

Evaluasi Kinerja Sistem Bioreaktor Membran pada Instalasi Pengolahan Lindi (Studi Kasus: TPA Supit Urang, Kota Malang)

Alfina Fadillah dan Agus Slamet

Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

e-mail: agusslamet@enviro.its.ac.id

Abstrak—Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Supit Urang merupakan tempat pemrosesan akhir sampah yang terletak di Kota Malang dengan menggunakan metode *sanitary landfill* sejak tahun 2021. Instalasi Pengolahan Lindi (IPL) TPA Supit Urang menggunakan teknologi bioreaktor membran dengan konfigurasi *sidestream* dan aliran *cross-flow*. Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem bioreaktor membran dengan melakukan pengambilan sampel air lindi TPA Supit Urang dan menganalisis parameter lingkungan yang terkandung pada air lindi. Parameter utama yang digunakan adalah analisis *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biological Oxygen Demand* (BOD), amonium (NH₄-N), dan *Total Suspended Solid* (TSS). Parameter tambahan yang digunakan adalah pH, *Dissolved Oxygen* (DO), SVI, MLSS, dan MLVSS. Analisis kedua parameter tersebut dilakukan selama dua bulan. Penelitian di laboratorium juga bertujuan untuk mengetahui penyebab terjadinya timbunan foaming pada bioreaktor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja bioreaktor membran menurunkan parameter adalah COD sebesar 97%, BOD sebesar 99%, NH₄-N sebesar 100%, dan TSS sebesar 97%. Sehingga, sistem ini mampu untuk menghasilkan efluen yang memenuhi baku mutu. Kemudian, hasil penelitian juga menemukan penyebab dan pencegahan permasalahan timbunan foaming yang terjadi pada bioreaktor membran. Timbunan busa dapat disebabkan oleh beberapa faktor operasional yang terlalu tinggi antara lain HRT, SRT, dan DO. Penyebab lain diperkirakan nilai rasio F/M yang terlalu rendah. Pencegahan timbunan busa selain penggunaan antifoam atau defoamer, perlu dilakukan perubahan nilai parameter operasional antara lain menurunkan SRT menjadi 20-50 hari dan mengatur nilai DO menjadi >2 mg/L untuk tangki denitrifikasi dan 2-4 mg/L untuk tangki nitrifikasi.

Kata Kunci—Air Lindi, Antifoam, Bioreaktor Membran, Instalasi Pengolahan Lindi, Pembusaaan.

I. PENDAHULUAN

SEBAGIAN besar TPA di Indonesia masih menggunakan teknologi pengolahan lindi dengan sistem kolam, yaitu menggunakan kolam penampung, kolam anaerobik, kolam aerobik, kolam stabilisasi, dan dilanjutkan dengan *wetland*. tersebut dipilih berdasarkan dari kesederhanaan dan iklim tropis Indonesia yang cukup panas. Kelemahan dari teknologi tersebut ialah waktu tinggal yang relatif lama yaitu 30-50 hari, membutuhkan lahan yang luas, dan hasil olahan tidak memenuhi baku mutu air lindi [1]. Di Indonesia, baku mutu pembuangan air lindi diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 59 Tahun 2016 tentang Baku Mutu bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah.

Salah satu alternatif dalam mengatasi permasalahan pengolahan air lindi ialah dengan mengembangkan teknologi pengolahan lindi menggunakan bioreaktor membran (BRM). Bioreaktor membran (BRM) adalah teknologi pengolahan air

limbah yang menggunakan kombinasi antara proses biologis untuk mendegradasi air limbah dan proses membran untuk pemisahan biomassa. Peran membran adalah untuk menggantikan peran kolam sedimentasi dalam pemisahan padatan dan cairan pada teknologi pengolahan konvensional (lumpur aktif) [2]. Sistem pengendapan pada bioreaktor membran tidak bergantung pada konsentrasi *mixed liquor suspended solid* (MLSS) dalam bioreaktor seperti pada lumpur aktif. Sistem bioreaktor membran pada awal pengaplikasian dapat beroperasi dengan MLSS mencapai 30 g/L dengan *solid retention time* (SRT) yaitu selama 100 hari [3]. Namun, terdapat beberapa masalah yang dapat ditemukan dalam pengoperasian bioreaktor membran, seperti terjadinya *fouling*, biaya pemeliharaan dan perawatan yang cukup tinggi, dan membutuhkan *pre-treatment* yang sesuai [4].

TPA Supit Urang sebelumnya memiliki pengolahan air lindi konvensional dengan pengolahan air lindi yang terbatas. Sehingga, pengembangan TPA Supit Urang dilakukan melalui program *Emission Reduction in Cities-Solid Waste Management* (ERIC-SMW). Program ini terkait dengan pengelolaan sampah kota dengan membangun *sanitary landfill*. Teknologi yang digunakan dalam pengolahan air lindi di TPA Supit Urang adalah bioreaktor membran dengan konfigurasi *sidestream* dan aliran *cross-flow*. Sejak instalasi pengolahan air lindi di TPA Supit Urang sudah dioperasikan sejak tahun 2021 hingga sekarang belum pernah ada dilakukan evaluasi untuk mengkaji kinerja bioreaktor membran. Kemudian terdapat beberapa kelemahan untuk sistem bioreaktor yang sering ditemukan yaitu pembentukan busa biologis (*foaming*) dan pengotoran membran (*fouling*) [5]. Busa dapat disebabkan oleh usia lumpur yang tinggi, suhu cairan yang tinggi, rasio F/M yang rendah, atau kandungan MLSS yang tinggi. Busa merupakan indikator kecenderungan terjadinya *fouling* [6]. Berdasarkan kondisi tersebut, maka penelitian ini dimaksudkan untuk mengetahui efektivitas kinerja bioreaktor membran dalam mengolah air lindi. Sistem ini diharapkan dapat menyisihkan polutan yang terkandung dalam air lindi dengan beberapa parameter uji yaitu COD, BOD, amonium (NH₄-N), dan TSS. Pada penelitian ini juga akan dilakukan upaya untuk mereduksi timbunan busa (*defoaming*) yang optimal agar memperlambat terjadinya *biofouling*.

II. METODE PENELITIAN

A. Ide Penelitian

Ide penelitian didapatkan dari observasi lapangan pada Instalasi Pengolahan Lindi (IPL) TPA Supit Urang. Evaluasi kinerja bioreaktor membran bertujuan untuk mengetahui efisiensi penggunaan sistem bioreaktor membran dalam

Tabel 1.
Hasil Analisis Kualitas Air Lindi dan Lumpur Bulan Maret 2023

Parameter	Satuan	Influen	Efluen	Baku Mutu
BOD	mg/L	6.086	78,82	150
COD	mg/L	18.600	247,4	300
TSS	mg/L	566	5	100
Raksa (Hg) Total	mg/L	<0,0003 x 10 ⁻¹	<0,0003 x 10 ⁻¹	0,005
Kadmium (Cd)	mg/L	<0,0020	<0,0020	0,1
pH	-	7,55	7,42	6 - 9
Total Nitrogen	mg/L	172,1	9,012	60
MLSS	mg/L	6.800	-	-
MLVSS	mg/L	4.800	-	-
SVI	mL/g	69,52	-	-

mengolah air lindi TPA Supit Urang sehingga dapat menurunkan parameter *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Biological Oxygen Demand* (BOD), amonium (NH₄-N), dan *Total Suspended Solid* (TSS). Selain itu, perlu diperhatikan cara untuk memperpanjang umur membran yaitu dengan mereduksi timbulan *foaming* dan *fouling*. Dari permasalahan tersebut maka diperoleh ide penelitian yaitu “Evaluasi Kinerja Sistem Bioreaktor Membran pada Instalasi Pengolahan Lindi (Studi Kasus: TPA Supit Urang, Kota Malang)”.

B. Studi Referensi

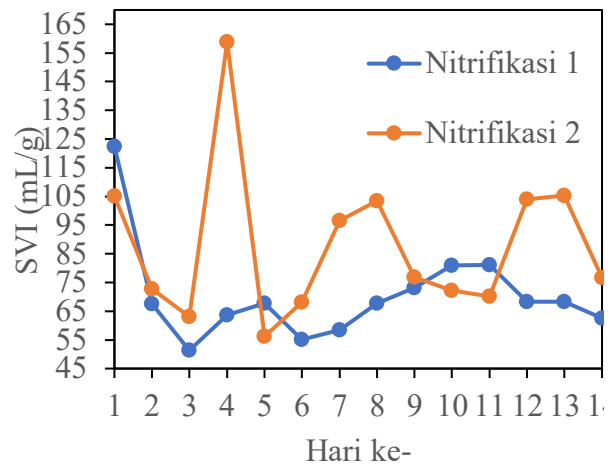
Studi referensi dilakukan untuk mendapatkan tinjauan pustaka sebagai landasan teori yang digunakan pada penelitian akurat. Adapun sumber referensi yang digunakan meliputi peraturan pemerintah, buku bacaan, jurnal/artikel ilmiah, diktat dosen, dan wawancara dengan pihak IPL serta diskusi bersama Dosen Pembimbing.

C. Analisis Karakteristik Awal

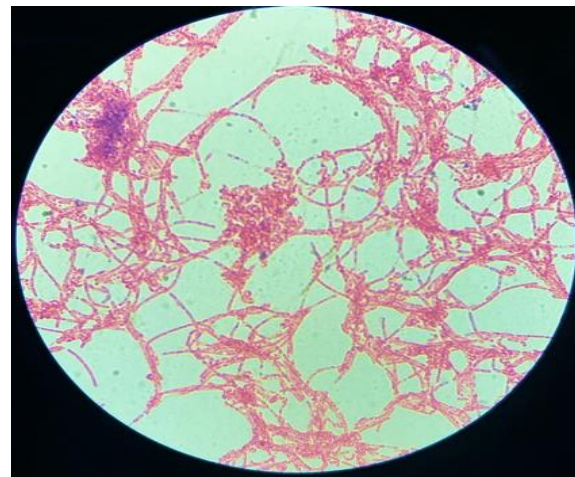
Pada tahap ini, dilakukan pengambilan sampel air lindi dari IPL TPA Supit Urang menggunakan metode pengambilan langsung (*grab sampling*). Pengambilan sampel air lindi dilakukan pada 4 titik yaitu air lindi segar pada MD A (*Measurement Device*), *inlet* bioreaktor, *outlet* bioreaktor, dan efluen bioreaktor membran. Kemudian, dilakukan analisis karakteristik awal bertujuan untuk mengetahui kualitas lindi serta lumpur aktif. Analisis ini menggunakan uji karakteristik yang meliputi BOD, COD, TSS, Raksa (Hg) Total, Kadmium (Cd), pH, dan Total Nitrogen serta uji MLSS, MLVSS, dan SVI pada lumpur aktif.

D. Persiapan Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada persiapan penelitian adalah botol *sampling* berukuran 1 L. Sedangkan alat yang digunakan dalam melakukan penelitian ini adalah *pH meter*, *DO meter*, *furnace*, *oven*, desikator, neraca analitik, *glassware* laboratorium, dan *conductivity meter*. Adapun bahan yang perlu disiapkan adalah sampel air lindi dari TPA Supit Urang. Selain itu, dibutuhkan pula alat berupa toples 5 liter dan pompa aerator yang akan digunakan dalam menganalisis penyebab timbulan busa pada bioreaktor.



Gambar 1. Nilai SVI pada tangki nitrifikasi 1 dan tangki nitrifikasi 2.



Gambar 2. Bakteri type 0803 pada foaming di tangki nitrifikasi (Perbesaran 1000x).

E. Penelitian Laboratorium

Parameter yang dianalisis pada penelitian ini terdiri dari dua parameter yaitu parameter utama dan parameter tambahan. Parameter utama dalam penelitian ini adalah COD, BOD, amonium (NH₄-N), dan TSS. Analisis parameter utama dilakukan pada air lindi segar, *inlet* bioreaktor, *outlet* bioreaktor, dan efluen bioreaktor membran. Analisis parameter tambahan berupa pH, MLSS, DO, dan SVI. Pengujian parameter COD, BOD, amonium (NH₄-N), dan TSS dilakukan satu kali dalam seminggu dan pengujian parameter pH, MLSS, DO, dan MLVSS dilakukan setiap hari selama dua bulan. Pada penelitian laboratorium akan dilakukan pengujian terhadap SVI selama dua minggu. Selain itu, penelitian di laboratorium juga akan dilakukan analisis terhadap penyebab timbulan busa yang terdapat pada bioreaktor.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Kualitas Lindi dan Lumpur

Analisis kualitas pada penelitian pendahuluan bertujuan untuk mengetahui karakteristik dari sampel yang digunakan. Sampel yang digunakan pada penelitian ini merupakan sampel lindi dan lumpur yang berasal dari Instalasi Pengolahan Lindi TPA Supit Urang. Analisis kualitas lindi yang dilakukan sesuai dengan baku mutu PermenLHK No

P.59, 2016 berupa analisis parameter BOD, COD, TSS, Raksa (Hg) Total, Kadmium (Cd), pH, dan Total Nitrogen. Analisis kualitas lindi digunakan untuk mengetahui kondisi sampel sebelum diolah sehingga dapat dibandingkan dengan kondisi sampel yang telah dilakukan pengolahan. Pada analisis kualitas lumpur dilakukan analisis parameter berupa MLSS, MLVSS, dan SVI. Hal tersebut bertujuan untuk mengetahui konsentrasi padatan tersuspensi pada lumpur, sehingga dapat diketahui kualitas dari lumpur yang berada pada bioreaktor. Hasil analisis kualitas air lindi dan lumpur bulan maret 2023 disajikan pada Tabel 1.

B. Penelitian Utama

Pelaksanaan penelitian utama dilakukan sejak tanggal 1 Maret 2023 hingga 30 April 2023 di Laboratorium TPA Supit Urang. Penelitian utama berfokus pada unit bioreaktor membran (BRM) yang berlokasi di Instalasi Pengolahan Lindi TPA Supit Urang, Kota Malang. Pada bioreaktor, terdapat satu tangki denitrifikasi dengan volume 250 m³ dan dua tangki nitrifikasi dengan masing-masing volume ialah 800 m³. Pada penelitian utama, terdapat variasi dalam pengambilan sampel yaitu periode pengolahan dan sumber air lindi. Periode pengolahan pada bioreaktor yang digunakan ialah pada bulan maret 2023. Kemudian, sumber air lindi yang digunakan ialah air lindi segar, inlet bioreaktor, outlet bioreaktor, dan efluen bioreaktor membran.

Variasi pengambilan sampel bertujuan untuk mengetahui efisiensi dari kinerja bioreaktor membran dalam waktu dua bulan dan juga mengetahui fenomena *foaming* yang terjadi pada bioreaktor. IPL TPA Supit Urang menggabungkan metode biologis dan fisik. Pada Step 1 air lindi diolah menggunakan kolam anaerobik kemudian dilanjutkan oleh Step 2 dimana air lindi sudah diolah menggunakan kolam anaerobik dan bioreaktor membran. Sistem bioreaktor membran adalah kombinasi proses biologis (oleh bioreaktor) dan fisik (pemisahan air dari padatan oleh membran).

1) Analisis Konsentrasi Zat Organik

Pada Penelitian ini dilakukan analisis zat organik yaitu analisis COD dan BOD. Analisis COD dan BOD dilakukan selama satu kali dalam seminggu. Analisis COD bertujuan untuk mengetahui penurunan zat organik secara kimiawi pada bioreaktor membran. Berdasarkan hasil analisis parameter COD, nilai rata-rata konsentrasi COD pada air lindi segar, efluen Step 1, dan efluen Step 2 adalah 6.342 mg/L, 612 mg/L, dan 191 mg/L. Nilai konsentrasi COD tertinggi pada air lindi segar, efluen Step 1, dan efluen Step 2 adalah 8.900 mg/L, 693 mg/L, dan 224 mg/L. Sedangkan, nilai konsentrasi COD terendah pada air lindi segar, efluen Step 1, dan efluen Step 2 adalah 2.630 mg/L, 565 mg/L, dan 148 mg/L. Nilai konsentrasi COD dari efluen Step 2 sudah memenuhi baku mutu air lindi sesuai dengan PermenLHK No P.59, 2016 yaitu tidak lebih dari 300 mg/L. Kemudian, efisiensi removal Step 1 yang menggunakan kolam anaerobik dengan rata-rata efisiensi removal adalah 89%. Efisiensi removal pada Step 2 mengalami peningkatan setelah melewati Step 1 yaitu kolam anaerobik dan dilanjutkan Step 2 yaitu bioreaktor membran dengan rata-rata efisiensi removal Step 2 adalah 97%.

Analisis BOD sebagai parameter utama dilakukan untuk mengetahui jumlah oksigen yang dibutuhkan oleh mikroorganisme dalam melakukan oksidasi zat-zat organik menjadi bentuk anorganik yang lebih stabil [7]. Nilai rata-rata

konsentrasi BOD pada air lindi segar, efluen Step 1, dan efluen Step 2 adalah 4.386 mg/L, 303 mg/L, dan 60 mg/L. Nilai konsentrasi BOD tertinggi pada air lindi segar, efluen Step 1, dan efluen Step 2 adalah 5.770 mg/L, 376 mg/L, dan 83 mg/L. Sedangkan, nilai konsentrasi BOD terendah pada air lindi segar, efluen Step 1, dan efluen Step 2 adalah 3.099 mg/L, 206 mg/L, dan 32 mg/L. Nilai konsentrasi BOD dari efluen Step 2 sudah memenuhi baku mutu air lindi sesuai dengan PermenLHK No P.59, 2016 yaitu tidak lebih dari 150 mg/L. Efisiensi removal Step 1 yang menggunakan kolam anaerobik dengan rata-rata efisiensi removal adalah 93%. Terjadi peningkatan efisiensi removal pada Step 2 setelah melewati Step 1 yaitu kolam anaerobik dan dilanjutkan Step 2 yaitu bioreaktor membran dengan rata-rata efisiensi removal Step 2 adalah 99%.

2) Analisis Konsentrasi Nitrogen

Analisis nitrogen yang dilakukan pada penelitian ini adalah analisis amonium-nitrogen. Berdasarkan hasil analisis parameter amonium-nitrogen, terjadi peningkatan efisiensi removal Step 2 dari Step 1 yang menggunakan kolam anaerobik dengan rata-rata efisiensi removal Step 2 adalah 100% sedangkan Step 1 adalah 77%. Nilai rata-rata konsentrasi amonium-nitrogen pada air lindi segar, efluen Step 1, dan efluen Step 2 adalah 1.211 mg/L, 202 mg/L, dan 0 mg/L. Nilai konsentrasi amonium-nitrogen tertinggi pada air lindi segar, efluen Step 1, dan efluen Step 2 adalah 3.400 mg/L, 250 mg/L, dan 0 mg/L. Sedangkan, nilai konsentrasi amonium-nitrogen terendah pada air lindi segar, efluen Step 1, dan efluen Step 2 adalah 500 mg/L, 50 mg/L, dan 0 mg/L. Peningkatan penyisihan amonium-nitrogen yang terjadi pada bioreaktor membran dibandingkan pada kolam anaerobik. Hal tersebut dikarenakan pada bioreaktor terdapat tangki denitrifikasi dan nitrifikasi. Pada tangki nitrifikasi dalam kondisi aerobik, amonium akan dioksidasi menjadi nitrit (nitritasi) dan kemudian menjadi nitrat (nitratasi) melalui perantara nitrit. Kemudian pada tangki denitrifikasi dengan kondisi anoksik, nitrat dihasilkan dari kondisi aerobik yang terdapat pada *retentate sludge* akan mengalami proses denitrifikasi sehingga nitrat akan direduksi menjadi gas nitrogen bebas (N₂). Penurunan nitrogen juga dapat terjadi dikarenakan adanya pengambilan senyawa nitrogen dalam pembentukan sel mikroorganisme (asimilasi) pada kondisi anoksik dan aerobik.

3) Analisis Konsentrasi Total Suspended Solid

Analisis TSS menjadi parameter utama untuk mengetahui padatan tersuspensi yang ada pada air limbah. TSS dapat mempengaruhi kualitas air limbah yang dihasilkan dan mempengaruhi kemampuan membran bioreaktor dalam mengolah air limbah tersebut [8]. Setelah dilakukan analisis parameter TSS maka terjadi peningkatan nilai rata-rata efisiensi removal Step 2 dari Step 1 dan tidak membutuhkan waktu tinggal yang lama yaitu dengan nilai rata-rata efisiensi removal Step 2 adalah 97% sedangkan Step 1 adalah 70%. Nilai rata-rata konsentrasi TSS pada air lindi segar, efluen Step 1 dan Step 2 adalah 1.001 mg/L, 288 mg/L, dan 28 mg/L. Nilai konsentrasi TSS tertinggi pada air lindi segar, efluen Step 1, dan efluen Step 2 adalah 1.660 mg/L, 318 mg/L, dan 39 mg/L. Sedangkan, nilai konsentrasi TSS terendah pada air lindi segar, efluen Step 1, dan efluen Step 2 adalah 760 mg/L, 263 mg/L, dan 18 mg/L. Nilai konsentrasi TSS dari efluen

Step 2 sudah memenuhi baku mutu air lindi sesuai dengan PermenLHK No P.59, 2016 yaitu tidak lebih dari 100 mg/L. Hal tersebut dikarenakan membran menggantikan *secondary clarifier* untuk pemisahan air yang telah diolah oleh bioreaktor. Bioreaktor membran mampu menghilangkan berbagai macam mikroorganisme menggunakan membran MF atau UF yang memiliki ukuran pori-pori yang lebih kecil daripada ukuran mikroorganisme [9].

C. Penyebab Timbulan Foaming

Foaming atau pembusaan yang dapat diakibatkan oleh bakteri *filamentous* yaitu *Nocardioform*, *Microthrix parvicella*, atau bakteri berfilamen lainnya yang terdapat pada bioreaktor membran seperti pada CAS dan *secondary clarifier* [10]. Pertumbuhan mikroorganisme dapat didorong oleh SRT dan HRT yang tinggi, suhu yang hangat, rasio F/M yang rendah, dan konsentrasi MLSS yang tinggi [11]. Selain itu, SVI juga dapat digunakan untuk mengukur konsentrasi biomassa yang berlebihan pada permukaan air limbah sehingga menyebabkan masalah seperti *foaming*.

1) Rasio Food to Microorganism (F/M)

Timbulnya *foaming* dapat diakibatkan oleh rasio F/M yang tidak seimbang [11]. Karena dispersi yang tinggi, rasio F/M yang tinggi membuat lingkungan di mana bakteri tidak akan membentuk flok padat yang baik dan besar sehingga memicu pembusaan. Sedangkan jika rasio F/M terlalu rendah dimana biomassa terlalu banyak dibandingkan dari nutrisi yang masuk sehingga bakteri kekurangan makanan dan menyebabkan bakteri mati. Berdasarkan hasil perhitungan rasio F/M, didapatkan nilai rata-rata rasio F/M pada tangki nitrifikasi 1 dan tangki nitrifikasi 2 adalah 0,0247 gBOD/gVSS.hari dan 0,0298 gBOD/gVSS.hari. Nilai rasio F/M tertinggi pada tangki nitrifikasi 1 dan tangki nitrifikasi 2 adalah 0,0350 g BOD/g VSS.hari dan 0,0650 s g BOD/g VSS.hari. Sedangkan, nilai rasio F/M terendah pada tangki nitrifikasi 1 dan tangki nitrifikasi 2 adalah 0,0164 g BOD/g VSS.hari dan 0,0186 g BOD/g VSS.hari. Nilai rasio F/M yang optimal pada bioreaktor membran adalah 0,1 – 0,3 g BOD/g VSS.hari. Sehingga, nilai rasio F/M pada bioreaktor membran di IPL TPA Supit Urang sangat rendah dari nilai rasio F/M yang optimal. Oleh karena itu, bakteri yang berada pada bioreaktor kekurangan nutrisi dan menyebabkan kematian sehingga timbulnya *foaming* pada bioreaktor.

2) Sludge Volume Index (SVI)

Karakter pengendapan lumpur aktif dapat dievaluasi dengan *Sludge Volume Index* (SVI). SVI antara 80 dan 120 mL/g biasanya mengindikasikan padatan sekunder yang mengendap dengan baik [12]. SVI yang lebih besar dari 150 mL/g mengindikasikan adanya padatan yang mengendap dengan buruk. Setelah dilakukan uji SVI selama 14 hari, maka didapatkan nilai rata-rata SVI dari tangki nitrifikasi 1 dan tangki nitrifikasi 2 adalah 70,61 mL/g dan 87,80 mL/g. Pada Gambar 1, nilai SVI pada tangki nitrifikasi 2 terjadi peningkatan pada hari ke-4 yaitu 158,84 mL/g. Sedangkan pada tangki nitrifikasi 1, nilai SVI tertinggi pada hari ke-1 yaitu 122,45 mL/g. Perubahan signifikan pada hari ke-1 di tangki nitrifikasi 1 dan hari ke-4 di tangki nitrifikasi 2 yang terjadi dapat menjadi penyebab terjadinya *foaming*. Penurunan nilai SVI menunjukkan adanya peningkatan kepadatan lumpur aktif di dalam bioreaktor yang dapat

memicu pertumbuhan bakteri berfilamen dan menghasilkan lebih banyak busa.

3) Bakteri Filamentous

Identifikasi bakteri pada sampel *foaming* di tangki nitrifikasi dilakukan untuk mengetahui jenis bakteri berfilamen yang menyebabkan *foaming*. Adapun jenis bakteri berfilamen yang berada pada sampel *foaming* di tangki nitrifikasi adalah bakteri Type 0803. Type 0803 termasuk kedalam filum *Chloroflexi* dan 20% dari total populasi *Chloroflexi* [13]. Bakteri Type 0803 merupakan bakteri *gram-variable* yang memiliki bentuk sel yang persegi dan tidak bercabang. Bakteri ini biasanya gram negatif, tetapi kadang-kadang *gram-variable* [14].

Foaming pada bioreaktor berasal dari protein ekstraseluler yang memiliki sifat agen aktif di permukaan air[11]. EPS merupakan produk mikroba dari proses metabolisme dan autolisis sel. Keberadaan bakteri berfilamen dapat meningkatkan konsentrasi EPS dalam *mixed liquor* sehingga menyebabkan terjadinya peningkatan *foaming* pada bioreaktor dan *biofouling* pada membran. Bakteri berfilamen memiliki pengaruh yang signifikan terhadap pengotoran biologis pada membran (*biofouling*) sehingga mempengaruhi fluks dan TMP pada membrane. Gambar 2 menyajikan bakteri tipe 0803 pada *foaming* di tangki nitrifikasi.

D. Pencegahan Timbulan Foaming

Pencegahan *foaming* pada bioreaktor perlu dilakukan untuk menjaga kinerja bioreaktor dan meminimalisir dampak negatif yang ditimbulkan. Terdapat beberapa cara dalam mencegah adanya timbulan *foaming* seperti menjaga kondisi operasional bioreaktor membran terutama suhu, pH, dan DO. Selain itu, menurunkan SRT dan HRT serta menjaga rasio f/m agar tetap seimbang. Kemudian, pencegahan *foaming* dapat dilakukan secara kimiawi dengan menggunakan *antifoam* atau *defoamer*.

Pada tangki nitrifikasi 1 dan tangki nitrifikasi 2 bioreaktor membran di IPL TPA Supit Urang, terdapat sensor dan *antifoam spray nozzles* dipasang diatas tangki. *Antifoam spray nozzles* yang berfungsi untuk mencegah terjadinya *foaming* atau mengatasi *foaming* yang sudah terjadi dengan cara menyemprotkan *anti-foam agent* ke permukaan busa. Sensor dapat mendeteksi jika terjadi *foaming* yang berlebih pada bioreaktor sehingga *antifoam spray nozzles* akan otomatis menyemprotkan *anti-foam agent* ke dalam tangki. *Anti-foam* yang digunakan berbahan dasar silikon yaitu Pay Off Antifoam AF-22. Dosis *antifoam* yang digunakan saat ini adalah 50 mL/jam.

E. Kondisi Operasional Bioreaktor Membran

Aktivitas mikroba bergantung pada parameter seperti komposisi air lindi, fluks, TMP, pH, suhu, DO, waktu retensi hidraulik (HRT), dan waktu retensi lumpur (SRT). Sangat penting untuk mengetahui efek dari setiap parameter untuk mencapai kondisi optimal di dalam bioreaktor membran sehingga mendapatkan limbah berkualitas tinggi dengan gangguan proses yang minimal, seperti pengotoran membran (*fouling*) [15].

1) Fluks dan Transmembrane Pressure (TMP)

TMP adalah kekuatan pendorong untuk filtrasi melalui membran. Fluks merupakan jumlah volume *permeate* yang melewati satuan luas membran dalam waktu tertentu dengan

menggunakan gaya dorong berupa tekanan. Setelah dilakukan perhitungan terhadap fluks dan TMP selama 14 hari, maka didapatkan nilai rata-rata fluks dan TMP. Nilai rata-rata fluks adalah 70,16 LMH dengan nilai tertinggi dan terendah adalah 76,59 LMH dan 67,40 LMH. Kemudian, nilai rata-rata TMP adalah 2,12 bar dengan nilai tertinggi adalah 3,07 bar dan nilai terendah adalah 0,13 bar. Secara umum, semakin tinggi fluks dan TMP maka semakin besar tekanan yang diperlukan untuk mendorong cairan melalui membran dan semakin besar kemungkinan terjadinya *fouling* serta kerusakan pada membran. Oleh karena itu, penting untuk memantau dan mengontrol fluks dan TMP agar tidak melebihi batas yang direkomendasikan oleh produsen membran. Nilai fluks optimal membran ultrafiltrasi pada bioreaktor membran di IPL TPA Supit Urang adalah di atas 70 LMH dan nilai TMP tidak lebih dari 5 bar. Jika nilai fluks di bawah 70 LMH, akan terdapat peringatan pada SCADA/PLC dan diperlukan pemeriksaan secara langsung untuk mengetahui penyebab terjadinya penurunan fluks.

2) Suhu Operasi

Suhu tertinggi pada tangki nitrifikasi 1 dan tangki nitrifikasi 2 adalah 37,01°C dan 36,95°C. Sedangkan, suhu terendah dari masing-masing tangki nitrifikasi 1 dan tangki nitrifikasi 2 adalah 30,79°C dan 30,65°C. Rata-rata suhu pada tangki nitrifikasi 1 dan tangki nitrifikasi 2 adalah 34,87°C dan 34,83°C. Bioreaktor membran di IPL TPA Supit Urang menggunakan *heat exchanger* untuk mengontrol dan menjaga suhu yang berada di bioreaktor. Pada bioreaktor juga terdapat sensor suhu sehingga jika suhu pada bioreaktor berubah di bawah ataupun di atas suhu 32 °C – 40 °C maka *heat exchanger* akan otomatis menyala. Suhu mempengaruhi deflokulasi, difusivitas, biodegradasi, dan adsorpsi pada bioreaktor membran. Ketika suhu air tinggi, viskositas akan rendah, menghasilkan permeabilitas yang lebih tinggi. Suhu yang lebih rendah juga menyebabkan lebih sedikit biodegradasi bahan organik. Sehingga, suhu yang stabil direkomendasikan untuk mengoperasikan bioreaktor membran [16].

3) pH

Laju nitrifikasi yang optimal terjadi pada nilai pH di kisaran 7,5 hingga 8,0 [10]. Laju oksidasi amonia menurun secara signifikan pada nilai pH di bawah 7,0. Nilai pH tertinggi pada masing-masing tangki nitrifikasi 1 dan tangki nitrifikasi 2 adalah 8,21 dan 8,20. pH terendah dari tangki nitrifikasi 1 dan tangki nitrifikasi 2 adalah 6,54 dan 7. Dengan rata-rata pH pada tangki nitrifikasi 1 dan tangki nitrifikasi 2 pada bioreaktor di IPL TPA Supit Urang adalah 7,55 dan 7,53. Pada kedua tangki nitrifikasi memiliki pH meter yang memiliki sensor dimana jika pH berada di atas maupun di bawah nilai pH 6,5 - 8 maka akan otomatis diberikan peringatan ke SCADA. Dengan nilai pH 6,5 - 8 maka dapat mempertahankan keseimbangan mikroorganisme pada tangki nitrifikasi.

Bakteri denitrifikasi memiliki pH optimal berkisar antara 7,5 hingga 9,5. Pada pH yang lebih rendah, aktivitas denitrifikasi melambat [17]. Jika pH terus meningkat, maka bakteri denitrifikasi dapat mati karena kelebihan pH dapat merusak struktur protein dan enzim pada sel bakteri. Hal ini dapat menyebabkan terhentinya proses denitrifikasi. pH tertinggi pada tangki denitrifikasi bioreaktor di IPL TPA Supit

Urang adalah 8,06 sedangkan pH terendah adalah 7,96. Rata-rata pH tangki denitrifikasi adalah 8,023. Sehingga, pH pada tangki denitrifikasi jika dijaga pada tingkat yang optimal, maka bakteri denitrifikasi dapat secara efektif mengubah nitrat (NO_3^-) menjadi nitrogen gas (N_2) melalui proses denitrifikasi.

4) Dissolved Oxygen (DO)

Konsentrasi *dissolved oxygen* (DO) dalam tangki aerasi harus dipertahankan sekitar 1,5 hingga 2 mg/L di semua area tangki aerasi. Nilai DO di atas 4 mg/L menghasilkan sedikit atau tidak ada peningkatan kinerja, tetapi meningkatkan biaya aerasi secara signifikan dan berpotensi mengakibatkan pertumbuhan organisme berbusa (*foaming organism*) [10]. Konsentrasi DO tertinggi pada tangki nitrifikasi 1 dan tangki nitrifikasi 2 adalah 6,55 mg/L dan 7 mg/L. Konsentrasi DO terendah pada tangki nitrifikasi 1 dan tangki nitrifikasi 2 adalah 2,06 mg/L dan 2,02 mg/L. Kemudian, untuk nilai rata-rata konsentrasi DO dari masing-masing tangki nitrifikasi 1 dan tangki nitrifikasi 2 adalah 4,08 mg/L dan 3,79 mg/L. Data tersebut didapatkan dari sensor DO yang berada pada masing-masing tangki nitrifikasi dimana ditempatkan pada masing-masing *jet pump* yang berada di sebelah dari bioreaktor. Jika nilai konsentrasi DO berada di bawah 2 mg/L, maka *blower* akan otomatis langsung menyala. Sebaliknya, jika nilai konsentrasi DO berada di atas 4 mg/L, maka *blower* akan otomatis padam.

Pada kondisi anoksik ditandai dengan jumlah konsentrasi DO dibawah 2 mg/L [10]. Dengan konsentrasi DO tersebut maka terjadi proses denitrifikasi pada kondisi anoksik. Pada tangki denitrifikasi tidak terdapat sensor DO seperti yang terdapat di tangki nitrifikasi sehingga dilakukan pengukuran DO secara langsung dengan menggunakan *DO meter*. Nilai rata-rata konsentrasi DO pada tangki denitrifikasi fase 1 dan tangki denitrifikasi fase 2 adalah 4,62 mg/L dan 2,1 mg/L. Nilai DO yang tinggi pada tangki denitrifikasi 2 dikarenakan aerasi yang berlebih dan menghasilkan *return activated sludge* (RAS) yang masih memiliki konsentrasi DO yang terlalu tinggi. Sehingga, RAS yang dikembalikan ke bioreaktor pada tangki denitrifikasi memiliki konsentrasi DO yang tinggi juga.

5) Solids Retention Time (SRT) dan Hydraulic Retention Time (HRT)

Berdasarkan hasil perhitungan SRT, bioreaktor di IPL TPA Supit Urang memiliki nilai SRT yang sangat tinggi yaitu 900 – 3.200 hari dikarenakan tidak dilakukan pembuangan lumpur dari proses pemisahan padatan di membran ultrafiltrasi. Seluruh RAS dikembalikan ke dalam bioreaktor. Sehingga diperlukan untuk melakukan pembuangan terhadap sebagian lumpur yang telah dihasilkan dari proses pemisahan padatan di membran. Dengan total volume dari bioreaktor adalah 1.850 m³ dan debit influen air lindi yang masuk ke bioreaktor adalah 12,5 m³/jam maka didapatkan nilai *Hydraulic Retention Time* (HRT) adalah 148 jam atau 6,17 hari. Nilai HRT tersebut sangat tinggi untuk bioreaktor membran. Bioreaktor membran membutuhkan HRT yaitu 12 jam agar menghindari terjadinya *fouling* [18]. HRT yang tinggi pada bioreaktor membran dapat menyebabkan *fouling* karena semakin lama waktu tinggal cairan di dalam membran, semakin banyak pula partikel padatan yang tertahan dan menumpuk pada permukaan membran. Jika partikel padatan

tidak dihilangkan secara teratur, maka akan menyumbat membran dan mengurangi efisiensi dari proses pemisahan padatan.

6) Pembersihan pada Membran

Pembersihan membran adalah bagian penting dari operasi pada bioreaktor membran yang secara signifikan mempengaruhi kinerja membran. Terdapat dua jenis pembersihan pada membran yaitu pembersihan fisik (*physical cleaning*) dan pembersihan kimiawi (*chemical cleaning*) [19]. Pengoperasian bioreaktor membran yang berkelanjutan bergantung pada pembersihan fisik melalui bilas (*rinse*) dan pembilasan balik (*backflushing*), atau kombinasi keduanya dan dilengkapi pembersihan kimiawi secara berkala dengan *clean in place* (CIP). Membran di IPL TPA Supit Urang otomatis melakukan pembersihan fisik dengan pembilasan balik (*backflushing*) dan bilas (*rinse*) setelah melakukan pemisahan padatan yang berasal dari bioreaktor. Selain itu, CIP dilakukan dengan kombinasi pembersihan fisik dan pembersihan kimiawi dilakukan setiap satu bulan sekali oleh operator. Pembersihan kimiawi menggunakan dua reagen kimia yaitu pembersihan asam (*acid cleaning*) dan pembersihan alkali (*alkaline cleaning*). Pembersihan asam menggunakan EON CIP 200 dengan tujuan untuk menghilangkan pengotoran anorganik yang disebabkan oleh pengendapan kimiawi bahan anorganik. Pembersihan alkali menggunakan EON CIP 101 dengan tujuan dapat menghilangkan kotoran organik yang mengendap pada permukaan membran.

IV. KESIMPULAN

Kinerja sistem bioreaktor membran dalam mengolah air lindi TPA Supit Urang mampu menurunkan parameter adalah COD sebesar 97%, BOD sebesar 99%, NH₄-N sebesar 100%, dan TSS sebesar 97%. Dengan kinerja ini, sistem bioreaktor mampu menghasilkan efluen IPL yang memenuhi baku mutu yang dipersyaratkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor P.59/Menlhk/Setjen/Kum.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah. Kemudian, timbul busa yang terjadi di bioreaktor disebabkan oleh beberapa faktor operasional yang terlalu tinggi antara lain HRT, SRT, dan DO. Penyebab lain diperkirakan nilai rasio F/M yang terlalu rendah. Pencegahan timbul busa selain menggunakan *antifoam* atau *defoamer*, perlu dilakukan perubahan nilai parameter operasional antara lain menurunkan nilai SRT dan mengatur nilai DO sesuai dengan standar operasional yang berlaku. 3. Kondisi operasional bioreaktor dapat dievaluasi dengan menggunakan parameter fluks dan TMP, suhu operasi, pH, DO, SRT, dan HRT, serta metode yang digunakan dalam pembersihan pada membran. Nilai rata-rata dari masing-masing parameter adalah 70,77 LMH untuk fluks, 2,47 bar untuk TMP, 34,85°C untuk suhu operasi, 7,54 untuk pH, 3,93 mg/L untuk DO, 900 – 3.200 hari untuk SRT, dan 6,17 hari untuk HRT.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Sururi, Mohamad Rangga and Ainun, Siti and Krisna, "Pengolahan lindi dengan proses oksidasi lanjut berbasis ozon," Reaktor, vol. 15, no. 1, pp. 20-26, Diponegoro University, 2014, doi: 10.14710/reaktor.15.1.20-26.
- [2] A. M. Yakobus, "Aplikasi Bioreaktor Membran pada Pengolahan Air Limbah dan Lindi TPA," Department of Chemical Engineering, Bandung Institute of Technology, 2016.
- [3] S. Bui, Xuan-Thanh and Chiemchaisri, Chart and Fujioka, Takahiro and Varjani, *Water and Wastewater Treatment Technologies*. Springer, 2019.
- [4] R. Wenten, IG and Khoiruddin, K and Harimawan, A and Ting, YP and Boopathy, "Membrane biosorption: recent advances and challenges," *Curr. Pollut. reports*, vol. 6, pp. 152–172, doi: 10.1007/s40726-020-00145-5.
- [5] Gayatri D. Gawande and Rucha Dandekar and Omparv Channa and Harshali Birari, "Troubleshooting foaming in membrane bioreactor: review of foam analysis, causes and remedies," *Int. J. Recent Technol. Eng.*, 2021, doi: 10.35940/ijrte.d6591.1110421.
- [6] T. Johansson, "Application of Membrane Bioreactors in the Pulp and Paper Industry," *Department of Information Technology, Uppsala University*, 2012.
- [7] A. Angrianto, Novaldi and Manusawai, Jacob and Sinery, "Analisis kualitas air lindi dan permukaan pada areal TPA Sowi Gunung dan sekitarnya di Kabupaten Manokwari Papua Barat," *CASSOWARY*, vol. 4, no. 2, pp. 221–233, 2021, doi: 10.30862/cassowary.cs.v4.i2.79.
- [8] C. Q. Ahmed, Farah Naz and Lan, "Treatment of landfill leachate using membrane bioreactors: A review," *Desalination*, vol. 287, pp. 41–54, 2012, doi: 10.1016/j.desal.2011.12.012.
- [9] G. Mutamim, Noor Sabrina Ahmad and Noor, Zainura Zainon and Hassan, Mohd Ariffin Abu and Yuniarto, Adhi and Olsson, "Membrane bioreactor: applications and limitations in treating high strength industrial wastewater," *Chem. Eng. J.*, vol. 225, pp. 109–119, 2013, doi: 10.1016/j.cej.2013.02.131.
- [10] G. Metcalf, Eddy and Tchobanoglous, "Microbial Growth Kinetic," *Wastewater Eng. Treat. Resour. Recover. fifth ed. McGraw-Hill Educ. United States*, p. 598, 2014, isbn:9780073401188.
- [11] G. Di Bella, Gaetano and Torregrossa, Michele and Viviani, "The role of EPS concentration in MBR foaming: Analysis of a submerged pilot plant," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, pp. 1628–1635, 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2010.09.028.
- [12] M. H. Gerardi, *Settleability Problems and Loss of Solids in the Activated Sludge Process*. John Wiley & Sons, 2003, isbn:9780471471646.
- [13] A. Milobkedzka, Aleksandra and Muszynski, "Differences in populations of filamentous bacteria involved in foaming and bulking of activated sludge," *Challenges Mod. Technol.*, vol. 6, no. 3, pp. 30–33, 2015, corpus id:113460254.
- [14] P. H. Kragelund, Caroline and Thomsen, Trine Rolighed and Mielczarek, Artur Tomasz and Nielsen, "Eikelboom's morphotype 0803 in activated sludge belongs to the genus *Caldilinea* in the phylum Chloroflexi," *FEMS Microbiol. Ecol.*, vol. 76, no. 3, pp. 451–462, 2011, doi: 10.1111/j.1574-6941.2011.01065.x.
- [15] J. Bhattacharyya, Anisha and Liu, Lei and Lee, Kenneth and Miao, "Review of biological processes in a Membrane Bioreactor (MBR): effects of wastewater characteristics and operational parameters on biodegradation Efficiency When Treating Industrial Oily Wastewater," *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 9, p. 1229, 2022, doi: 10.3390/jmse10091229.
- [16] V. and others Rahman, Tanzim Ur and Roy, Hridoy and Islam, Md Reazul and Tahmid, Mohammed and Fariha, Athkia and Mazumder, Antara and Tasnim, Nishat and Pervez, Md Nahid and Cai, Yingjie and Naddeo, "The advancement in membrane bioreactor (MBR) technology toward sustainable industrial wastewater management," *Membranes (Basel)*, vol. 13, no. 2, p. 181, 2023, doi: 10.3390/membranes13020181.
- [17] B. Albina, Pierre and Durban, Nadege and Bertron, Alexandra and Albrecht, Achim and Robinet, Jean-Charles and Erable, "Influence of hydrogen electron donor, alkaline pH, and high nitrate concentrations on microbial denitrification: a review," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 20, no. 20, p. 5163, 2019, doi: 10.1016/j.ijenvman.2020.111859.
- [18] K. Yu, Dawei and Chen, Yutao and Wei, Yuansong and Wang, Jianxing and Wang, Yawei and Li, "Fouling analysis of membrane bioreactor treating antibiotic production wastewater at different hydraulic retention times," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 24, pp. 9026–9035, 2017, doi: 10.1007/s11356-015-5751-5.
- [19] M. N. Z. Ladewig, Bradley and Al-Shaeli, Muayad Nadhim Zeman and Ladewig, Bradley and Al-Shaeli, "Fouling in membrane bioreactors," *Fundam. Membr. Bioreact. Mater. Syst. Membr. Fouling*, pp. 39–85, 2017, doi: 10.1007/978-981-10-2014-8_3.

[1] A. Sururi, Mohamad Rangga and Ainun, Siti and Krisna, "Pengolahan lindi dengan proses oksidasi lanjut berbasis ozon," Reaktor, vol. 15, no.