



TUGAS AKHIR - RE 141581

PENGOLAHAN LINDI MENGGUNAKAN *MOVING BED BIOFILM REACTOR (MBBR)* DENGAN *PRE-TREATMENT* KIMIAWI UNTUK MENURUNKAN KONSENTRASI ORGANIK DAN NITROGEN

ARINA WIDA IMANIA
3314100083

Dosen Pembimbing
Welly Herumurti, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - RE 141581

PENGOLAHAN LINDI MENGGUNAKAN *MOVING BED BIOFILM REACTOR* (MBBR) DENGAN *PRE-TREATMENT* KIMIAWI UNTUK MENURUNKAN KONSENTRASI ORGANIK DAN NITROGEN

ARINA WIDA IMANIA
3314100083

DOSEN PEMBIMBING
Welly Herumurti, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - RE 141581

LEACHATE TREATMENT USING MOVING BED BIOFILM REACTOR (MBBR) WITH CHEMICAL PRE-TREATMENT FOR ORGANIC AND NITROGEN REMOVAL

ARINA WIDA IMANIA
3314100083

SUPERVISOR
Welly Herumurti, S.T., M.Sc.

DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
Faculty of Civil, Environmental, and Geo Engineering
Institute of Technology Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGOLAHAN LINDI MENGGUNAKAN MOVING BED
BIOFILM REACTOR (MBBR) DENGAN PRE-
TREATMENT KIMIWI UNTUK MENURUNKAN
KONSENTRASI ORGANIK DAN NITROGEN**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

ARINA WIDA IMANIA
NRP. 3314 100 083

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:



Welly Herumurti, S.T., M.Sc
NIP. 19811223 200604 1 001



**PENGOLAHAN LINDI MENGGUNAKAN *MOVING BED*
BIOFILM REACTOR (MBBR) DENGAN *PRE-TREATMENT*
KIMIAWI UNTUK MENURUNKAN KONSENTRASI ORGANIK
DAN NITROGEN**

Nama Mahasiswa : Arina Wida Imania
NRP : 3314100083
Departemen : Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing : Welly Herumurti, S.T., M.Sc.

ABSTRAK

Lindi menjadi salah satu permasalahan utama di TPA Ngipik Gresik karena belum adanya fasilitas pengolahan yang memadai. Lindi mengandung polutan senyawa organik dan nitrogen hasil penguraian sampah dengan konsentrasi tinggi. Lindi berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak diolah. Salah satu cara efektif mengolah lindi adalah pengolahan biologis seperti *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR). MBBR mampu menurunkan jumlah senyawa organik dan nitrogen melalui proses aerobik-anoksik. MBBR bekerja dengan prinsip proses *activated sludge* dan menggunakan media sebagai tempat perkembangbiakkan mikroorganisme. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektifitas penurunan nitrogen dan zat organik pada lindi melalui pengolahan MBBR dengan variasi *pre-treatment* kimiawi menggunakan ozon dan durasi proses aerobik-anoksik.

Pada penelitian ini digunakan sampel lindi yang berasal dari TPA Ngipik Gresik dan lumpur dari *return activated sludge* unit clarifier IPLT Keputih sebagai sumber biomassa. Penelitian dilakukan secara *batch* dengan kapasitas reaktor masing-masing sebesar 5 L. Reaktor dilengkapi dengan aerator dan pompa *submersible* untuk memudahkan pengkondisian proses aerobik-anoksik dalam MBBR. Untuk menciptakan kondisi aerobik, aerator dan pompa *submersible* akan dinyalakan, sedangkan untuk menciptakan kondisi anoksik, aerator dimatikan dengan membiarkan pompa *submersible* menyala. Dalam pengoperasiannya, MBBR membutuhkan media sebagai tempat mikroorganisme membentuk biofilm. Media yang digunakan adalah media Kaldnes tipe 1 (media K1) sebanyak 1 L (20% volume reaktor). Penelitian diawali dengan tahap analisis karakteristik

awal, *seeding* dan aklimatisasi. Pada penelitian utama digunakan variasi *pre-treatment* menggunakan ozon dengan variasi waktu operasi 24 jam, 48 jam dan tanpa *pre-treatment* (kontrol). Variasi untuk durasi proses aerobik-anoksik digunakan waktu 45 jam untuk tiap siklus dengan variasi (dalam jam) 22,5 jam-22,5 jam (50%-50%), 31,5 jam-13,5 jam (70%-30%), dan 36 jam-9 jam (80%-20%). Pengolahan aerobik-anoksik dilakukan secara bertahap dalam reaktor yang sama. Dalam sekali pengolahan dilakukan 5 kali siklus sehingga membutuhkan waktu 10 hari. Pada penelitian ini dilakukan tiga kali analisis parameter utama yaitu sebelum proses aerobik, setelah aerobik dan setelah anoksik. Parameter utama yang digunakan adalah analisis organik (COD), amonium-nitrogen, nitrat-nitrogen dan nitrit-nitrogen. Parameter tambahan yang digunakan adalah TKN, DO, BOD, pH, dan salinitas. Analisis parameter tambahan dilakukan pada saat awal siklus (hari ke-0) dan akhir siklus ke-5 (hari ke-10).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *pre-treatment* dengan ozon dan MBBR optimum dalam mengoksidasi zat organik dan nitrogen. *Pre-treatment* dengan ozon optimum pada variasi waktu operasi 48 jam dengan penyisihan COD dan amonium-nitrogen mencapai 53,85% dan 52,1%. Sedangkan, pengolahan lindi dengan MBBR optimum menurunkan jumlah COD, amonium-nitrogen, dan nitrat-nitrogen pada durasi proses aerobik-anoksik 36-9 jam dengan besar penyisihan masing-masing masing 92%, 65,98% dan 13,05%.

Kata Kunci : Lindi, *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR), Nitrogen, *Pre-treatment*, Senyawa organik

LEACHATE TREATMENT USING MOVING BED BIOFILM REACTOR (MBBR) WITH CHEMICAL PRE-TREATMENT FOR ORGANIC AND NITROGEN REMOVAL

Student : Arina Wida Imania
NRP : 3314100083
Departement : Environmental Engineering
Supervisor : Welly Herumurti, S.T., M.Sc.

ABSTRACT

Leachate is one of the main problems in Ngipik, Gresik Landfill, as a result of no decent treatment facility. Leachate contains matter compound pollutants and nitrogen from decomposition of high concentration waste. Leachate potentially pollute environment if adequate treatment is not provided. One effective way to treat leachate is using biological treatment such as Moving Bed Biofilm Reactor. MBBR has the ability to reduce organic matter and nitrogen through aerobic-anoxic process. MBBR works with the principle of activated sludge process, using a media as a breeding ground for microorganisms. This study aims to determine the effectiveness of nitrogen reduction and organic matter in leachate through MBBR treatment with chemical pre-treatment variation using ozone and the duration of aerobic-anoxic process.

This research uses leachate samples obtained in Ngipik, Gresik Landfill and sludge samples from clarifier unit's return activated sludge in Keputih Domestic Waste Water Treatment Plant as biomass source. The research conducted with batch method using reactors with capacity of 5 L each. Reactors were equipped with aerator and submersible pump to facilitate the conditioning of anoxic-anoxic processes in MBBR. To create aerobic condition, the aerator and submersible pumps will be turned on, while to create anoxic condition, the aerator will be switched off by keeping the submersible pump on. In its operation, MBBR requires a media where microorganisms can form biofilms. The media used is Kaldnes media type 1 (media K1) of 1 L (20% by volume of reactor). The research begins with the initial characteristic analysis stage, seeding, and acclimatization. During main research, pretreatment

variation with ozone of 24 hours, 48 hours, and without pretreatment are used. While variation for duration of aerobic-anoxic process of 45 hours for each cycle with variation (in hours) 22.5 hours-22.5 hours (50% -50%), 31.5 hours-13.5 hours (70% - 30%), and 36 hours-9 hours (80% - 20%) are used. Aerobic-anoxic treatment is carried out gradually in the same reactor. In one-time processing 5 cycles are done, so it takes up to 10 days. This research conducts three times of main parameters analysis; before aerobic process, after aerobic, and after anoxic. The main parameters used were organic analysis (COD), ammonium-nitrogen, nitrate-nitrogen and nitrite-nitrogen. Additional parameters used are TKN, DO, BOD, pH, and salinity. Additional parameter analysis is performed at the beginning of the cycle (day 0) and by the end of the fifth cycle (10th day).

The result showed that pre-treatment with ozone and MBBR is optimum in oxidizing organic matter and nitrogen. Pre-treatment with ozone is optimum on 48 hours operating time with COD and ammonium-nitrogen removal up to 53.85% and 52.1%. Optimum MBBR removes COD, ammonium-nitrogen, and nitrate-nitrogen on aerobic-anoxic process during 36-9 hours operating time with removal of 92%, 65,98% and 13,05%.

Keywords: Leachate, Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR), Nitrogen, Pre-treatment, Organic matters

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah memberikan ilmu, perlindungan, bimbingan, rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul **“Pengolahan Lindi Menggunakan *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) Dengan *Pre-treatment* Kimiawi Untuk Menurunkan Konsentrasi Organik dan Nitrogen”** dengan baik. Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu kelancaran pembuatan laporan tugas akhir ini, yakni:

1. Bapak Welly Herumurti, ST., M.Sc., selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah memberikan banyak ilmu, kesabaran, bantuan, motivasi serta waktu selama proses pembuatan tugas akhir ini.
2. Ibu Ir. Ellina S Pandebesie, MT, Ibu Harmin Sulistyaning Titah, ST., MT., PhD dan Ibu Bieby Vojjant Tangahu, ST., MT., PhD selaku dosen penguji yang telah memberikan banyak masukan, kritik dan saran yang membangun.
3. Bapak dan Ibu laboran yang telah membantu memfasilitasi serta melancarkan kegiatan penelitian.
4. Teman-teman Teknik Lingkungan angkatan 2014 dan teman-teman lainnya yang telah memberikan bantuan pelaksanaan penelitian dan semangat.
5. Semua pihak yang telah membantu pembuatan tugas akhir ini.

Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan oleh penulis. Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca.

Surabaya, Januari 2018
Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Manfaat.....	4
1.5 Ruang Lingkup.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Pengertian dan Karakteristik Lindi.....	5
2.2 <i>Moving Bed Biofilm Reactor</i> (MBBR).....	8
2.3 Degradasi Zat Organik dan Nitrogen Pada Proses Aerobik dan Anoksik.....	11
2.4 Faktor yang Mempengaruhi Kinerja MBBR.....	12
2.5 Penelitian Terdahulu Mengenai MBBR.....	13
2.6 <i>Pre-treatment</i> Menggunakan Ozon pada Lindi.....	15
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	17
3.1 Kerangka Penelitian.....	17
3.2 Pengambilan Sampel dan Perlakuan Sebelum Uji.....	18
3.3 Analisis Karakteristik Awal.....	19
3.4 Pembuatan Reaktor.....	19
3.5 <i>Seeding</i> dan Aklimatisasi.....	20
3.6 Penelitian Pendahuluan.....	21
3.7 Pelaksanaan Penelitian.....	22
3.8 Metode Analisis Sampel.....	27
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1 Analisis Awal Karakteristik Lindi dan Lumpur.....	31
4.2 <i>Seeding</i> dan Aklimatisasi.....	32
4.3 <i>Pre-treatment</i> Lindi Dengan Ozon.....	34
4.4 Penelitian Utama.....	37
4.4.1 Analisis Zat Organik.....	38

4.4.2	Hasil Penurunan Konsentrasi Nitrogen.....	47
4.4.3	Analisis BOD dan BOD/COD.....	61
4.4.4	Analisis Dissolved Oxygen.....	63
4.4.5	Analisis Biomass Sebagai MLSS.....	66
4.4.6	Analisis pH.....	67
4.4.7	Analisis Salinitas.....	68
4.5	Penentuan Pengaruh Durasi Proses Aerobik-Anoksik Terhadap Parameter Organik dan Nitrogen.....	70
4.6	Ringkasan Kinerja MBBR.....	73
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....		75
5.1	Kesimpulan.....	75
5.2	Saran.....	75
DAFTAR PUSTAKA.....		lxxvii
LAMPIRAN-LAMPIRAN.....		lxxxiii
BIOGRAFI PENULIS.....		cxiii

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Polutan pada Lindi	5
Tabel 2. 2 Karakteristik Lindi Berdasarkan Usia TPA	6
Tabel 2. 3 Karakteristik Lindi TPA Ngipik	7
Tabel 2. 4 Baku Mutu Lindi	8
Tabel 3. 1 Variasi Durasi Aerobik-Anoksik dan <i>Pre-treatment</i>	23
Tabel 3. 2 Variabel Penelitian.....	25
Tabel 3. 3 Metode Analisis Parameter Utama	27
Tabel 3. 4 Metode Analisis Parameter Tambahan	27
Tabel 4. 1 Hasil Analisis Awal Karakteristik Lindi dan Lumpur ...	31
Tabel 4. 2 Konsentrasi COD pada Tahap Aklimatisasi	33
Tabel 4. 3 Hasil Analisis pada Tahap <i>Pre-treatment</i>	35
Tabel 4. 4 Perhitungan <i>Mass Balance</i> COD	43
Tabel 4. 5 Perhitungan <i>Mass Balance</i> Nitrogen	57
Tabel 4. 6 Hasil Uji ANOVA dengan Program Minitab 16.....	70

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 (a) Kondisi Aerobik dan (b) Kondisi Anoksik pada MBBR.....	9
Gambar 2. 2 Media Kaldnes Tipe 1	10
Gambar 2. 3 Tahap Pembentukan Lapisan Biofilm pada Media	11
Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian	18
Gambar 3. 2 Reaktor Uji MBBR	20
Gambar 3. 3 Diagram Alir Pengolahan MBBR	25
Gambar 4. 1 Penyisihan COD pada Tahap Aklimatisasi	33
Gambar 4. 2 <i>Settleability Solid Test</i>	34
Gambar 4. 3 Efisiensi Penyisihan Konsentrasi COD pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam	40
Gambar 4. 4 Penyisihan Konsentrasi COD pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam	41
Gambar 4. 5 Penyisihan Konsentrasi COD pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam	41
Gambar 4. 6 <i>Mass Balance</i> COD pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam.....	44
Gambar 4. 7 <i>Mass Balance</i> COD pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam.....	45
Gambar 4. 8 <i>Mass Balance</i> COD pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam.....	46
Gambar 4. 9 Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam	48
Gambar 4. 10 Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam	49
Gambar 4. 11 Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam	49
Gambar 4. 12 Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 Jam	51
Gambar 4. 13 Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 Jam	52
Gambar 4. 14 Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 Jam	52
Gambar 4. 15 Konsentrasi Nitrit-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 Jam	54

Gambar 4. 16 Konsentrasi Nitrit-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 Jam	54
Gambar 4. 17 Konsentrasi Nitrit-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 Jam	55
Gambar 4. 18 <i>Mass Balance</i> Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam	58
Gambar 4. 19 <i>Mass Balance</i> Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam	59
Gambar 4. 20 <i>Mass Balance</i> Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam	60
Gambar 4. 21 Penyisihan BOD pada Setiap Durasi Proses Aerobik-Anoksik	61
Gambar 4. 22 Rasio BOD/COD pada MBBR pada Tiap Durasi Proses Aerobik-Anoksik	62
Gambar 4. 23 Hasil Analisis Dissolved Oxygen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam	64
Gambar 4. 24 Hasil Analisis Dissolved Oxygen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam	65
Gambar 4. 25 Hasil Analisis Dissolved Oxygen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam	65
Gambar 4. 26 Konsentrasi MLSS pada Setiap Durasi Proses Aerobik-Anoksik	67
Gambar 4. 27 Nilai pH pada MBBR pada Tiap Durasi Proses Aerobik-Anoksik	68
Gambar 4. 28 Nilai Salinitas pada Setiap Durasi Proses Aerobik-Anoksik	69

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 PERHITUNGAN DEBIT AERATOR	xxi
LAMPIRAN 2 PERHITUNGN KEBUTUHAN GULA UNTUK SEEDING	lxxxv
LAMPIRAN 3 PENENTUAN PANJANG GELOMBANG DAN KURVA KALIBRASI.....	lxxxvii
LAMPIRAN 4 HASIL ANALISIS LABORATORIUM	xciii
LAMPIRAN 5 DOKUMENTASI PENELITIAN	cviii

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

TPA Ngipik merupakan tempat pemrosesan akhir sampah yang terletak di lahan PT. Semen Indonesia dan dioperasikan oleh Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Gresik. TPA Ngipik beroperasi dengan sistem *open dumping* dan belum dilengkapi dengan fasilitas pengolahan lindi yang memadai (Arofah *et al.*, 2012). Instalasi pengolahan lindi menggunakan *Anaerobic Baffled Reactor* (ABR) tidak berjalan secara optimum sehingga kandungan bahan organik dan nitrogen pada lindi TPA Ngipik sangat tinggi (Ni'am, 2013). Bahan organik dan amonium nitrogen merupakan komponen pencemar utama pada lindi, sedangkan sisanya terdiri atas logam berat, garam anorganik, dan zat organik terklorinasi lain (Renou *et al.*, 2008). Kadar nitrogen dan zat organik pada lindi semakin meningkat seiring bertambahnya usia lindi. Hal ini mengakibatkan lindi semakin sulit diolah karena komposisinya yang terlalu kompleks (Zhang *et al.*, 2017). Faktor lain yang juga mempengaruhi konsentrasi lindi adalah variasi cuaca, jenis sampah dan komposisi sampah (Li *et al.*, 2010).

Keberadaan lindi berpotensi mengakibatkan pencemaran lingkungan, seperti pencemaran tanah, badan air permukaan dan air tanah (Ngoc dan Schnitzer, 2009). Lindi yang tidak terkontrol dapat mencemari air tanah melalui perkolasi tanah (Han *et al.*, 2014). Kontaminasi lindi berpotensi menyebabkan efek negatif untuk habitat, lingkungan bahkan kesehatan manusia (Brennan *et al.*, 2017). Adanya kontaminasi oleh lindi mengakibatkan nilai BOD lingkungan semakin menurun, sedangkan nilai COD meningkat hingga 40 kali lipat (Lopes *et al.*, 2012). Senyawa nitrogen dalam lindi (umumnya berbentuk nitrat) juga merupakan penyebab eutrofikasi sungai dan penurunan kualitas air yang dapat mengancam kesehatan manusia (Li *et al.*, 2010).

Salah satu cara menurunkan konsentrasi nitrogen pada lindi adalah dengan pengolahan biologis dengan nitrifikasi-denitrifikasi (Kulikowska, 2012) melalui proses aerobik dan anoksik (Kermani, *et al.*, 2008). Proses aerobik berperan dalam penurunan kadar amonium, sedangkan proses anoksik memainkan peran

penting dalam menurunkan senyawa organik (COD) (Chen *et al.*, 2008). Pengolahan biologis pada lindi digunakan untuk menurunkan kadar amonium yang tinggi, konsentrasi zat organik *biodegradable* dan meningkatkan rasio C/N yang rendah (Eldyasti *et al.*, 2010). Pengolahan biologis terbukti mampu menurunkan zat organik dan senyawa nitrogen dengan sangat efektif bahkan pada lindi yang memiliki rasio BOD/COD rendah (Abbas *et al.*, 2009).

Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) merupakan pengolahan biologis kombinasi yang memanfaatkan dua bentuk biomassa sekaligus, yaitu flok tersuspensi dan terlekat (biofilm). Prinsip kerja MBBR didasari pada penggunaan media sebagai tempat perkembangbiakkan mikroorganisme. Media dijaga agar terus bergerak di dalam tangki aerasi sehingga biomassa akan tumbuh membentuk biofilm di permukaannya (Hajipour *et al.*, 2011). Secara prinsip pengolahan, MBBR merupakan pengembangan dari proses *activated sludge* dan *fluidized bed reactor*. Perbedaan utama dari MBBR dengan sistem *activated sludge* konvensional lainnya adalah tidak diperlukannya resirkulasi lumpur (Metcalf dan Eddy, 2014). Selain itu, MBBR membutuhkan lahan yang relatif kecil, waktu pengolahan yang singkat, dapat digunakan untuk *flow* yang bervariasi, tidak menyebabkan *clogging*, *head loss* rendah, area permukaan spesifik biofilm luas, dan tidak membutuhkan *backwashing* (Gulhane dan Kotangale, 2013). MBBR juga terbukti mampu menurunkan kadar karbon organik dan nutrisi secara efektif tanpa menimbulkan masalah pada proses lumpur aktifnya (Al-Rekabi, 2015).

MBBR umumnya didahului dengan *pre-treatment* untuk meningkatkan efisiensi pengolahan. *Pre-treatment* juga berfungsi untuk mengoptimalkan penyisihan senyawa organik yang tidak mampu dicapai secara maksimum oleh proses nitrifikasi-denitrifikasi. Proses ozonasi merupakan salah satu *pre-treatment* yang umum digunakan dalam mengolah lindi karena kekuatan oksidasinya yang tinggi (Tizaoui *et al.*, 2007). Reaksi ozon dapat bersifat langsung dan tidak langsung. Reaksi ozon langsung merupakan reaksi molekul ozon dengan senyawa kimia. Sedangkan reaksi ozon tidak langsung dapat terbentuk dari dekomposisi ozon menjadi ion OH^- radikal (OH^*) yang merupakan oksidan terkuat di dalam air. Penggunaan ozon sebagai *pre-treatment* dalam pengolahan lindi dapat meningkatkan efisiensi

penyisihan COD sebesar 60% dari konsentrasi awal. Selain itu, ozon juga mampu meningkatkan biodegradabilitas hingga 0,5 (Lopez *et al.*, 2004). Dalam pengaplikasiannya, ozon dapat digunakan sebagai senyawa tunggal maupun dikombinasi dengan penggunaan *pre-treatment* lain seperti hidrogen peroksida (H_2O_2).

Durasi *pre-treatment* dan proses aerobik-anoksik merupakan faktor yang berpengaruh pada pengolahan dengan MBBR. Oleh karena itu dilakukan penelitian mengenai pengolahan lindi menggunakan MBBR dengan variasi durasi operasi *pre-treatment* dan proses aerobik-anoksik. Diharapkan dengan adanya penelitian ini dapat menjadi acuan bagi pengelola TPA sebagai alternatif untuk penggunaan teknologi pengolahan lindi melalui pengolahan biologis (*fluidized attached growth*) berupa *Moving Bed Biofilm Reaktor* (MBBR).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana variasi durasi ozon yang optimum sebagai *pre-treatment* terhadap pengolahan lindi?
2. Bagaimana durasi aerobik-anoksik yang optimum dalam mengolah lindi menggunakan *Moving Bed Biofilm Reaktor* (MBBR)?
3. Bagaimana kemampuan *Moving Bed Biofilm Reaktor* (MBBR) dalam menurunkan konsentrasi organik dan nitrogen pada lindi?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. Menentukan variasi durasi ozon yang optimum sebagai *pre-treatment* terhadap pengolahan lindi.
2. Menentukan durasi aerobik-anoksik yang optimum dalam mengolah lindi menggunakan *Moving Bed Biofilm Reaktor* (MBBR).
3. Menentukan kemampuan *Moving Bed Biofilm Reaktor* (MBBR) dalam menurunkan konsentrasi organik dan nitrogen pada lindi.

1.4 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah

1. Memberikan informasi secara ilmiah mengenai *Moving Bed Biofilm Reaktor* (MBBR) dengan sistem *batch* dalam menurunkan senyawa organik dan nitrogen yang terdapat pada lindi.
2. Menjadi acuan dalam penelitian lebih lanjut tentang penggunaan *pre-treatment* dan durasi aerobik-anoksik yang optimum pada MBBR untuk menurunkan kadar organik dan nitrogen.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penelitian ini adalah

1. Sampel lindi berasal dari TPA Ngipik Gresik dan diambil pada musim kemarau.
2. Sumber mikroorganisme berasal dari *return sludge* unit *clarifier* IPLT Keputih.
3. Reaktor dioperasikan dengan sistem *batch*.
4. Media yang digunakan yaitu media Kaldnes tipe 1 (media K1).

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian dan Karakteristik Lindi

Lindi adalah cairan residu yang dihasilkan dari berbagai macam proses kimia, fisika dan biologis yang terjadi pada sampah di TPA. Lindi timbul karena adanya air yang meresap (mengalami perkolasi) melalui lapisan-lapisan sampah yang ada di TPA (Zhong *et al.*, 2017). Komponen utama lindi adalah zat organik dan amonium-nitrogen, sedangkan sisanya terdiri atas logam berat, garam anorganik, dan zat organik terklorinasi lain. Kandungan lindi selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Polutan pada Lindi

Kelompok Polutan Lindi	Komponen
1. Senyawa organik	Asam, alkohol, aldehida dan biasa dikualifikasikan sebagai COD (<i>Chemical Oxygen Demand</i>), BOD (<i>Biochemical Oxygen Demand</i>), DOC (<i>Dissolved Organic Carbon</i>), dan asam lemak volatil.
2. Senyawa anorganik	Sulfat, klorida, amonium, kalsium, magnesium, natrium, kalium, hidrogen karbonat, besi, mangan dan logam berat seperti timbal, nikel, tembaga, kadmium, kromium dan zink.
3. Senyawa organik xenobiotika (tidak terjadi secara alami di alam)	Hidrokarbon aromatik, fenol, alifatik klorinasi, pestisida dan plastik termasuk PCB, dioksin, dll.

Sumber : Lee *et al.*, 2010

Bahan pencemar yang terkandung di dalam lindi dapat menyebabkan gangguan kesehatan manusia serta mencemari lingkungan (tanah, air permukaan atau air tanah). Pengaruh lindi

mengakibatkan perubahan warna, peningkatan kekeruhan dan penurunan kualitas air lainnya.

Lindi yang berasal dari TPA dengan komposisi sampah perkotaan memiliki karakteristik yang relatif sama, yaitu memiliki kandungan organik *biodegradable* rendah. Nilai *biodegradability* lindi yang ditunjukkan melalui rasio BOD₅/COD mencapai nilai dibawah 0.3. Hal ini mengakibatkan efluen pengolahan biologis lindi selalu mengandung total nitrogen dalam konsentrasi tinggi, terutama nitrat (Li *et al.*, 2010). Kuantitas timbulan lindi dipengaruhi oleh faktor curah hujan, aliran permukaan, infiltrasi, evaporasi, transpirasi, suhu, komposisi sampah, kelembapan, kedalaman dan ketinggian tumpukan sampah di TPA. Kualitas lindi dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor berikut:

1. Komposisi material sampah padat
2. Musim
3. Suhu dan kelembapan
4. Teknis operasional pengelolaan lindi
5. Umur timbunan sampah di TPA

(Riansyah dan Wesen, 2012).

Lindi TPA dikelompokkan menjadi tiga kelompok utama berdasarkan usia TPA, yaitu muda (kurang dari 5 tahun), intermediet (5-10 tahun), dan tua atau stabil (lebih dari 10 tahun). Tipikal konsentrasi kimia masing-masing kelompok lindi dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Karakteristik Lindi Berdasarkan Usia TPA

Parameter	Muda (<5 tahun)	Intermediate (5-10 tahun)	Tua (>10 tahun)
pH	6.5	6.5-7.5	> 7.5
COD (mg/L)	> 10.000	4000-10.000	< 4000
BOD ₅ /COD	> 0.3	0.1-0.3	< 0.1
Senyawa organik	80% asam lemak volatil (VFA)	5-30% VFA + asam fulvat dan humat	asam fulvat dan humat
Logam berat	rendah-medium	rendah	rendah
<i>Biodegradability</i>	tinggi	medium	rendah

Sumber : Bhalla *et al.*, 2013

Seiring meningkatnya usia TPA, kandungan organik (COD) pada lindi akan semakin berkurang, sedangkan konsentrasi amonium-nitrogen akan semakin meningkat (Yusmartini dan Setiabudidaya, 2013). Beberapa parameter uji yang dapat digunakan untuk karakteristik lindi antara lain adalah pH, warna, kekeruhan, TSS (*Total Suspended Solid*), VSS (*Volatile Suspended Solid*), COD (*Chemical Oxygen Demand*), BOD (*Biological Oxygen Demand*), TKN (*Total Kjeldahl Nitrogen*), NH₃-N (amonium-nitrogen), NO₃-N (nitrat-nitrogen), NO₂-N (nitrit-nitrogen), PO₄⁻ (fosfat), fenol, dan logam (Zn, Cu, Mn, Cr, Pb dan Fe) (Aljumriana, 2015).

Pada penelitian ini sampel lindi yang digunakan merupakan lindi yang berasal dari TPA Ngipik Gresik. Lindi yang diambil berasal dari kolam anaerobik karena sudah terkondisikan pada suasana fakultatif atau anoksik. Berdasarkan penelitian sebelumnya, karakteristik lindi TPA Ngipik dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Karakteristik Lindi TPA Ngipik

Parameter	Satuan	Nilai
COD	mg/L	7062
NH ₄ -N	mg/L	602,9
NO ₃ -N	mg/L	42,86
BOD	mg/L	601
TKN	mg/L	745,7
pH	-	8,36
Salinitas	ppt	5,48

Sumber: Huda, 2017

Di Indonesia, baku mutu atau ambang batas kualitas lindi yang diperbolehkan untuk dibuang ke badan air diatur 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, seperti pada Tabel 2.4. Berdasarkan Tabel 2.3, terlihat bahwa kualitas lindi TPA Ngipik Gresik masih jauh di atas baku mutu yang diperbolehkan meski sudah terdapat pengolahan anaerobik di

kolam penampungan. Oleh karena itu dibutuhkan pengolahan lindi lebih lanjut untuk memenuhi baku mutu yang diperbolehkan.

Tabel 2. 4 Baku Mutu Lindi

Parameter	Kadar Paling Tinggi	
	Nilai	Satuan
pH	6-9	-
BOD	150	mg/L
COD	300	mg/L
TSS	100	mg/L
N Total	60	mg/L
Merkuri	0,005	mg/L
Kadmium	0,1	mg/L

Sumber : (Kementerian Lingkungan Hidup, 2016)

2.2 *Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)*

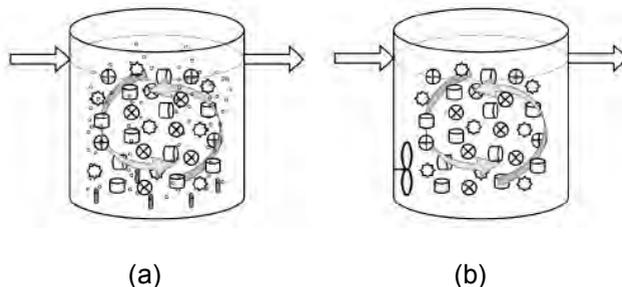
Moving Bed Biofilm Reaktor (MBBR) merupakan pengembangan teknologi pengolahan biologis dari proses *activated sludge* dan proses biofilter (Kermani, *et al.*, 2008). MBBR dipercaya efektif menurunkan senyawa organik dan nitrogen karena mampu menggabungkan keunggulan dari sistem *attached growth* dan *suspended growth*. Hal ini ditunjukkan dengan pertumbuhan biomassa yang dapat tumbuh baik di media (biofilm) maupun di dalam limbah cair itu sendiri. Selama beroperasi, media dijaga agar terus bergerak dan tersirkulasi di dalam reaktor. Hal ini dikarenakan lebih dari 90% biomassa di dalam MBBR tumbuh dan berkembangbiak di dalam media tersebut (Kawan *et al.*, 2016).

Ciri yang membedakan MBBR dengan sistem *activated sludge* lainnya adalah tidak diperlukannya resirkulasi lumpur (Metcalf dan Eddy, 2014). Hal ini dikarenakan MBBR menggunakan seluruh volume reaktornya untuk pertumbuhan biomassa sehingga tidak menghasilkan lumpur dalam jumlah banyak. Hal ini menjadi salah satu keunggulan MBBR karena hanya biomassa berlebih yang harus dipisahkan.

MBBR relatif membutuhkan lahan yang lebih kecil dan waktu pengolahan yang lebih singkat. Pengoperasiannya lebih sederhana karena tidak memerlukan resirkulasi lumpur dan *backwashing*. MBBR tidak menyebabkan *sludge bulking* yang

dapat mengakibatkan *clogging* dan mampu bertahan terhadap *flow* yang bervariasi (Gulhane dan Kotangale, 2013). MBBR dipercaya lebih adaptif apabila diaplikasikan ke dalam sistem kontinu dibanding teknologi *attached growth* lainnya, seperti *trickling filter*, *rotating biological reactor*, dan lain-lain. Hal ini dikarenakan MBBR tidak memerlukan perawatan khusus untuk kontrol ketebalan biofilm ataupun *flushing* sisa padatan (Metcalf dan Eddy, 2014).

Reaktor MBBR dioperasikan pada kondisi aerobik dan anoksik. Kondisi aerobik digunakan untuk menurunkan kadar organik dan menjaga kelangsungan proses nitrifikasi, sedangkan kondisi anoksik untuk denitrifikasi (Chen et al., 2008a). Dalam menciptakan kondisi aerobik, MBBR menggunakan sistem aerasi untuk mendukung ketersediaan oksigen. Sistem aerasi dapat diciptakan dengan penggunaan *coarse bubble* (*bubbling* udara). Injeksi udara mengakibatkan terjadinya pengadukan yang menyebabkan pergerakan media biofilm. Pergerakan tersebut berguna untuk menjaga resirkulasi mikroorganisme pada biofilm. Kondisi anoksik diciptakan dengan mematikan sistem aerasi namun tetap menjaga pergerakan media di dalam reaktor. Umumnya, pergerakan diciptakan dengan menggunakan pengaduk mekanik yang terendam dalam reaktor (Kermani, et al., 2008). Kondisi aerobik ditandai dengan adanya kecukupan jumlah oksigen terlarut minimal 2 mg/L, sedangkan kondisi anoksik ditandai dengan adanya jumlah oksigen terlarut kurang dari 2 mg/L.



Gambar 2. 1 (a) Kondisi Aerobik dan (b) Kondisi Anoksik pada MBBR

Sumber : Kawan et al., 2016

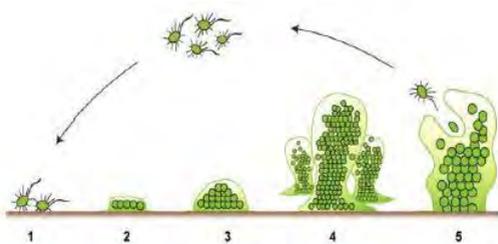
Media menjadi ciri khas utama MBBR. Salah satu media yang umum digunakan adalah media Kaldnes tipe 1 (media K1). Media K1 terbuat dari *High Density Polyethylene* (HDPE) dan berbentuk silinder kecil dengan diameter 9,1 mm serta panjang 7,2 mm. Media K1 memiliki *specific gravity* 0,96 dengan luas area spesifik mencapai $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Aygün *et al.*, 2008). Keutamaan MBBR adalah proses *fluidized attached growth* (mikroorganisme melekat pada media), sehingga kapasitas pengolahan adalah sebuah fungsi dari luas permukaan spesifik reaktor. Luas permukaan spesifik reaktor dihitung dengan membagi luas permukaan media yang ditumbuhi biofilm dan volume reaktor. Luas permukaan spesifik media merefleksikan jumlah luas permukaan yang tersedia untuk pertumbuhan biofilm per-unit volume media. Selain itu, jumlah media yang digunakan MBBR juga dapat sangat beragam dan dapat mempengaruhi efisiensi pengadukan. Jumlah media yang besar dapat menurunkan efisiensi pengadukan di dalam MBBR.



Gambar 2. 2 Media Kaldnes Tipe 1

Sumber : Aygün *et al.*, 2008

Penggunaan media dalam MBBR berkaitan erat dengan fungsinya untuk menurunkan senyawa organik dan nitrogen. Ketebalan lapisan biofilm menunjukkan tingkat pertumbuhan mikroorganisme. Adanya sirkulasi di dalam MBBR menyebabkan mikroorganisme terus beregenerasi sehingga mampu menurunkan senyawa organik dan nitrogen dengan baik.

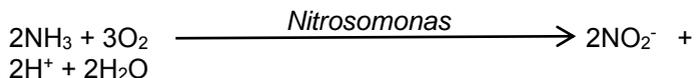


Gambar 2. 3 Tahap Pembentukan Lapisan Biofilm pada Media
 Sumber : Kawan *et al.*, 2016

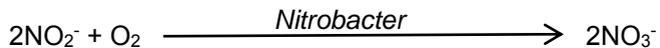
2.3 Degradasi Zat Organik dan Nitrogen Pada Proses Aerobik dan Anoksik

MBBR mampu secara efektif menurunkan senyawa organik dan nitrogen melalui proses nitrifikasi yang berlangsung dalam kondisi aerobik. Nitrifikasi adalah proses pembentukan senyawa nitrat dari senyawa amonium. Pada proses ini ion amonium dioksidasi menjadi ion nitrit oleh bakteri *Nitrosomonas*, serta ion nitrit menjadi ion nitrat oleh bakteri *Nitrobacter*. Secara umum, proses nitrifikasi dapat ditunjukkan melalui skema sebagai berikut:

1. Tahap nitritasi, yaitu tahap oksidasi amonium (NH_3) menjadi nitrit nitrogen (NO_2^-) oleh bakteri *Nitrosomonas* dengan reaksi sebagai berikut:



2. Tahap nitratasi, yaitu tahap saat oksidasi nitrit nitrogen (NO_2^-) menjadi nitrat nitrogen (NO_3^-) oleh bakteri *Nitrobacter* dengan reaksi sebagai berikut:



(Sawyer *et al.*, 2003)

Selama proses nitrifikasi berlangsung, sekaligus terjadi proses penyisihan senyawa organik akibat adanya proses oksidasi aerobik. Proses oksidasi terjadi ketika zat organik memberikan satu atau lebih elektronnya kepada agen pengoksidasi. Dalam hal

ini, agen pengoksidasi atau yang menjadi donor elektron adalah oksigen.

Dalam pengoperasian MBBR, proses oksidasi aerobik dan nitrifikasi berada di awal proses pengolahan (*primarily treatment*). Hal ini dikarenakan kedua proses tersebut mampu menurunkan sebagian besar zat organik terlarut yang berimbans pada minimalisasi pertumbuhan bakteri heterotropik. Bakteri heterotropik merupakan kompetitor bagi bakteri pereduksi nitrogen yang dapat mengganggu pertumbuhan bakteri pereduksi nitrogen pada lapisan biofilm (Metcalf dan Eddy, 2014). Selain itu, proses nitrifikasi juga mampu meningkatkan efisiensi pengolahan MBBR karena mampu menjamin ketersediaan nitrogen terolah untuk proses pengolahan selanjutnya.

Proses aerobik selanjutnya diikuti dengan proses anoksik melalui proses denitrifikasi. Denitrifikasi merupakan proses penyisihan nitrat menjadi gas nitrogen. Nitrat (NO_3^-) digunakan sebagai akseptor elektron alternatif dalam respirasi anaerobik/anoksik. Nitrat selanjutnya direduksi menjadi gas-gas nitrogen seperti N_2 , NO , atau N_2O (Sawyer *et al.*, 2003). Skema dari proses denitrifikasi diawali dengan penyisihan nitrat menjadi nitrit yang kemudian diikuti oleh penyisihan nitrit. Proses ini dibantu oleh bakteri denitrifikasi, seperti *Pseudomonas denitrificans*. Proses anoksik membutuhkan sumber karbon untuk mendukung pertumbuhan biomassa dan serta memenuhi kebutuhan nitrat atau nitrit sebagai akseptor elektron. Oleh sebab itu, proses anoksik didahului dengan proses aerobik.

2.4 Faktor yang Mempengaruhi Kinerja MBBR

Faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja MBBR antara lain *hydraulic retention time* (HRT), beban permukaan atau *surface loading rate*, dan tingkat oksigen terlarut atau *dissolve oxygen* (DO) di dalam reaktor MBBR (Kawan *et al.*, 2016). Peningkatan efisiensi MBBR berbanding lurus dengan besarnya HRT. Untuk mencapai efisiensi yang tinggi, HRT yang disarankan adalah lebih dari 5 jam. Hal ini dikarenakan semakin besar HRT maka waktu kontak mikroorganisme dalam mengolah senyawa organik dan nitrogen akan semakin besar (Najafpour *et al.*, 2006). HRT juga berhubungan dengan waktu pembentukan biofilm sehingga berpengaruh pada perkembangan lapisan biofilm aktif di

permukaan media. Rentang HRT yang cocok untuk MBBR berkisar 12 hingga 16,5 jam dan semakin berkurang pada HRT di bawah 9 jam (Hajjipour *et al.*, 2011).

Untuk faktor beban permukaan, nilai beban yang besar dapat menyebabkan tingkat efisiensi pengolahan semakin menurun (Aygün *et al.*, 2008). Pengaruh tingkat DO menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi DO juga akan meningkatkan efisiensi pengolahan. Untuk mencapai efisiensi pengolahan yang optimum, dibutuhkan konsentrasi DO berkisar 2 mg/L atau lebih. Peningkatan DO dari 2 mg/L hingga 6 mg/L mampu meningkatkan efisiensi pengolahan hingga 5,8%. Konsentrasi DO yang terlalu rendah dapat mengakibatkan proses denitrifikasi pada lapisan dalam biofilm tidak terjadi (Wang *et al.*, 2005). Selain itu, ukuran dan bentuk media, persentase volume media dalam reaktor MBBR, teknik difusi serta tingkat pemberian sistem aerasi juga turut mempengaruhi tingkat efisiensi pengolahan MBBR (Kawan *et al.*, 2016).

2.5 Penelitian Terdahulu Mengenai MBBR

Ide penggunaan *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) berawal dari penggunaan media biofilm plastik yang diaplikasikan pada proses *Integrated Fixed Film Activated Sludge* (IFAS). Penelitian ini dikembangkan oleh Norwegian University of Science and Technology (NTNU) bekerjasama dengan korporasi Kaldnes Miljøteknologi pada tahun 1989 (Kawan *et al.*, 2016). Media bertujuan memberikan tempat bagi proses penyisihan nitrogen untuk menurunkan sumber limbah nitrogen di Laut Utara (Metcalf dan Eddy, 2014). Sejak saat itu, penggunaan media plastik untuk aplikasi MBBR pun banyak digunakan, terutama media Kaldnes.

Pada tahap awal penelitian, MBBR fokus menurunkan senyawa organik menggunakan teknologi *hybrid* antara sistem *activated sludge* dan biofilter membran. Penelitian dilakukan untuk mengolah limbah yang tercemar. Kemudian berkembang dengan mempelajari sistem aerasi tambahan. Sistem aerasi digunakan untuk memberikan kebutuhan oksigen yang cukup sehingga menjamin biofilm berada pada kondisi aerobik. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan tingkat biodegradasi limbah. Pada penelitian ini diperoleh hasil bahwa produksi mikroorganisme di MBBR

mencapai 10 kali lipat lebih banyak dibanding dengan sistem *activated sludge* konvensional (AAhl *et al.*, 2006).

Penelitian lain juga mengembangkan performa denitrifikasi pada MBBR menggunakan dua jenis media, salah satunya Kaldnes. Penggunaan media Kaldnes memberikan tempat yang lebih luas untuk berkembangbiakan mikroorganisme. Tingkat denitrifikasi maksimum yang diperoleh adalah 420 g N/m³.d (10°C) dan 730 g N/m³.d (20°C) untuk pengolahan limbah. Tingkat penyisihan COD melalui denitrifikasi maksimum mencapai 37% dengan beban volumetric zona anoksik sebesar 2,2 kg COD/m³.d (Maurer *et al.*, 2001).

Pengujian MBBR dengan *Hydraulic Retention Time* (HRT) 8 jam dan pengendapan 4 jam menunjukkan pertumbuhan mikroorganisme optimum pada minggu ke 4. Mikroorganisme mampu menurunkan senyawa organik secara optimum hingga 10 minggu pengujian berikutnya. Penelitian dilakukan skala laboratorium dengan volume reaktor 2L dan penggunaan media Kaldnes tipe 1 (media K1) sebanyak 50% dari volume reaktor. Selain itu, efisiensi pengolahan MBBR menunjukkan penurunan pada setiap kenaikan beban organik. Pada percobaan menggunakan beban organik 6, 12, 24, 48, dan 96 COD/m².d menunjukkan hasil efisiensi penyisihan COD berturut-turut sebesar 95,1%, 94,9%, 89,3%, 68,7% dan 45,2% (Aygün *et al.*, 2008).

Penggunaan MBBR diyakini sebagai teknologi alternatif yang cocok untuk pengolahan limbah domestik dan industri berbasis sistem *activated sludge*. Hal ini dikarenakan MBBR dapat diterapkan untuk pengolahan limbah skala besar. Dibuktikan dengan pengujian 3 buah MBBR berbentuk silinder dengan diameter 10 cm dan kedalaman 60 cm. MBBR tersebut diuji dengan limbah sintetik mengandung senyawa amina aromatik dan dioperasikan secara aerobik. Penelitian dilakukan dengan sistem *batch* yang kemudian dilanjutkan dengan kontinu. Influen yang digunakan mengandung konsentrasi COD sebesar 100 hingga 3500 mg/L. MBBR dioperasikan dengan HRT sebesar 8, 24, 48 dan 72 jam. Pada pengujian ini MBBR mampu menunjukkan efisiensi sebesar 90% untuk influen COD 750 mg/L, 87% untuk influen COD 1000 mg/L, dan 75% untuk influen COD 1500 mg/L (Delnavaz *et al.*, 2010).

2.6 *Pre-treatment* Menggunakan Ozon pada Lindi

Penambahan senyawa kimia sebagai *pre-treatment* pada pengolahan limbah menggunakan MBBR bisa menjadi langkah tambahan (Metcalf dan Eddy, 2014). *Pre-treatment* digunakan untuk menurunkan beban organik influen yang masuk ke dalam MBBR. *Pre-treatment* bahkan menjadi rekomendasi bagi MBBR yang ingin memperoleh efisiensi penyisihan senyawa organik dan proses nitrifikasi yang optimum. Selain itu, *pre-treatment* dapat digunakan untuk meminimalisasi pertumbuhan bakteri heterotropik yang menjadi kompetitor bagi bakteri nitrifikasi. Hal ini akan meningkatkan pencapaian penyisihan nitrogen karena kebutuhan amonium-nitrogen tercukupi dengan baik melalui proses nitrifikasi. Salah satu *pre-treatment* yang banyak digunakan dalam pengolahan lindi sampah adalah sistem ozonasi.

Ozon adalah oksidator yang sangat kuat dan bersifat tidak stabil pada konsentrasi tinggi. Dalam aplikasinya, ozon akan meluruh dan berubah menjadi oksigen. Penggunaan ozon pada *pre-treatment* dikarenakan ozon mengandung hidroksil bebas yang sangat reaktif dan merupakan salah satu oksidan terkuat. Hidroksil bebas tersebut adalah ion OH⁻ radikal (OH^{*}) hasil dari dekomposisi ozon (Gelardiansyah *et al.*, 2015). Sifat reaktifnya banyak dimanfaatkan untuk mendegradasi senyawa organik di dalam limbah (Zhang *et al.*, 2005). Penambahan ozon dapat dilakukan dengan cara injeksi debit ozon menggunakan *ozonizer*. Penggunaan ozon sebagai *pre-treatment* pengolahan lindi disebabkan karena sulitnya menurunkan senyawa organik lindi menggunakan pengolahan biologis akibat konsentrasi organik yang ekstrim. Penambahan efisiensi optimum penyisihan COD menggunakan reaksi ozon dapat mencapai 60% dari konsentrasi awal. Tingkat biodegradasi yang ditunjukkan oleh rasio BOD₅/COD juga mengalami kenaikan dari 0,2 menjadi 0,5 (Lopez *et al.*, 2004). Ozon juga dapat dikombinasikan dengan senyawa kimia lain seperti H₂O₂ (Tizaoui *et al.*, 2007). Penggunaan ozon bersamaan dengan H₂O₂ bahkan mampu menurunkan COD hingga 48% dan meningkatkan tingkat biodegradasi limbah hingga 0,7.

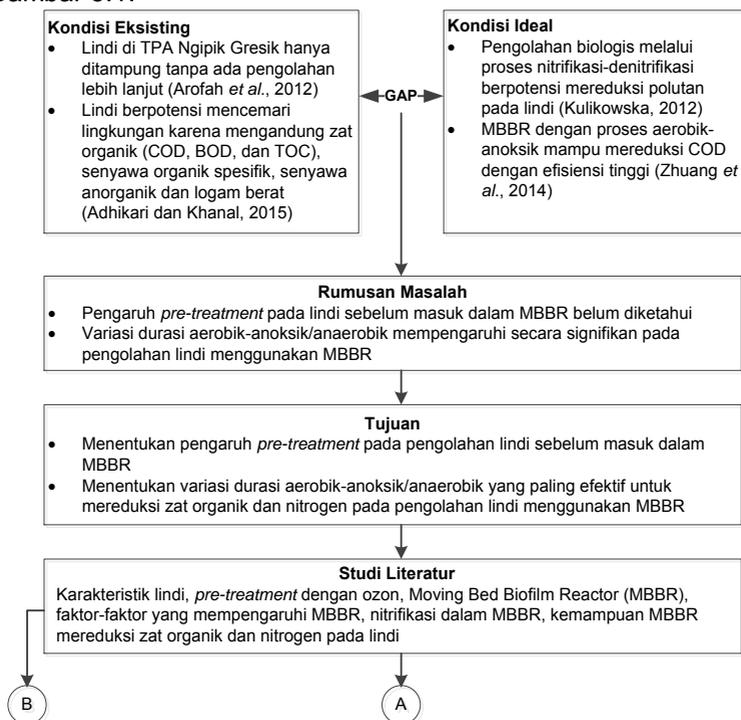
Adanya peningkatan debit ozon yang diinjeksikan dapat berimbas pada kenaikan efisiensi pengolahan (Sharma dan Ruparelia, 2017). Selain itu, peningkatan pH juga dapat

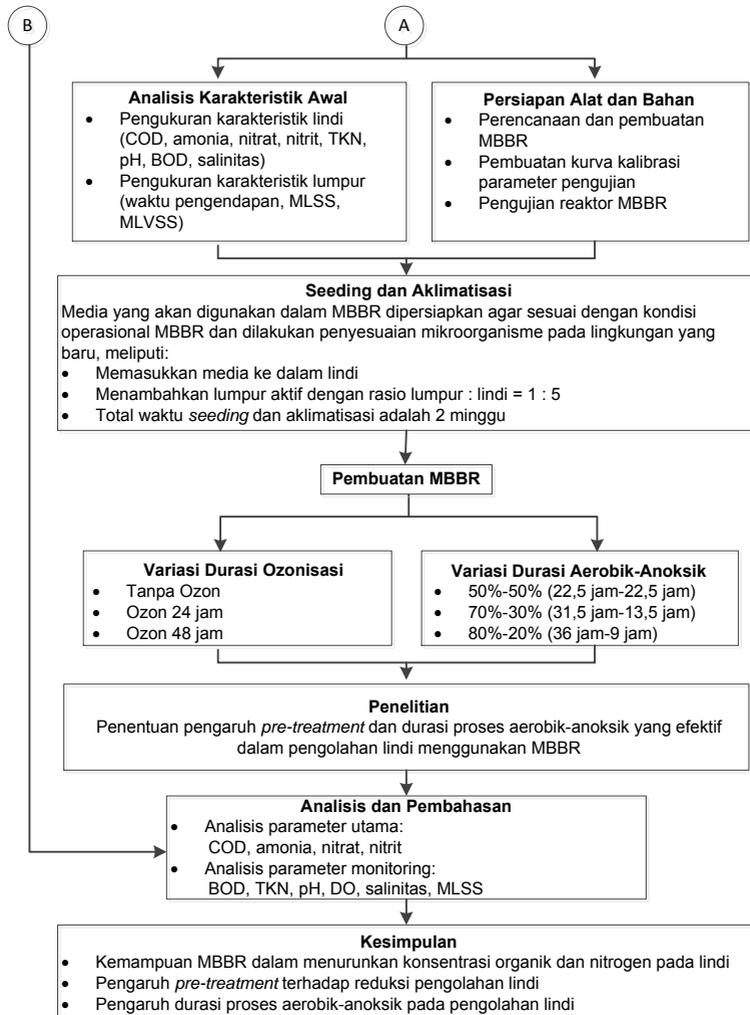
mempercepat reaksi peluruhan ozon sehingga dapat mempercepat terbentuknya senyawa radikal OH*. Degradasi organik oleh ozon dijelaskan melalui dua tahap. Tahap pertama ozon akan mengalami degradasi senyawa organik dan menghasilkan senyawa lain seperti karbonat. Tahap kedua, senyawa karbonat yang terbentuk pada tahap satu akan dihilangkan menjadi karbondioksida sebagai proses mineralisasi (Rezagama, 2013). Hal ini mengakibatkan penggunaan ozon pada pengolahan lindi tidak menghasilkan produk sampingan berupa asam seperti yang dapat terjadi apabila menggunakan H₂O₂ sebagai *pre-treatment*.

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Kerangka Penelitian

Kegiatan penelitian dilakukan dalam skala laboratorium. Bahan uji yang digunakan berupa lindi dari TPA Ngipik Gresik dan lumpur aktif dari IPLT Keputih. Penelitian ini didasarkan atas adanya “GAP” antara kondisi ideal dengan kondisi eksisting sehingga dapat ditentukan rumusan masalah dan tujuan dari penelitian. Berikutnya, dilakukan persiapan awal penelitian yang terdiri dari persiapan alat dan bahan serta penelitian pendahuluan untuk memudahkan pelaksanaan penelitian. Setelah itu dilakukan analisis dan pembahasan terkait hasil penelitian untuk merumuskan kesimpulan. Kerangka penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.





Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian

3.2 Pengambilan Sampel dan Perlakuan Sebelum Uji

Sampel lindi diambil dari outlet instalasi pengolahan lindi (IPL) berupa ABR. Outlet IPL dipilih sebagai lokasi *sampling* karena merepresentasikan kondisi akhir lindi yang ada di TPA

Ngipik sebelum dibuang ke lingkungan. Pengambilan sampel dilakukan dalam satu waktu karena kondisi lindi di outlet IPL TPA Ngipik relatif sama untuk sepanjang waktu (dalam musim yang sama). Terbatasnya fasilitas pengawetan sampel di tempat uji menyebabkan pengawetan sampel tidak dilakukan. Untuk mengantisipasi adanya perubahan fisik, kimia dan biologis dari sampel maka akan dilakukan analisis karakteristik awal sebelum pengujian utama. Apabila terdapat perubahan kondisi hingga mencapai $\pm 10\%$ maka akan dilakukan pengambilan sampel ulang. Hal tersebut juga diterapkan pada pengambilan lumpur di IPLT Keputih. Lumpur yang diambil merupakan lumpur dari *return activated sludge* unit clarifier IPLT Keputih. Hal ini dikarenakan lumpur tersebut memiliki konsentrasi yang tinggi, yaitu sebesar 28000 mg/L (Aljumriana, 2015). Selain itu, lumpur juga sudah dalam kondisi anoksik sehingga lebih siap digunakan untuk mengolah zat organik dan nitrogen yang ada di lindi.

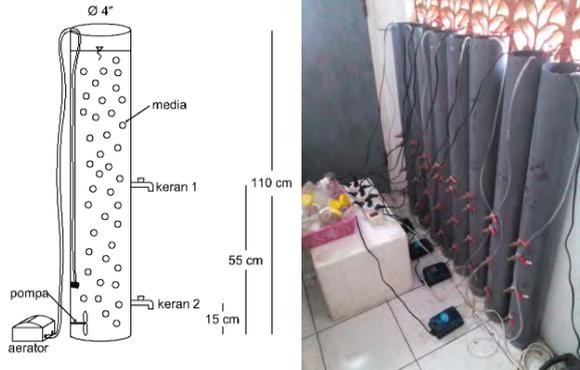
3.3 Analisis Karakteristik Awal

Analisis karakteristik awal berguna untuk mengetahui kualitas lindi dan lumpur aktif yang digunakan dalam penelitian ini. Dalam analisis ini dilakukan uji karakteristik yang meliputi COD, amonium, nitrat, nitrit, BOD, DO, TKN, pH, dan salinitas pada lindi serta uji MLSS dan MLVSS pada lumpur aktif. Pada analisis karakteristik awal juga dilakukan *settleability solid test* guna mengetahui waktu yang dibutuhkan oleh lumpur untuk mengendap (Metcalf and Eddy, 2003). *Settleability solid test* juga berguna untuk mengetahui jumlah lumpur yang terendapkan selama waktu pengendapan tersebut. Dari analisis tersebut maka akan diperoleh jumlah lindi dan lumpur yang harus dimasukkan ke dalam reaktor uji.

3.4 Pembuatan Reaktor

Reaktor MBBR terbuat dari pipa PVC dengan diameter $\pm 10,16$ cm (4 inchi) dan tinggi 110 cm dengan volume reaktor 8,9 L. Volume pengolahan pada reaktor MBBR adalah 5 L. Media yang digunakan adalah media Kaldness tipe 1 sebanyak 20% dari volume pengolahan atau sebanyak 1 L dan terendam dalam lindi. Reaktor yang dibutuhkan berjumlah sembilan reaktor. Dalam pengujian ini digunakan reaktor dengan variasi tanpa *pre-*

treatment sebagai reaktor kontrolnya. Reaktor dilengkapi dengan dua keran yang berada di tengah dan bagian bawah reaktor. Keran 1 digunakan untuk mengambil sampel lindi sedangkan keran 2 digunakan untuk mengambil sampel lumpur. Gambar reaktor dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Reaktor Uji MBBR

Dalam pengujian ini, reaktor dilengkapi dengan aerator dan pompa *submersible*. Aerator digunakan untuk menciptakan kondisi aerobik dengan memberikan suplai oksigen. Pada proses aerobik, aerator akan dinyalakan sedangkan pada kondisi anoksik/anaerobik, aerator akan dimatikan. Aerator yang digunakan merupakan Amara tipe BS-410 dengan debit output sebesar 3,5 L/menit. Penggunaan spesifikasi ini disesuaikan dengan kebutuhan debit aerator berdasarkan perhitungan (Lampiran A) sekaligus debit jagaan untuk menjamin tercapainya nilai DO > 2 mg/L pada kondisi aerobik.

Pompa *submersible* digunakan untuk menjaga agar media tetap bergerak di dalam reaktor. Pompa yang digunakan adalah Vosso tipe VS-804 dengan kapasitas pengadukan 2000 L/menit. Tinggi maksimal pengadukan oleh pompa yaitu maksimal 2 meter.

3.5 **Seeding dan Aklimatisasi**

Seeding adalah proses menumbuhkan mikroorganisme yang berasal dari lumpur aktif. Proses ini dilakukan untuk mendapatkan biomassa yang siap mengolah polutan lindi di dalam reaktor MBBR. Proses *seeding* dilakukan dengan cara

memasukkan lindi dan lumpur aktif ke dalam reaktor MBBR. Hal ini dilakukan untuk membiasakan mikroorganisme mencerna polutan yang terkandung di dalam lindi. Selain itu ditambahkan pula sukrosa yang berasal dari gula pasir. Jumlah gula yang dimasukkan ke dalam reaktor bergantung pada karakteristik lindi yang digunakan (Lampiran B). Gula berfungsi sebagai sumber organik bagi mikroorganisme sebelum nantinya mengolah 100% lindi di dalam reaktor (Qaderi *et al.*, 2011). Proses *seeding* dilakukan selama 7 hari pada minggu pertama.

Aklimatisasi merupakan proses penyesuaian atau adaptasi bagi organisme untuk beroperasi pada lingkungan baru. Lindi dan lumpur dicampur di dalam reaktor yang diaerasi selama 7 hari pada minggu kedua. Volume lumpur yang dimasukkan ke dalam setiap reaktor sebanyak 1 L dan volume lindi sebanyak 4 L sehingga total volume pengolahan adalah 5 L. Selama proses *seeding* dan aklimatisasi dilakukan pengukuran COD hingga diperoleh kondisi *steady state*. Kondisi *steady state* adalah kondisi dimana jumlah biomass input sama dengan jumlah biomass output dan biomass yang terasimilasi di dalam mikroorganisme tersebut. Persamaan *steady state* dapat dilihat sebagai berikut.

$$\text{Biomassa akumulasi} = \text{inflow} + \text{outflow} + \text{pertumbuhan}$$

(Metcalf dan Eddy, 2003)

Kondisi *steady state* umumnya ditandai dengan diperolehnya efluen sampel yang telah mencapai nilai efisiensi penyisihan COD sebesar 80% (Chen *et al.*, 2008). Setelah mencapai kondisi *steady state*, sejumlah sampel disimpan di dalam tangki sebagai stok lumpur yang sudah teraklimatisasi.

3.6 Penelitian Pendahuluan

Pada penelitian pendahuluan dilakukan pembuatan reagen dan kurva kalibrasi untuk pengujian parameter. Kurva kalibrasi yang dibuat meliputi kurva kalibrasi amonium-nitrogen, nitrat-nitrogen dan nitrit-nitrogen. Selain itu dilakukan pula *pre-treatment* terhadap lindi dengan variasi:

- Lindi tanpa *pre-treatment*
- *Pre-treatment* lindi menggunakan ozon dengan variasi durasi operasi 24 jam
- *Pre-treatment* lindi menggunakan ozon dengan variasi durasi operasi 48 jam

Pemilihan durasi ozonisasi memperhatikan jumlah zat organik dan nutrisi yang ada pada sampel lindi yang akan digunakan untuk penelitian. Sifat ozon yang sangat reaktif mampu menurunkan zat organik dan nutrisi dalam jumlah besar sehingga penggunaan ozon cocok untuk mengolah COD lindi tersebut. Namun dikarenakan jumlah nutrisi dalam sampel lindi relatif rendah maka durasi ozon dibatasi sebesar 2 jam untuk menjaga rasio C/N agar sesuai dengan kriteria pada pengolahan biologis yaitu 20-30. Rasio C/N yang terlalu rendah maupun terlalu tinggi dapat mengakibatkan proses degradasi oleh bakteri akan berlangsung lebih lambat (Hadi *et al.*, 2016).

Proses ozonisasi dilakukan dengan cara memasukkan keseluruhan lindi yang akan diolah sebanyak 45 L ke dalam satu reaktor yang dialiri dengan gas ozon (O₃). Lama waktu injeksi sesuai dengan variasi durasi yang telah ditentukan. Injeksi ozon dilakukan menggunakan ozonizer dengan debit injeksi 3L/menit. Gas ozon dilewatkan melalui pipa menuju reaktor berisi lindi agar terjadi kontak antara lindi dengan ozon tersebut. Selama proses *pre-treatment*, dilakukan pengambilan sampel sesuai dengan variasi waktu ozon dan dianalisis untuk mengetahui durasi ozon optimum sebagai *pre-treatment* lindi. Analisis yang dilakukan meliputi analisis COD, amonia, dan nitrat. Setelah dilakukan *pre-treatment*, lindi dimasukkan ke dalam MBBR bersama dengan lumpur yang telah diaklimatisasi. Jumlah lindi dan lumpur yang dimasukkan ke dalam tiap reaktor masing-masing sebesar 4L dan 1L.

3.7 Pelaksanaan Penelitian

Penelitian dilakukan dengan menggunakan variasi durasi *pre-treatment* dan aerobik-anoksik. Variasi durasi *pre-treatment* dilakukan pada saat penelitian pendahuluan sedangkan variasi durasi aerobik-anoksik pada MBBR dilakukan pada penelitian utama. Penelitian utama dilakukan untuk mengetahui kemampuan MBBR dalam menurunkan konsentrasi organik dan nitrogen dalam

lindi. Penelitian dilakukan selama 10 hari yang terdiri dari 5 siklus (pengulangan tahap aerobik-anoksik). Kondisi aerobik diciptakan dengan memberikan suplai oksigen dari aerator. Untuk menjamin suplai oksigen di dalam reaktor terdistribusi dengan merata maka pompa *submersible* dikondisikan menyala. Kondisi anoksik diciptakan dengan memberikan sedikit atau tanpa adanya suplai oksigen sehingga aerator dikondisikan dalam keadaan mati. Pada kondisi anoksik pompa *submersible* tetap dikondisikan menyala untuk menjaga sirkulasi di dalam reaktor.

Sampel yang dimasukkan ke dalam MBBR adalah lindi yang sudah diozonisasi dan lumpur IPLT yang telah diaklimatisasi. Setelah itu dilakukan analisis tiap parameter uji untuk mengetahui durasi proses aerobik-anoksik yang optimum bagi MBBR dalam mengolah lindi. Setiap satu siklus dilakukan tiga kali pengambilan sampel untuk parameter utama yaitu COD, amonium, nitrat dan nitrit. Pengambilan sampel tersebut dilakukan sebelum proses aerobik, setelah proses aerobik dan setelah proses anoksik. Gambar diagram pengolahan pada MBBR dapat dilihat pada Gambar 3.3. Sedangkan penjelasan mengenai durasi proses aerobik-anoksik dan durasi ozonisasi dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan 3.2.

Tabel 3. 1 Variasi Durasi Aerobik-Anoksik dan *Pre-treatment*

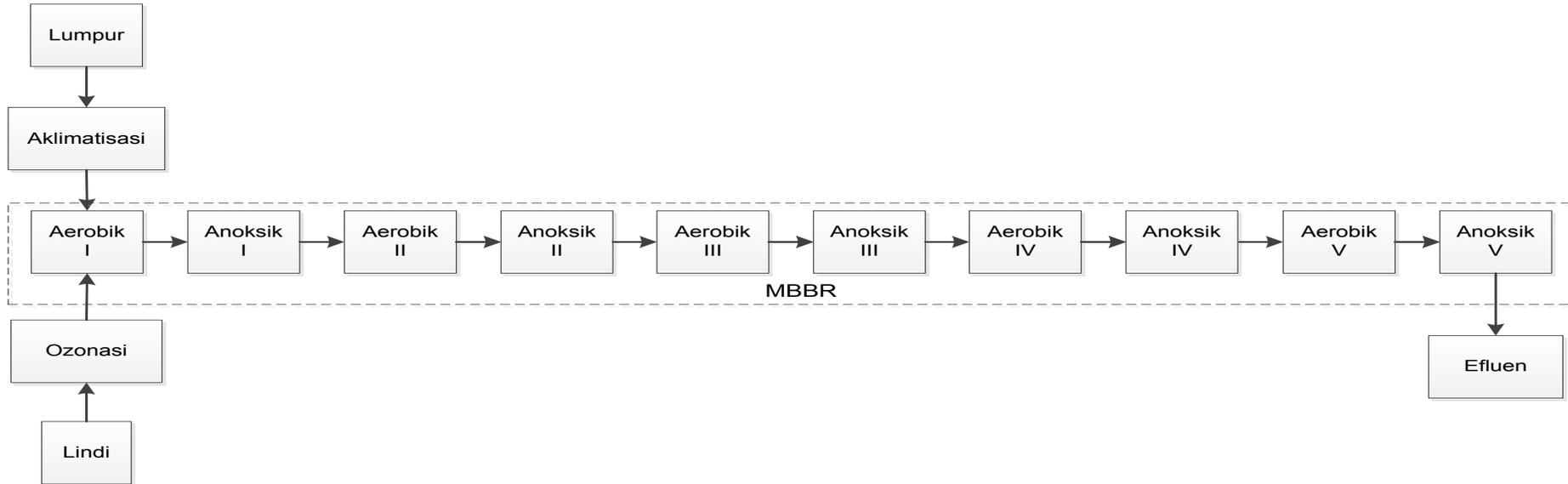
Reaktor	Aerobik (%)	Anoksik (%)	Durasi (jam)		Keterangan
MBBR 1	50	50	22,5	22,5	Tanpa ozon (kontrol)
MBBR 2	50	50	22,5	22,5	Ozon 24 jam (ozon 1)
MBBR 3	50	50	22,5	22,5	Ozon 48 jam (ozon 2)
MBBR 4	70	30	31,5	13,5	Tanpa ozon (kontrol)
MBBR 5	70	30	31,5	13,5	Ozon 24 jam (ozon 1)
MBBR 6	70	30	31,5	13,5	Ozon 48 jam (ozon 2)
MBBR 7	80	20	36	9	Tanpa ozon (kontrol)
MBBR 8	80	20	36	9	Ozon 24 jam (ozon 1)
MBBR 9	80	20	36	9	Ozon 48 jam (ozon 2)

Reaktor MBBR dioperasikan dengan sistem *batch*, yaitu lindi dan lumpur yang masuk akan diaduk secara sempurna dan diolah hingga akhirnya dikeluarkan, dan begitu seterusnya. Waktu total yang dibutuhkan untuk proses aerobik-anoksik adalah 45 jam dengan dilanjutkan dengan proses pengendapan dengan lama

waktu 3 jam. Pemilihan durasi pengolahan ditentukan berdasarkan kebutuhan mikroorganisme yang mampu menurunkan nitrogen secara optimum dalam waktu (HRT) selama 1,25 hari dan kebutuhan proses denitrifikasi pada tahap anoksik serta waktu pengendapan (Chen et al., 2008). Variasi durasi proses aerobik-anoksik dikondisikan memiliki durasi waktu aerobik yang lebih lama. Hal ini berfungsi untuk mengetahui jumlah penurunan zat organik dari proses aerobik serta memastikan adanya suplai oksigen yang cukup untuk proses anoksik (Aljumriana, 2015). Durasi aerobik yang lebih lama juga digunakan untuk meningkatkan proses nitrifikasi. Hal ini dilakukan karena konsentrasi amonium pada lindi besar sedangkan jumlah nitrat untuk proses denitrifikasi pada saat anoksik masih kecil.

Tabel 3. 2 Variabel Penelitian

Variasi Durasi Aerobik-Anoksik (jam-jam)																		Variasi Ozon
22,5-22,5 (50%-50%)						31,5-13,5 (70%-30%)						36-9 (80%-20%)						
I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI	
1A	1B	1C	1D	1E	1F	4A	4B	4C	4D	4E	4F	7A	7B	7C	7D	7E	7F	Tanpa ozon (kontrol)
2A	2B	2C	2D	2E	2F	5A	5B	5C	5D	5E	5F	8A	8B	8C	8D	8E	8F	Ozon 24 jam (ozon 1)
3A	3B	3C	3D	3E	3F	6A	6B	6C	6D	6E	6F	9A	9B	9C	9D	9E	9F	Ozon 48 jam (ozon 2)



Gambar 3. 3 Diagram Alir Pengolahan MBBR

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

3.8 Metode Analisis Sampel

Parameter yang dianalisis pada penelitian ini terdiri dari parameter utama dan parameter tambahan. Analisis parameter utama meliputi analisis COD, amonium-nitrogen, dan nitrat-nitrogen. Analisis parameter utama dilakukan setiap sebelum aerobik, sebelum anoksik dan setelah anoksik. Sedangkan analisis parameter tambahan meliputi analisis BOD, nitrit-nitrogen, DO, TKN, salinitas, dan pH. Analisis parameter tambahan dilakukan setiap awal (hari ke-0) dan akhir siklus (hari ke-10). Metode analisis yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.3 dan 3.4.

Tabel 3. 3 Metode Analisis Parameter Utama

Analisis	Tujuan	Metode	Standar
<i>Chemical Oxygen Demand</i> (COD)	Menentukan besar degradasi organik	Metode <i>Closed reflux</i>	SNI 6989.73:2009
Amonium-nitrogen	Mengetahui kandungan dan penurunan amonium dalam sampel	Metode Spektrofotometri (Nessler)	SNI 6989.30-2005
Nitrat-nitrogen	Mengetahui kandungan dan penurunan nitrat dalam sampel	Metode Spektrofotometri (Brucin Asetat)	SNI 06-2480-1991

Tabel 3. 4 Metode Analisis Parameter Tambahan

Analisis	Tujuan	Metode/Alat	Standar
<i>Biological Oxygen Demand</i> (BOD)	Mengetahui tingkat biodegradabilitas sampel (Rasio BOD/COD)	Metode Yodometri (Winkler)	SNI 6989.72:2009
<i>Total Kjeldahl</i>	Mengetahui jumlah nitrogen yang terikat pada	Metode Spektrofotometri (Nessler)	SNI 4146:2013

<i>Nitrogen</i> (TKN)	organik secara total		
Nitrit-nitrogen	Mengetahui kandungan dan penurunan nitrit dalam sampel	Metode Spektrofotometri (NED)	SNI 06-6989.9-2004
<i>Dissolved Oxygen</i> (DO)	Mengetahui kecukupan oksigen di dalam reaktor, melihat proses yang terjadi di dalam reaktor	Metode elektrometrik menggunakan DO meter	SNI 06-6989.14-2004
Salinitas	Mengetahui kadar salinitas (kadar garam) sampel	Metode elektrometrik menggunakan alat <i>pH onlab-EC 10</i>	SNI 7644:2010
pH	Menganalisis kondisi keasaman sampel	Metode elektrometrik (pH meter) menggunakan alat <i>Basic pH meter-03771 Denver Instrument</i>	SNI 06-6989.11-2004
MLSS	Kecukupan biomassa	Metode gravimetri	SNI 06-6989.3-2004

Untuk analisis data dan pembahasan yang dilakukan pada penelitian ini mencakup:

- Kemampuan MBBR untuk menurunkan konsentrasi organik dan nitrogen pada lindi.

- Variasi durasi *pre-treatment* dan proses aerobik-anoksik/anaerobik yang paling efektif untuk menurunkan konsentrasi organik dan nitrogen pada lindi.

Hasil analisis dibahas dan diverifikasi kembali dengan tinjauan pustaka, sehingga dapat memberikan kesimpulan. Analisis dan pembahasan dalam penelitian ini akan dibuat dalam bentuk tabel, grafik dan interpretasi yang diperkuat dengan analisis statistik deskriptif

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Awal Karakteristik Lindi dan Lumpur

Analisis karakteristik awal merupakan salah satu penelitian pendahuluan yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik sampel yang digunakan. Pada penelitian ini sampel yang digunakan adalah lindi TPA Ngipik Gresik. Selain itu digunakan pula lumpur IPLT Keputih sebagai sumber biomassa. Analisis karakteristik lindi meliputi analisis parameter organik dalam COD, amonium-nitrogen, nitrat-nitrogen, nitrit-nitrogen, BOD, pH, dan salinitas. Karakterisasi berguna untuk mengetahui kondisi sampel sebelum terolah sehingga dapat dibandingkan dengan kondisi setelah diolah nantinya. Sedangkan karakteristik lumpur yang dianalisis meliputi konsentrasi MLSS dan MLVSS. Hal ini bertujuan untuk mengetahui konsentrasi padatan tersuspensi pada lumpur, sehingga dapat ditentukan volume lumpur yang dibutuhkan di dalam reaktor agar sesuai dengan kebutuhan di dalam reaktor MBBR.

Hasil analisis awal karakteristik awal lindi TPA Ngipik Gresik dan lumpur IPLT keputih dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Hasil Analisis Awal Karakteristik Lindi dan Lumpur

Parameter	Satuan	Nilai
Lindi		
COD	mg/L	26000
NH ₄ -N	mg/L	67,71
NO ₃ -N	mg/L	24,20
NO ₂ -N	mg/L	22,82
BOD	mg/L	2112
pH	-	8,6
Salinitas	ppt	6,91

Lumpur		
MLSS	mg/L	28000
MLVSS	mg/L	19600

4.2 **Seeding dan Aklimatisasi**

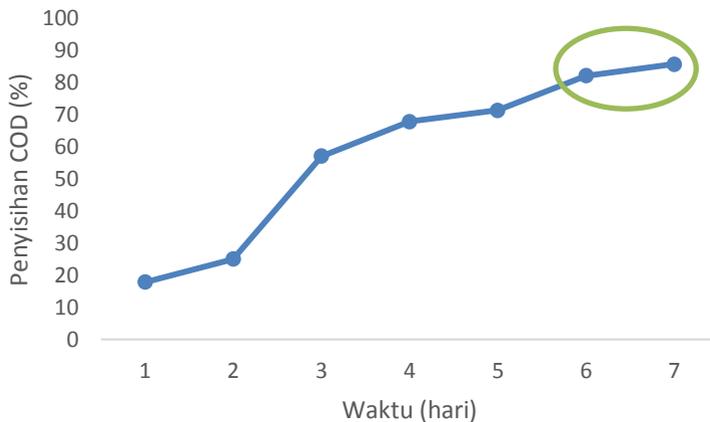
Seeding dilakukan untuk mengembangbiakkan mikroorganisme sehingga didapat jumlah biomassa yang cukup untuk mengolah lindi pada reaktor MBBR. Mikroorganisme diambil dari *return activated sludge* pada unit clarifier IPLT Keputih. Pada proses *seeding* dilakukan memberikan sumber organik pada mikroorganisme yang berasal dari sampel dan sumber organik tambahan yang berasal dari sukrosa. Pemberian sumber organik tambahan dimaksudkan untuk memudahkan mikroorganisme dalam mendegradasi sampel karena kondisi organik pada lindi yang terlalu kompleks. Sedangkan aklimatisasi bertujuan untuk mendapatkan suatu kultur mikroorganisme yang stabil dan mampu mendegradasi sumber organik yang hanya berasal dari lindi.

Pada proses *seeding*, lindi dan lumpur dicampur di dalam reaktor serta diaerasi selama 7 hari. Sumber organik yang digunakan terdiri dari 50% lindi dan 50% sukrosa yang berasal dari gula pasir. Jumlah gula pasir yang digunakan terdapat pada Lampiran B. Tahap *seeding* kemudian dilanjutkan dengan tahap aklimatisasi yang juga berlangsung selama 7 hari. Pada proses ini, sumber organik diganti dengan 100% lindi dikarenakan mikroorganisme telah mampu mendegradasi senyawa organik kompleks di dalam lindi pada proses *seeding*. Pada tahap aklimatisasi, proses aerasi tetap dilakukan seperti halnya pada saat tahap *seeding*. Aklimatisasi dilakukan hingga mencapai kondisi *steady state* dimana mikroorganisme benar-benar stabil dalam mendegradasi organik pada lindi. Kondisi *steady state* dapat dicapai apabila efluen sampel mempunyai nilai konsentrasi COD yang konstan dan umumnya berada pada penyisihan 80% atau lebih (Chen et al., 2008b). Pengukuran parameter COD dilakukan setiap hari selama proses aklimatisasi berlangsung.

Hasil analisis COD pada tahap aklimatisasi dapat dilihat pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.1.

Tabel 4. 2 Konsentrasi COD pada Tahap Aklimatisasi

Hari ke-	Konsentrasi COD (mg/L)	Penyisihan (%)
0	26000	0
1	23000	11,54
2	21000	19,23
3	12000	53,85
4	9000	65,38
5	8000	69,23
6	5000	80,77
7	4000	84,62



Gambar 4. 1 Penyisihan COD pada Tahap Aklimatisasi

Berdasarkan Tabel 4.2 dan Gambar 4.1 terlihat bahwa penyisihan COD sudah mencapai lebih dari 80% pada hari ke-6 aklimatisasi. Penyisihan yang diperoleh pada tahap aklimatisasi mencapai 84,62%. Sehingga dapat dikatakan proses aklimatisasi sudah mencapai kondisi *steady state*. Setelah proses aklimatisasi selesai, dilakukan proses *decanting* (penuangan efluen). Sehingga di dalam reaktor hanya tertinggal lumpur yang sudah teraklimatisasi. Selanjutnya lumpur akan digunakan untuk mengolah lindi di dalam reaktor MBBR pada penelitian utama.

Selain *seeding*-aklimatisasi, dilakukan pula *Settleability Solid Test* untuk mengetahui banyaknya lumpur dan waktu pengendapan lumpur yang dibutuhkan di dalam reaktor MBBR. Hasil tes menunjukkan bahwa waktu pengendapan yang dibutuhkan 1 L lumpur adalah 3 jam, dengan endapan lumpur yang didapatkan sebanyak 200 mL (Gambar 4.2). Hal ini menunjukkan bahwa jumlah lumpur yang dibutuhkan di dalam setiap reaktor MBBR berkapasitas 5 L adalah sebanyak 1 L lumpur dengan lama waktu pengendapan selama 3 jam.



Gambar 4. 2 *Settleability Solid Test*

4.3 *Pre-treatment* Lindi Dengan Ozon

Pre-treatment dengan menggunakan ozon bertujuan untuk mengoptimalkan penyisihan zat organik kompleks pada lindi yang tidak mampu dicapai oleh pengolahan biologis. *Pre-treatment* dengan ozon dipilih karena tidak menghasilkan produk sampingan seperti halnya penggunaan H_2O_2 yang dapat menghasilkan asam sehingga menghambat proses pengolahan selanjutnya. Hal ini dikarenakan pembentukan OH^* sebagai senyawa radikal untuk mengoksidasi senyawa organik dan nutrisi pada lindi akan terbentuk dengan baik pada pH basa (Rezagama, 2013). Selain itu penggunaan ozon juga mampu meningkatkan jumlah oksigen terlarut di dalam lindi sehingga berguna untuk pengolahan biologis selanjutnya dengan reaksi sebagai berikut.



(Standard, 2017)

Penggunaan ozon sebagai *pre-treatment* juga mampu meningkatkan tingkat biodegradabilitas lindi yang sangat kecil dengan cara mengubah zat organik *non-biodegradable* menjadi organik *biodegradable* sehingga nantinya dapat diolah secara biologis. Senyawa organik *biodegradable* adalah unsur organik yang mampu diurai dengan menggunakan bantuan mikroorganismenya. Perubahan sifat organik ini dapat terjadi karena peningkatan gas (dalam hal ini oksigen) yang memicu pembentukan senyawa organik *biodegradable*.

Proses *pre-treatment* dilakukan sebelum lindi dimasukkan ke dalam reaktor MBBR. Pada pengujian ini dilakukan injeksi gas ozon dengan menggunakan ozonizer ke dalam lindi. Debit ozon yang diinjeksikan adalah 3 L/menit yang dimasukkan ke dalam 45 liter lindi. Volume tersebut merupakan kebutuhan lindi yang akan dimasukkan ke dalam MBBR sesuai dengan variasi ozon yang digunakan. Variasi durasi pengoperasian ozon yang digunakan adalah 24 jam (variasi ozon 1) dan 48 jam (variasi ozon 2) dengan waktu operasi aktif 1 jam dan interval 30 menit. Waktu interval dilakukan untuk mencegah kondisi yang terlalu panas pada ozonizer.

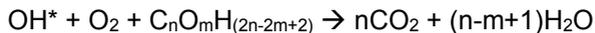
Selama tahap *pre-treatment*, dilakukan analisis COD, amonium-nitrogen dan nitrat-nitrogen setiap 12 jam. Hasil analisis pada tahap *pre-treatment* dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4. 3 Hasil Analisis pada Tahap *Pre-treatment*

Waktu operasi	Konsentrasi (mg/L)	Penyisihan (%)
COD		
0 jam	26000	0
12 jam	21000	19,23
24 jam	17000	34,62
36 jam	15000	42,31
48 jam	12000	53,85
Amonium-nitrogen		
0 jam	67,71	67,71
12 jam	44,61	44,61
24 jam	35,90	35,90

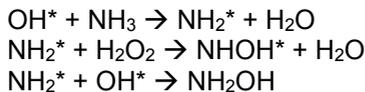
36 jam	34,21	34,21
48 jam	32,43	32,43
Nitrat-nitrogen		
0 jam	24,2	0
12 jam	23,8	1,65
24 jam	23,4	3,31
36 jam	23,1	4,55
48 jam	22,8	5,79

Berdasarkan Tabel 4.3 terlihat bahwa terjadi penurunan konsentrasi yang cukup besar pada konsentrasi zat organik (COD) dan amonium-nitrogen. Hal ini ditunjukkan dengan besarnya penyisihan COD dan amonium-nitrogen yang masing-masing mencapai 53,85% dan 52,1%. Penurunan kadar organik terjadi karena ozon mampu mengoksidasi senyawa organik yang terkandung di dalam lindi dan mengubahnya menjadi karbondioksida dan air. Reaksi antara limbah organik dan radikal OH yang berasal dari ozon dapat dilihat pada persamaan umum berikut.



(Usada dan Purwadi, 2007)

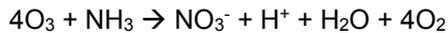
Sedangkan penurunan amonium-nitrogen terjadi akibat oksidasi ozon terhadap amonium sehingga membentuk basa lemah senyawa turunan amonium berupa nitrit maupun nitrogen bebas. Dalam kondisi basa, ozon tidak hanya terdekomposisi menjadi ion radikal OH* tetapi juga membentuk ion hidroksil dengan persamaan sebagai berikut.



(Ekasari, 2013)

Berbeda dengan penyisihan COD dan amonium-nitrogen, penyisihan nitrat-nitrogen terlihat sangat kecil. Hal ini dikarenakan pH basa pada lindi yang menghambat degradasi pada nitrat. Kondisi

degradasi pada nitrat dapat berjalan dengan baik apabila pH limbah berada pada kondisi asam, kecuali terdapat mikroorganisme di dalam limbah. Sedangkan sistem ozonasi tidak hanya menurunkan kadar organik dan nutrisi lainnya tetapi juga membunuh mikroorganisme yang ada di limbah sehingga bisa dipastikan tidak terdapat degradasi nitrat oleh mikroorganisme. pH basa juga mempengaruhi pembentukan nitrat oleh amonium sehingga tidak terbentuk senyawa nitrat baru di dalam lindi selama ozonasi berlangsung. Reaksi tersebut dapat dilihat dari persamaan reaksi ozon dan amonium pada kondisi asam.



(Ekasari, 2013)

Berdasarkan hasil tersebut terlihat bahwa semakin lama waktu operasi ozon pada lindi maka penyisihan zat organik dan amonium-nitrogen yang diperoleh juga akan semakin besar. Hal ini dikarenakan proses degradasi yang terjadi akan berbanding lurus dengan lamanya waktu kontak lindi dengan ozon. Sehingga durasi *pre-treatment* yang paling optimum dalam mengolah lindi pada penelitian ini adalah durasi operasi 48 jam. Akan tetapi persentase penyisihan pada amonium-nitrogen terbesar justru terjadi pada 24 jam pertama. Setelah melewati 24 jam pertama, kenaikan persentase penyisihan akan semakin kecil. Hal tersebut menunjukkan bahwa ozon sangat efektif dalam menurunkan zat organik namun terbatas dalam menurunkan nitrogen. Sehingga diperlukan pengolahan lain untuk menurunkan kadar nitrogen di dalam lindi, salah satunya dengan pengolahan biologis nitrifikasi-denitrifikasi.

4.4 Penelitian Utama

Penelitian utama berlangsung selama 10 hari di *workshop* Jurusan Teknik Lingkungan. Hal ini bertujuan agar cuaca hujan atau panas tidak mempengaruhi kondisi lindi di dalam reaktor MBBR selama pelaksanaan penelitian. Reaktor penelitian terdiri dari 9 buah reaktor yang terbagi menjadi 3x3 pasang reaktor. Reaktor dioperasikan dengan konsentrasi COD lindi yang berbeda-beda, bergantung pada hasil *pre-treatment*

menggunakan ozon. Kapasitas pengolahan setiap reaktor yaitu sebesar 5 L, yang terdiri dari 1 L lumpur dan 4 L lindi.

Penelitian utama yang digunakan merupakan pengolahan secara biologis menggunakan MBBR dengan media kaldness. Pengolahan biologis dipilih karena pengolahan biologis merupakan salah satu pengolahan yang optimum dalam mengolah lindi dengan konsentrasi nitrogen yang tinggi. Hal ini dikarenakan pengolahan biologis dengan tahap aerobik-anoksik mampu menciptakan proses nitrifikasi-denitrifikasi yang efisien dalam menurunkan nitrogen (Chen *et al.*, 2008). Proses nitrifikasi adalah perubahan senyawa amonia menjadi nitrat sedangkan denitrifikasi adalah proses perubahan senyawa nitrat pada limbah menjadi gas nitrogen bebas sehingga nitrogen dapat diturunkan secara optimal (Sawye *et al.*, 2003). Hal ini lah yang tidak dapat diperoleh pada pengolahan *pre-treatment* menggunakan ozon dimana efisiensi penyisihan nitrogen masih cukup rendah dibandingkan dengan efisiensi penyisihan COD. Selain itu, beberapa hal yang dapat mengganggu pengolahan biologis seperti rasio BOD/COD lindi yang terlalu kecil dapat ditangani dengan penggunaan MBBR. Hal ini dikarenakan MBBR mampu mengolah limbah dalam kondisi ekstrim, contohnya limbah dengan rasio BOD/COD 0,2 (Robinson *et al.*, 2012). Hal ini sekaligus menjadi keunggulan MBBR sebagai teknologi pengolahan biologis *advance* dibandingkan dengan pengolahan biologis konvensional lainnya dimana pengolahan biologis konvensional membutuhkan rasio BOD/COD sebesar 0,5 (Hajipour *et al.*, 2011)

4.4.1 Analisis Zat Organik

Analisis zat organik yang dilakukan pada penelitian ini adalah analisis COD dan BOD. Analisis COD dilakukan setiap awal siklus (hari ke-0), setelah proses aerobik dan anoksik. Sedangkan untuk analisis BOD hanya dilakukan setiap awal siklus (hari ke-0) dan akhir siklus (hari ke-10). Analisis COD dilakukan dengan menggunakan metode *close reflux* dan analisis BOD dilakukan dengan menggunakan metode Yodometri (winkler). Penyisihan zat organik didapatkan melalui proses degradasi oleh mikroorganisme yang dapat terjadi baik pada saat aerobik maupun anoksik. Pada kondisi aerobik, mikroorganisme memanfaatkan oksigen bebas sebagai oksidator sedangkan pada kondisi anoksik

mikroorganisme menggunakan oksigen terlarut yang ada pada lindi. Mikroorganisme menggunakan zat organik pada lindi sebagai substrat bagi pertumbuhannya dengan cara asimilasi atau *uptake* sehingga terjadi penurunan zat organik pada lindi. Selain membentuk sel-sel mikroorganisme baru, mikroorganisme juga menghasilkan gas CO₂ sebagai produk oksidasinya.

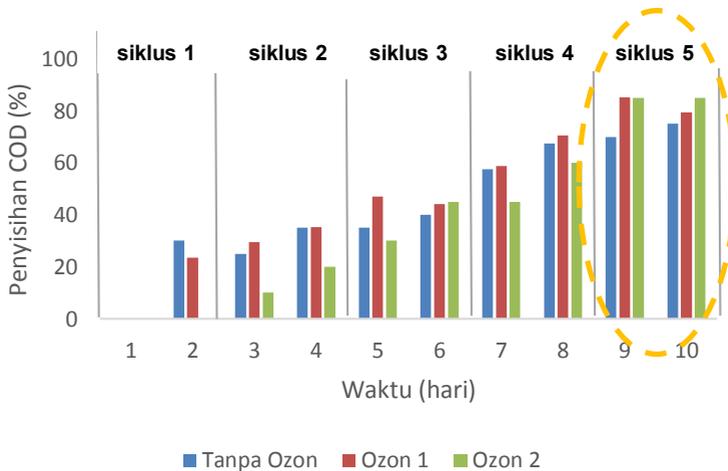
4.4.1.1 Hasil Penurunan Konsentrasi COD

COD merupakan parameter utama pada penelitian ini. Analisis COD bertujuan untuk mengetahui penurunan zat organik secara kimiawi di dalam reaktor MBBR. Analisis COD dilakukan setiap awal siklus (hari ke-0), setelah proses aerobik, dan setelah proses anoksik. Berdasarkan hasil analisis parameter COD, pada durasi proses aerobik-anoksik 22,5-22,5 jam penyisihan COD paling tinggi terjadi pada hari ke 9 dan 10 atau akhir siklus (siklus 5), dimana penyisihan pada reaktor kontrol (tanpa ozon), reaktor dengan variasi ozon 1 dan variasi ozon 2, yaitu sebesar 75%, 79,41%, dan 85%. Peningkatan penyisihan COD terjadi sebanding dengan peningkatan waktu pengolahan di dalam reaktor. Namun pada awal siklus (siklus 1) menunjukkan rendahnya penyisihan COD bahkan mencapai nilai 0%. Hal ini dikarenakan adanya masa adaptasi bakteri dalam mengolah lindi sebagai substratnya. Persentase penyisihan konsentrasi COD untuk durasi proses aerobik-anoksik 22,5-22,5 jam dapat dilihat pada Gambar 4.3.

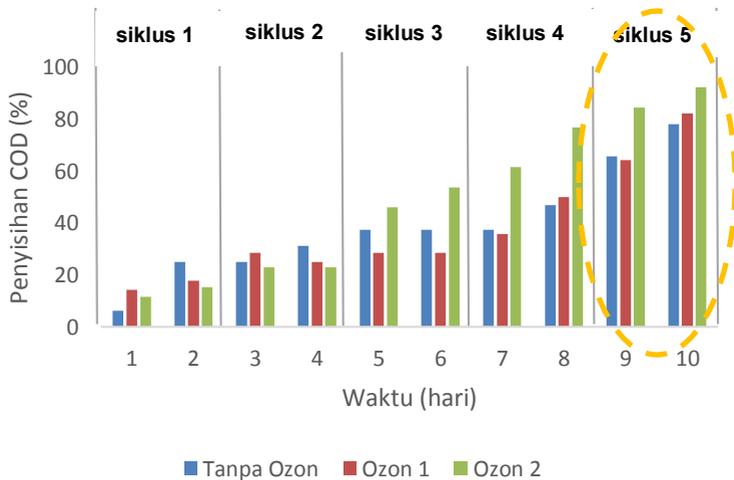
Pada durasi proses aerobik-anoksik 31,5-13,5 jam penyisihan COD paling optimum juga terjadi pada akhir siklus (siklus 5) dengan efisiensi reaktor kontrol (tanpa ozon), reaktor dengan variasi ozon 1 dan variasi ozon 2 sebesar 78,12%, 82,14% dan 92,31%. Pada durasi aerobik-anoksik 31,5-13,5 jam terlihat peningkatan yang stabil pada penyisihan COD. Namun pada siklus kedua dan ketiga terjadi beberapa penurunan penyisihan COD. Hal ini menunjukkan bahwa proses nitrifikasi pada durasi tersebut dapat menurunkan lebih banyak amonium dibandingkan dengan jumlah amonium yang terbentuk pada kondisi anoksik setelah memasuki tengah siklus (siklus 3). Sehingga mengakibatkan jumlah amonium relatif kecil dan tidak mengganggu bakteri dalam mendegradasi zat organik. Proses nitrifikasi yang berjalan dengan baik juga mengindikasikan adanya kecukupan oksigen bagi

mikroorganisme untuk menurunkan COD maupun amonium-nitrogen. Penyisihan konsentrasi COD pada durasi proses aerobik-anoksik 31,5-13,5 jam dapat dilihat pada Gambar 4.4.

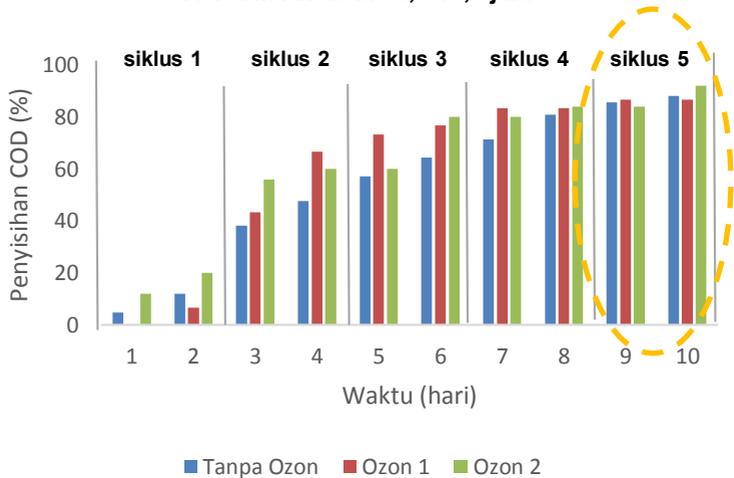
Hal yang sama juga diperlihatkan oleh reaktor dengan durasi aerobik-anoksik 36-9 jam. Pada durasi ini, penyisihan COD terbesar juga dicapai pada tahap akhir siklus dengan efisiensi reaktor kontrol (tanpa ozon), reaktor dengan variasi ozon 1 dan variasi ozon 2 sebesar 88,10%, 86,67%, dan 92%. Sama seperti reaktor dengan durasi aerobik-anoksik 22,5-22,5 jam, reaktor dengan variasi aerobik-anoksik 36-9 jam ini menunjukkan rendahnya penyisihan COD pada tahap awal siklus bahkan mencapai nilai 0%. Pada durasi ini terlihat bahwa peningkatan penyisihan COD dari tiap siklus menunjukkan hasil yang cukup tinggi dan cepat dibandingkan dengan durasi lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa lamanya durasi aerobik akan mempengaruhi peningkatan penyisihan COD pada sampel. Peningkatan penyisihan COD juga terlihat sebanding dengan lamanya waktu pengolahan. Penyisihan konsentrasi COD pada durasi proses aerobik-anoksik 36-9 jam dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 3 Efisiensi Penyisihan Konsentrasi COD pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam



Gambar 4. 4 Penyisihan Konsentrasi COD pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam



Gambar 4. 5 Penyisihan Konsentrasi COD pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam

Berdasarkan hasil analisis parameter COD, terlihat bahwa penyisihan konsentrasi COD berbanding terbalik dengan

konsentrasi COD lindi, yaitu semakin rendah konsentrasi lindi maka penyisihan COD akan semakin tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa mikroorganisme pada penelitian ini lebih optimum mendegradasi senyawa organik pada konsentrasi organik rendah. Secara keseluruhan pada semua durasi proses terjadi penurunan konsentrasi COD yang cukup baik. Penurunan paling tinggi terjadi pada hari ke 9 dan 10 (siklus 5). Hal ini menunjukkan bahwa ketersediaan oksigen terikat pada siklus terakhir sudah banyak sehingga oksidasi organik juga dapat dilakukan dengan optimum. Penyisihan COD paling baik terjadi pada durasi proses aerobik-anoksik 36-9 jam, sedangkan penyisihan COD paling rendah terjadi pada durasi proses aerobik-anoksik 22,5-22,5 jam. Hal ini menunjukkan bahwa lamanya durasi aerobik mampu meningkatkan penyisihan COD pada lindi.

4.4.1.2 Mass Balance COD

Mass balance COD dapat ditentukan berdasarkan perhitungan penyisihan konsentrasi organik pada lindi yang diubah menjadi sel-sel mikroorganisme melalui asimilasi dan pelepasan karbon menjadi gas CO₂. Pada perhitungan *mass balance*, akan terlihat penyisihan konsentrasi karbon baik pada saat proses aerobik maupun anoksik. Penurunan senyawa karbon disebabkan karena terjadi proses asimilasi mikroorganisme membentuk sel-sel baru, perubahan menjadi gas CO₂ sedangkan sisanya akan tetap menjadi zat organik non-sel di dalam lindi. Perhitungan *mass balance* COD dapat dilihat pada Tabel 4.4, sedangkan skema *mass balance* untuk masing-masing durasi pengolahan aerobik-anoksik dapat dilihat pada Gambar 4.6 sampai Gambar 4.8.

Tabel 4. 4 Perhitungan *Mass Balance* COD

1. Siklus 1

Variasi Pre-treatment	Aerobik			Anoksik		
	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 1	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 2	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 3	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 1	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 2	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 3
Tanpa ozon (kontrol)	100 gram	80 gram	105 gram	70 gram	60 gram	92,5 gram
Ozon 1	85 gram	70 gram	75 gram	65 gram	57,5 gram	70 gram
Ozon 2	50 gram	65 gram	62,5 gram	55 gram	55 gram	50 gram

2. Siklus 2

Variasi Pre-treatment	Aerobik			Anoksik		
	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 1	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 2	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 3	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 1	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 2	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 3
Tanpa ozon (kontrol)	75 gram	60 gram	65 gram	65 gram	55 gram	55 gram
Ozon 1	60 gram	50 gram	42,5 gram	55 gram	52,5 gram	25 gram
Ozon 2	45 gram	50 gram	27,5 gram	40 gram	50 gram	25 gram

3. Siklus 3

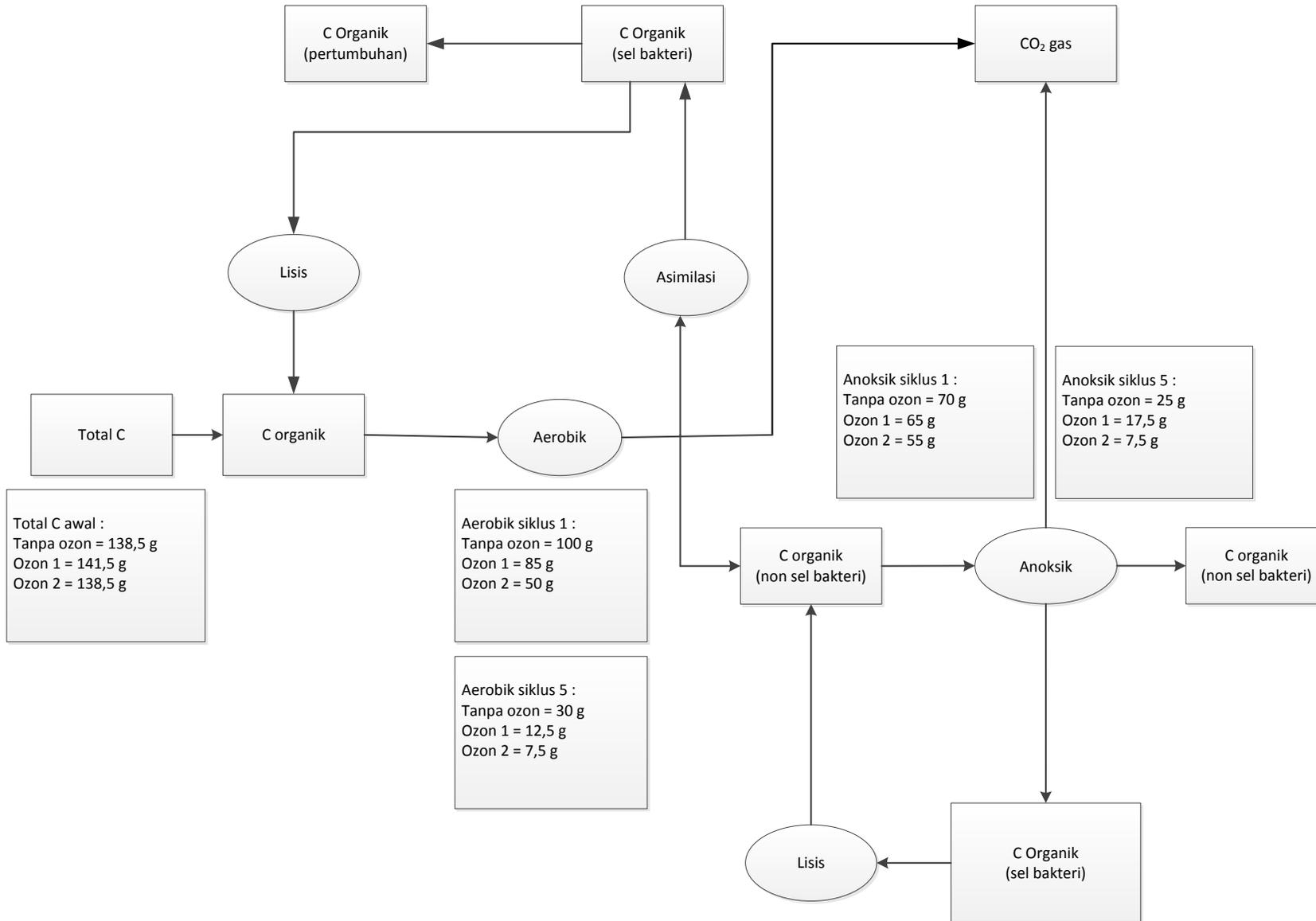
Variasi Pre-treatment	Aerobik			Anoksik		
	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 1	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 2	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 3	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 1	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 2	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 3
Tanpa ozon (kontrol)	65 gram	50 gram	45 gram	60 gram	50 gram	37,5 gram
Ozon 1	45 gram	50 gram	20 gram	47,5 gram	50 gram	17,5 gram
Ozon 2	35 gram	35 gram	25 gram	27,5 gram	30 gram	12,5 gram

4. Siklus 4

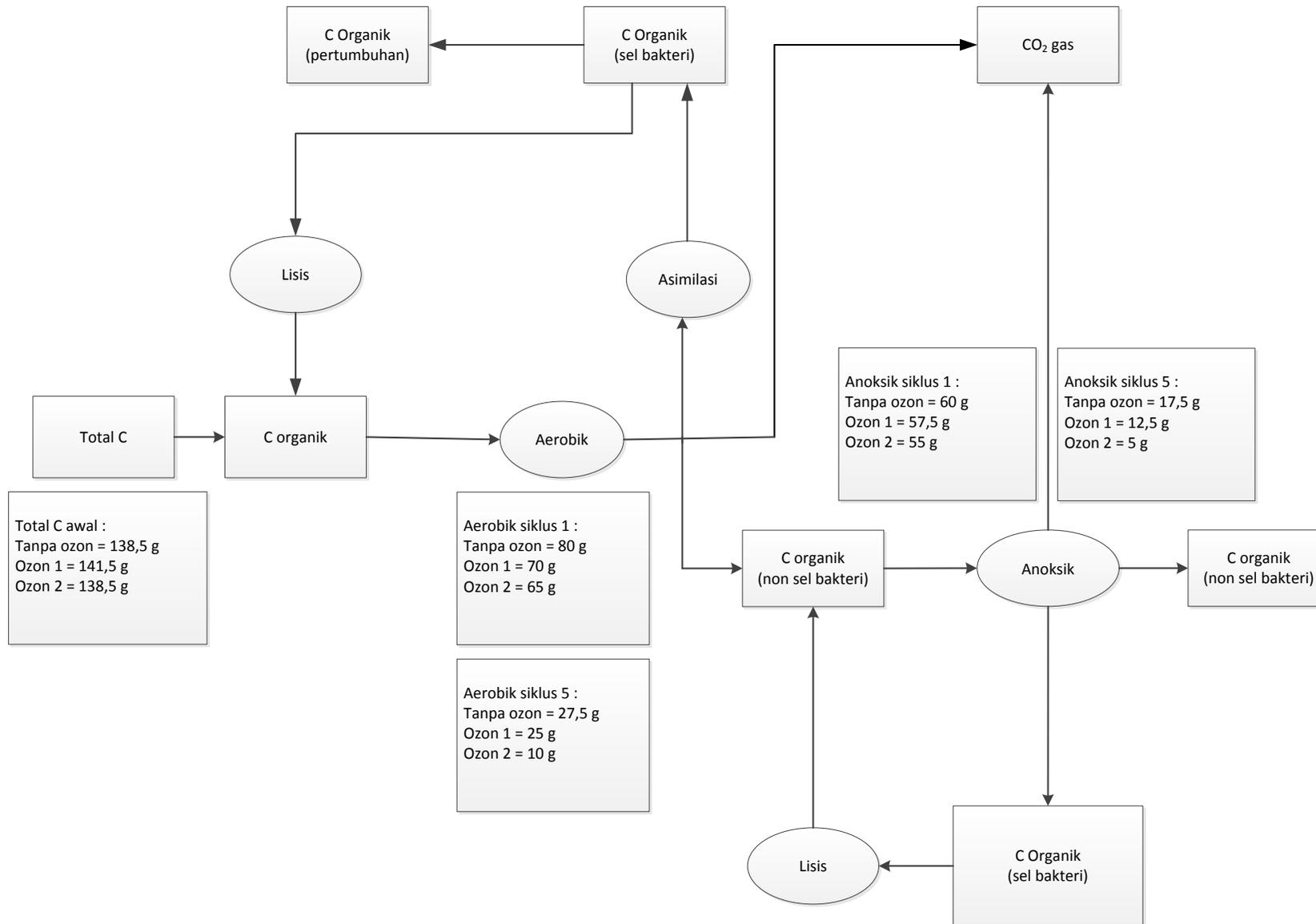
Variasi Pre-treatment	Aerobik			Anoksik		
	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 1	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 2	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 3	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 1	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 2	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 3
Tanpa ozon (kontrol)	42,5 gram	50 gram	30 gram	32,5 gram	42,5 gram	20 gram
Ozon 1	35 gram	45 gram	12,5 gram	25 gram	35 gram	12,5 gram
Ozon 2	27,5 gram	25 gram	12,5 gram	20 gram	15 gram	10 gram

5. Siklus 5

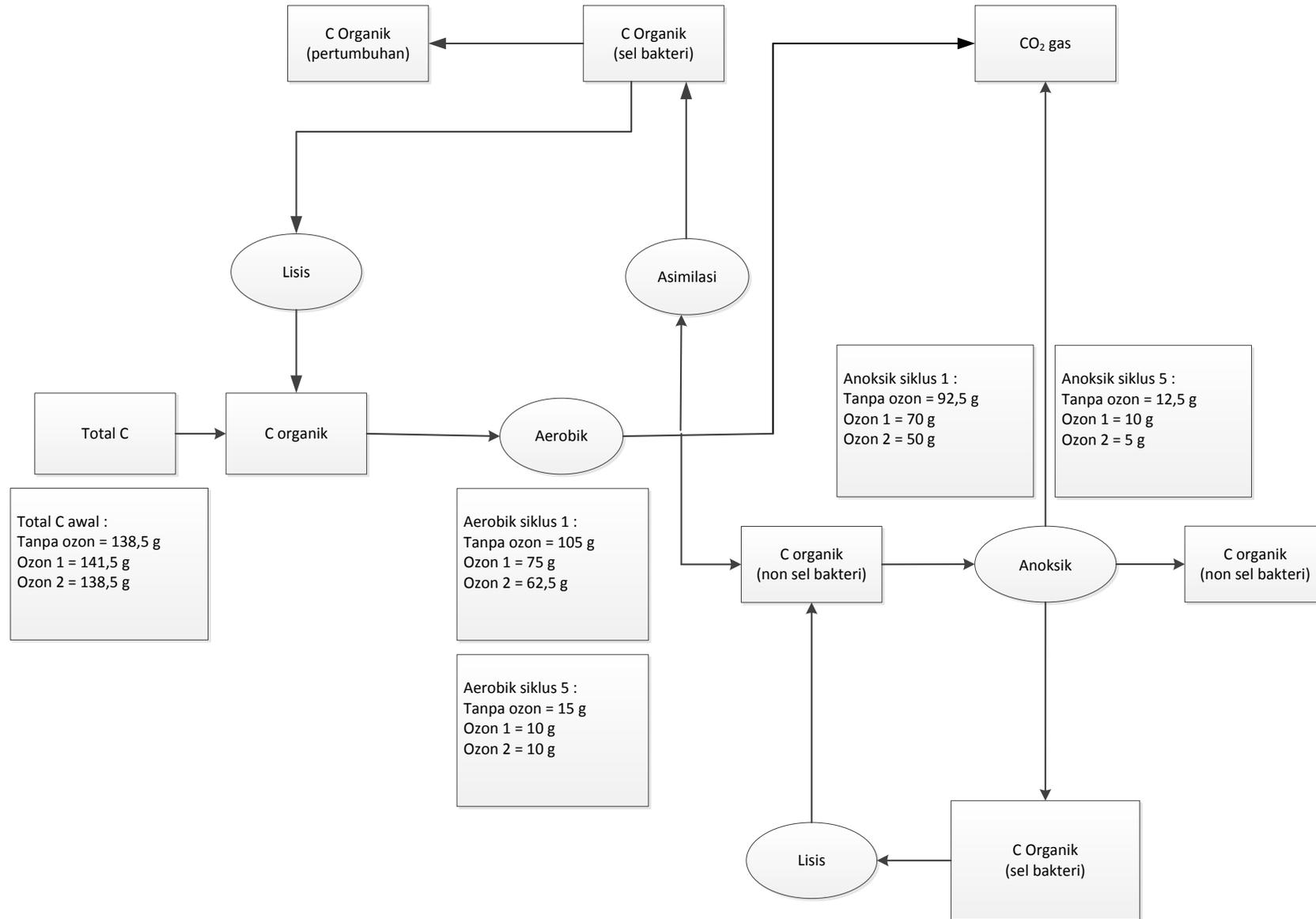
Variasi Pre-treatment	Aerobik			Anoksik		
	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 1	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 2	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 3	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 1	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 2	Variasi Durasi Aerobik-Anoksik 3
Tanpa ozon (kontrol)	30 gram	27,5 gram	15 gram	25 gram	17,5 gram	12,5 gram
Ozon 1	12,5 gram	25 gram	10 gram	17,5 gram	12,5 gram	10 gram
Ozon 2	7,5 gram	10 gram	10 gram	7,5 gram	5 gram	5 gram



Gambar 4. 6 Mass Balance COD pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam



Gambar 4. 7 Mass Balance COD pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam



Gambar 4. 8 Mass Balance COD pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam

4.4.2 Hasil Penurunan Konsentrasi Nitrogen

Analisis nitrogen yang dilakukan pada penelitian ini adalah analisis amonium-nitrogen, nitrat-nitrogen, nitrit-nitrogen dan Total Kjeldahl Nitrogen (TKN). Analisis amonium-nitrogen, nitrat-nitrogen dan nitrit-nitrogen dilakukan setiap awal siklus (hari ke-0), setelah proses aerobik dan anoksik. Sedangkan untuk analisis TKN hanya dilakukan setiap awal siklus (hari ke-0) dan akhir siklus (hari ke-10). Analisis amonium-nitrogen dilakukan dengan menggunakan metode *Nessler*, analisis nitrat-nitrogen dilakukan dengan menggunakan metode *Brucine Acetat*, analisis nitrit-nitrogen dengan menggunakan metode NED dan analisis TKN dilakukan menggunakan tabung Kjeldahl.

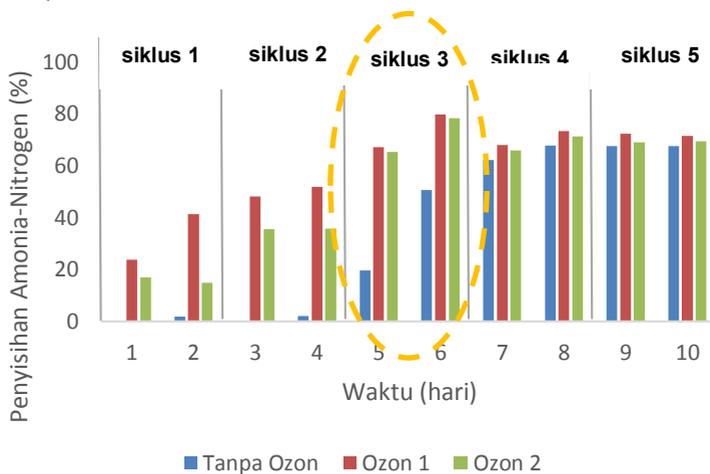
Penyisihan total nitrogen sebagai amonium-nitrogen, nitrat-nitrogen, dan nitrit-nitrogen didapatkan melalui proses aerobik dan anoksik. Pada kondisi aerobik akan terjadi proses nitrifikasi dimana amonium akan diubah menjadi nitrat melalui senyawa perantara nitrit. Sedangkan pada kondisi anoksik, nitrat yang telah dihasilkan pada kondisi aerobik akan mengalami denitrifikasi menjadi gas nitrogen bebas. Selain proses nitrifikasi-denitrifikasi, penurunan nitrogen juga dapat diakibatkan oleh pengambilan senyawa nitrogen untuk proses pembentukan sel mikroorganisme (asimilasi) pada kedua kondisi tersebut.

4.4.2.1 Hasil Penurunan Konsentrasi Amonium-Nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$)

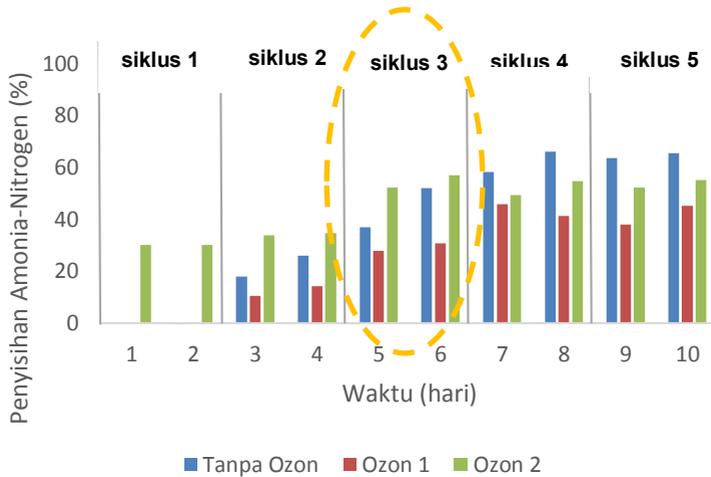
Penurunan konsentrasi amonium dapat terjadi pada proses aerobik dan anoksik. Namun yang paling berpengaruh pada penurunan kadar amonium-nitrogen adalah adanya proses nitrifikasi yang terjadi pada kondisi aerobik. Sedangkan sebagian lainnya, penurunan amonium-nitrogen diakibatkan karena adanya *uptake* oleh mikroorganisme untuk pertumbuhan sel (asimilasi).

Ketiga durasi menunjukkan bahwa penyisihan amonium-nitrogen terlihat mulai stabil setelah memasuki siklus 3. Hal ini ditunjukkan dengan nilai penyisihan pada siklus 3, 4 dan 5 memiliki selisih yang cukup kecil dibandingkan dengan siklus lainnya. Pada durasi proses aerobik-anoksik 22,5-22,5

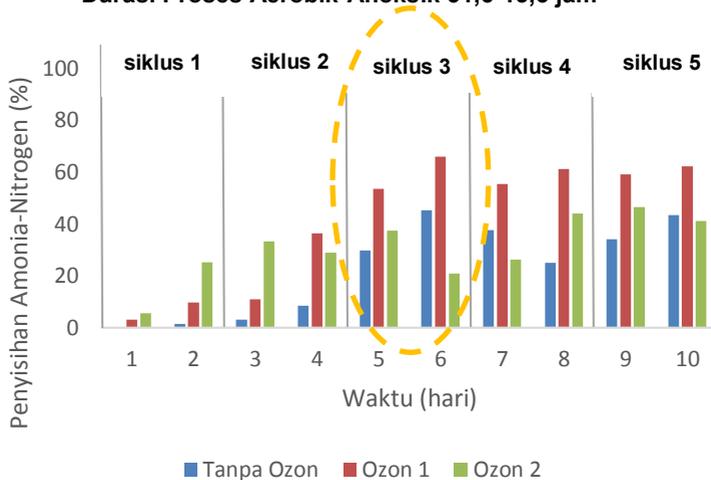
jam, penyisihan amonium-nitrogen tertinggi terjadi pada siklus 3 dengan penyisihan masing-masing pada reaktor kontrol (tanpa ozon), reaktor dengan variasi ozon 1 dan variasi ozon 2, yaitu sebesar 50,56%, 79,74%, dan 78,11%. Pada durasi proses aerobik-anoksik 31,5-13,5 jam, penyisihan amonium-nitrogen tertinggi terjadi pada siklus 5 dengan penyisihan masing-masing pada reaktor kontrol (tanpa ozon), reaktor dengan variasi ozon 1 dan variasi ozon 2, yaitu sebesar 65%, 45,17%, dan 55,02%. Sedangkan pada durasi proses aerobik-anoksik 36-9 jam, penyisihan amonium-nitrogen tertinggi terjadi pada siklus 3 dengan penyisihan masing-masing pada reaktor kontrol (tanpa ozon), reaktor dengan variasi ozon 1 dan variasi ozon 2, yaitu sebesar 45,26%, 65,98%, dan 46,5%. Hal ini menunjukkan bahwa memasuki siklus 3, kadar amonium yang dihasilkan pada kondisi anoksik cukup besar sehingga terjadi peningkatan penyisihan kadar amonium oleh bakteri nitrifikasi. Hal ini diperkuat dengan adanya beberapa penurunan penyisihan COD yang diakibatkan karena tingginya kadar amonium yang mengganggu proses degradasi zat organik pada siklus 3. Penyisihan konsentrasi amonium-nitrogen dapat dilihat pada Gambar 4.9, 4.10 dan 4.11.



Gambar 4. 9 Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam



Gambar 4. 10 Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam



Gambar 4. 11 Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam

Kestabilan penyisihan amonium-nitrogen saat memasuki siklus 3 menunjukkan bahwa bakteri nitrifikasi telah mampu beradaptasi dengan kondisi di dalam reaktor MBBR sehingga proses nitrifikasi dapat berjalan dengan baik.

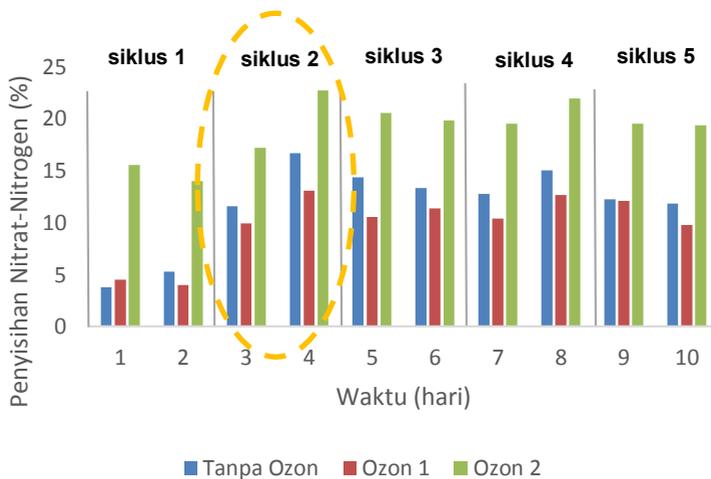
Produksi amonium akibat kondisi anoksik pun bisa teratasi karena jumlah amonium yang terolah atau tersisihkan lebih besar dibanding dengan amonium yang terbentuk sehingga tidak mengganggu proses degradasi substrat lainnya seperti COD (zat organik).

Berdasarkan hasil analisis tersebut, terlihat bahwa penurunan konsentrasi amonium-nitrogen paling optimum terjadi pada durasi proses aeobik-anoksik 36-9 jam. Hal ini menunjukkan bahwa lamanya durasi aerobik akan mempengaruhi penyisihan amonium. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penurunan konsentrasi amonium akan optimum ketika HRT proses aerobik di dalam MBBR lebih dari 1,25 hari (>30 jam) akibat adanya asimilasi mikroorganisme dan nitrifikasi (Chen *et al.*, 2008). Lamanya proses aerasi juga menyebabkan ketersediaan oksigen di dalam reaktor terpenuhi bahkan berlebih sehingga dapat digunakan oleh mikroorganisme untuk mendegradasi amonium (di samping mendegradasi zat organik).

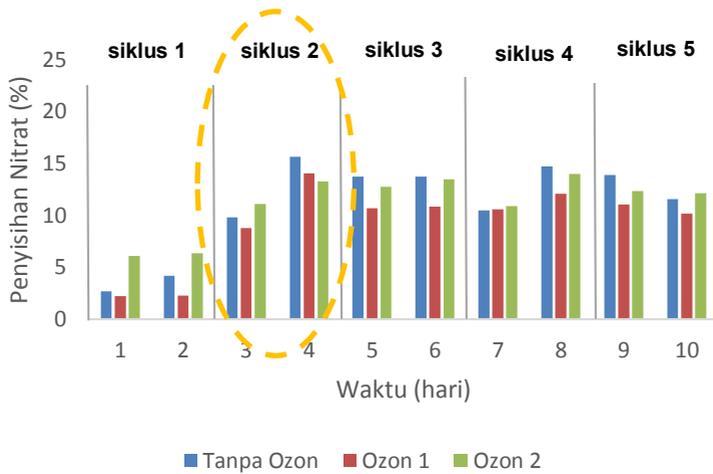
4.4.2.2 Hasil Penurunan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen (NO₃-N)

Penurunan konsentrasi nitrat-nitrogen disebabkan karena adanya proses denitrifikasi pada kondisi anoksik (Suganda *et al.*, 2014). Di dalam reaktor MBBR, kondisi anoksik terjadi setelah kondisi aerobik berlangsung dengan mematikan aerator di dalam reaktor. Kondisi aerobik tersebut dilakukan untuk mempersiapkan kecukupan oksigen terikat yang dibutuhkan pada proses anoksik. Berdasarkan analisis, penurunan konsentrasi nitrat-nitrogen pada durasi 22,5-22,5 jam dan 31,5-13,5 jam paling optimum terjadi pada siklus 2 dan didukung dengan adanya kestabilan penyisihan ketika memasuki siklus 3. Pada durasi 22,5-22,5 jam, penyisihan nitrat-nitrogen paling tinggi terjadi pada hari 4 (siklus 2) dengan besar penyisihan masing-masing pada reaktor kontrol (tanpa ozon), reaktor dengan variasi ozon 1, variasi ozon 2, yaitu sebesar 16,69%, 13,09%, 22,74%. Pada durasi 31,5-13,5 jam, penyisihan nitrat-nitrogen paling tinggi terjadi pada hari 4 (siklus 2) dengan besar penyisihan masing-masing pada reaktor kontrol (tanpa ozon), reaktor dengan variasi ozon 1, variasi ozon 2, yaitu sebesar 15,63%, 14,01%, 13,28%. Pada durasi

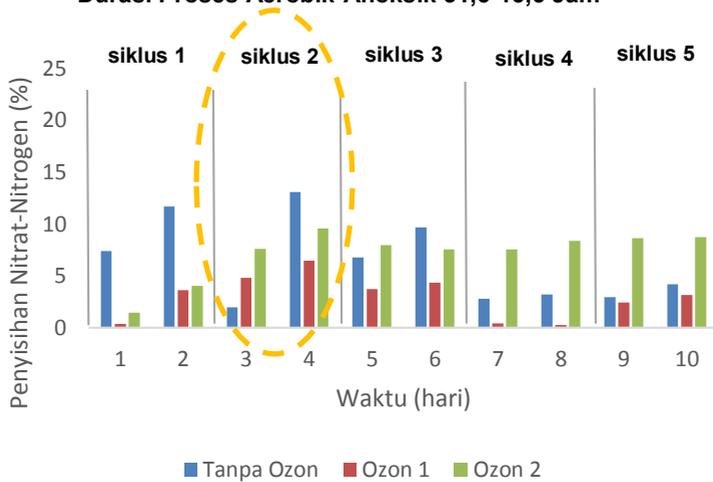
aerobik-anoksik 36-9 jam, penyisihan konsentrasi nitrat-nitrogen juga berada pada fase awal siklus yaitu pada siklus 1 dan 2, namun saat memasuki siklus 3 terjadi penurunan persen penyisihan nitrat-nitrogen. Hal ini menunjukkan bahwa bakteri denitrifikasi tidak dapat menurunkan secara optimum karena waktu anoksik yang sangat singkat dibandingkan dengan fase aerobiknya. Penyisihan nitrat-nitrogen paling tinggi terjadi pada hari 4 (siklus 2) dengan besar penyisihan masing-masing pada reaktor kontrol (tanpa ozon), reaktor dengan variasi ozon 1, variasi ozon 2, yaitu 13,05%, 6,45% dan 9,55%. Penyisihan konsentrasi nitrat-nitrogen dapat dilihat pada Gambar 4.12, 4.13 dan 4.14.



Gambar 4. 12 Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 Jam



Gambar 4. 13 Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 Jam



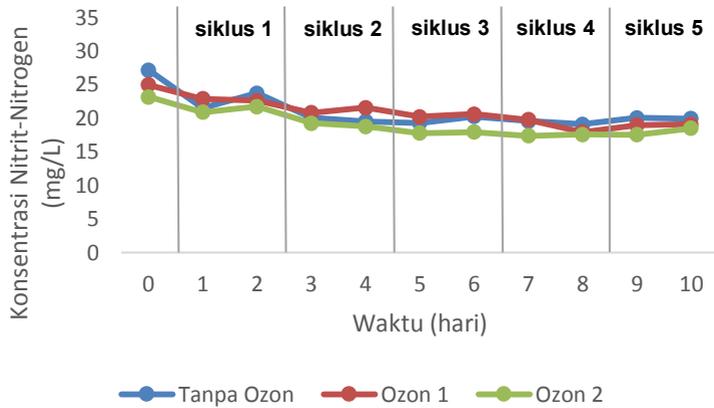
Gambar 4. 14 Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 Jam

Berdasarkan hasil tersebut, terlihat bahwa penyisihan nitrat-nitrogen jauh lebih kecil dibandingkan dengan penyisihan zat organik (COD) dan amonium-nitrogen. Hal ini dikarenakan waktu anoksik yang jauh lebih kecil dibandingkan waktu aerobik

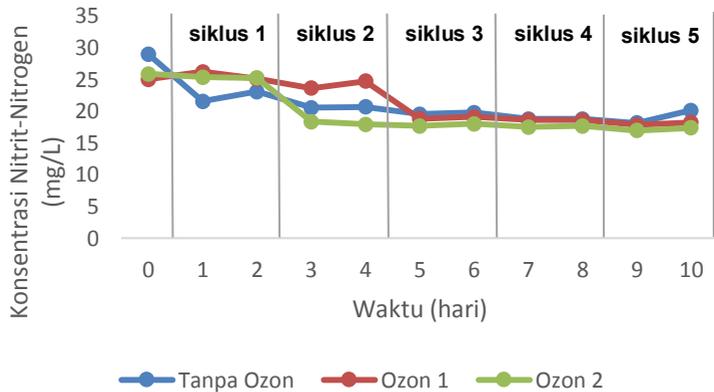
sehingga proses denitrifikasi berjalan kurang maksimal. Dari hasil analisis tersebut terlihat bahwa semakin lama durasi anoksik maka penyisihan nitrat-nitrogen yang diperoleh juga akan semakin besar. Hal ini ditunjukkan dengan hasil penyisihan pada durasi 22,5-22,5 jam yang menunjukkan hasil lebih besar dibandingkan dengan durasi lainnya. Selain itu, diperoleh pula hasil bahwa penyisihan tertinggi terjadi pada fase akhir siklus yaitu siklus 4 dan 5. Hal ini menunjukkan bahwa pada akhir siklus, ketersediaan oksigen terikat di dalam MBBR sudah cukup sehingga proses denitrifikasi dapat berjalan dengan baik. Sedangkan beberapa penurunan persen penyisihan nitrat-nitrogen pada ketiga durasi dapat disebabkan karena ketidakcukupan nitrat hasil dari proses aerobik untuk didenitrifikasi ataupun kurangnya kadar oksigen terikat di dalam lindi. Selain itu hal ini dapat pula terjadi karena jumlah organik yang jauh lebih besar daripada nitrat sehingga mikroorganisme cenderung untuk menurunkan senyawa organik dibandingkan dengan nitrat-nitrogen.

4.4.2.3 Hasil Penurunan Konsentrasi Nitrit-Nitrogen (NO₂-N)

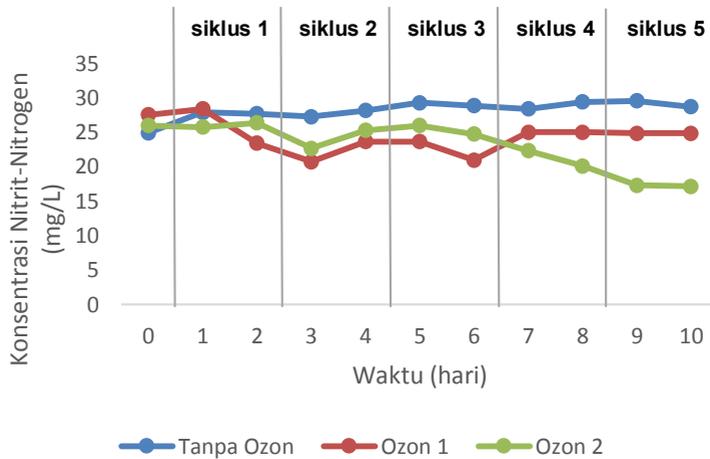
Nitrit merupakan fase transisi dari perubahan amonium menjadi nitrat melalui proses nitrifikasi. Pada penelitian ini parameter nitrit-nitrogen menjadi salah satu parameter tambahan untuk memastikan berlangsungnya proses nitrifikasi di dalam reaktor MBBR. Analisis nitrit-nitrogen dilakukan bersamaan dengan analisis amonium-nitrogen dan nitrat-nitrogen untuk memastikan terjadinya kondisi aerobik-anoksik pada reaktor MBBR. Sehingga pengambilan sampel analisis untuk nitrit-nitrogen dilakukan pada saat awal (hari ke-0), setelah proses aerobik dan setelah anoksik. Hasil analisis nitrit-nitrogen ditunjukkan melalui tren konsentrasi nitrit di dalam reaktor MBBR karena penyisihan nitrit akan berjalan seiring dengan amonium-nitrogen ataupun nitrat-nitrogen. Hasil analisis nitrit-nitrogen dapat dilihat pada Gambar 4.15, 4.16 dan 4.17.



Gambar 4. 15 Konsentrasi Nitrit-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 Jam



Gambar 4. 16 Konsentrasi Nitrit-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 Jam



Gambar 4. 17 Konsentrasi Nitrit-Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 Jam

Dari hasil analisis parameter nitrit-nitrogen, ketiga durasi menunjukkan kecenderungan penurunan konsentrasi nitrit pada saat proses aerobik berlangsung yaitu pada hari ke-1, 3, 5, 7, dan 9. Penurunan konsentrasi nitrit tersebut terjadi karena pada kondisi aerobik (hari 1, 3, 5, 7, 9), terjadi proses nitrifikasi sehingga nitrit akan diubah menjadi nitrat oleh bakteri nitrifikasi. Sedangkan pada hari ke 2, 4, 6, 8, dan 10 terjadi kondisi anoksik. Hal tersebut mengakibatkan terbentuknya kembali amonia-nitrogen yang kemudian diubah menjadi nitrit-nitrogen. Oleh karenanya, terjadi peningkatan jumlah nitrit-nitrogen. Meski demikian, peningkatan yang terjadi tidak melebihi konsentrasi awal nitrit-nitrogen pada sampel tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa produksi amonia-nitrogen pada kondisi anoksik tidak lebih banyak dibandingkan dengan jumlah amonia-nitrogen yang diolah melalui proses nitrifikasi sehingga jumlah nitrit-nitrogen yang terbentuk pun menjadi lebih sedikit. Sehingga, meski mengalami tren kenaikan dan penurunan, pada akhir siklus (siklus 5) didapatkan hasil penyisihan konsentrasi nitrit-nitrogen yang cukup baik.

4.4.2.4 **Mass Balance Nitrogen**

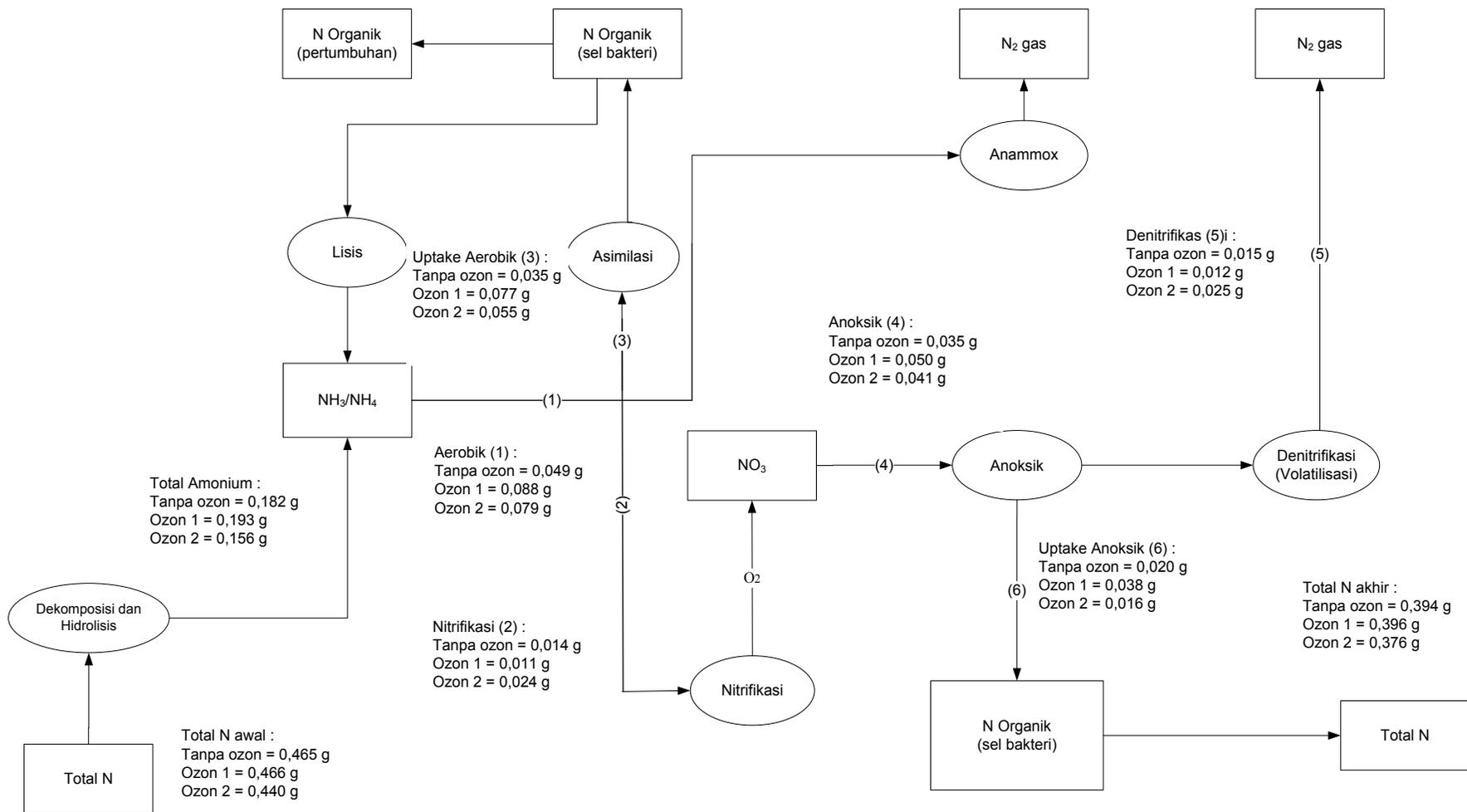
Mass balance nitrogen dapat ditentukan berdasarkan perhitungan penyisihan konsentrasi nitrogen yang meliputi perhitungan ammonium-nitrogen, nitrat-nitrogen dan nitrit-nitrogen. Pada perhitungan *mass balance*, akan terlihat penyisihan konsentrasi nitrogen baik pada saat proses aerobik maupun anoksik. Pada kondisi aerobik, penyisihan amonium-nitrogen terjadi karena adanya proses nitrifikasi. Proses nitrifikasi tersebut akan mengubah amonium-nitrogen menjadi nitrat-nitrogen. Selain itu, terjadi pula proses asimilasi oleh sel bakteri untuk pertumbuhan (*uptake*). Proses aerobik, perubahan amonium-nitrogen oleh nitrifikasi, dan perubahan amonium-nitrogen oleh asimilasi masing-masing ditunjukkan oleh siklus (1), (2) dan (3). Sedangkan pada kondisi anoksik, akan terjadi penyisihan nitrat-nitrogen. Proses anoksik tersebut ditunjukkan oleh siklus (4). Penyisihan nitrat-nitrogen terjadi karena adanya proses denitrifikasi yang mengubah nitrat-nitrogen menjadi N_2 gas dengan memanfaatkan bakteri. Proses denitrifikasi tersebut ditunjukkan oleh siklus (5). Selain itu, sama halnya pada kondisi aerobik, bakteri juga melakukan asimilasi untuk pertumbuhan pada saat anoksik. Siklus (6) menunjukkan adanya proses *uptake* nitrat oleh sel bakteri akibat kondisi anoksik di dalam reaktor (Metcalf and Eddy, 2003). Perhitungan *mass balance* nitrogen dapat dilihat pada Tabel 4.5, sedangkan skema *mass balance* untuk masing-masing durasi pengolahan aerobik-anoksik dapat dilihat pada Gambar 4.18 sampai Gambar 4.20.

Tabel 4. 5 Perhitungan *Mass Balance* Nitrogen

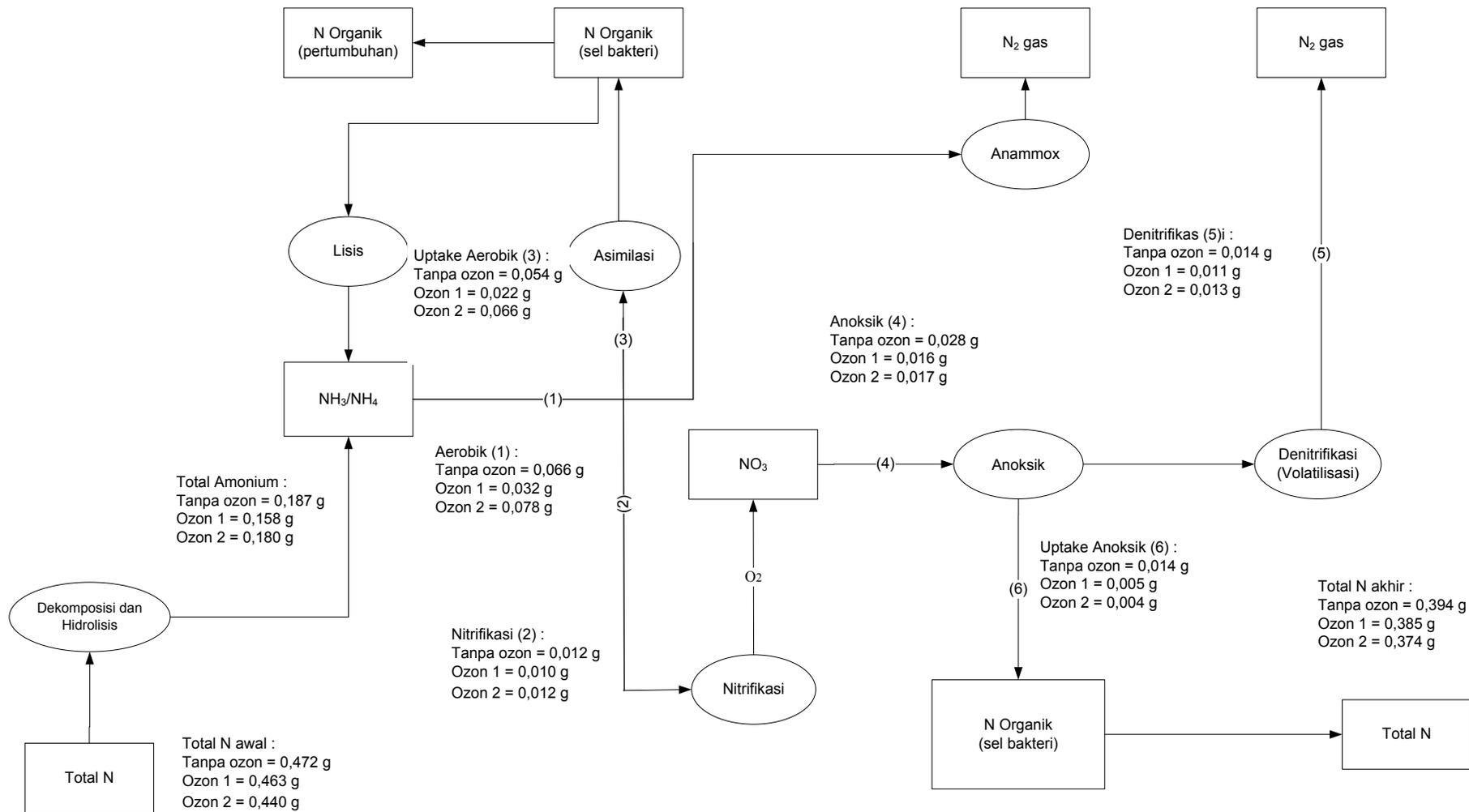
Durasi Proses	Variasi Pre-treatment	Massa (g)							
		Total amonium	Total N awal	Total N akhir	Penyisihan Amonium				
					Aerobik+ Anoksik	Aerobik	Nitrifikasi	Uptake aerob	Uptake Anoksik
50-50	Tanpa Ozon	0,182	0,465	0,394	0,069	0,049	0,014	0,035	0,020
	Ozon 1	0,193	0,466	0,396	0,126	0,088	0,011	0,077	0,038
	Ozon 2	0,156	0,440	0,376	0,095	0,079	0,024	0,055	0,016
70-30	Tanpa Ozon	0,187	0,472	0,394	0,080	0,066	0,012	0,054	0,014
	Ozon 1	0,158	0,463	0,385	0,042	0,032	0,010	0,022	0,010
	Ozon 2	0,180	0,440	0,374	0,082	0,078	0,012	0,066	0,004
80-20	Tanpa Ozon	0,160	0,447	0,438	0,046	0,038	0,005	0,033	0,008
	Ozon 1	0,160	0,471	0,421	0,063	0,059	0,003	0,056	0,004
	Ozon 2	0,169	0,436	0,376	0,054	0,051	0,008	0,043	0,003

Lanjutan Tabel 4.5

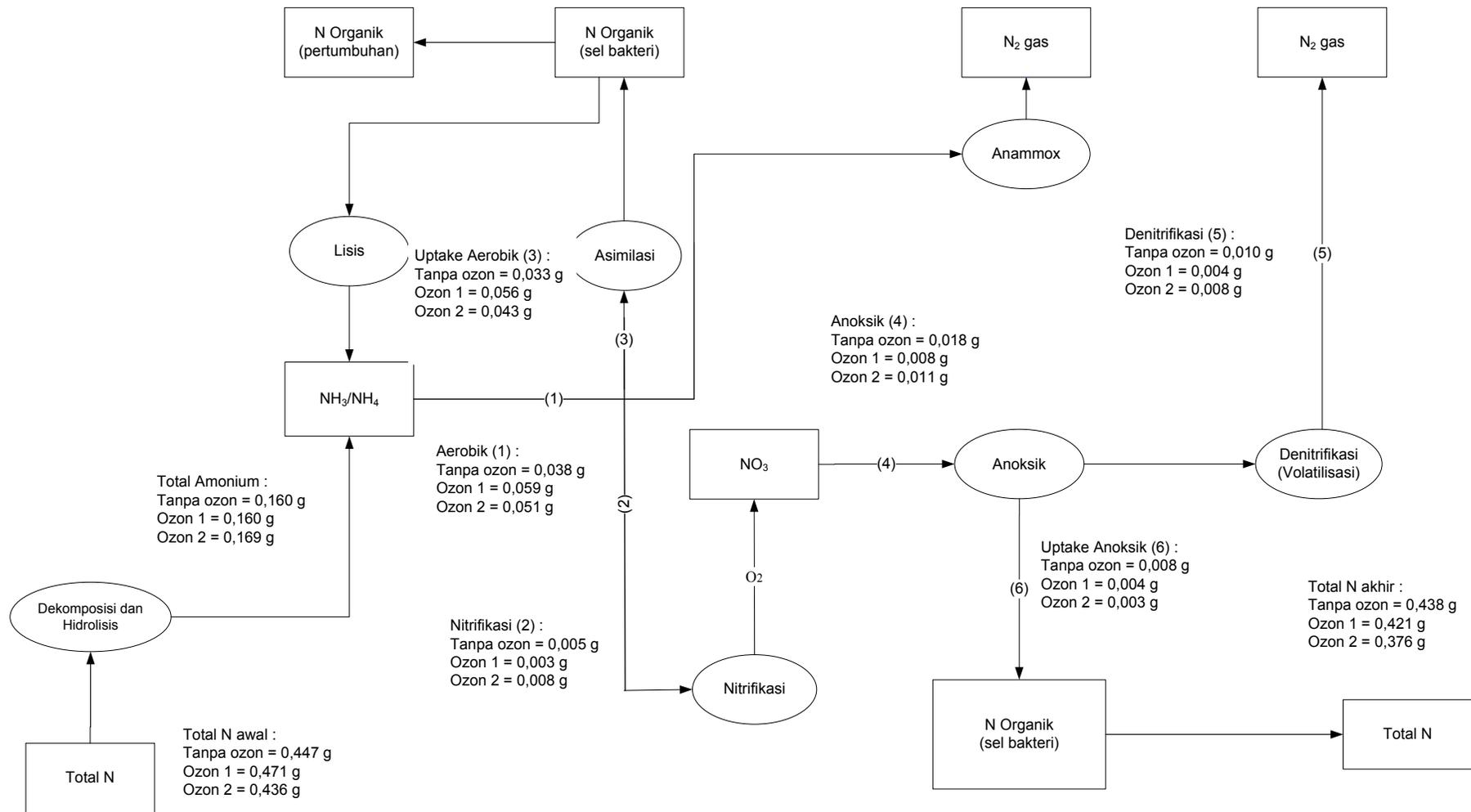
Massa (g)				
Penyisihan Nitrat				
Aerobik	Anoksik	Denitrifikasi	Uptake anoksik	Penyisihan Total N
0,013	0,035	0,015	0,020	0,070
0,011	0,050	0,012	0,038	0,070
0,023	0,041	0,025	0,016	0,064
0,012	0,028	0,014	0,014	0,078
0,010	0,016	0,011	0,005	0,078
0,012	0,017	0,013	0,004	0,066
0,005	0,018	0,010	0,008	0,009
0,003	0,008	0,004	0,004	0,050
0,007	0,011	0,008	0,003	0,060



Gambar 4. 18 Mass Balance Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam



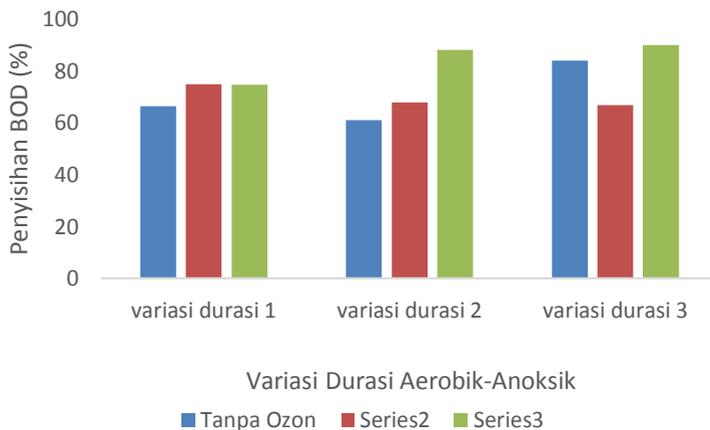
Gambar 4. 19 Mass Balance Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam



Gambar 4. 20 Mass Balance Nitrogen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam

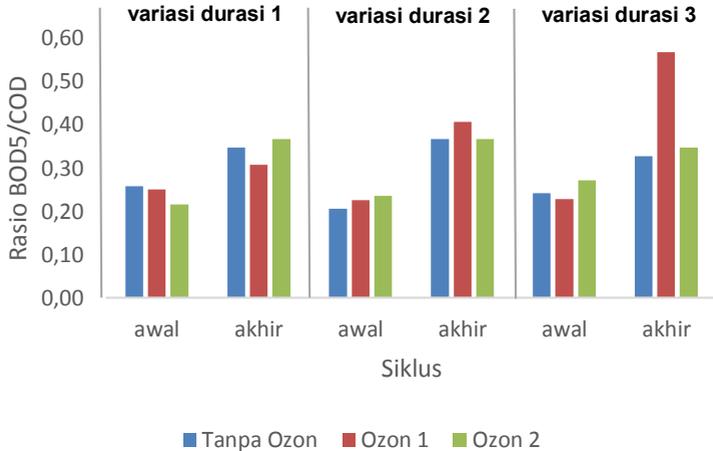
4.4.3 Analisis BOD dan BOD/COD

BOD merupakan parameter tambahan di dalam penelitian ini sehingga analisisnya dilakukan hanya pada awal siklus (hari ke-0) dan akhir siklus (hari ke-10). Nilai BOD yang digunakan pada penelitian ini adalah nilai BOD₅. Hasil analisis awal menunjukkan konsentrasi BOD pada sampel mengalami penurunan seperti halnya parameter COD. Meski demikian, konsentrasi BOD di dalam sampel masih tergolong rendah. Konsentrasi BOD yang rendah dapat disebabkan karena konsentrasi amonium yang tinggi pada sampel sehingga sampel bersifat toksik. Penurunan konsentrasi BOD yang paling optimum terjadi pada durasi proses aerobik-anoksik 36-9 jam dengan besar penyisihan pada reaktor kontrol (tanpa ozon), variasi ozon 1, dan variasi ozon 2 sebesar 83,92%, 66,83% dan 89,79%. Penyisihan BOD paling tinggi terjadi pada variasi ozon 2, hal ini sesuai dengan kemampuan mikroorganisme yang dapat mendegradasi bahan organik dengan cepat pada konsentrasi yang rendah. Efisiensi penyisihan BOD untuk setiap konsentrasi COD lindi pada setiap durasi proses aerobik-anoksik dapat dilihat pada Gambar 4.18.



Gambar 4. 21 Penyisihan BOD pada Setiap Durasi Proses Aerobik-Anoksik

Meski mengalami penurunan konsentrasi BOD seperti halnya konsentrasi COD, namun tingkat rasio BOD/COD yang dihasilkan setelah pengolahan mengalami peningkatan dibandingkan dengan kondisi sebelum pengolahan. Rasio BOD/COD pada awal dan akhir siklus dapat dilihat pada Gambar 4.19.



Gambar 4. 22 Rasio BOD/COD pada MBBR pada Tiap Durasi Proses Aerobik-Anoksik

Ketiga durasi menunjukkan peningkatan BOD/COD yang baik. Rasio BOD/COD sampel pada kondisi sebelum diolah berada pada rentang 0,21-0,27. Secara umum, sampel dengan rasio di bawah 0,5 tidak memenuhi kriteria untuk dilakukan pengolahan secara biologis. Namun karena pengolahan biologis yang dilakukan menggunakan MBBR yang mampu bekerja dengan rasio BOD/COD ekstrim (minimum 0,2) maka hal ini dapat dilakukan meskipun efisiensi yang diperoleh akan lebih rendah dibandingkan sampel dengan rasio BOD/COD di atas 0,5 (Hajipour et al., 2011; Robinson *et al.*, 2012). Hal ini berhubungan dengan karakteristik lindi yang umumnya memiliki rasio BOD/COD sangat rendah bahkan mencapai 0,1 (Bhalla *et al.*, 2013). Sedangkan rasio BOD/COD pada sampel yang telah diolah menunjukkan adanya peningkatan, dengan rentang rasio 0,31-0,57. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat toksisitas sampel

mengalami penurunan yang disebabkan oleh kenaikan tingkat biodegradabilitas sampel sehingga sampel akan lebih mudah didegradasi oleh mikroorganisme dibanding sebelum diolah.

4.4.4 Analisis Dissolved Oxygen

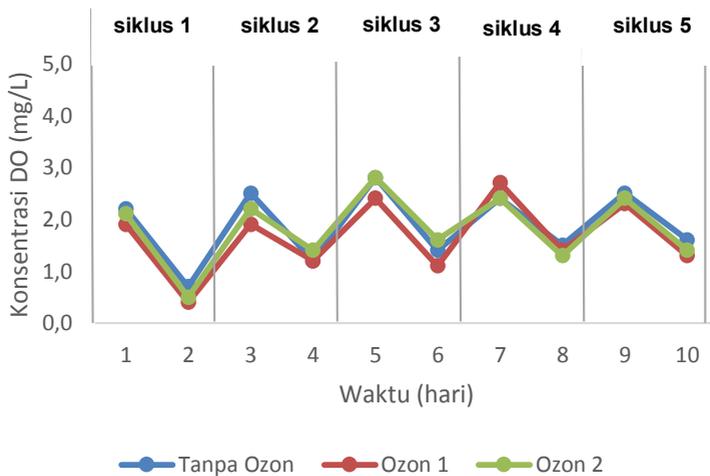
Analisis Dissolved Oxygen (DO) dilakukan pada setiap fase aerobik dan anoksik. Hal ini bertujuan untuk mengetahui kecukupan oksigen di dalam reaktor serta memastikan proses yang terjadi di dalam reaktor. Kondisi aerobik ditandai dengan kecukupan konsentrasi DO > 2 mg/L (Titiresmi and Nida Sopiah, 2006). Hal tersebut dikarenakan pada kondisi aerobik terjadi proses nitrifikasi yang salah satu faktornya dipengaruhi oleh konsentrasi oksigen terlarut sehingga ketersediaan oksigen harus mencukupi bahkan berlebih. Ketersediaan oksigen yang berlebih sangat dibutuhkan karena mikroorganisme cenderung akan mengoksidasi senyawa karbon dibanding nitrogen, sehingga proses nitrifikasi hanya dapat dilakukan apabila konsentrasi oksigen untuk kebutuhan penyisihan karbon sudah terpenuhi. Sedangkan kondisi anoksik adalah kondisi perantara antara aerobik dan anaerobik. Kondisi anoksik ditandai dengan jumlah konsentrasi DO < 2 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa oksigen yang ada pada kondisi anoksik merupakan oksigen terikat, bukan oksigen bebas seperti pada fase aerobik. Kadar DO yang demikian mengakibatkan terjadinya proses denitrifikasi pada kondisi anoksik. Pengukuran DO dilakukan menggunakan DO meter. Hasil analisis DO pada durasi proses aerobik-anoksik 22,5-22,5 jam dapat dilihat pada Gambar 4.23.

Berdasarkan hasil analisis, konsentrasi DO pada kondisi aerobik yaitu sebesar 1,9 mg/L-2,8 mg/L. Konsentrasi DO paling rendah terjadi pada siklus aerobik pertama. Hal ini dikarenakan reaktor baru dioperasikan sehingga oksigen terlarut yang tersedia masih sedikit. Tetapi secara keseluruhan konsentrasi oksigen terlarut pada proses aerobik masih berada pada kondisi cukup untuk proses nitrifikasi, dengan rata-rata konsentrasi DO pada kondisi aerobik yaitu 2,37 mg/L. Pada kondisi anoksik konsentrasi DO berada pada rentang 0,4 mg/L-1,6 mg/L, dengan rata-rata konsentrasi DO yaitu 1,2 mg/L.

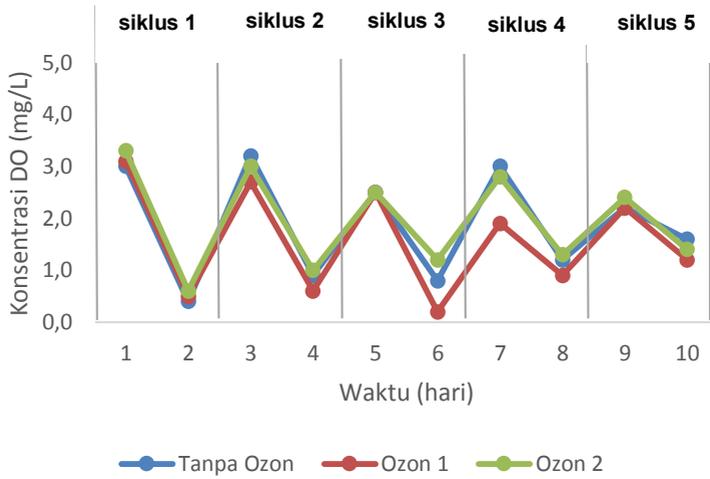
Pada durasi proses aerobik-anoksik 31,5-13,5 jam konsentrasi DO pada semua konsentrasi COD lindi untuk kondisi aerobik yaitu sebesar 1,9 mg/L-3,3 mg/L. Hal ini

menunjukkan bahwa setiap reaktor sudah berada pada kondisi siap untuk proses nitrifikasi. Secara keseluruhan konsentrasi DO pada kondisi aerobik paling baik untuk ketiga reaktor terjadi pada hari ke-10 (siklus 5). Sementara pada kondisi anoksik konsentrasi DO berada pada rentang 0,2 mg/L-1,4 mg/L, yang menunjukkan bahwa setiap reaktor sudah memiliki konsentrasi DO untuk proses denitrifikasi. Konsentrasi DO untuk durasi proses aerobik-anoksik 31,5-13,5 jam dapat dilihat pada Gambar 4.24.

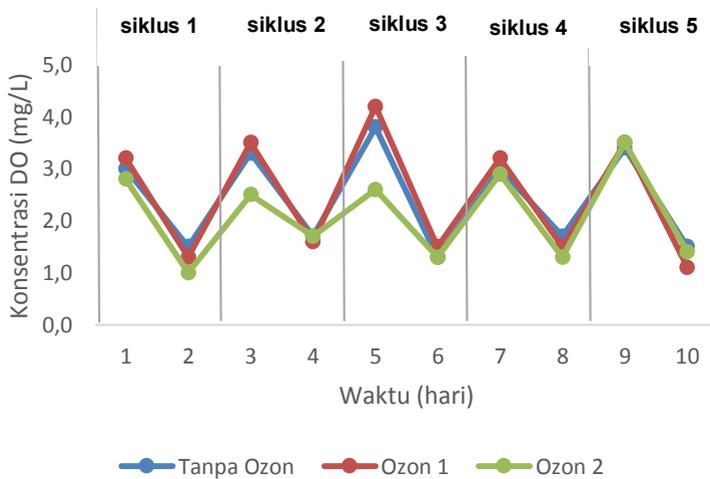
Pada durasi proses aerobik-anoksik 36-9 konsentrasi DO pada kondisi aerobik maupun anoksik sudah berada pada konsentrasi DO untuk proses nitrifikasi dan denitrifikasi. Konsentrasi DO saat kondisi aerobik di semua reaktor yaitu 2,5 mg/L-4,2 mg/L. Sedangkan konsentrasi DO saat anoksik yaitu 1 mg/L-1,7 mg/L. Konsentrasi DO pada durasi proses aerobik-anoksik 36-9 jam dapat dilihat pada Gambar 4.25.



Gambar 4. 23 Hasil Analisis Dissolved Oxygen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam



Gambar 4. 24 Hasil Analisis Dissolved Oxygen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam



Gambar 4. 25 Hasil Analisis Dissolved Oxygen pada Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam

Hasil pengukuran konsentrasi DO pada tiga variasi durasi proses aerobik-anoksik menunjukkan bahwa konsentrasi

DO saat kondisi aerobik sebanding dengan lamanya waktu durasi proses aerobik. Rata-rata konsentrasi DO saat kondisi aerobik yang paling tinggi terdapat pada durasi proses aerobik-anoksik 36-9 jam, yaitu sebesar 3,3 mg/L, dan rata-rata konsentrasi DO saat aerobik paling rendah pada durasi proses aerobik-anoksik 22,5-22,5 jam yaitu 2,37 mg/L.

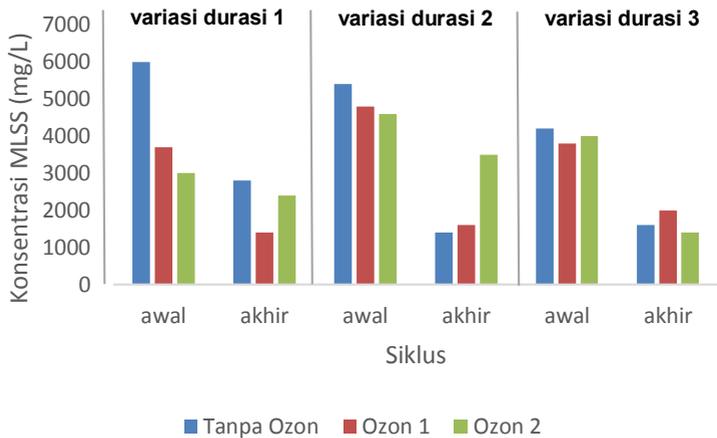
4.4.5 Analisis Biomass Sebagai MLSS

Analisis MLSS dilakukan pada awal siklus (hari ke-0) dan akhir siklus (hari ke-10). MLSS merupakan jumlah padatan organik dan mineral yang tersuspensi, termasuk mikroorganisme di dalam larutan yang tercampur (Gracia *et al.*, 2006). Ketersediaan mikroorganisme di dalam reaktor dapat diketahui melalui pengukuran MLSS.

Pada durasi proses aerobik-anoksik 22,5-22,5 jam konsentrasi MLSS pada hari ke-0 berkisar antara 3000 mg/L-6000 mg/L. Pada hari ke ke-10 terjadi penurunan konsentrasi MLSS sehingga konsentrasi MLSS berkisar antara 1400 mg/L-2800 mg/L. Pada durasi proses aerobik-anoksik 31,5-13,5 jam, konsentrasi MLSS tidak terlalu berbeda untuk setiap konsentrasi COD lindi pada hari ke-0, yaitu berkisar antara 4800 mg/L-5400 mg/L. Pada hari ke ke-10 konsentrasi MLSS berkisar antara 1400 mg/L-3500 mg/L. Pada durasi proses aerobik-anoksik 36-9 jam konsentrasi MLSS pada hari ke-0 berkisar antara 3800 mg/L-4200 mg/L dan pada hari ke-10 berkisar antara 1400 mg/L-2000 mg/L. Konsentrasi MLSS pada setiap durasi proses aerobik-anoksik dapat dilihat pada Gambar 4.26.

Berdasarkan Gambar 4.26 dapat dilihat bahwa pada setiap durasi proses aerobik-anoksik pada masing-masing reaktor terjadi penurunan konsentrasi MLSS. Hal ini dapat disebabkan karena terjadi respirasi *endogenous* yaitu penggunaan oksigen terikat (NO_3) sebagai aseptor elektron untuk mengoksidasi senyawa organik selain lindi, yang di dalam hal ini adalah mikroorganisme itu sendiri. Mikroorganisme akan cenderung mendegradasi senyawa organik yang memiliki komposisi organik lebih sederhana. Mikroorganisme memiliki komposisi organik (sel organik) yang lebih sederhana dibandingkan dengan komposisi organik lindi sehingga pada proses anoksik ini mikroorganisme justru saling

mendegradasi, antar mikroorganismenya yang satu dengan yang lainnya (Metcalf and Eddy, 2003).



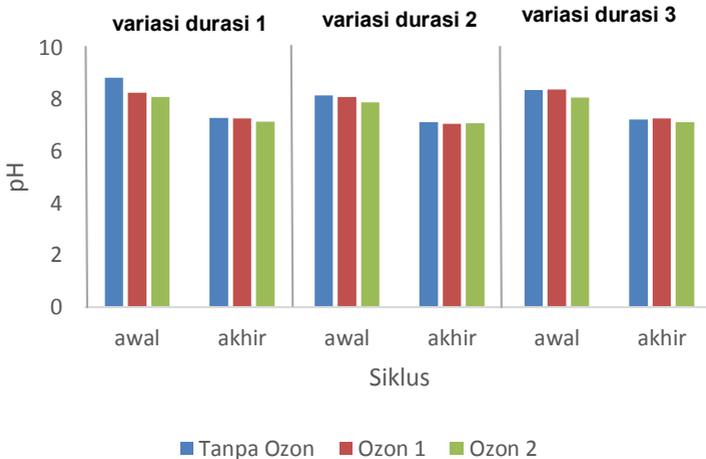
Gambar 4. 26 Konsentrasi MLSS pada Setiap Durasi Proses Aerobik-Anoksik

4.4.6 Analisis pH

pH merupakan parameter tambahan di dalam penelitian ini. Pengukuran pH dilakukan untuk mengetahui apakah proses yang terjadi di dalam reaktor sudah berada pada pH optimum untuk proses nitrifikasi dan denitrifikasi. Umumnya nitrifikasi berlangsung optimal pada pH 7,7-8,9 dan akan berhenti pada pH 5-5,5. Mikroorganismenya yang berperan dalam nitrifikasi yaitu *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter*. pH optimum untuk *Nitrosomonas* berkisar antara 8,5-8,5 dan pH optimum untuk *Nitrobacter* yaitu 8,3-9,3. Sedangkan pH paling efektif untuk proses denitrifikasi berkisar antara 7-8,5.

Berdasarkan hasil pengukuran pH pada semua durasi proses, secara umum semua reaktor pada setiap durasi proses berada pada rentang pH optimum untuk nitrifikasi dan denitrifikasi. Penurunan nilai pH menunjukkan adanya peningkatan kualitas lindi dan berkurangnya nilai toksik di dalam lindi. Nilai pH lindi pada hari ke-0 berkisar antara 8,84-7,89 sedangkan pada hari ke-10 berkisar antara 7,28-7,06.

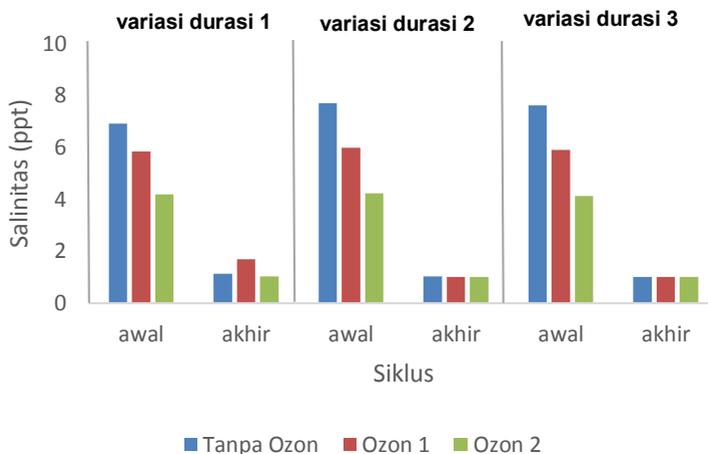
Selain itu nilai pH juga berbanding lurus dengan konsentrasi lindi, dengan kata lain konsentrasi yang lebih rendah juga akan memiliki nilai pH yang lebih rendah atau mendekati normal. Nilai pH pada setiap durasi proses aerobik-anoksik dapat dilihat pada Gambar 4.27.



Gambar 4. 27 Nilai pH pada MBBR pada Tiap Durasi Proses Aerobik-Anoksik

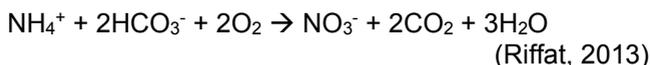
4.4.7 Analisis Salinitas

Salinitas merupakan parameter tambahan di dalam penelitian ini. Pengukuran salinitas dilakukan pada awal siklus (hari ke-0) dan akhir siklus (hari ke-12). Pengukuran salinitas dengan menggunakan *pH onlab-EC 10*. Nilai salinitas di semua durasi proses aerobik-anoksik menunjukkan nilai yang hampir sama untuk setiap reaktor, dimana semakin tinggi konsentrasi lindi maka salinitas akan semakin tinggi. Hasil pengukuran salinitas pada setiap reaktor yaitu berkisar antara 4,1-6,91 ppt pada hari ke-0 dan 1,01-1,14 ppt pada hari ke-10 setelah pengolahan. Nilai salinitas hari ke-0 tergolong dalam kategori salin atau pekat sedangkan salinitas hari ke-10 sudah tergolong dalam kondisi air tawar. Hasil pengukuran salinitas untuk semua durasi proses dapat dilihat pada Gambar 4.28.

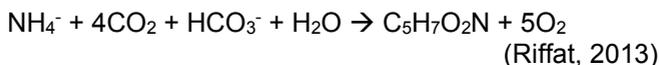


Gambar 4. 28 Nilai Salinitas pada Setiap Durasi Proses Aerobik-Anoksik

Penurunan nilai salinitas pada setiap variasi durasi *pre-treatment* dan aerobik-anoksik disebabkan karena berkurangnya jumlah dari ion-ion yang mempengaruhi salinitas. Beberapa contoh ion tersebut adalah klorida, karbonat, bikarbonat, sulfat, natrium, kalsium, magnesium dan garam mineral lainnya. Salah satu ion yang sangat berpengaruh pada penurunan nilai salinitas lindi adalah ion bikarbonat. Ion bikarbonat dapat teroksidasi bersama dengan amonium dalam proses nitrifikasi. Reaksi oksidasi tersebut dapat dilihat pada persamaan berikut.



Tidak hanya proses oksidasi, penurunan ion bikarbonat juga dapat diakibatkan karena adanya proses pembentukan atau sintesis sel mikroorganisme baru selama proses pengolahan berlangsung di dalam reaktor MBBR. Hal ini ditunjukkan melalui persamaan berikut.



4.5 Penentuan Pengaruh Durasi Proses Aerobik-Anoksik Terhadap Parameter Organik dan Nitrogen

Hasil penelitian yang diperoleh kemudian dianalisis dengan menggunakan metode statistika untuk mengetahui pengaruh lamanya durasi ozonisasi dan durasi aerobik-anoksik terhadap parameter organik, nitrogen serta berbagai parameter tambahan lainnya. Metode statistika yang digunakan adalah uji ANOVA (*Analysis of Variance*). Uji ANOVA dilakukan dengan menggunakan metode *two-way* ANOVA. Program yang digunakan adalah software Minitab 16 dengan tingkat signifikansi (α) 95%. Hipotesis uji ANOVA yang dilakukan adalah sebagai berikut.

$$H_0 : t_1 = t_2 = t_3 = 0$$

$$H_1 : \text{paling sedikit ada satu } t_1 \neq 0$$

$$\alpha = 0,05$$

Hasil *running* dengan menggunakan program Minitab 16 dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Hasil Uji ANOVA dengan Program Minitab 16

No	Parameter	Source	DF	SS	MS	F	P
1	COD	durasi	2	3.35E+08	167522727	7,52	0,001
		ozon	2	72969697	36484848	1,64	0,2
		Interaction	4	27803030	6950758	0,31	0,869
		Error	90	2.01E+09	22287879		
		Total	98	2.44E+09			
2	Amonia	durasi	2	448,45	224,224	3,1	0,05
		ozon	2	269,26	134,629	1,86	0,161
		Interaction	4	417,58	104,395	1,44	0,226
		Error	90	6502,36	72,248		
		Total	98	7637,64			
3	Nitrat	durasi	2	18,829	9,41441	8,11	0,001
		ozon	2	2,777	1,38868	1,2	0,307
		Interaction	4	1,532	0,38305	0,33	0,857
		Error	90	104,458	1,16065		
		Total	98	127,597			

4	Nitrit	durasi	2	118,95	59,473	7,99	0,001
		ozon	2	489,65	244,825	32,9	0
		Interaction	4	75,53	18,881	2,54	0,045
		Error	90	669,83	7,443		
		Total	98	1353,95			
5	DO	durasi	2	0,362	0,18101	0,16	0,85
		ozon	2	5,177	2,58859	2,33	0,103
		Interaction	4	1,278	0,31949	0,29	0,885
		Error	90	99,796	1,10885		
		Total	98	106,614			
6	BOD	durasi	2	1142867	571433	0,11	0,9
		ozon	2	952532	476266	0,09	0,916
		Interaction	4	913354	228339	0,04	0,996
		Error	9	48265630	5362848		
		Total	17	51274383			
7	BOD/COD	durasi	2	0,005623	0,0028114	0,24	0,795
		ozon	2	0,002507	0,0012534	0,1	0,901
		Interaction	4	0,017717	0,0044292	0,37	0,824
		Error	9	0,107439	0,0119377		
		Total	17	0,133286			
8	pH	durasi	2	0,22088	0,110439	0,19	0,832
		ozon	2	0,19188	0,095939	0,16	0,852
		Interaction	4	0,07726	0,019314	0,03	0,998
		Error	9	5,28075	0,58675		
		Total	17	5,77076			
9	salinitas	durasi	2	8,082	4,041	0,33	0,724
		ozon	2	0,006	0,0028	0	1
		Interaction	4	0,231	0,0577	0	1
		Error	9	108,601	12,0667		
		Total	17	116,919			

10	MLSS	durasi	2	1423333	711667	0,21	0,812
		ozon	2	1543333	771667	0,23	0,798
		Interaction	4	3643333	910833	0,27	0,888
		Error	9	30050000	3338889		
		Total	17	36660000			

Pada analisis ini, *state* H0 diinterpretasikan sebagai variasi yang diberikan menunjukkan tidak adanya perbedaan yang cukup besar untuk hasil dari keseluruhan variasi tersebut terhadap parameter tertentu. Hal ini menunjukkan keberadaan variasi tidak berpengaruh pada hasil atau dengan kata lain tidak signifikan. Hal ini ditandai dengan kondisi nilai P-Value atau nilai signifikansi kurang dari alpha ($\alpha=0,05$). Oleh karena itu, variasi dengan nilai P-Value kurang dari 0,05 menunjukkan bahwa variasi tersebut berpengaruh secara signifikan terhadap parameter. Berdasarkan hasil *output* Minitab 16, maka dapat diketahui bahwa signifikansi terjadi hanya pada parameter utama saja, yaitu parameter COD, amonia, nitrat dan nitrit. Pada parameter COD, amonia dan nitrat, nilai signifikansi terjadi akibat adanya variasi durasi aerobik-anoksik pada pengolahan lindi menggunakan MBBR. Hal ini menunjukkan bahwa adanya variasi durasi akan berpengaruh pada hasil yang diperoleh untuk ketiga parameter tersebut. Sedangkan untuk variasi ozon pada ketiga parameter tersebut tidak menunjukkan hasil yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa pengolahan dengan MBBR dapat digunakan untuk konsentrasi lindi yang bervariasi dan tetap menghasilkan hasil yang tidak berbeda jauh antar variasi konsentrasinya. Hal ini dikarenakan nilai P-Value dengan kontrol durasi dan respon parameter COD, amonia dan nitrat berada di bawah nilai alpha yaitu 0,05. Sedangkan untuk parameter nitrit, nilai signifikansi ditunjukkan pada variasi durasi ozon, variasi aerobik-anoksik pada MBBR dan interaksi antar kedua variasi tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa baik variasi durasi ozon (variasi konsentrasi lindi) dan variasi durasi aerobik-anoksik pada MBBR kedua berpengaruh secara signifikan terhadap hasil parameter nitrit. Sehingga adanya perbedaan kedua variasi tersebut akan menunjukkan perbedaan yang cukup besar pada hasil parameter nitrit.

Sedangkan untuk parameter tambahan seperti BOD, DO, pH, salinitas, dan MLSS baik adanya variasi durasi ozonisasi dan variasi aerobik-anoksik keduanya tidak menunjukkan hasil yang signifikan. Hal ini dikarenakan nilai signifikansi yang diperoleh berada di atas nilai alpha. Hal ini menunjukkan bahwa adanya perbedaan durasi ozon dan durasi aerobik-anoksik tidak akan memberikan perbedaan hasil yang cukup besar pada parameter tersebut.

4.6 Ringkasan Kinerja MBBR

Pengolahan lindi dengan *pre-treatment* ozon dan proses aerobik-anoksik menggunakan MBBR, menunjukkan kinerja yang cukup baik dalam menurunkan konsentrasi COD dan nitrogen. Penurunan COD dan amonium-nitrogen pada *pre-treatment* ozon optimum pada waktu durasi operasi selama 48 jam dengan penyisihan COD dan amonium masing-masing 53,85% dan 57,47%. Sedangkan pada MBBR, penurunan konsentrasi COD paling baik terjadi pada durasi proses aerobik-anoksik 36-9 jam dengan penyisihan COD mencapai 92% untuk variasi ozon *pre-treatment* 2 yaitu dengan durasi ozon selama 48 jam.

Penyisihan nitrogen paling optimum terjadi pada durasi proses aerobik-anoksik 36-9 jam baik untuk amonium-nitrogen maupun nitrat-nitrogen. Besar penyisihan masing-masing mencapai 65,98% untuk penyisihan amonia-nitrogen dan 13,05% untuk penyisihan nitrat-nitrogen pada variasi ozon *pre-treatment* 2 yaitu dengan durasi ozon selama 48 jam. Hasil optimum pada durasi 36-9 jam ini didukung oleh hasil dari parameter tambahan seperti nitrit-nitrogen, BOD, DO, MLSS, pH, dan salinitas. Sehingga secara keseluruhan durasi proses aerobik 36 jam dan durasi proses anoksik 9 jam merupakan durasi proses yang paling optimum pada pengolahan lindi dengan menggunakan MBBR.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Analisis dan pembahasan pada penelitian pengolahan lindi menggunakan *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) pada proses aerobik-anoksik dan dengan *pre-treatment* ozon menghasilkan kesimpulan sebagai berikut:

1. *Pre-treatment* ozon yang optimum dalam menurunkan zat organik dan nitrogen dalam lindi adalah ozon dengan durasi 48 jam dengan nilai penyisihan masing-masing 53,85% untuk COD, 52,10% untuk amonium-nitrogen dan 5,51% untuk nitrat-nitrogen.
2. Durasi aerobik-anoksik yang paling optimum dalam pengolahan lindi menggunakan MBBR adalah durasi aerobik-anoksik 39-6 dengan nilai penyisihan masing-masing 92% untuk COD, 65,98% untuk amonium-nitrogen dan 13,05% untuk nitrat-nitrogen.

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan dan kekurangan yang ada pada penelitian ini, diperlukan adanya saran untuk perkembangan penelitian selanjutnya mengenai pengolahan lindi menggunakan *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) pada proses aerobik-anoksik. Berikut ini adalah beberapa saran yang dapat diberikan:

1. Perlu dilakukan analisis lebih lanjut untuk mengetahui adanya proses anammox (*anaerobic amonium oxidation*) pada reaktor karena terdapat indikasi adanya penurunan amonia yang disertai dengan penurunan nitrat dan nitrit akibat terbentuknya gas N₂.
2. Perlu dilakukan penelitian dengan reaktor kontrol, yaitu tanpa menggunakan media untuk mengetahui kemampuan media dalam MBBR.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- AAhl, R. M., Leiknes, T., Odegaard, H. 2006. Tracking Particle Size Distributions in A Moving Bed Biofilm Membrane Reactor for Treatment of Municipal Wastewater. **Water Science and Technology**, 53(7), 33–42.
- Abbas, A. A., Jingsong, G., Ping, L. Z., Ya, P. Y., Al-Rekabi, W. S. 2009. Review on Landfill Leachate Treatments. **Journal of Applied Sciences Research**, 5(5), 534–545.
- Aljumriana. 2015. **Pengolahan Lindi Menggunakan Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) Pada Proses Aerobik-Anoksik**. Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS.
- Al-Rekabi, W. S. 2015. Mechanisms of Nutrient Removal in Moving Bed Biofilm Reactors. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, 6(1), 497-517.
- Arofah, U., Warmadewanthi, I., Pandebesie, E. S. 2012. Pengaruh Resirkulasi Lindi Terhadap Laju Degradasi Sampah di TPA Ngipik, Gresik. **Prosiding of Scientific Conference IX Environmental Technology**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Aygun, A., Nas, B., Berkay, A. 2008. Influence of High Organic Loading Rates on COD Removal and Sludge Production in Moving Bed Biofilm Reactor. **Environmental Engineering Science**, 25(9), 1311–1316.
- Bhalla, B., Saini, M. S., Jha, M. K. 2013. Effect of Age and Seasonal Variations on Leachate Characteristics of Municipal Solid Waste Landfill. **Int J Res Eng Technol (IJRET)**, 2, 223–232.
- Brennan, R. B., Clifford, E., Devroedt, C., Morrison, L., Healy, M. G. 2017. Treatment of Landfill Leachate in Municipal Wastewater Treatment Plants and Impacts on Effluent Ammonium Concentrations. **Journal of Environmental Management**, 188, 64–72.
- Chen, S., Sun, D., Chung, J.-S. 2008. Simultaneous Removal of COD and Ammonium from Landfill Leachate Using an Anaerobic–Aerobic Moving-Bed Biofilm Reactor System. **Waste Management**, 28(2), 339–346.

- Delnavaz, M., Ayati, B., Ganjidoust, H. 2010. Prediction of Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) Performance for the Treatment of Aniline Using Artificial Neural Networks (ANN). **Journal of Hazardous Materials**, 179(1–3), 769–775.
- Ekasari, S. R. 2013. **Penyisihan Amonia dari Air Limbah Menggunakan Gabungan Proses Membran dan Oksidasi Lanjut Dalam Reaktor Hibrida Ozon-Plasma Menggunakan Larutan Penyerap Asam Sulfat**. Tesis Prodi Teknik Kimia FT Universitas Indonesia.
- Eldyasti, A., Chowdhury, N., Nakhla, G., Zhu, J. 2010. Biological Nutrient Removal from Leachate Using A Pilot Liquid–Solid Circulating Fluidized Bed Bioreactor (LSCFB). **Journal of Hazardous Materials**, 181(1–3), 289–297.
- Gelardiansyah, S., Sururi, M. R., Ainun, S. 2015. Kelarutan Ozon Pada Proses Ozonisasi Konvensional dan Advanced Oxidation Process (O_3/H_2O_2) pada Lindi Effluent Pengolahan. **Jurnal Rekayasa Lingkungan**, 3(2).
- Gulhane, M. L., Kotangale, A. J. 2013. Moving Bed Biofilm Reactor–New Innovation in the Field of Conventional Biological Wastewater Treatment. **IJSR-International Journal Of Scientific Research**, 2(12), 167–170.
- Hajipour, A., Moghadam, N., Nosrati, M., Shojasadati, S. 2011. Aerobic Thermophilic Treatment of Landfill Leachate in a Moving-Bed Biofilm Bioreactor. **Journal of Environmental Health Science & Engineering**, 8(1), 3–14.
- Han, D., Tong, X., Currell, M. J., Cao, G., Jin, M., Tong, C. 2014. Evaluation of the Impact of an Uncontrolled Landfill on Surrounding Groundwater Quality, Zhoukou, China. **Journal of Geochemical Exploration**, 136, 24–39.
- Huda, R. 2017. **Pengolahan Lindi Dengan Proses Aerobik-Anoksik Menggunakan Moving Bed Biofilm Reactor Untuk Menurunkan Konsentrasi Organik dan Nitrogen**. Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS.
- Kawan, J. A., Hasan, H. A., Suja, F., JAAFAR, O. B., Abd-Rahman, R. 2016. A Review on Sewage Treatment and

- Polishing Using Moving Bed Bioreactor (MBBR). **Journal of Engineering Science and Technology**, 11(8), 1098–1120.
- Kementerian Lingkungan Hidup. 2016. **Baku Mutu Lindi Bagi Usaha Dan Atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Sampah**.
- Kermani, M., Bina, B., Movahedian, H., Amin, M., Nikaen, M. 2008. Application of Moving Bed Biofilm Process for Biological Organics and Nutrients Removal from Municipal Wastewater. **Science Publications**, 4(6), 682–689.
- Kulikowska, D. 2012. Nitrogen Removal from Landfill Leachate via the Nitrite Route. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, 29(2), 211–219.
- Lee, A. H., Nikraz, H., Hung, Y. T. 2010. Influence of Waste Age on Landfill Leachate Quality. **International Journal of Environmental Science and Development**, 1(4), 347.
- Li, H., Zhou, S., Sun, Y., Lv, J. 2010. Nitrogen and Carbon Removal from Fenton-Treated Leachate by Denitrification and Biofiltration. **Bioresource Technology**, 101(20), 7736–7743.
- Li, W., Zhou, Q., Hua, T. 2010. Removal of Organic Matter from Landfill Leachate by Advanced Oxidation Processes: A Review. **International Journal of Chemical Engineering**, 2010, 1–10.
- Lopes, D. D., Silva, S. M. C. P., Fernandes, F., Teixeira, R. S., Celligoi, A., Dall'Antônia, L. H. 2012. Geophysical Technique and Groundwater Monitoring to Detect Leachate Contamination in the Surrounding Area of A Landfill – Londrina (PR – Brazil). **Journal of Environmental Management**, 113, 481–487.
- Lopez, A., Pagano, M., Volpe, A., Claudio Di Pinto, A. 2004. Fenton's Pre-Treatment of Mature Landfill Leachate. **Chemosphere**, 54(7), 1005–1010.
- Maurer, M., Fux, C., Graf, M., Seigrist, H. 2001. Moving-Bed Biological Treatment (MBBT) of Municipal Wastewater: Denitrification. **Water Science and Technology**, 43(11), 337–344.
- Metcalf, Eddy. 2003. **Wastewater Engineering Treatment and Reuse (4th ed.)**. New York: Mc Graw Hill.

- Metcalf, Eddy. 2014. **Wastewater Engineering : Treatment and Resource Recovery (5th ed., Vol. 1)**. McGrawHill.
- Najafpour, G. D., Zinatizadeh, A. A. L., Lee, L. K. 2006. Performance of a Three-Stage Aerobic RBC Reactor in Food Canning Wastewater Treatment. **Biochemical Engineering Journal**, 30(3), 297–302.
- Ngoc, U. N., Schnitzer, H. 2009. Sustainable Solutions for Solid Waste Management in Southeast Asian Countries. **Waste Management**, 29(6), 1982–1995.
- Ni'am, A. C. 2013. **Effectivity of Eichhornia crassipes and Typha angustifolia in Leachate Effluen Treatment from TPA Ngipik, Gresik**. Tesis Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS.
- Putra, H. P., Andrio, A., Elystia, S. 2016. Pengaruh Rasio Pencampuran Limbah Cair Tahu dan Kotoran Sapi Terhadap Proses Anaerob. **Teknik**, 3(2).
- Qaderi, F., Ayati, B., Ganjidoust, H. (Eds.). 2011. Role of Moving Bed Biofilm Reactor and Sequencing Batch Reactor in Biological Degradation of Formaldehyde Wastewater. **Journal of Environment, Health, Sciences dan Engineering**, 8(4), 295-306
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., Moulin, P. 2008. Landfill Leachate Treatment: Review and Opportunity. **Journal of Hazardous Materials**, 150(3), 468–493.
- Rezagama, A. 2013. Studi Ozonisasi Senyawa Organik Air Lindi Tempat Pemrosesan Akhir Sarimukti. **Teknik**, 34(2), 82–87.
- Riansyah, E., Wesen, P. 2012. Pemanfaatan Lindi Sampah Sebagai Pupuk Cair. **Jurnal Ilmiah Teknik Lingkungan**, Vol 4 No 1.
- Riffat, R. 2013. **Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering**. London: IWA Publishing.
- Robinson, James M., Bowman, W. Jason., Palmer, M. 2012. MBBR Process Proves Highly Effective for Treating Variable Strength Landfill Leachate. **Proceedings of Water Environment Federation**, 60(10), 3926-3935.

- Sawyer, C. N., McCarty, P. L., Parkin, G. F. 2003. **Chemistry for Environmental Engineering and Science (5th ed.)**. New York: McGrawHill.
- Sharma, S. P., Ruparelia, J. P. 2017. Synergistic Effect of O₃/UV-PS Process for Oxidation of Reactive Dyes Effects of Operating Parameters. **International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)**, 8(2), 49–57.
- Standard, J. M. 2017. **Mechanism Case Study : Gas Phase Decomposition of Ozone**. Austin : University of Texas.
- Suganda, R., Sutrisno, E., Wardana, I. W. 2014. Penurunan Konsentrasi Amonia, Nitrat, Nitrit dan COD dalam Limbah Cair Tahu dengan Menggunakan Biofilm–Kolam (Pond) Media Pipa CODC Sarang Tawon dan Tempurung Kelapa Disertai Penambahan Ecotru. **Jurnal Teknik Lingkungan**, 03(2014), 58–86.
- Suharni, T. T dan Soetarto, A. E. S. 2003. **Mikrobiologi Industri**. Yogyakarta : Universitas Gajah Mada.
- Titiresmi, Nida Sopiah. 2006. Teknologi Biofilter untuk Pengolahan Limbah Ammonia. **Jurnal Teknik Lingkungan**, 7(2), 173–179.
- Tizaoui, C., Bouselmi, L., Mansouri, L., Ghrabi, A. 2007. Landfill leachate treatment with ozone and ozone/hydrogen peroxide systems. **Journal of Hazardous Materials**, 140(1–2), 316–324.
- Usada, W., Purwadi, A. 2007. Prinsip Dasar Teknologi Oksidasi Maju: Teknologi Hibrida Ozon Dengan Titania. **Prosiding PPI-PDIPTN 2007 Pustek Akselerator dan Proses BATAN**, 170–178.
- Wang, R.-C., Wen, X.-H., Qian, Y. 2005. Influence of Carrier Concentration on the Performance and Microbial Characteristic of a Suspended Carrier Biofilm Reactor. **Process Biochemistry**, 40(2005), 2992–3001.
- Yusmartini, E. S., Setiabudidaya, D. 2013. Characteristics of Leachate at Sukawinatan Landfill, Palembang, Indonesia. **Journal of Physics: Conference Series**, 423, 012048.
- Zhang, F., Peng, Y., Miao, L., Wang, Z., Wang, S., Li, B. 2017. A Novel Simultaneous Partial Nitrification Anammox

- and Denitrification (SNAD) With Intermittent Aeration for Cost-Effective Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate. **Chemical Engineering Journal**, 313, 619–628.
- Zhang, H., Choi, H. J., Huang, C.-P. 2005. Optimization of Fenton Process for the Treatment of Landfill Leachate. **Journal of Hazardous Materials**, 125(1–3), 166–174.
- Zhong, H., Tian, Y., Yang, Q., Brusseau, M. L., Yang, L., Zeng, G. 2017. Degradation of Landfill Leachate Compounds by Persulfate for Groundwater Remediation. **Chemical Engineering Journal**, 307, 399–407.

LAMPIRAN 1 PERHITUNGAN DEBIT AERATOR

Menghitung kebutuhan oksigen secara teori:

$$\begin{aligned} \text{BOD}_{\text{needed}} &= \frac{Q (S_o - S_e)}{1000 \times f} \\ &= \frac{5 \frac{L}{\text{hari}} \times (1000 - 12) \text{ mg/L}}{1000 \times 0,68} \\ &= 7,2 \times 10^{-3} \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_x &= \frac{Y \times Q (S_o - S_e)}{1000 \times (1 + K_d \times \theta_c)} \\ &= \frac{0,6 \times 5 \frac{L}{\text{hari}} \times (1000 - 12)}{1000 \times (1 + (0,06 \times 15))} \\ &= 1,56 \times 10^{-3} \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{O}_2 \text{ demand} &= \frac{Q (S_o - S_e)}{1000 \times f} - 1,42 (P_x) \\ &= 7,2 \times 10^{-3} \text{ kg/hari} - 1,42 (1,56 \times 10^{-3} \text{ kg/hari}) \\ &= 4,98 \approx 5 \times 10^{-3} \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

Menghitung volume udara yang dibutuhkan:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{udara}} &= \gamma_{\text{udara}} = 1,201 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Volume O}_2 &= 23,2\% V_{\text{udara}} \\ V_{\text{udara}} &= \frac{5 \times 10^{-3} \text{ kg/hari}}{1,201 \times 0,232} = 0,018 \text{ m}^3/\text{hari} \end{aligned}$$

O₂ transfer di dalam udara = 8%

$$V_{\text{udara}} \text{ aktual} = \frac{0,018 \text{ m}^3/\text{hari}}{0,08} = 0,224 \text{ m}^3/\text{hari}$$

Faktor keamanan dan kebutuhan nitrifikasi = 2

$$\begin{aligned} \text{O}_2 \text{ yang dibutuhkan} &= 2 \times 0,224 \text{ m}^3/\text{hari} \times 1/1440 \text{ menit} \times 1000 \\ &= 0,31 \text{ L/menit} \end{aligned}$$

Karena di dalam reaktor digunakan media Kaldnes tipe 1 (K1) yang dibuat melayang di dalam air maka debit udara yang dibutuhkan minimum 5x lipat dari kebutuhan udara aktual.

Sehingga, O_2 minimum yang dibutuhkan = $5 \times 0,31 \text{ L/menit} = 1,55 \text{ L/menit}$

(Aerator yang digunakan menyediakan debit sebesar 3,5 L/menit karena menyesuaikan aerator yang dijual di pasaran).

Keterangan:

Q = debit limbah (m^3/s)

S_o = konsentrasi BOD awal (mg/L)

S_e = konsentrasi BOD akhir (mg/L)

f = faktor korelasi BOD-COD

Y = Koefisien yield (kg VSS / kg BOD)

Kd = koefisien endogenous (massa sel / waktu)

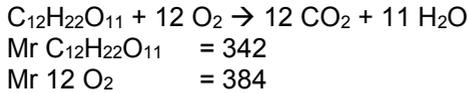
θ_c = umur lumpur (hari)

ρ_{udara} = masa jenis udara (kg/m^3)

LAMPIRAN 2

PERHITUNGN KEBUTUHAN GULA UNTUK *SEEDING*

Zat organik pada lindi TPA Ngipik berdasarkan analisis COD pada karakteristik analisis awal adalah 7000 mg/L
 Perbandingan penggunaan lindi dan sukrosa = 1 : 1
 Sehingga kebutuhan sukrosa adalah 3500 mg/L



Kadar COD $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} = \text{Mr } \text{O}_2 / \text{Mr } \text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} = 384/342 = 1,12$
 mg O_2 / mg $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$

Sehingga massa sukrosa yang dibutuhkan:

$$\begin{aligned} \frac{1 \text{ mg } \text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}}{x \text{ mg } \text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}} &= \frac{1,12 \text{ mg } \text{O}_2}{3500 \text{ mg } \text{O}_2} \\ x \text{ mg } \text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} &= \frac{3500 \text{ mg } \text{O}_2}{1,12 \text{ mg } \text{O}_2} \\ &= 3125 \text{ mg} \\ &= 3,125 \text{ gram } \text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} \\ &\text{(untuk tiap liter)} \end{aligned}$$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

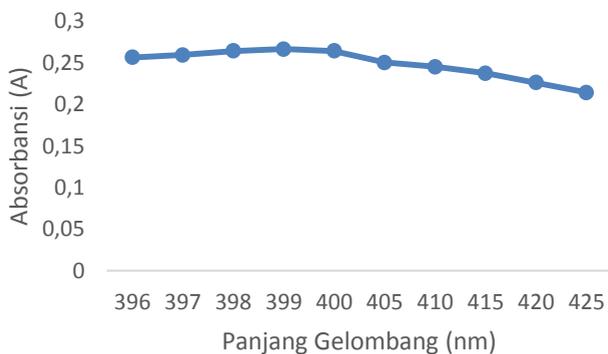
LAMPIRAN 3

PENENTUAN PANJANG GELOMBANG DAN KURVA KALIBRASI

A. Amonium-Nitrogen

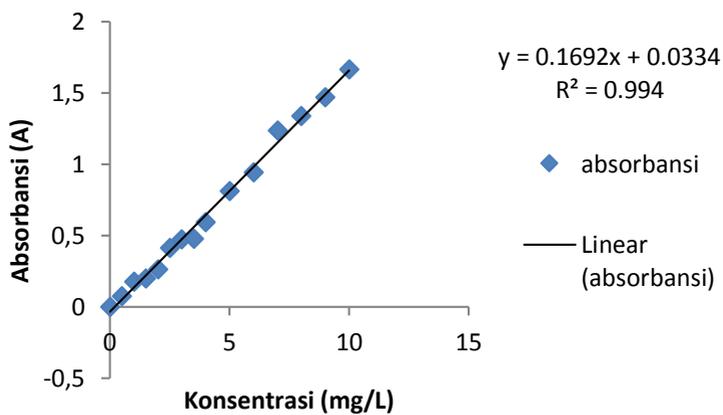
Penentuan panjang gelombang maksimum:

Panjang Gelombang (nm)	Absorbansi (A)
396	0.256
397	0.259
398	0.264
399	0.266
400	0.264
405	0.25
410	0.245
415	0.237
420	0.226
425	0.214



Penentuan persamaan kurva kalibrasi:

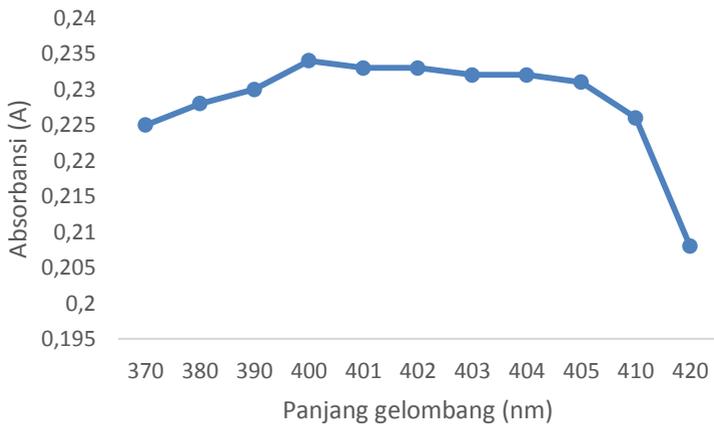
Konsentrasi (mg/L)	Absorbansi (A)
0	0
0.5	0.077
1	0.179
1.5	0.2
2	0.263
2.5	0.416
3	0.475
3.5	0.480
4	0.597
5	0.812
6	0.946
7	1.237
8	1.34
9	1.472
10	1.666



A. Nitrat-Nitrogen

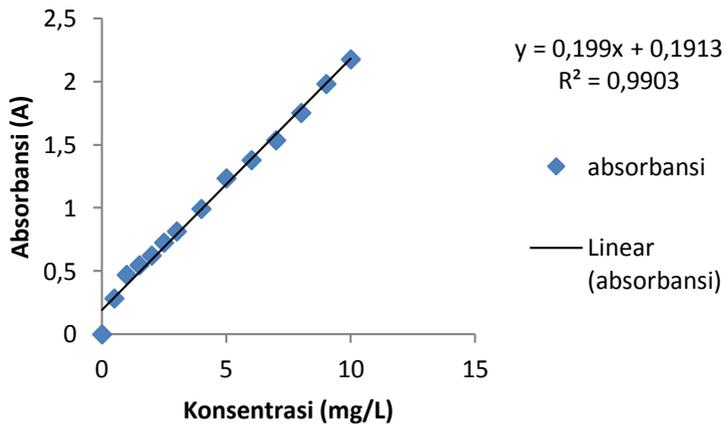
Penentuan panjang gelombang maksimum:

Panjang Gelombang (nm)	Absorbansi (A)
370	0.225
380	0.228
390	0.23
400	0.234
401	0.233
402	0.233
403	0.232
404	0.232
405	0.231
410	0.226
420	0.208



Penentuan persamaan kurva kalibrasi:

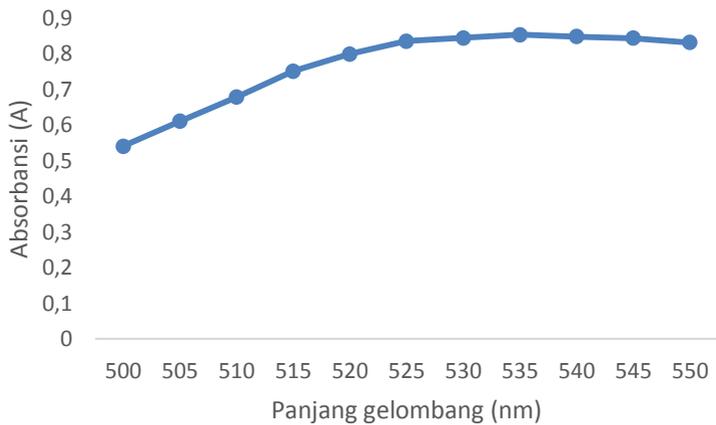
Konsentrasi (mg/L)	Absorbansi (A)
0	0
0.5	0.286
1	0.469
1.5	0.547
2	0.622
2.5	0.726
3	0.813
4	0.995
5	1.234
6	1.378
7	1.537
8	1.752
9	1.981
10	2.178



B. Nitrit-Nitrogen

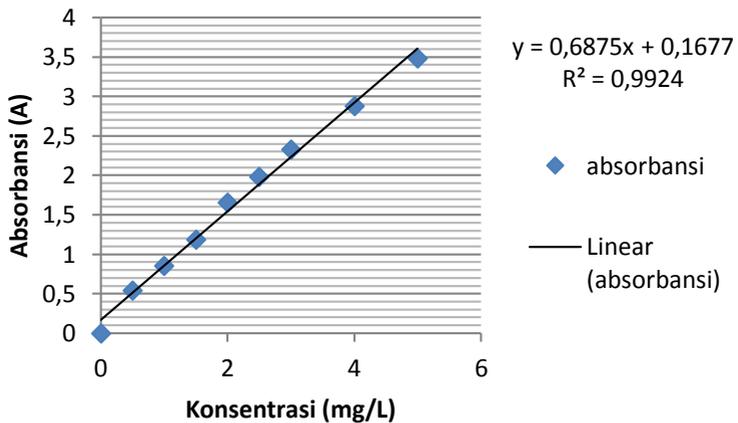
Penentuan panjang gelombang maksimal:

Panjang Gelombang (nm)	Absorbansi (A)
500	0.54
505	0.61
510	0.678
515	0.751
520	0.799
525	0.835
530	0.844
535	0.853
540	0.848
545	0.843
550	0.831



Penentuan persamaan kurva kalibrasi:

Konsentrasi (mg/L)	Absorbansi (A)
0	0
0.5	0.543
1	0.857
1.5	1.185
2	1.655
2.5	1.983
3	2.330
4	2.879
5	3.484



LAMPIRAN 4 HASIL ANALISIS LABORATORIUM

A. Parameter Zat Organik (COD)

1. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi COD (mg/L)										
	0	Aerobik 1	Anoksik 1	Aerobik 2	Anoksik 2	Aerobik 3	Anoksik 3	Aerobik 4	Anoksik 4	Aerobik 5	Anoksik 5
Tanpa Ozon (kontrol)	20000	21000	14000	15000	13000	13000	12000	11000	10000	6000	5000
24 jam (Ozon 1)	17000	17000	13000	12000	11000	9000	9500	8000	5000	2500	3500
48 jam (Ozon 2)	10000	13000	11000	9000	8000	7000	5500	5500	4000	1500	1500

2. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi COD (mg/L)										
	0	Aerobik 1	Anoksik 1	Aerobik 2	Anoksik 2	Aerobik 3	Anoksik 3	Aerobik 4	Anoksik 4	Aerobik 5	Anoksik 5
Tanpa Ozon (kontrol)	16000	15000	12000	12000	11000	10000	10000	10000	8500	5500	3500
24 jam (Ozon 1)	14000	12000	11500	10000	10500	10000	10000	9000	7000	5000	2500
48 jam (Ozon 2)	13000	11500	11000	10000	10000	7000	6000	5000	3000	2000	1000

3. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi COD (mg/L)										
	0	Aerobik 1	Anoksik 1	Aerobik 2	Anoksik 2	Aerobik 3	Anoksik 3	Aerobik 4	Anoksik 4	Aerobik 5	Anoksik 5
Tanpa Ozon (kontrol)	21000	20000	18500	13000	11000	9000	7500	6000	4000	3000	2500
24 jam (Ozon 1)	15000	15000	14000	8500	5000	4000	3500	2500	2500	2000	2000
48 jam (Ozon 2)	12500	11000	10000	5500	5000	5000	2500	2500	2000	2000	1000

B. Parameter Amonium-Nitrogen

1. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi Amonium-Nitrogen (mg/L)										
	0	Aerobik 1	Anoksik 1	Aerobik 2	Anoksik 2	Aerobik 3	Anoksik 3	Aerobik 4	Anoksik 4	Aerobik 5	Anoksik 5
Tanpa Ozon (kontrol)	54,43	42,25	35,82	40,30	35,74	29,39	18,05	11,82	11,82	11,85	11,90
24 jam (Ozon 1)	38,61	29,47	22,70	20,08	18,64	12,73	7,82	12,44	10,34	10,70	11,02
48 jam (Ozon 2)	31,25	26,01	26,60	20,17	20,08	10,87	6,84	10,72	9,03	9,74	9,60

2. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi Amonium-Nitrogen (mg/L)										
	0	Aerobik 1	Anoksik 1	Aerobik 2	Anoksik 2	Aerobik 3	Anoksik 3	Aerobik 4	Anoksik 4	Aerobik 5	Anoksik 5
Tanpa Ozon (kontrol)	58,49	45,55	38,02	37,43	27,70	23,64	17,95	15,66	12,73	13,63	12,92
24 jam (Ozon 1)	45,72	38,27	33,54	28,37	27,19	22,88	21,94	17,20	18,60	19,65	17,37
48 jam (Ozon 2)	35,90	25,08	25,08	23,72	23,47	17,18	15,44	18,20	16,27	17,20	16,15

3. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi Amonium-Nitrogen (mg/L)										
	0	Aerobik 1	Anoksik 1	Aerobik 2	Anoksik 2	Aerobik 3	Anoksik 3	Aerobik 4	Anoksik 4	Aerobik 5	Anoksik 5
Tanpa Ozon (kontrol)	49,61	36,07	32,94	31,08	29,39	22,53	17,57	20,04	24,06	21,14	18,14
24 jam (Ozon 1)	46,90	31,08	28,97	28,54	20,42	14,88	10,92	14,29	12,44	13,15	12,12
48 jam (Ozon 2)	33,87	31,93	25,33	22,62	24,06	9,50	6,15	9,35	7,91	7,96	8,40

C. Parameter Nitrat-Nitrogen

1. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi Nitrat-Nitrogen (mg/L)										
	0	Aerobik 1	Anoksik 1	Aerobik 2	Anoksik 2	Aerobik 3	Anoksik 3	Aerobik 4	Anoksik 4	Aerobik 5	Anoksik 5
Tanpa Ozon (kontrol)	24,20	23,29	22,93	21,40	20,16	20,72	20,98	21,12	20,56	21,24	21,34
24 jam (Ozon 1)	23,41	22,35	22,47	21,08	20,34	20,94	20,74	20,98	20,44	20,58	21,12
48 jam (Ozon 2)	25,20	21,28	21,68	20,86	19,47	20,03	20,20	20,28	19,67	20,86	20,32

2. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi Nitrat-Nitrogen (mg/L)										
	0	Aerobik 1	Anoksik 1	Aerobik 2	Anoksik 2	Aerobik 3	Anoksik 3	Aerobik 4	Anoksik 4	Aerobik 5	Anoksik 5
Tanpa Ozon (kontrol)	23,81	23,17	22,81	21,48	20,09	20,54	20,54	21,32	20,30	20,50	21,06
24 jam (Ozon 1)	22,73	22,23	22,21	20,74	19,55	20,30	20,26	20,32	19,99	20,22	20,42
48 jam (Ozon 2)	22,63	21,26	21,20	20,13	19,63	19,75	19,59	20,16	19,47	19,85	19,89

3. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi Nitrat-Nitrogen (mg/L)										
	0	Aerobik 1	Anoksik 1	Aerobik 2	Anoksik 2	Aerobik 3	Anoksik 3	Aerobik 4	Anoksik 4	Aerobik 5	Anoksik 5
Tanpa Ozon (kontrol)	22,87	21,18	20,20	22,41	19,89	21,32	20,66	22,23	22,13	22,19	21,92
24 jam (Ozon 1)	21,92	21,84	21,12	20,86	20,50	21,10	20,96	21,82	21,86	21,38	21,22
48 jam (Ozon 2)	21,68	21,36	20,80	20,03	19,61	19,95	20,05	20,05	19,87	19,81	19,79

D. Parameter Nitrit-Nitrogen

1. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi Nitrit-Nitrogen (mg/L)										
	0	Aerobik 1	Anoksik 1	Aerobik 2	Anoksik 2	Aerobik 3	Anoksik 3	Aerobik 4	Anoksik 4	Aerobik 5	Anoksik 5
Tanpa Ozon (kontrol)	34,16	31,69	33,82	20,07	34,58	19,31	35,68	19,59	34,78	20,07	19,93
24 jam (Ozon 1)	37,12	28,39	30,86	30,04	34,78	20,21	32,51	19,80	33,34	18,97	19,11
48 jam (Ozon 2)	47,16	28,60	30,52	19,25	36,71	17,80	35,81	17,39	33,20	17,53	18,49

2. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi Nitrit-Nitrogen (mg/L)										
	0	Aerobik 1	Anoksik 1	Aerobik 2	Anoksik 2	Aerobik 3	Anoksik 3	Aerobik 4	Anoksik 4	Aerobik 5	Anoksik 5
Tanpa Ozon (kontrol)	32,51	21,58	29,42	20,55	32,24	19,52	29,56	18,76	29,56	18,15	20,14
24 jam (Ozon 1)	48,33	26,19	25,09	18,90	24,75	18,83	25,23	18,63	31,83	17,87	18,21
48 jam (Ozon 2)	69,91	25,36	48,19	24,26	25,30	17,66	26,05	17,53	25,64	16,98	17,39

3. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi Nitrit-Nitrogen (mg/L)										
	0	Aerobik 1	Anoksik 1	Aerobik 2	Anoksik 2	Aerobik 3	Anoksik 3	Aerobik 4	Anoksik 4	Aerobik 5	Anoksik 5
Tanpa Ozon (kontrol)	54,10	27,90	27,70	27,29	28,18	29,28	32,58	28,39	29,42	29,56	28,73
24 jam (Ozon 1)	43,03	28,39	26,53	20,76	27,50	29,08	20,96	25,02	27,43	24,88	26,05
48 jam (Ozon 2)	44,75	25,78	26,40	22,68	25,30	17,94	19,18	17,25	20,14	17,32	17,18

E. Konsentrasi *Total Kjeldahl Nitrogen* (TKN)

1. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi TKN (mg/L)	
	Hari ke-0	Hari ke-10
Tanpa Ozon (kontrol)	41,6	37,6
24 jam (Ozon 1)	44,8	38,9
48 jam (Ozon 2)	39,6	36,3

2. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi TKN (mg/L)	
	Hari ke-0	Hari ke-10
Tanpa Ozon (kontrol)	41,6	37,6
24 jam (Ozon 1)	44,8	38,3
48 jam (Ozon 2)	39,6	37,6

3. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi TKN (mg/L)	
	Hari ke-0	Hari ke-10
Tanpa Ozon (kontrol)	41,6	37
24 jam (Ozon 1)	44,8	37
48 jam (Ozon 2)	39,6	38,3

F. Parameter BOD

1. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi BOD (mg/L)		Rasio BOD/COD	
	Hari ke-0	Hari ke-10	Hari ke-0	Hari ke-10
Tanpa Ozon (kontrol)	5160	1736	0,26	0,35
24 jam (Ozon 1)	4256	1075,2	0,25	0,31
48 jam (Ozon 2)	2162	550,8	0,22	0,37

2. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi BOD (mg/L)		Rasio BOD/COD	
	Hari ke-0	Hari ke-0	Hari ke-0	Hari ke-10
Tanpa Ozon (kontrol)	3300	1285,2	0,21	0,37
24 jam (Ozon 1)	3168	1018	0,23	0,41
48 jam (Ozon 2)	3072	367,2	0,24	0,37

3. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi BOD (mg/L)		Rasio BOD/COD	
	Hari ke-0	Hari ke-0	Hari ke-0	Hari ke-10
Tanpa Ozon (kontrol)	5088	818	0,24	0,33
24 jam (Ozon 1)	3420	1134,4	0,23	0,57
48 jam (Ozon 2)	3400	347,2	0,27	0,35

4. Parameter Dissolve Oksigen

1. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi Nitrit-Nitrogen (mg/L)									
	Aerobik 1	Anoksik 1	Aerobik 2	Anoksik 2	Aerobik 3	Anoksik 3	Aerobik 4	Anoksik 4	Aerobik 5	Anoksik 5
Tanpa Ozon (kontrol)	2,2	0,7	2,5	1,2	2,4	1,4	2,4	1,5	2,5	1,6
24 jam (Ozon 1)	1,9	0,4	1,9	1,2	2,4	1,1	2,7	1,4	2,3	1,3
48 jam (Ozon 2)	2,1	0,5	2,2	1,4	2,8	1,6	2,4	1,3	2,4	1,4

2. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi Nitrit-Nitrogen (mg/L)									
	Aerobik 1	Anoksik 1	Aerobik 2	Anoksik 2	Aerobik 3	Anoksik 3	Aerobik 4	Anoksik 4	Aerobik 5	Anoksik 5
Tanpa Ozon (kontrol)	3,0	0,4	3,2	0,9	2,5	0,8	3,0	1,2	2,2	1,6
24 jam (Ozon 1)	3,1	0,5	2,7	0,6	2,5	0,2	1,9	0,9	2,2	1,2
48 jam (Ozon 2)	3,3	0,6	3,0	1,0	2,5	1,2	2,8	1,3	2,4	1,4

3. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Konsentrasi Nitrit-Nitrogen (mg/L)									
	Aerobik 1	Anoksik 1	Aerobik 2	Anoksik 2	Aerobik 3	Anoksik 3	Aerobik 4	Anoksik 4	Aerobik 5	Anoksik 5
Tanpa Ozon (kontrol)	3,0	1,5	3,3	1,7	3,8	1,3	3,0	1,7	3,4	1,5
24 jam (Ozon 1)	3,2	1,3	3,5	1,6	4,2	1,5	3,2	1,5	3,5	1,1
48 jam (Ozon 2)	2,8	1,0	2,5	1,7	2,6	1,3	2,9	1,3	3,5	1,4

5. Parameter pH

1. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	pH	
	Hari ke-0	Hari ke-10
Tanpa Ozon (kontrol)	8,84	7,28
24 jam (Ozon 1)	8,26	7,26
48 jam (Ozon 2)	8,08	7,14

2. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	pH	
	Hari ke-0	Hari ke-10
Tanpa Ozon (kontrol)	8,16	7,11
24 jam (Ozon 1)	8,09	7,06
48 jam (Ozon 2)	7,89	7,07

3. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	pH	
	Hari ke-0	Hari ke-10
Tanpa Ozon (kontrol)	8,36	7,23
24 jam (Ozon 1)	8,37	7,27
48 jam (Ozon 2)	8,07	7,11

6. Parameter Salinitas

1. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Salinitas (ppt)	
	Hari ke-0	Hari ke-10
Tanpa Ozon (kontrol)	6,91	1,14
24 jam (Ozon 1)	5,83	1,68
48 jam (Ozon 2)	4,19	1,03

2. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Salinitas (ppt)	
	Hari ke-0	Hari ke-10
Tanpa Ozon (kontrol)	7,69	1,02
24 jam (Ozon 1)	5,98	1,01
48 jam (Ozon 2)	4,22	1,01

3. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	Salinitas (ppt)	
	Hari ke-0	Hari ke-10
Tanpa Ozon (kontrol)	7,61	1,01
24 jam (Ozon 1)	5,90	1,01
48 jam (Ozon 2)	4,13	1,01

7. Parameter MLSS

1. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 22,5-22,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	MLSS	
	Hari ke-0	Hari ke-10
Tanpa Ozon (kontrol)	6000	2800
24 jam (Ozon 1)	3700	1400
48 jam (Ozon 2)	3000	2400

2. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 31,5-13,5 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	MLSS	
	Hari ke-0	Hari ke-10
Tanpa Ozon (kontrol)	5400	1400
24 jam (Ozon 1)	4800	1600
48 jam (Ozon 2)	4600	3500

3. Durasi Proses Aerobik-Anoksik 36-9 jam

Variasi <i>Pre-treatment</i>	MLSS	
	Hari ke-0	Hari ke-10
Tanpa Ozon (kontrol)	4200	1600
24 jam (Ozon 1)	3800	2000
48 jam (Ozon 2)	4000	1400

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN 5 DOKUMENTASI PENELITIAN



Pengambilan sampel lindi



Pengambilan sampel lumpur



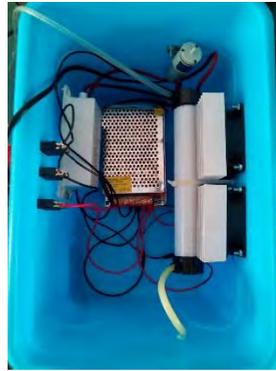
Reaktor penelitian



Stok lindi



Stok lumpur



Ozonizer



Media Kaldness (K1) awal



Media Kaldness setelah penelitian



Analisis COD



Analisis Nitrat



Analisis Amonium



Analisis Nitrit



Analisis BOD



Analisis pH



Analisis DO



Analisis salinitas

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIOGRAFI PENULIS



Penulis berasal dari Kebumen, Jawa Tengah namun dilahirkan di Mojokerto, Jawa Timur. Penulis menghabiskan masa pendidikan wajibnya di Kebumen dengan mengenyam pendidikan di SDN 1 Kutosari (2002-2008), SMPN 1 Kebumen (2008-2011) dan SMAN 1 Kebumen (2012-2014). Penulis kemudian melanjutkan pendidikan S1 di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan dan

Kebumihan (FTSLK), ITS.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif menyalurkan hobi menulisnya di berbagai organisasi seperti Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL), Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) ITS dan ITS Online. Penulis juga sempat mengikuti magang sebagai reporter di beberapa media nasional seperti Tempo dan Detikkom. Selain itu, penulis juga aktif mengikuti beberapa kepanitian nasional dan internasional di ITS dan di Surabaya. Di bidang Teknik Lingkungan, penulis aktif menjadi asisten laboratorium untuk mata kuliah Kimia Lingkungan 1, Kimia Lingkungan 2 dan Teknik Analisis Pencemar Lingkungan. Prestasi yang pernah diraih adalah medali perak Pekan Ilmiah Mahasiswa Nasional (PIMNAS) 28 di Kendari. Penulis juga berkesempatan untuk kerja praktek di PT Chandra Asri Petrochemical Cilegon pada divisi *Utility* dan

mengevaluasi unit pengolahan biologis (tangki aerasi dan settler). Penulis dapat dihubungi melalui email arinawidaimania@gmail.com.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”