian oksigen pada *activated sludge* sebesar 9,48 Ton CO₂/hari. Adapun alternatif pengurangan emisi gas rumah kaca dari pengolahan limbah cair yang dapat dilakukan adalah dengan mengganti pengolahan saat ini menjadi pengolahan anaerob yang akan menghasilkan CH₄ sebagai sumber energi mencapai 14,88 hingga 24,34 MWh tergantung pada jenis teknologi dan efisiensi proses pengolahan. Perlu diperhatikan emisi gas rumah kaca lain yang tidak dihitung pada penelitian ini seperti emisi N₂O dari masing-masing alternatif pengolahan maupun emisi dari sumber tidak langsung yang mendukung aktivitas pengolahan.

5. Referensi

- [1] IPCC, Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 2023.
- [2] H. Nayeb, M. Mirabi, H. Motiee, A. Alighardashi, and A. Khoshgard, "A study on estimation of greenhouse gas emissions from industrial wastewater sector in Iran," *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, vol. 13, pp. 64–69, 2020.
- [3] A. Nurprabowo and S. Rahayu, *Investasi Sektor Hilirisasi Hasil Sumber Daya Hutan*, Kementerian Investasi/BKPM, Kajian Strategis Seri Energi Hijau, 2023.
- [4] IPCC, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019.
- [5] Climate Change Division, Office of Atmospheric Programs, U.S. Environmental Protection Agency, Technical Support Document for Industrial Wastewater Treatment: Final Rule for Mandatory Reporting of Greenhouse Gases, June 2010.
- [6] K.E. Tomberlin, R. Venditti, and Y. Yao, "Life cycle carbon footprint analysis of pulp and paper grades in the United States using production-line-based data integration," *BioResources*, vol. 15, no. 2, pp. 3899–3914, 2020.
- [7] T. Bantacut and E. L. Ardhiyansy, "Chemical Oxygen Demand balance and energy recovery in wastewater treatment plant of pulp and paper industry (corrugated board)," *Journal of Natural Sciences Research*, vol. 8, no. 18, 2018.
- [8] O. Ashrafi, L. Yerushalmi, and F. Haghighat, "Wastewater treatment in the pulp-and-paper industry: A review of treatment processes and the associated greenhouse gas emission," *Journal of Environmental Management*, vol. xxx, pp. 1–12, 2015.
- [9] P. Bajpai, *Anaerobic Technology in Pulp and Paper Industry*, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, Springer, 2017. ISBN 978-981-10-4129-7, ISBN 978-981-10-4130-3 (eBook).
- [10] Y. Gu, Y. Li, X. Li, P. Luo, H. Wang, X. Wang, J. Wu, and F. Li, "Energy self-sufficient wastewater treatment plants: feasibilities and challenges," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 3741–3751, 2017.
- [11] H. Berger, N. Shahri, T. Eisenhut, and M. Farghadan, *Energy Efficiency in the Pulp and Paper Industry*, Sino-German Demonstration Project on Energy Efficiency in Industry, Beijing, China, July 2021.
- [12] S. Zetterlund, O. Schwartz, M. Sandberg, and G. Venkatesh, "Computational modelling to advise and inform optimization for aeration and nutrient-dosing in wastewater treatment: Case study from pulp and paper mill in south-central Sweden," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 56, p. 104508, 2023.
- [13] H. Yang, Y. Guo, N. Fang, and B. Dong, "Life cycle assessment of greenhouse gas emissions of typical sewage sludge incineration treatment route based on two case studies in China," *Environmental Research*, vol. 231, p. 115959, 2023.
- [14] P. Faubert, S. Barnabé, S. Bouchard, R. Côté, and C. Villeneuve, "Pulp and paper mill sludge management practices: What are the challenges to assess the impacts on greenhouse gas emissions?" *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 108, pp. 107–133, 2016.
- [15] H. Ci, N. Fang, H. Yang, Y. Guo, X. Mei, and X. Zhao, "A comparison of the carbon footprints of different digested sludge post-treatment routes: A case study in China," *Processes*, vol. 12, no. 1444, 2024.