

# Optimasi Instalasi Pengolahan Air Limbah Industri Pemerahan Sapi Menggunakan *Moving Bed Biofilm Reactor*

Adhiola Kusumoningrat Nugroho dan Eddy Setiadi Soedjono

Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

*e-mail*: soedjono@enviro.its.ac.id

**Abstrak**—Instalasi Pengolahan Air Limbah Industri Pemerahan Sapi dengan sistem lumpur aktif seringkali mengalami masalah, salah satunya adalah masalah *sludge bulking*. Permasalahan *sludge bulking* menyebabkan pengendapan lumpur sangat buruk dan lumpur aktif melimpah menuju outlet bak sedimentasi menuju unit selanjutnya. Hal ini mengakibatkan kualitas pengolahan lumpur aktif tidak berjalan optimal dan hasil pengolahan masih sering keruh dan berbau. Salah satu solusi untuk mengurangi kondisi *sludge bulking* adalah penggunaan *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR). Pertumbuhan mikroorganisme akan menerapkan sistem terlekat pada media MBBR, sehingga produksi lumpur dapat berkurang, kualitas pengendapan lumpur lebih baik, dan mengurangi kondisi *sludge bulking*. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kemampuan MBBR dalam meningkatkan penyisihan COD dan mengurangi *sludge bulking*, menganalisa waktu aerasi optimum dan menganalisa media *filling ratio optimum*. Contoh uji air limbah diambil dari Bak Kontrol CIP IPAL Milking PT X. Sumber mikroorganisme berasal dari *bio-starter* EM4. Penelitian dilakukan pada reaktor dengan sistem *continous flow*. Reaktor terdiri dari reaktor MBBR yang terbuat dari bak plastik berdiameter 24 cm dengan tinggi air efektif 22,5 cm dan bak sedimentasi dari bak plastik dengan tinggi air efektif 13,5 cm. Variasi waktu aerasi adalah 4 jam; 8,5 jam; dan 17 jam. Variasi volume pengisian media atau media *filling ratio* adalah 25%, 40%, dan 50% dari volume reaktor. Media MBBR menggunakan Media *Kaldness K1*. Parameter yang dianalisis adalah COD, Amonia, TSS, dan Kekeruhan sebelum air limbah diolah dan sesudah air limbah diolah secara *time series*. Berdasarkan hasil penelitian, waktu aerasi optimum adalah pada 8,5 jam. *Media filling ratio* optimum adalah 40% untuk parameter COD dan TSS, 50% untuk SVI dan Kekeruhan, serta 25% untuk Ammonia.

**Kata Kunci**—*Media Filling Ratio, Media Kaldness K1, Moving Bed Biofilm Reactor, Sludge Bulking, dan Waktu Aerasi.*

## I. PENDAHULUAN

PENGOLAHAN air limbah kegiatan pemerahan susu sapi umumnya terdiri dari pengolahan fisik-kimia untuk mengurangi kandungan padatan tersuspensi, lemak, dan minyak serta pengolahan biologis untuk mengurangi kandungan organik dalam air limbah. Kandungan organik air limbah tersebut antara lain nitrogen baik dalam bentuk ammonia maupun nitrat yang dapat memicu eutrofikasi, penurunan kadar oksigen, dan perubahan pada badan air yang tidak diinginkan lainnya [1]. Selain itu, kandungan organik dapat dinyatakan dalam bentuk BOD atau COD, yang mengartikan jumlah oksigen yang digunakan mikroorganisme untuk mendegradasi materi organik dalam air limbah [2]. Pengolahan biologis yang telah banyak digunakan pada instalasi pengolahan air limbah industri pemerahan susu sapi adalah sistem lumpur aktif (sistem pertumbuhan mikroba

tersuspensi). Namun disamping penggunaannya yang banyak, banyak laporan permasalahan yang terjadi pada pengolahan dengan sistem lumpur aktif terutama permasalahan produksi lumpur yang terlalu banyak, buruknya pengendapan lumpur aktif, penyisihan bahan organik yang tidak efisien, dan timbulnya efek *sludge bulking* sehingga air hasil pengolahan masih buruk [3]. *Sludge bulking* adalah kondisi ketika lumpur aktif terendapkan secara buruk atau gagal terendapkan diikuti dengan terbentuknya *scum*, busa, dan padatan yang mengapung. Kondisi *sludge bulking* ditentukan apabila nilai  $SVI_{30} \geq 150$  mL/g [4-5]. Maka dari itu perlu ada optimasi pengolahan agar memenuhi baku mutu.

Salah satu solusi permasalahan tersebut adalah penggunaan *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) sebagai sistem pengolahan biologis. Sistem MBBR diklaim dapat meminimalisir kondisi *sludge bulking* dan menawarkan pengolahan air limbah industri susu yang lebih baik daripada sistem lumpur aktif konvensional dikarenakan prinsip pengolahan MBBR adalah dengan menumbuhkan mikroorganisme dalam media *biocarrier* yang bergerak bebas dalam bak larutan air limbah sehingga beban padatan pada unit sedimentasi dapat lebih rendah daripada sistem lumpur aktif konvensional [6]. Kelebihan MBBR antara lain dapat meningkatkan kapasitas pengolahan, ukuran yang cukup kecil, meningkatkan kemampuan pengendapan padatan atau bioflok, *head loss* rendah, tidak ada kebutuhan untuk *backwashing*, dan produksi lumpur pada unit pengendapan dapat berkurang sehingga masalah *sludge bulking* juga dapat dikurangi [7]. Penelitian yang mengolah air limbah industri pemerahan susu menggunakan sistem MBBR secara aerobik dapat mengolah beban COD (*Chemical Oxygen Demand*) maksimum 5,06 kgCOD/m<sup>3</sup>/hari menjadi 0,67 kgCOD/m<sup>3</sup>/hari atau dapat dikatakan efisiensi penyisihan sebesar 97,3% [6]. Penelitian lain menyebutkan bahwa sistem MBBR *methanogenic* yang dilanjutkan dengan sistem MBBR aerobik dapat menyisihkan COD rata-rata sebesar 93%, NH<sub>4</sub>-N 97%, TKN 99%, dan PO<sub>4</sub>-P 31% [3]. MBBR aerobik juga telah diklaim dapat menyisihkan COD sebesar 98% dari konsentrasi COD awal 600-800 mg O<sub>2</sub>/L setelah 8 jam pengolahan [8]. Produksi lumpur pada MBBR maksimum mencapai 12,25 gTSS/hari dengan konsentrasi COD awal sebesar 8000 mg/L [9].

Objek penelitian ini adalah IPAL Industri Pemerahan Sapi PT X yang mengalami *sludge bulking*. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kemampuan MBBR dalam meningkatkan penyisihan COD dan mengurangi kondisi *sludge bulking* pada IPAL eksisting terutama IPAL PT X, menganalisa waktu aerasi optimum, dan menganalisa media

Tabel 1.  
Standar Analisa Parameter Uji

Parameter Uji	Standar Metode	Titik Uji
COD	SNI 06-6989.15-2004	
Amonia, N-NH <sub>3</sub>	Metode Nessler	Bak Kontrol CIP Silo Susu dan Bak Chlorinator IPAL PT X.
pH	SNI 06-6989.11-2004	
TSS	SNI 06-6989.3-2004	

filling ratio optimum pada pengolahan air limbah dengan sistem MBBR.

## II. METODE PENELITIAN

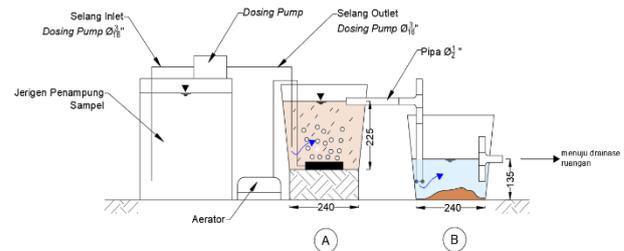
### A. Analisa Performa IPAL Eksisting

Analisa performa IPAL Eksisting untuk mengetahui karakteristik awal dan performa eksisting IPAL. Uji dilakukan di inlet dan outlet IPAL dengan rincian titik uji tersaji pada Tabel 1. Parameter yang diuji adalah COD, Ammonia, TSS, dan pH IPAL eksisting. Standar uji parameter tersaji pada Tabel 1.

### B. Persiapan Reaktor

Reaktor penelitian berupa rangkaian reaktor pengolah air limbah skala laboratorium secara *continuous flow* yang terdiri dari reaktor MBBR dan kolom sedimentasi yang menggunakan bak plastik dengan diameter 24 cm dan ketinggian 28 cm, aerator dengan kapasitas 4 L/menit, media MBBR tipe Kaldness K1, glasswear, dan dosing pump untuk pengatur debit aliran. Sumber mikroba pada reaktor penelitian ini adalah berasal dari *bio-starter* EM4. *Bio-starter* EM4 dipilih karena mengandung kompleks campuran mikroba aerobik dan anerobik yang secara sinergis mendegradasi bahan organik. Mikroba yang terkandung dalam EM4 antara lain bakteri fotosintetik yang berfungsi menyediakan nutrisi untuk mikroba lain, bakteri asam laktat yang berfungsi merombak bahan organik seperti lignin dan selulosa menjadi senyawa yang lebih sederhana tanpa memproduksi senyawa beracun dari proses perombakan, ragi yang berfungsi merombak zat organik seperti asam amino dan gula menjadi senyawa sederhana yang dijadikan sebagai nutrisi dan enzim untuk pertumbuhan mikroba lainnya, *Actinomyces* yang berfungsi menghasilkan zat anti mikroba untuk menekan jamur dan bakteri pengganggu, dan jamur fermentasi untuk menguraikan zat organik menjadi senyawa sederhana seperti alkohol, ester, dan zat anti mikroba [10-11]. Beberapa penelitian menemukannya bahwa kadar EM4 yang efektif untuk mengolah air limbah adalah 5% dari volume efektif pengolahan reaktor [12-14]. Maka, pada penelitian ini, digunakan EM4 dengan kadar 5% atau dengan volume 500 mL tiap reaktor.

Air limbah diambil dari unit Bak Kontrol CIP Silo Susu PT X. Kebutuhan sampel air limbah disesuaikan dengan volume pengolahan efektif yang dijelaskan pada subbab berikutnya. Sedangkan perhitungan kebutuhan media MBBR Kaldness K1 adalah sebagai berikut, *media filling ratio* 25% volume pengolahan efektif dengan kebutuhan media = 2,5 Liter. *media filling ratio* 40% volume pengolahan efektif dengan kebutuhan media = 4 Liter, *media filling ratio* 50% volume pengolahan efektif dengan kebutuhan media = 5 Liter.



Gambar 1. Sketsa Reaktor Penelitian.

Debit yang harus dialirkan di tiap reaktor untuk mencapai waktu aerasi yang direncanakan tersaji sebagai berikut, waktu Aerasi 4 Jam sebanyak 42 mL/menit, waktu Aerasi 8,5 Jam sebanyak 21 mL/menit, waktu Aerasi 17 Jam sebanyak 11 mL/menit.

Aerator yang digunakan menggunakan aerator berkapasitas 4 L/menit dengan *diffuser* berbahan batu keramik (*fine bubble diffuser*). Sketsa reaktor yang digunakan sesuai dengan Gambar 1.

### C. Seeding dan Aklimatisasi

Proses *seeding* dan aklimatisasi adalah bagian dari proses *start-up* reaktor yang difungsikan untuk mendapatkan *biofilm* yang siap untuk pengoperasian MBBR. Proses *start-up* diawali dengan mengisi reaktor dengan air limbah kemudian diberi 500 mL *bio-starter* EM4 pada masing-masing reaktor. Pada periode ini, reaktor dioperasikan secara *batch* dengan waktu 17 jam untuk aerasi kemudian 1 jam untuk pengendapan. Setelah itu dilakukan *decanting* hingga setengah volume reaktor. Kemudian reaktor kembali diisi dengan air limbah. Proses ini dilakukan selama 5 hari. Setelah itu, operasional reaktor dibuat secara *continuous* selama 25 hari dengan dilakukan sirkulasi lumpur aktif. Setelah kondisi *steady state* tercapai, yang ditandai dengan penebalan *biofilm*, media Kaldness telah berputar (*fluidize*), dan kualitas *effluent* tidak fluktuatif secara signifikan, maka reaktor telah dinyatakan siap untuk dilakukan penelitian utama. Sirkulasi lumpur dapat dihentikan.

Pada penelitian ini, parameter TSS dijadikan parameter utama dan kekeruhan sebagai *rapid test* untuk menentukan kondisi *steady state*. Parameter TSS dipilih dikarenakan zat organik juga berkontribusi didalamnya selain zat inorganik seperti sedimen, pasir, dan tanah liat. Fitoalga dan beberapa bakteri juga berkontribusi meningkatkan jumlah TSS. Analisa TSS juga dapat dilakukan lebih cepat untuk memperkirakan jumlah zat organik dibandingkan dengan analisa COD. Sedangkan parameter kekeruhan (*turbidity*) dipilih atas dasar dapat memperkirakan pergerakan konsentrasi TSS dan organik dengan lebih cepat (*rapid test*) berdasarkan tingkat kekeruhan sampel walaupun hasilnya jauh kurang teliti dibandingkan analisa TSS dan COD [5].

### D. Penelitian Utama

Penelitian utama bertujuan untuk menemukan hubungan antara variasi waktu aerasi ( $t_d$ ) dengan variasi volume media yang diisi ke reaktor dalam persentase volume reaktor atau *media filling ratio*. Matriks penelitian ini sesuai dengan tabel 2.

Pemilihan waktu aerasi ( $t_d$ ) didasarkan pada nilai tengah pada kriteria desain waktu aerasi, yaitu 4 jam. Dan waktu aerasi actual di lapangan. Bak Aerasi IPAL Milking PT X

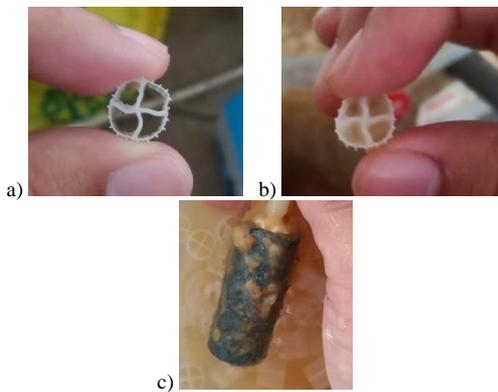
Tabel 2. Matriks Penelitian

t <sub>a</sub> (Waktu Aerasi)	Media filling ratio (% volume reaktor)				Train Name
	0% (kontrol)	25%	40%	50%	
4 jam	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	Train 1
8,5 jam	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	D <sub>2</sub>	Train 2
17 jam	A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	Train 3
Train Name	Train A	Train B	Train C	Train D	

Tabel 3.

Hasil Analisa Karakteristik Awal Limbah Kegiatan Pemerahan Sapi PT X dan Bio-starter EM4

Parameter	Satuan	Nilai
Karakter Air Limbah Inlet		
COD	mg O <sub>2</sub> /L	2804,80
TSS	mg/L	1684,00
Amonia	mg NH <sub>3</sub> – N/L	22,19 ± 0,422
pH		2,82 ± 0,180
Karakter Air Limbah Outlet		
COD	mg O <sub>2</sub> /L	72,00
TSS	mg/L	62,00
Amonia	mg NH <sub>3</sub> – N/L	8,79 ± 0,051
pH		5,73 ± 0,02
Karakter Bio – Starter EM4		
pH		3,74 ± 0,02



Gambar 5. Kondisi Media Kaldness Awal (a), Media Kaldness yang Telah mengalami Penebalan Biofilm (b), dan Kondisi Diffuser Aerator yang Terselimuti Biofilm (c).

masing-masing berkapasitas 8,5 m<sup>3</sup>. Dengan debit desain 20 m<sup>3</sup>/hari, didapatkan waktu aerasi untuk masing-masing bak aerasi adalah 8,5 jam. Sehingga, diambil angka 8,5 jam dan 17 jam (2x8,5 jam: karena terdapat 2 unit Bak Aerasi) untuk variabel waktu aerasi.

E. Analisa dan Pembahasan

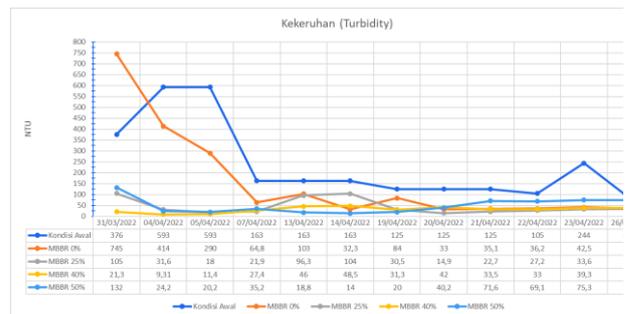
Setelah dilakukan pengambilan sampel dan analisa parameter, maka dapat dilakukan visualisasi hubungan data terkait hal-hal berikut:

1. Hubungan variasi waktu aerasi terhadap tingkat penyisihan pollutant dalam air limbah.
2. Hubungan variasi waktu aerasi terhadap angka SVI untuk menentukan kondisi *sludge bulking* atau tidaknya.
3. Hubungan variasi media filling ratio dalam reaktor terhadap tingkat penyisihan pollutant dalam air limbah.
4. Hubungan variasi media filling ratio dalam reaktor terhadap angka SVI untuk menentukan kondisi *sludge bulking* atau tidaknya.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Performa IPAL Eksisting

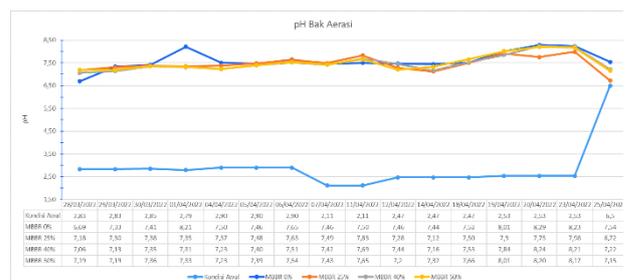
Analisa performa IPAL Eksisting ini dilakukan uji karakteristik air limbah kegiatan pemerahan susu PT X,



Gambar 2. Trend Kekeruhan pada Tahap Seeding dan Aklimatisasi.



Gambar 3. Trend TSS pada Tahap Seeding dan Aklimatisasi.

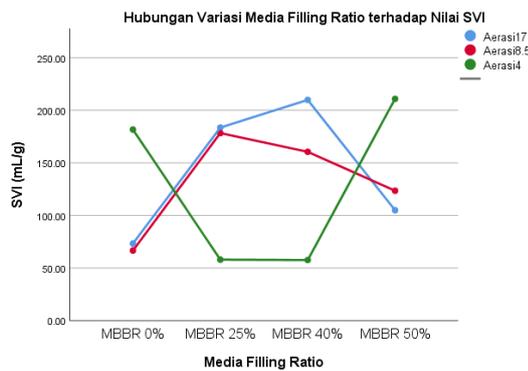


Gambar 4. Trend pH Bak Aerasi pada Tahap Seeding dan Aklimatisasi.

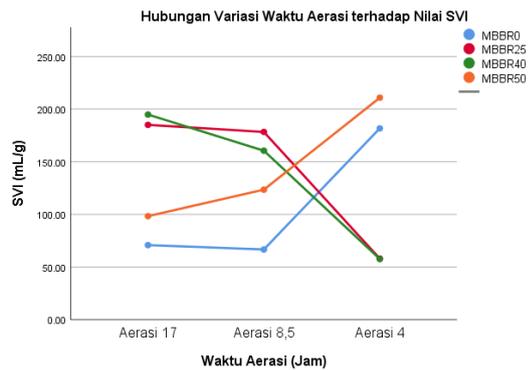
meliputi parameter COD, Amonia, TSS, dan pH IPAL Milking PT X. Uji dilakukan di inlet dan outlet IPAL dengan rincian titik uji tersaji pada Tabel 1 untuk mengetahui karakteristik awal dan performa eksisting IPAL. Selain itu, dilakukan uji TSS bio – starter EM4 sebagai sumber mikroba reaktor penelitian dan dasar perhitungan volume mikroorganisme yang dibutuhkan reaktor. Metode analisa parameter disesuaikan dengan metode yang tersaji pada Tabel 1. Sampel yang digunakan untuk analisa awal diambil pada 27 Maret 2022 dan dilakukan analisa pada 5 – 6 April 2022. Sampel ini juga digunakan untuk seeding serta aklimatisasi. Hasil analisa parameter tersebut tersaji pada **Error! Reference source not found.**

B. Seeding dan Aklimatisasi

Proses seeding dan aklimatisasi adalah bagian dari proses start-up reaktor yang difungsikan untuk mendapatkan biofilm yang siap untuk pengoperasian MBBR. Kondisi steady state tercapai apabila terdapat penebalan biofilm dan media Kaldness telah berputar (fluidize). Pada penelitian ini, parameter TSS dijadikan parameter utama dan kekeruhan sebagai rapid test untuk menentukan kondisi steady state. Reaktor mulai dijalankan pada 28 Maret 2022. Media Kaldness belum fluidize atau masih mengambang di permukaan air (tidak berputar). Media Kaldness mulai fluidize pada 31 Maret 2022 atau setelah 3 hari sejak awal reaktor dijalankan, namun belum terlihat penebalan biofilm.



Gambar 6. Hubungan Variasi Media Filling Ratio terhadap Nilai SVI.



Gambar 7. Hubungan Variasi Waktu Aerasi terhadap Nilai SVI.

Penebalan *biofilm* mulai terlihat pada 7 April 2022 atau setelah 10 hari. Kondisi *kalldness* dan diffuser yang mengalami penebalan *biofilm* ditunjukkan pada Gambar 2.

Hasil analisa kekeruhan pada tahap *seeding* dan aklimatisasi tersaji pada **Error! Reference source not found.**. Sedangkan hasil TSS pada tahap *seeding* dan aklimatisasi tersaji pada **Error! Reference source not found.**. Berdasarkan *trend* grafik hasil analisa kekeruhan dan TSS, keduanya tidak mengalami fluktuasi yang terlalu signifikan pada 20 April 2022 hingga 26 April 2022. Analisa pH di bak aerasi juga dilakukan pada tahap *seeding* dan aklimatisasi untuk menilai kondisi mikroorganisme. Nilai pH dalam grafik ini adalah pH rata-rata harian. Analisa pH dilakukan tiap jam per hari. Hasil analisa pH di bak aerasi tersaji pada **Error! Reference source not found.**

Dari **Error! Reference source not found.** rata-rata pH bak aerasi MBBR 0% adalah  $7,61 \pm 0,405$ ; MBBR 25% adalah  $7,45 \pm 0,320$ ; MBBR 40% adalah  $7,48 \pm 0,353$ ; dan MBBR 50% adalah  $7,50 \pm 0,349$  dari kondisi pH air limbah awal adalah  $2,61 \pm 0,269$ . Kondisi pH ideal bak aerasi agar menciptakan lingkungan bagi mikroba pengolah air limbah yang baik adalah berkisar antara 6,5 – 9,0 [15]. Sehingga bak aerasi pada reaktor penelitian ini sudah dinyatakan ideal untuk pengolahan air limbah. Tahap *seeding* dan aklimatisasi dianggap telah selesai.

### C. Hasil Analisa SVI dalam Reaktor

Nilai SVI adalah indikator dari kualitas pengendapan lumpur aktif. Merujuk pada [16], rentang nilai SVI ideal adalah berkisar 100 – 250 mL/g. Rentang nilai SVI beserta dampak yang dialami dari nilai tersebut tersaji pada **Error! Reference source not found.**. Namun, merujuk pada [17], reaktor telah dinyatakan mengalami ketidak-idealitas pengendapan yaitu *sludge bulking* ketika angka SVI melebihi 150 mL/g. Grafik hubungan variasi *media filling ratio*

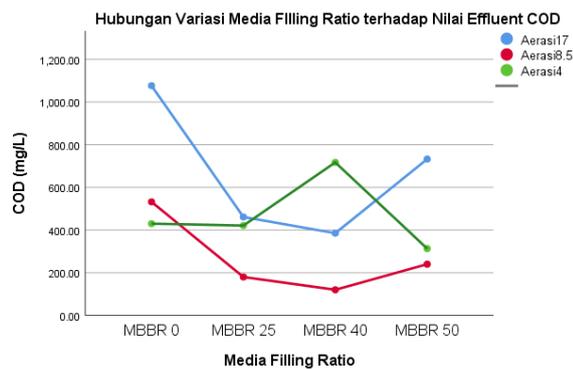
Tabel 4. Rentang Nilai SVI dan Dampaknya

Nilai SVI	Dampak	Pencegahan
<100	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lumpur mengendap terlalu cepat</li> <li>Meninggalkan jejak kekeruhan (kondisi <i>pin-floc</i>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tingkatkan debit air limbah</li> <li>Kurangi debit <i>return activated sludge</i></li> </ul>
100 – 250	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lumpur lebih padat</li> <li>SVI Ideal</li> <li>Lumpur mengendap tidak telalu cepat, sehingga partikel padatan tertangkap dengan lebih baik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kondisi normal</li> </ul>
>250	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kondisi <i>sludge bulking</i></li> <li>Lumpur mengendap dengan lama sehingga melayang di bak</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kurangi debit air limbah</li> <li>Tingkatkan debit <i>return activated sludge</i></li> </ul>

terhadap nilai SVI dan hubungan variasi waktu aerasi terhadap nilai SVI secara berurutan tersaji pada **Error! Reference source not found.** dan Gambar 7.

Berdasarkan hasil analisa, baik pada waktu aerasi 17 jam maupun 8,5 jam, reaktor kontrol atau MBBR 0% tidak mengalami *sludge bulking* namun nilai SVI berada dibawah 100 mL/g, yang mengartikan reaktor MBBR 0% mengalami kondisi *pin-floc*. Kondisi *pin-floc* adalah salah satu bentuk kegagalan atau buruknya kualitas pengendapan lumpur aktif mengakibatkan *effluent* air limbah keruh dan seringkali diikuti dengan konsentrasi TSS yang tinggi [16-18]. Hal ini dibuktikan pada nilai kekeruhan rata-rata reaktor MBBR 0% yang paling tinggi diantara reaktor lainnya (dapat dilihat pada Gambar 14 dan Gambar 15). Reaktor MBBR 50% juga mengalami *pin-floc* pada waktu aerasi 17 jam ditandai dengan 5 nilai SVI dari 7 percobaan berada dibawah 100 mL/g. Namun pada waktu aerasi 8,5 jam, nilai SVI reaktor MBBR 50% lebih ideal. Hal ini dapat diakibatkan oleh adanya pengurangan waktu aerasi yang mengartikan juga adanya penambahan debit air limbah sehingga kadar organik yang menuju sistem tersedia dalam jumlah yang ideal. Rasio F/M menjadi ideal ketika debit air limbah ditambah. Rasio F/M ideal merujuk pada [18] adalah 0,2-0,5 kgBOD<sub>5</sub>/kgMLVSS/hari. Hal ini mengakibatkan nilai kekeruhan reaktor MBBR 50% pada waktu aerasi 8,5 jam adalah nilai terbaik daripada reaktor lainnya. Reaktor MBBR 40% memiliki nilai SVI rata-rata yang paling tinggi diantara reaktor lainnya pada waktu aerasi 17 jam yaitu  $194,83 \pm 60,56$  mL/g dan memiliki nilai maksimal 276,07 mL/g atau telah terpaut 26,07 dari nilai maksimum SVI ideal. Nilai maksimum tersebut hanya terjadi sekali dan tidak ada kejadian nilai dibawah minimum. Hal ini mengartikan bahwa MBBR 40% adalah reaktor yang menghasilkan kualitas pengendapan paling ideal walaupun sekali mengalami *sludge bulking* namun tidak separah yang terjadi pada reaktor MBBR 25% serta reaktor MBBR 40% tidak pernah mengalami *pin-floc* pada waktu aerasi 17 jam. Hal ini juga dibuktikan dari nilai kekeruhan rata-rata reaktor MBBR 40% yang paling rendah daripada reaktor lainnya pada waktu aerasi 17 jam. Namun, pada waktu aerasi 8,5 jam, MBBR 40% menghasilkan kekeruhan yang lebih tinggi daripada MBBR 50%, dikarenakan MBBR 40% mengalami *bulking* pada waktu aerasi 8,5 jam.

Kondisi berbeda pada waktu aerasi 4 jam. Reaktor MBBR



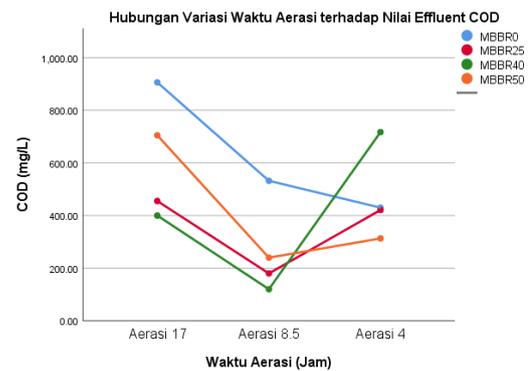
Gambar 9. Hubungan Variasi *Media Filling Ratio* terhadap Nilai *Effluent COD*.

25% dan MBBR 40% lebih sering mengalami kondisi *pin-floc* dan seringkali terdapat kegagalan pengendapan lumpur aktif (lumpur mengapung). Reaktor kontrol MBBR 0% mengalami ketidakstabilan nilai SVI ditandai dengan nilai maksimum dan minimumnya yang terpaut jauh dari nilai SVI ideal. Reaktor MBBR 50% dinilai lebih stabil pada waktu aerasi 4 jam ditandai dengan *trend* nilai SVI yang lebih landai dan tidak terpaut jauh dari rentang nilai SVI ideal. Berdasarkan nilai SVI rata-rata, nilai maksimum, dan nilai minimum, reaktor MBBR 50% dengan waktu aerasi 8,5 jam adalah kondisi yang paling baik karena memiliki nilai SVI yang tidak melampaui terlalu jauh dari nilai SVI maksimum-minimum ideal sehingga kekeruhannya menjadi yang paling rendah.

#### D. Hasil Analisa Konsentrasi COD Effluent Reaktor

Parameter COD dijadikan parameter utama untuk menilai konsentrasi organik yang terkandung dalam air limbah. Kandungan organik yang dimaksud antara lain karbohidrat, protein, dan lemak. Sedangkan COD merpresentasikan jumlah oksigen yang diperlukan untuk mengoksidasi zat organik menjadi senyawa sederhana oleh larutan kimia oksidator kuat dalam suasana asam [17]. Hasil analisa laboratorium dari konsentrasi COD *effluent* dari keempat reaktor akan dijadikan dasar data untuk dilakukan analisa hubungan variasi *media filling ratio* terhadap konsentrasi COD dan hubungan variasi waktu aerasi terhadap konsentrasi COD. Grafik hubungan variasi *media filling ratio* terhadap konsentrasi COD dan variasi waktu aerasi terhadap konsentrasi COD secara berurutan tersaji pada **Error! Reference source not found.** dan **Error! Reference source not found.**

Berdasarkan grafik hubungan variasi *media filling ratio* terhadap nilai *effluent COD*, semakin tinggi *media filling ratio*, maka nilai *effluent COD* berkurang. Hal ini mengartikan bahwa penggunaan MBBR dapat meningkatkan penyisihan COD. Namun, pada variasi *media filling ratio* 50% (MBBR 50%), terdapat kenaikan nilai *effluent COD* mengartikan penyisihan COD pada MBBR 50% tidak sebaik reaktor lainnya. Hal ini dapat dikarenakan jumlah media dalam reaktor terlalu banyak, sehingga pengadukan menjadi sulit dan menciptakan banyak *dead zone*. Volume media MBBR maksimal adalah 60% agar pengadukan dalam bak aerasi tetap terjadi secara ideal sehingga kontak antara mikroorganisme dengan bahan organik terjadi secara maksimal. Ketika terdapat *dead zone*, kontak antara mikroorganisme dengan bahan organik tidak terjadi secara



Gambar 8. Hubungan Variasi Waktu Aerasi terhadap Nilai *Effluent COD*.

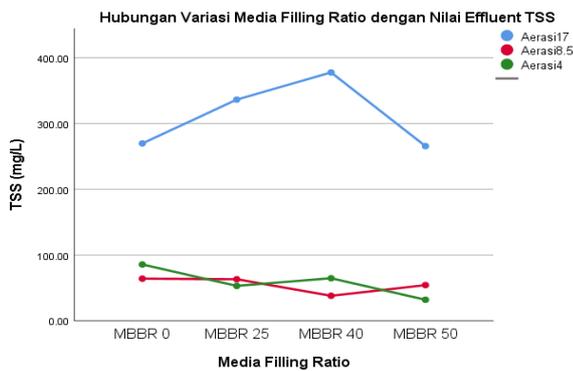
menyeluruh dalam reaktor, sehingga efisiensi penyisihan menjadi berkurang [17].

Walaupun semakin banyak media akan semakin menyediakan banyak permukaan untuk mikroorganisme berkembang, namun apabila pengadukan tidak ideal sehingga menciptakan *dead zone*, maka mikroorganisme tidak dapat berkontak dengan bahan organik secara ideal. Pengadukan dalam reaktor MBBR 25% dan MBBR 0% jauh lebih baik daripada reaktor MBBR 50% namun efisiensinya tidak sebaik dengan reaktor MBBR 40%. Hal ini dikarenakan jumlah media dalam reaktor belum menyediakan permukaan untuk tumbuhnya mikroorganisme dalam jumlah cukup. Sehingga, penyisihan COD lebih rendah daripada reaktor MBBR 40%. Pada grafik hubungan variasi waktu aerasi terhadap nilai *effluent COD*, terdapat penurunan nilai *effluent COD* setelah waktu aerasi dikurangi dari 17 jam menjadi 8,5 jam. Namun ada peningkatan nilai ketika waktu aerasi dikurangi menjadi 4 jam. Hal ini dapat diakibatkan bahwa penyisihan polutan oleh mikroorganisme dapat terjadi dengan baik pada waktu aerasi atau waktu kontak yang tepat. Terlalu tinggi maupun terlalu rendah waktu aerasi dapat mempengaruhi penyisihan polutan [19]. Merujuk pada [19], telah dibuktikan bahwa reaktor MBBR untuk mengolah limbah pada waktu aerasi 6 jam menghasilkan persentase penyisihan COD lebih besar daripada saat waktu aerasi 24 jam (84,62% pada 6 jam; 80,99% pada 24 jam).

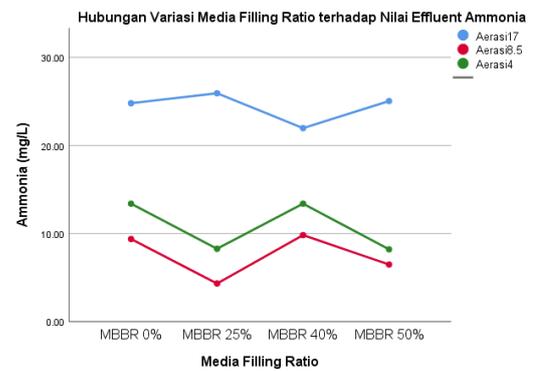
Pada penelitian ini, reaktor MBBR 40% dengan waktu aerasi 8,5 jam adalah kondisi yang paling ideal dalam menyisihkan COD, didasarkan pada konsentrasi COD *effluent* rata-rata yang paling rendah diantara reaktor lainnya yaitu  $120,00 \pm 53,86$  mg/L, nilai penyisihan (%R) rata-rata yang paling tinggi 96,6%, konsentrasi COD *effluent* maksimum, serta konsentrasi minimum yang juga paling rendah diantara reaktor lainnya.

#### E. Hasil Analisa Konsentrasi TSS Effluent Reaktor

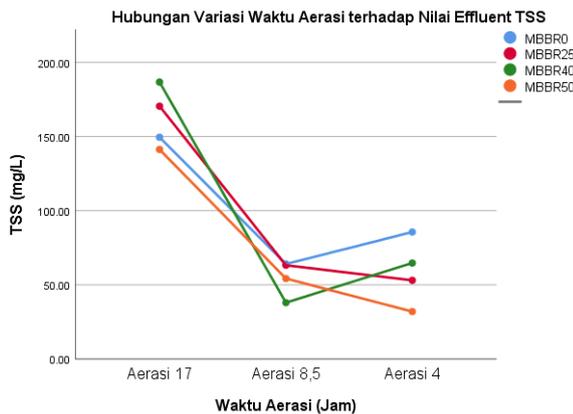
Parameter TSS juga menjadi parameter utama karena TSS mengandung zat organik juga zat inorganik seperti sedimen, pasir, dan tanah liat. Fitoalga dan beberapa mikroba patogen juga berkontribusi didalam kandungan TSS. Dalam konteks kualitas air permukaan, kandungan partikel tersuspensi yang tinggi dapat menghambat cahaya matahari masuk sehingga tanaman dan fitoalga air tidak bisa berfotosintesis untuk memproduksi oksigen bagi kehidupan organisme air lainnya. Selain itu, partikel tersuspensi juga dapat menyerap panas matahari yang membuat suasana air menjadi hangat dan menurunkan konsentrasi DO [5]. Grafik hubungan variasi



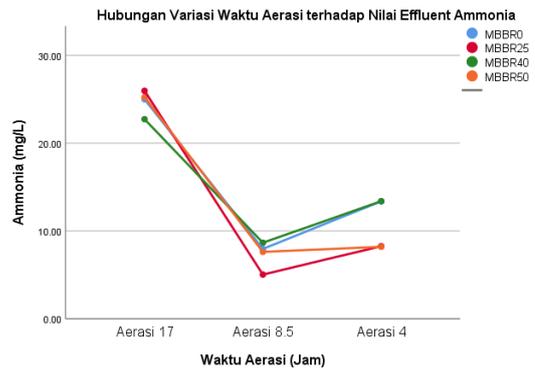
Gambar 12. Hubungan Variasi *Media Filling Ratio* dengan Nilai *Effluent TSS*.



Gambar 10. Hubungan Variasi *Media Filling Ratio* terhadap Nilai *Effluent Ammonia*.



Gambar 13. Hubungan Variasi Waktu Aerasi dengan Nilai *Effluent TSS*.



Gambar 11. Hubungan Variasi Waktu Aerasi terhadap Nilai *Effluent Ammonia*.

*media filling ratio* terhadap nilai *effluent TSS* dan hubungan variasi waktu aerasi terhadap nilai *effluent TSS* secara berurutan tersaji pada **Error! Reference source not found.** dan **Error! Reference source not found.**

Berdasarkan hasil penelitian, reaktor MBBR 40% dengan waktu aerasi 8,5 jam adalah kondisi paling ideal dalam menyisihkan TSS, didasarkan pada konsentrasi TSS *effluent* rata-rata yang paling rendah diantara reaktor lainnya yaitu 33,89 mg/L.

#### F. Hasil Analisa Konsentrasi Ammonia Effluent Reaktor

Zat ammonia adalah hasil dari hidrolisis nitrogen organik seperti protein. Keberadaan ammonia dalam lingkungan air dapat membahayakan karena bersifat racun. Tingkat ammonia juga dapat menjadi indikator seberapa aktif kegiatan dekomposisi organik oleh mikroba [17]. Grafik hubungan variasi *media filling ratio* terhadap nilai *effluent ammonia* dan hubungan variasi waktu aerasi terhadap nilai *effluent ammonia* secara berurutan tersaji pada **Error! Reference source not found.** dan Gambar 13.

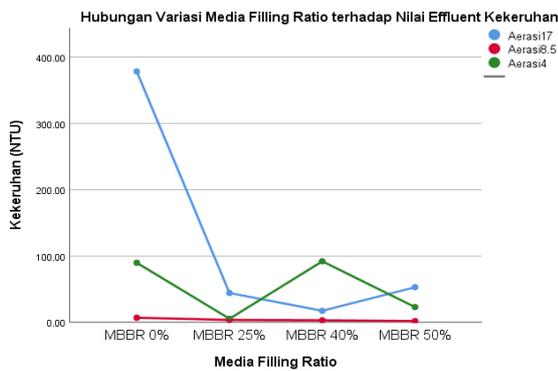
Nilai rata-rata *effluent ammonia* pada waktu aerasi 17 jam berdekatan antar satu reaktor dengan reaktor lainnya. Hal ini menandakan pengaruh variasi media pada penyisihan Ammonia tidak berpengaruh secara signifikan. Tidak adanya signifikansi pengaruh antar perbedaan perlakuan pada waktu aerasi 17 jam dapat diakibatkan dari:

1. Keempat reaktor sama-sama tidak dapat memproduksi bakteri *nitrifier* untuk melakukan nitrifikasi. Bakteri *nitrifier* adalah bakteri yang bersifat autotofik. Sedangkan bakteri yang berfungsi mendegradasi karbon organik (COD dan BOD) adalah bakteri bersifat heterotofik. Bakteri autotofik berkembang lebih lama

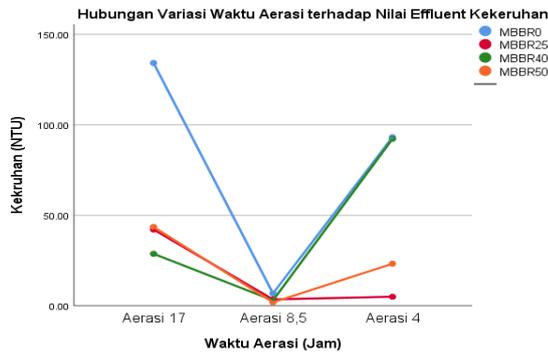
daripada bakteri heterotofik. Bakteri *nitrifier* umumnya mulai aktif ketika bakteri heterotofik telah mengonsumsi karbon organik secara menyeluruh [17]. Hal inilah yang menjadi alasan pada parameter COD terdapat signifikansi sementara pada parameter Ammonia tidak ada signifikansi. Perbedaan variasi *media filling ratio* mempengaruhi kinerja dari bakteri heterotofik namun keempat variasi tersebut tidak bisa menumbuhkan bakteri *nitrifier*.

2. Beban BOD BOD *influent* lebih dari 0,5 g/m<sup>2</sup>/hari dan Rasio C/N atau BOD/TKN lebih dari 1,0. Seperti yang telah disebutkan pada poin nomor satu, bakteri *nitrifier* atau bakteri autotofik akan aktif ketika bakteri heterotofik telah mengonsumsi karbon organik secara menyeluruh. Maka dari itu, BOD yang boleh masuk kedalam reaktor untuk terjadi nitrifikasi haruslah dalam konsentrasi kecil. Hal ini sangatlah krusial terutama pada reaktor sistem *attached growth* yang apabila BOD yang diolah masih dalam konsentrasi besar, maka lapisan bakteri *nitrifier* akan tertutup dengan lapisan bakteri heterotofik. Lapisan bakteri *nitrifier* lama-kelamaan akan kekurangan nutrisi dan oksigen sehingga akan mati atau luruh [19].

Tebalnya lapisan bakteri heterotofik (*C oxidizers*) menyebabkan lapisan bakteri *nitrifiers* kekurangan nutrisi dan oksigen. Merujuk pada [20], perencanaan MBBR untuk nitrifikasi perlu ada pengolahan awal (*pre-treatment*) terlebih dahulu untuk mengurangi kadar organik sehingga nitrifikasi dapat berjalan optimal. Merujuk pada penelitian [6], telah dibuktikan bahwa bahwa pada beban BOD yang lebih tinggi, efisiensi nitrifikasi MBBR lebih rendah daripada pada reaktor lumpur aktif konvensional. Merujuk pada penelitian Boller dan Gujer (1986), telah dibuktikan bahwa bahwa



Gambar 14. Hubungan Variasi Media Filling Ratio terhadap Nilai Effluent Kekeruhan.



Gambar 15. Hubungan Variasi Waktu Aerasi terhadap Nilai Effluent Kekeruhan.

nitrifikasi pada reaktor sistem *biofilm* akan optimum setelah operasional bertahun-tahun [21].

Pada waktu aerasi 8,5 jam, terjadi signifikansi nilai *effluent* ammonia antar reaktor. Hal ini dimungkinkan disebabkan karena adanya penambahan debit sehingga rasio nitrogen mencukupi untuk terjadinya nitrifikasi. Kejadian ini juga terjadi pada waktu aerasi 4 jam yang menunjukkan adanya signifikansi nilai *effluent* ammonia antar reaktor. Pertumbuhan mikroorganisme *nitrifiers* pada reaktor sistem *single-stage* sangat bergantung pada rasio  $BOD_5/TKN$ . Semakin rendah rasionya, maka proses nitrifikasi akan terjadi jauh lebih baik [17]. Hal ini juga membuktikan bahwa variasi waktu aerasi yang memengaruhi hasil ammonia secara signifikan. *Media filling ratio* tidak berpengaruh signifikan pada *effluent Total Ammonia Nitrogen* (TAN) [21]. Skala pengolahan MBBR adalah variabel yang memberikan efek signifikan pada penyisihan ammonia. Semakin besar skala pengolahan MBBR, semakin baik penyisihan ammonia. Sementara *media filling ratio* memengaruhi namun tidak secara signifikan. Serupa dengan yang terjadi pada hasil analisa COD, terjadi penurunan nilai *effluent* ammonia ketika waktu aerasi diturunkan dari 17 jam menjadi 8,5 jam, namun kembali meningkat ketika waktu aerasi diturunkan menjadi 4 jam. Hal ini dapat diakibatkan bahwa penyisihan polutan oleh mikroorganisme dapat terjadi dengan baik pada waktu aerasi atau waktu kontak yang tepat [19].

Pada penelitian ini, reaktor MBBR 25% dengan waktu aerasi 8,5 jam adalah kondisi ideal untuk menghasilkan *effluent* ammonia rata-rata yang paling rendah yaitu  $5,04 \pm 3,22$  mg/L, nilai maksimum, dan nilai minimum yang paling rendah diantara reaktor lainnya.

Tabel 5.

Perbandingan Hasil Penelitian dengan Baku Mutu				
No.	Parameter	Satuan	Effluent Penelitian	Hasil Baku Mutu
1	COD	mg/L	$120 \pm 53,86^*$	100
2	Ammonia	mg $NH_4^-$	$5,04 \pm 3,22$	10
		N/L		
3	TSS	mg/L	33,89	50

### G. Hasil Analisa Kekeruhan Effluent Reaktor

Kekeruhan dapat memperkirakan pergerakan konsentrasi TSS dan organik dengan lebih cepat (*rapid test*) berdasarkan tingkat kekeruhan sampel. Selain itu, kekeruhan juga digunakan sebagai indikator kualitas pengendapan yang berhubungan dengan nilai SVI. Grafik hubungan variasi *media filling ratio* terhadap nilai *effluent* kekeruhan dan hubungan variasi waktu aerasi terhadap nilai *effluent* kekeruhan secara berurutan tersaji pada Gambar 14 dan Gambar 15.

Sesuai dengan nilai SVI yang telah dijelaskan sebelumnya, reaktor MBBR 50% dengan waktu aerasi 8,5 jam adalah kondisi yang paling ideal untuk menghasilkan nilai kekeruhan paling rendah karena dapat menghasilkan nilai SVI yang juga paling baik.

## IV. RINGKASAN VARIASI WAKTU AERASI DAN VARIASI MEDIA FILLING RATIO OPTIMUM UNTUK KINERJA MBBR

Berdasarkan hasil penelitian, dapat diringkas bahwa variasi waktu aerasi adalah variasi yang berpengaruh dengan signifikansi tinggi pada parameter COD, TSS, Ammonia, dan Kekeruhan. Tingginya tingkat signifikansi pada variabel waktu aerasi diakibatkan karena pengaturan waktu aerasi dengan cara mengatur debit membuat adanya perubahan *supply* kandungan organik kedalam sistem sehingga ada signifikansi hasil variasi perlakuan. Sementara variasi *media filling ratio* hanya membedakan luas permukaan mikroorganisme untuk melekat. Variasi yang ideal terhadap kinerja MBBR pada penelitian ini dapat diringkas sebagai berikut:

1. Reaktor dengan variasi *media filling ratio* 40% (MBBR 40%) pada waktu aerasi 8,5 jam adalah kondisi paling ideal untuk menghasilkan *effluent* COD paling baik dengan nilai *effluent* rata-rata  $120 \pm 53,86$  mg/L.
2. Reaktor dengan variasi *media filling ratio* 50% (MBBR 50%) pada waktu aerasi 8,5 jam adalah kondisi paling ideal untuk menghasilkan nilai SVI paling baik yaitu  $123,51 \pm 68,26$  mL/g.
3. Reaktor dengan variasi *media filling ratio* 25% (MBBR 25%) pada waktu aerasi 8,5 jam adalah kondisi paling ideal untuk menghasilkan *effluent* ammonia paling baik dengan nilai *effluent* rata-rata  $5,04 \pm 3,22$  mg/L.
4. Reaktor dengan variasi *media filling ratio* 40% (MBBR 40%) pada waktu aerasi 8,5 jam adalah kondisi paling ideal untuk menghasilkan *effluent* TSS paling baik dengan nilai *effluent* rata-rata 33,89 mg/L.
5. Reaktor dengan variasi *media filling ratio* 50% (MBBR 50%) pada waktu aerasi 8,5 jam adalah kondisi paling ideal untuk menghasilkan *effluent* kekeruhan paling baik dengan nilai *effluent* rata-rata 1,91 NTU

Berdasarkan penelitian, reaktor dengan sistem MBBR dapat meningkatkan penyisihan COD dibuktikan dengan

nilai *removal* paling tinggi pada penelitian ini dapat mencapai hingga 98,7% (pada reaktor MBBR 40% waktu aerasi 8,5 jam), sedangkan nilai *removal* COD pada IPAL eksisting sesuai dengan data pada **Error! Reference source not found.** adalah 97,43%. Sistem MBBR juga terbukti dapat memperbaiki permasalahan pengendapan lumpur aktif baik *sludge bulking* dan *pin-floc* dibuktikan dengan nilai SVI pada reaktor MBBR dapat berada pada nilai ideal dibandingkan pada reaktor kontrol tanpa MBBR (MBBR 0%). Hasil dari perlakuan dengan variasi paling ideal ini apabila dibandingkan dengan baku mutu PermenLH nomor 5 tahun 2014 tersaji pada

Berdasarkan data tersebut, nilai rata-rata COD masih belum memenuhi baku mutu, namun pada penelitian ini nilai minimum effluent COD adalah 56,00 mg/L sehingga sempat memenuhi baku mutu sesuai pada Tabel 5.

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa MBBR dapat meningkatkan penyisihan COD dibuktikan dengan nilai persentase penyisihan COD maksimum dengan MBBR adalah 98,7% sementara penyisihan eksisting adalah 97,43% serta dapat mengurangi kondisi pengendapan lumpur aktif yang buruk dibuktikan dengan nilai SVI reaktor MBBR berada di rentang nilai SVI ideal sedangkan nilai SVI reaktor MBBR 0% berada dibawah rentang nilai SVI ideal. Waktu aerasi optimum pada pengolahan air limbah dengan sistem MBBR adalah pada waktu aerasi 8,5 jam sedangkan *media filling ratio* optimum pada pengolahan air limbah dengan sistem MBBR adalah 40% untuk parameter COD dan TSS, 50% untuk parameter SVI dan Kekeruhan, dan 25% untuk parameter Ammonia.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. M. W. Wijaya, H. Ribeiro, E. S. Soedjono, A. Slamet, C. Teixeira, and A. A. Bordalo, "Start-up of the nitrogen removal process in an anaerobic up-flow reactor inoculated with aeration tank sludge," *16th International Conference on Environmental Science and Technology.*, 2019. doi: 10.13140/RG.2.2.31779.48160.
- [2] I. M. W. Wijaya and E. S. Soedjono, "Physicochemical characteristic of municipal wastewater in tropical area: case study of Surabaya city, Indonesia," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 135, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1755-1315/135/1/012018.
- [3] E. Zkeri *et al.*, "Comparing the use of a two-stage MBBR system with a methanogenic MBBR coupled with a microalgae reactor for medium-strength dairy wastewater treatment," *Bioresour. Technol.*, vol. 323, no. December 2020, p. 124629, 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2020.124629.
- [4] M. J. Donkin, "Bulking in aerobic biological systems treating dairy processing wastewaters," *Int. J. Dairy Technol.*, vol. 50, no. 2, pp. 67–72, 1997, doi: 10.1111/j.1471-0307.1997.tb01740.x.
- [5] S. R. Qasim and G. Zhu, "Wastewater Treatment And Reuse : Theory And Design Examples." Florida: CRC Press, 2018.
- [6] G. Andreottola, P. Foladori, M. Ragazzi, and R. Villa, "Dairy wastewater treatment in a moving bed biofilm reactor," *Water Sci. Technol.*, vol. 45, no. 12, pp. 321–328, 2002, doi: 10.2166/wst.2002.0441.
- [7] S. M. Sheikh, S. Sharma, A. Sharma, and S. Verma, "A review on reduction of phosphate from industrial cum municipal wastewater using mbbtr technology," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 06, no. 03, 2019.
- [8] A. D. Santos, R. C. Martins, R. M. Quinta-Ferreira, and L. M. Castro, "Moving bed biofilm reactor (MBBR) for dairy wastewater treatment," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 340–344, 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.11.158.
- [9] A. Aygun, B. Nas, and A. Berkay, "Influence of high organic loading rates on COD removal and sludge production in moving bed biofilm reactor," *Environ. Eng. Sci.*, vol. 25, no. 9, pp. 1311–1316, 2008, doi: 10.1089/ees.2007.0071.
- [10] R. D. P. Gultom and R. K. Prabatiwi, "Pemanfaatan limbah air kelapa menjadi pupuk organik cair menggunakan mikroorganisme aspergillus niger.pseudomonas putida dan bioaktivator EM4," *J. Tek. ITS*, vol. 6, pp. 5–9, 2017.
- [11] E. M. Rashed and M. Massoud, "The effect of effective microorganisms (EM) on EBPR in modified contact stabilization system," *HBRC J.*, vol. 11, no. 3, pp. 384–392, 2015, doi: 10.1016/j.hbrj.2014.06.011.
- [12] A. Asadiya and N. Karmaningroem, "Pengolahan air limbah domestik menggunakan proses aerasi, pengendapan, dan filtrasi media zeolit-arang aktif," *J. Tek. ITS*, vol. 7, no. 1, 2018, doi: 10.12962/j23373539.v7i1.28923.
- [13] S. Holifah, "Pengolahan limbah air rebusan ikan teri menjadi pupuk organik cair dan aplikasinya terhadap hasil tanaman bayam (*Amaranthus sp.*)," *Agromix*, vol. 10, no. 2, 2019, doi: 10.35891/agx.v10i2.1622.
- [14] U. Munawaroh, M. Sutisna, and K. Pharmawati, "Penyisihan parameter pencemar lingkungan pada limbah cair industri tahu menggunakan efektif mikroorganisme 4 (em4) serta pemanfaatannya," *J. Inst. Teknol. Nas.*, vol. 1, no. 2, pp. 93–104, 2013.
- [15] F. R. Spellman, "Spellman's Standard Handbook for Wastewater Operators," Second. Florida: CRC Press, 2011.
- [16] D. Jenkins, M. G. Richard, and G. T. Daigger, "Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking, Foaming, and Other Solids Separation Problems". Florida: CRC Press, 2003.
- [17] A. H. Javid, A. H. Hassani, B. Ghanbari, and K. Yaghmaian, "Feasibility of utilizing moving bed biofilm reactor to upgrade and retrofit municipal wastewater treatment plants," *Int. J. Environ. Res.*, vol. 7, no. 4, pp. 963–972, 2013, doi: 10.22059/ijer.2013.679.
- [18] G. Wang, D. Wang, Y. Xu, Z. Li, and L. Huang, "Study on optimization and performance of biological enhanced activated sludge process for pharmaceutical wastewater treatment," *Sci. Total Environ.*, vol. 739, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140166.
- [19] V. Hoang, "MBBR Ammonia Removal: An Investigation Of Nitrification Kinetics, Biofilm And Biomass Response, And Bacterial Population Shifts During Long-Term Cold Temperature Exposure," University of Ottawa, Ottawa, 2013.
- [20] B. Rusten, B. Eikebrokk, Y. Ulgenes, and E. Lygren, "Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors," *Aquac. Eng.*, vol. 34, no. 3, pp. 322–331, 2006, doi: 10.1016/j.aquaeng.2005.04.002.
- [21] A. Kamstra, E. Blom, and B. F. Terjesen, "Mixing and scale affect moving bed biofilm reactor (MBBR) performance," *Aquac. Eng.*, vol. 78, pp. 9–17, 2017, doi: 10.1016/j.aquaeng.2017.04.004.