



TUGAS AKHIR - RE 184804

**PENGOLAHAN LINDI TPA NGIPIK GRESIK DENGAN
KOMBINASI PROSES OZONISASI DAN *MOVING BED*
BIOFILM REACTOR (MBBR) SECARA *INTERMITTEN***

ROFIQOH AL GHANI
0321154000020

DOSEN PEMBIMBING:
WELLY HERUMURTI, S.T., M.Sc.

Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - RE 184804

**PENGOLAHAN LINDI TPA NGIPIK GRESIK DENGAN
KOMBINASI PROSES OZONISASI DAN *MOVING BED*
*BIOFILM REACTOR (MBBR) SECARA INTERMITTEN***

ROFIQOH AL GHANI
0321134000020

DOSEN PEMBIMBING
WELLY HERUMURTI, S.T., M.Sc.

Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, 2019



FINAL PROJECT - RE 184804

**LEACHATE TREATMENT NGIPIK LANDFILL USING THE
INTERMITTEN PROCESSES IN COMBINATION OF
OZONATION AND MOVING BED BIOFILM REACTOR
(MBBR)**

ROFIQOH AL GHANI
0321154000020

ADVISOR
WELLY HERUMURTI, S.T., M.Sc.

Department of Environmental Engineering
Faculty of Civil Environmental and Geo Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya, 2019

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGOLAHAN LINDI TPA NGIPIK GRESIK DENGAN
KOMBINASI PROSES OZONISASI DAN *MOVING BED*
BIOFILM REACTOR (MBBR) SECARA INTERMITTEN**

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 :

ROFIQOH AL GHANI
NRP. 0321154000020

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :



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

**SURABAYA
JULI, 2019**



PENGOLAHAN LINDI TPA NGIPIK GRESIK DENGAN KOMBINASI PROSES OZONISASI DAN *MOVING BED BIOFILM REACTOR* (MBBR) SECARA *INTERMITTEN*

Nama Mahasiswa : Rofiqoh Al Ghani
NRP : 0321154000020
Departemen : Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan
Kebumian
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Dosen Pembimbing : Welly Herumurti, S.T., M.Sc.

ABSTRAK

Dampak negatif dari TPA adalah timbulnya lindi dengan karakteristik yang kompleks. Lindi menjadi salah satu permasalahan utama di TPA Ngipik Gresik karena instalasi pengolahan lindi yang ada belum berjalan secara optimal sehingga senyawa organik dan nitrogen memiliki konsentrasi sangat tinggi serta rasio BOD₅/COD rendah. Salah satu cara efektif mengolah lindi adalah pengolahan biologis seperti *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR). MBBR mampu mereduksi konsentrasi senyawa organik dan nitrogen melalui nitrifikasi-denitrifikasi yang memanfaatkan proses aerobik-anoksik/anaerobik. MBBR bekerja dengan prinsip proses *activated sludge* dan menggunakan media sebagai tempat perkembangbiakkan mikroorganisme. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan efisiensi penyisihan konsentrasi zat organik dan nitrogen pada lindi melalui pengolahan MBBR dengan variasi *pre-treatment* kimiawi menggunakan ozon dan jenis media yang digunakan dalam MBBR.

Pada penelitian ini menggunakan sampel lindi yang berasal dari TPA Ngipik Gresik dan lumpur dari *return activated sludge* (RAS) unit *Clarifier* IPLT Keputih sebagai sumber biomassa. Penelitian ini dilakukan secara *intermitten* dengan volume pengolahan masing-masing reaktor sebesar 7 L. Reaktor dilengkapi dengan aerator dan propeller pengaduk untuk pengondisian proses aerobik-anoksik dalam MBBR. Untuk menciptakan kondisi aerobik, aerator dan propeller pengaduk akan

dinyalakan, sedangkan untuk menciptakan kondisi anoksik, aerator dimatikan dengan membiarkan propeller pengaduk menyala. Dalam pengoperasian MBBR, proses aerobik-anoksik digunakan waktu 45 jam adalah 36 jam-9 jam serta 3 jam pengendapan (aerobik-anoksik dilakukan secara bertahap dalam reaktor yang sama) dan dilakukan *intermitten* (mengeluarkan lindi dan memasukkan lindi baru) pada setiap pergantian siklus sebanyak 1 L. Penelitian diawali dengan tahap karakteristik awal, *seeding*, dan aklimatisasi. Pada penelitian utama digunakan variasi *pre-treatment* menggunakan ozon dengan durasi ozon 12 jam, 24 jam dan tanpa *pre-treatment* (kontrol). Variasi media untuk tempat mikroorganisme membentuk biofilm dalam MBBR yaitu media Kaldnes K1, Kaldnes K5, dan Helix. Dalam sekali pengolahan dilakukan 5 kali siklus sehingga membutuhkan waktu 10 hari. Analisis parameter utama dilakukan tiga kali, yaitu sebelum proses aerobik, setelah proses aerobik, dan setelah proses anoksik. Parameter utama yang digunakan adalah analisis organik (COD), amonium-nitrogen, nitrat-nitrogen, pH dan DO. Parameter tambahan yang digunakan adalah nitrit-nitrogen, TKN, BOD₅, pH, dan salinitas. Analisis parameter tambahan dilakukan pada saat awal siklus (hari ke-0), tengah siklus (hari ke-6), dan akhir siklus (hari ke-10).

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa *pre-treatment* dengan ozon dan MBBR optimum dalam mengoksidasi zat organik dan nitrogen pada lindi. *Pre-treatment* ozonisasi optimum pada variasi durasi 24 jam dengan penyisihan COD mencapai 53%. Sedangkan, media yang paling optimum dalam pengolahan lindi menggunakan MBBR adalah Helix dengan efisiensi penyisihan COD mencapai 94% dan N organik mencapai 75%.

Kata Kunci: Lindi, Ozonisasi, *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR), Kaldnes, Helix

LEACHATE TREATMENT NGIPIK LANDFILL USING THE INTERMITTEN PROCESSES IN COMBINATION OF OZONATION AND MOVING BED BIOFILM REACTORS (MBBR)

Student Name : Rofiqoh Al Ghani
NRP : 0321154000020
Department : Environmental Engineering
Supervisor : Welly Herumurti, S.T., M.Sc.

ABSTRACT

The negative impact of landfill is the production of leachate with complex characteristics. Leachate is one of the main problems at the Ngipik Gresik Landfill because the existing leachate treatment plant has not run optimally, causing the organic and nitrogen compounds to have very high concentrations and low BOD₅/COD ratios. One effective way to treat leachate is through biological treatment such as Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR). MBBR is able to reduce the concentration of organic compounds and nitrogen through nitrification-denitrification by utilizing aerobic-anoxic or anaerobic processes. MBBR works on the principle of the activated sludge process and uses media as a place to breed microorganisms. This study aims to determine the efficiency of the removal of organic matter and nitrogen concentrations in leachate by processing MBBR with various chemical pre-treatments using ozone and the type of media used in MBBR.

This study uses leachate samples originating from the Ngipik Gresik Landfill and sludge from the return activated sludge (RAS) of Keputih IPLT Clarifier unit as a source of biomass. This research was carried out intermittently with the processing volume of each reactor of 7 L. The reactor was equipped with a stirring aerator and propeller for conditioning the aerobic-anoxic process in MBBR. To create aerobic conditions, the stirrer aerator and propeller are turned on. Meanwhile, to create anoxic conditions, the aerator is turned off by allowing the stirring propeller to turn on. In the operation of MBBR, the aerobic-anoxic process used for 45 hours is 36 hours-9 hours and 3 hours of sedimentation (aerobic-

anoxic is carried out gradually in the same reactor). The study begins with the initial characteristic stage, seeding, and acclimatization. In the main study, pre-treatment variations using ozone duration of 12 hours, 24 hours, and no pre-treatment (control) were used. Variations of media for microorganism sites form biofilms in MBBR, namely Kaldnes K1, Kaldnes K5, and Helix media. In one process, 5 cycles are carried out, so that it takes 10 days. The main parameter analysis was carried out three times: before the aerobic process, after the aerobic process, and after the anoxic process. The main parameters used were organic analysis (COD), ammonium-nitrogen, nitrate-nitrogen, pH and DO. Additional parameters used are nitrite-nitrogen, TKN, BOD₅, pH, alkalinity, and salinity. Additional parameter analysis was carried out at the beginning of the cycle (day 0), middle cycle (day 6), and end of cycle (day 10).

The results of this study indicate that pre-treatment with ozone and MBBR is optimal for oxidizing organic and nitrogen compounds in leachate. Optimal ozonation *pre-treatment* for 24 hour duration variations with COD removal 53%. Meanwhile, the most optimum media in leachate processing using MBBR is Helix with COD removal efficiency reaching 94% and organic N reaching 75%.

Keywords: Leachate, Ozonation, Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR), Kaldnes, Helix

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT karena dengan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penulisan Tugas Akhir dengan judul “Pengolahan Lindi TPA Ngipik Gresik dengan Kombinasi Proses Ozonisasi dan *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) secara *Intermittent*”. Tugas Akhir ini disusun dalam rangka memenuhi penyelesaian Program Sarjana Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan ITS. Selama pelaksanaan penelitian dan penulisan Tugas Akhir ini penulis telah banyak mendapat bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Welly Herumurti, ST., MSc. selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan nasehat, arahan, pemikiran, dan bimbingan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
2. I.D.A.A Warmadewanti, ST., MT., Ph.D., Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., MPhil, Ph.D., Dr. Eng. Arie Dipareza Syafei., ST., MEPM. selaku dosen pengarah yang selalu memberi masukan dan saran.
3. Orang tua, kakak, dan keluarga yang selalu memberi dukungan, doa, dan dorongan baik selama menjalani masa studi maupun penyusunan tugas akhir ini.
4. Teman-teman asistensi tugas akhir (Perwit, Misel, Salsa, dan Fathyah) dan Laboratorium Teknologi Pengolahan Air yang selalu mendampingi dalam memberi dukungan dan doa bagi penulis selama penyusunan tugas akhir.
5. Teman-teman angkatan 2015 Departemen Teknik Lingkungan yang senantiasa menemani selama masa studi terutama Ino, Emil, Dewi, Dian, Lifa, Marisa, dan Vira.
6. Seluruh pihak yang secara langsung maupun tidak langsung telah membantu dalam pembuatan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Namun, Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat menjadi pengetahuan baru dan bermanfaat bagi semua pihak.

Hormat,
Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
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 Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)	8
2.3 Degradasi Zat Organik dan Nitrogen Pada Aerobik dan Anoksik.....	16
2.4 Faktor yang Mempengaruhi Kinerja MBBR	17
2.5 Pre-treatment Menggunakan Ozon pada Pengolahan Lindi	18
BAB 3 METODE PENELITIAN	23
3.1 Kerangka Penelitian	23
3.2 Pengambilan Sampel dan Perlakuan Sebelum Pengujian	25
3.3 Analisis Karakteristik Awal	25
3.4 Variabel Penelitian	26
3.5 Pembuatan Reaktor MBBR	27
3.6 Seeding dan Aklimatisasi	29
3.7 Penelitian Pendahuluan	31
3.8 Pelaksanaan Penelitian.....	32
3.9 Metode Analisis Sampel dan Data	36
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Analisis Karakteristik Awal Lindi dan Lumpur	39
4.2 <i>Seeding</i> dan Aklimatisasi	40
4.3 <i>Pre-treatment</i> Lindi dengan Ozon	42

4.4	Penelitian Utama	44
4.4.1	Analisis Zat Organik.....	44
4.4.2	Hasil Penurunan Konsentrasi Nitrogen	59
4.4.3	Analisis BOD ₅ dan BOD ₅ /COD.....	85
4.4.4	Analisis F/M	88
4.4.5	Analisis COD/TN.....	89
4.4.6	Analisis BOD ₅ /Nitrogen Organik	91
4.4.7	Analisis Dissolved Oxygen.....	93
4.4.8	Analisis Biomass Sebagai MLSS	96
4.4.9	Analisis pH.....	98
4.4.10	Analisis Salinitas	101
4.4.11	Analisis <i>Total Suspended Solid</i> (TSS)	102
4.5	Penentuan Pengaruh Jenis Media dan <i>Pre-treatment</i> Terhadap Penyisihan Zat Organik dan Nitrogen	105
4.6	Rigkasan Kinerja MBBR	110
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		111
5.1	Kesimpulan	111
5.2	Saran.....	111
DAFTAR PUSTAKA		113
LAMPIRAN-LAMPIRAN.....		119
BIOGRAFI PENULIS		157

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 (a) Kondisi Aerobik dan (b) Kondisi Anoksik pada MBBR	10
Gambar 2.2 Jenis Media <i>Moving Bed Biofilm Reactor</i> (MBBR)..	12
Gambar 3.1 Kerangka Penelitian	24
Gambar 3.2 <i>Settleability Solid</i>	26
Gambar 3.3 Reaktor Uji MBBR dengan Media Kaldnes K1.....	28
Gambar 3.4 Reaktor Uji MBBR dengan Media Kaldnes K5.....	28
Gambar 3.5 Reaktor Uji MBBR dengan Media Helix.....	29
Gambar 3.6 Reaktor <i>Pre-treatment</i> Ozonisasi	32
Gambar 4.1 Penyisihan COD pada Tahap Aklimatisasi	41
Gambar 4.2 <i>Settleability Solid Test</i>	42
Gambar 4.3 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Siklus pada Media Kaldnes K1	47
Gambar 4.4 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Proses pada Media Kaldnes K1	48
Gambar 4.5 Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Siklus pada Media Kaldnes K1	48
Gambar 4.6 Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Proses pada Media Kaldnes K1	49
Gambar 4.7 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Siklus pada Media Kaldnes K5	49
Gambar 4.8 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Proses pada Media Kaldnes K5	50
Gambar 4.9 Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Siklus pada Media Kaldnes K5.....	50
Gambar 4.10 Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Proses pada Media Kaldnes K5	51
Gambar 4.11 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Siklus pada Media Helix	51
Gambar 4.12 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Proses pada Media Helix	52
Gambar 4.13 Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Siklus pada Media Helix	52
Gambar 4.14 Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Proses pada Media Helix	53
Gambar 4.15 <i>Mass Balance</i> COD pada Media Kaldnes K1	56

Gambar 4.16	<i>Mass Balance</i> COD pada Media Kaldnes K5	57
Gambar 4.17	<i>Mass Balance</i> COD pada Media Helix.....	58
Gambar 4.18	Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Kaldnes K1	62
Gambar 4.19	Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Kaldnes K1	62
Gambar 4.20	Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Proses pada Media Kaldnes K1.....	63
Gambar 4.21	Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Proses pada Media Kaldnes K1	63
Gambar 4.22	Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Kaldnes K5	64
Gambar 4.23	Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Kaldnes K5.....	64
Gambar 4.24	Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Proses pada Media Kaldnes K5.....	65
Gambar 4.25	Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Proses pada Media Kaldnes K5	65
Gambar 4.26	Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Helix.....	66
Gambar 4.27	Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Helix.....	66
Gambar 4.28	Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Proses pada Media Helix.....	67
Gambar 4.29	Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Proses pada Media Helix	67
Gambar 4.30	Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Kaldnes K1	70
Gambar 4.31	Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Kaldnes K1	70
Gambar 4.32	Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Proses pada Media Kaldnes K1	71
Gambar 4.33	Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Proses pada Media Kaldnes K1	71
Gambar 4.34	Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Kaldnes K5.....	72
Gambar 4.35	Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Kaldnes K5	72

Gambar 4.36 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Proses pada Media Kaldnes K5	73
Gambar 4.37 Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Proses pada Media Kaldnes K5	73
Gambar 4.38 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Helix	74
Gambar 4.39 Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Helix	74
Gambar 4.40 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Proses pada Media Helix	75
Gambar 4.41 Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Proses pada Media Helix	75
Gambar 4.42 Konsentrasi Nitrit-Nitrogen pada Media Kaldnes K1	76
Gambar 4.43 Konsentrasi Nitrit-Nitrogen pada Media Kaldnes K5	77
Gambar 4.44 Konsentrasi Nitrit-Nitrogen pada Media Helix	77
Gambar 4.45 Penyisihan Konsentrasi TKN, TN, dan N Organik	79
Gambar 4.46 <i>Mass Balance</i> Nitrogen pada Media Kaldnes K1..	82
Gambar 4.47 <i>Mass Balance</i> Nitrogen pada Media Kaldnes K5..	83
Gambar 4.48 <i>Mass Balance</i> Nitrogen pada Media Helix	84
Gambar 4.49 Konsentrasi BOD ₅ pada Media Kaldnes K1.....	85
Gambar 4.50 Konsentrasi BOD ₅ pada Media Kaldnes K5.....	86
Gambar 4.51 Konsentrasi BOD ₅ pada Media Helix	86
Gambar 4.52 Rasio BOD ₅ /COD pada MBBR pada Setiap Media	87
Gambar 4.53 Rasio F/M pada MBBR pada Setiap Media	89
Gambar 4.54 Rasio COD/TN pada MBBR pada Setiap Media...	91
Gambar 4.55 Rasio BOD ₅ /N Organik pada MBBR pada Setiap Media	92
Gambar 4.56 Hasil Analisis Dissolved Oksigen pada Media K1.	94
Gambar 4.57 Hasil Analisis Dissolved Oksigen pada Media K5.	95
Gambar 4.58 Hasil Analisis Dissolved Oksigen pada Media Helix	95
Gambar 4.59 Konsentrasi MLSS pada Media Kaldnes K1	96
Gambar 4.60 Konsentrasi MLSS pada Media Kaldnes K5.....	97
Gambar 4.61 Konsentrasi MLSS pada Media Helix	97
Gambar 4.62 Nilai pH pada Media Kaldnes K1	99
Gambar 4.63 Nilai pH pada Media Kaldnes K5	100

Gambar 4.64 Nilai pH pada Media Helix	100
Gambar 4.65 Nilai Salinitas pada Media Kaldnes K1	101
Gambar 4.66 Nilai Salinitas pada Media Kaldnes K5	102
Gambar 4.67 Nilai Salinitas pada Media Helix	102
Gambar 4.68 Konsentrasi TSS pada Media Kaldnes K1	103
Gambar 4.69 Konsentrasi TSS pada Media Kaldnes K5	104
Gambar 4.70 Konsentrasi TSS pada Media Helix	104

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 Gresik	7
Tabel 2.4 Baku Mutu Lindi.....	8
Tabel 2.5 Jenis Media dan Spesifikasinya.....	12
Tabel 2.6 Penelitian Terdahulu tentang MBBR	13
Tabel 2.7 Penelitian Terdahulu tentang <i>Pre-treatment</i> Ozonisasi	22
Tabel 3.1 Rancangan Penelitian dan Nama Reaktor	33
Tabel 3.2 Jumlah Sampel yang Dianalisis.....	35
Tabel 3.3 Metode Analisis Parameter Utama	36
Tabel 3.4 Metode Analisis Parameter Tambahan	37
Tabel 4.1 Hasil Analisis Karakteristik Awal Lindi dan Lumpur	39
Tabel 4.2 Konsentrasi COD pada Tahap Aklimatisasi.....	41
Tabel 4.3 Hasil Analisis pada Tahap <i>Pre-treatment</i>	43
Tabel 4.4 Hasil Analisis Karakteristik Awal Lindi dan Lumpur Setelah <i>Pre-treatment</i> Ozon.....	43
Tabel 4.5 Mass Balance COD Proses Biologis MBBR	55
Tabel 4.6 Perhitungan <i>Mass Balance Nitrogen</i>	81
Tabel 4.7 Rasio BOD ₅ /COD pada MBBR pada Setiap Media	87
Tabel 4.8 Hasil Uji ANOVA Jenis Media Terhadap Parameter dengan Program SPSS 16	105
Tabel 4.9 Hasil Uji ANOVA Variasi <i>Pre-treatment</i> Terhadap Parameter dengan Program SPSS 16	107
Tabel 4.10 Hasil Uji Tukey Variasi <i>Pre-treatment</i> dengan Program SPSS 16.....	109

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 PERHITUNGAN VOLUME MEDIA UNTUK MBBR	119
LAMPIRAN 2 PERHITUNGAN DEBIT AERATOR	121
LAMPIRAN 3 PERHITUNGAN KEBUTUHAN GULA UNTUK SEEDING	123
LAMPIRAN 4 PEMBUATAN REAGEN, PROSEDUR ANALISIS, DAN KALIBRASI	125
LAMPIRAN 5 DATA HASIL ANALISIS LABORATORIUM.....	141
LAMPIRAN 6 DOKUMENTASI PENELITIAN	155

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Lindi merupakan cairan hasil dekomposisi sampah yang telah membusuk dan mengalami pelarutan akibat masuknya air eksternal ke dalam timbunan sampah (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Komponen pencemar utama lindi adalah senyawa organik dan amonium nitrogen (Silva *et al.*, 2004). Hal ini mengakibatkan lindi berpotensi dalam pencemaran lingkungan, seperti pencemaran tanah, badan air permukaan dan air tanah (Ngoc and Schnitzer, 2009). Karakteristik lindi dipengaruhi oleh komposisi sampah, usia TPA, dan curah hujan. Seiring bertambahnya usia lindi, konsentrasi nitrogen dan COD semakin menurun, dan rasio BOD₅/COD semakin menurun (Melidis, 2014). Hal ini mengakibatkan lindi semakin sulit diolah karena komposisinya semakin kompleks (Xiong *et al.*, 2018). Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) Ngipik merupakan salah satu TPA yang menghasilkan lindi tua yang terletak di daerah industri PT Semen Indonesia Tbk, Gresik. Dalam perencanaannya menerapkan sistem *Sanitary Landfill*, namun dalam pengoperasiannya menggunakan sistem *Open Dumping* (RPJMD Kabupaten Gresik, 2016). TPA Ngipik memiliki instalasi pengolahan lindi menggunakan *Anaerobic Baffled Reactor* (ABR) tetapi belum berjalan dengan optimal sehingga konsentrasi senyawa organik dan nitrogen pada lindi sangat tinggi (Yadi, 2017).

Salah satu cara mereduksi konsentrasi nitrogen pada lindi adalah dengan pengolahan biologis melalui nitrifikasi-denitrifikasi (Kulikowska, 2012) yang memanfaatkan proses aerobik dan anoksik (Kermani *et al.*, 2008). Proses aerobik berperan dalam penurunan konsentrasi amonium nitrogen, sedangkan proses anoksik berperan penting dalam penurunan konsentrasi zat organik (COD) (Chen *et al.*, 2008). Pengolahan biologis mampu menyisihkan kadar zat organik dan nitrogen secara efektif apabila rasio BOD₅/COD lebih dari 0,4 (Melidis, 2014). Parameter uji yang

digunakan untuk karakteristik lindi antara lain COD, BOD, amonium, nitrat, nitrit, DO, TKN, pH, alkalinitas, dan salinitas (Huda, 2017).

Untuk meningkatkan efisiensi pengolahan biologis, pengolahan lindi dapat didahului dengan *pre-treatment*. *Pre-treatment* berfungsi untuk mengoptimalkan penyisihan senyawa organik yang tidak mampu dicapai secara maksimum oleh proses nitrifikasi-denitrifikasi (Abbas *et al.*, 2009). Proses ozonisasi merupakan salah satu *pre-treatment* yang umum digunakan dalam pengolahan lindi karena memiliki kekuatan oksidasi tinggi. Penggunaan ozon sebagai *pre-treatment* dalam pengolahan lindi dapat meningkatkan efisiensi penyisihan COD sebesar 60% dari konsentrasi awal (Lopez *et al.*, 2004). Selain itu, *pre-treatment* ozon juga dapat meningkatkan biodegradabilitas hingga 0,5 (Sururi *et al.*, 2014).

Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) merupakan pengolahan biologis kombinasi yang memanfaatkan dua biofilm sekaligus yaitu dengan sistem *fluidized attached growth* dan *suspended growth* (mikroorganisme yang tumbuh dan berkembangbiak pada media) (Hajipour *et al.*, 2011). Secara prinsip pengolahan, MBBR merupakan pengembangan dari proses *activated sludge* dan *fluidized bed reactor* (Chen *et al.*, 2008). Perbedaan utama dari MBBR dengan sistem *activated sludge* konvensional adalah tidak diperlukannya resirkulasi lumpur (Metcalf and Eddy, 2014). Selain itu, lahan yang dibutuhkan relatif kecil, waktu pengolahan singkat, dapat digunakan untuk *flow* yang bervariasi, tidak menyebabkan *clogging*, area permukaan spesifik biofilm luas, dan tidak membutuhkan *backwashing* (Gulhane and Kotangale, 2013). MBBR dengan sistem aerobik-anoksik dapat menurunkan konsentrasi COD mencapai 95% dan amonium mencapai 97% (Chen *et al.*, 2008). Efisiensi removal nitrogen pada lindi dalam bentuk amonia dan nitrat melalui proses aerobik-anoksik yaitu mencapai 80% (Miao *et al.*, 2014).

Media yang digunakan dalam MBBR mempengaruhi pertumbuhan biofilm. Beberapa tipe media yang Kaldnes berdasarkan diameter, yaitu K1 (9,1 mm), K2 (15 mm), K3 (25 mm) (Rusten *et al.*, 2006),

K5 (25 mm) (Dezotti *et al.*, 2018), dan Helix merk Numa (17 mm). Jenis media yang digunakan dalam MBBR mempengaruhi persentase penyisihan senyawa organik dan nitrogen. Ketebalan lapisan biofilm menunjukkan tingkat pertumbuhan mikroorganisme (Odegaard *et al.*, 2000).

Durasi *pre-treatment* dan proses aerobik-anoksik merupakan faktor yang berpengaruh pada pengolahan lindi dengan MBBR. Oleh karena itu dilakukan penelitian mengenai pengolahan lindi menggunakan MBBR dengan variasi durasi ozon saat *pre-treatment* dan jenis media yang digunakan dalam MBBR. 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 Reactor* (MBBR).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Pengaruh durasi ozon yang optimum sebagai *pre-treatment* terhadap pengolahan lindi menggunakan *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR).
2. Pengaruh jenis media yang optimum terhadap efisiensi *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) dalam menurunkan konsentrasi senyawa organik dan nitrogen pada lindi TPA Ngipik.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menentukan durasi ozon yang optimum sebagai *pre-treatment* pada pengolahan lindi sebelum masuk *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR).
2. Menentukan pengaruh jenis media yang optimum terhadap efisiensi *Moving Bed Biofilm* (MBBR) dalam menurunkan konsentrasi senyawa organik dan nitrogen pada lindi TPA Ngipik.

1.4 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan informasi secara ilmiah mengenai *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR) dengan sistem *intermitten* dalam menurunkan senyawa organik dan nitrogen yang terdapat pada lindi.
2. Menjadi acuan dalam penelitian lebih lanjut tentang penggunaan *pre-treatment* dan media yang optimum pada MBBR untuk menurunkan konsentrasi senyawa organik dan nitrogen.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini adalah:

1. Sampel lindi berasal dari Instalasi Pengolahan Lindi (IPL) TPA Ngipik Gresik dan diambil pada musim hujan.
2. Sumber mikroorganisme berasal dari lumpur *return activated sludge* unit *Clarifier* IPLT Keputih.
3. Reaktor dioperasikan dengan sistem *intermitten* selama 10 hari terdiri dari 5 siklus.
4. Media yang digunakan yaitu media Kaldnes tipe 1 (media K1), Kaldnes tipe 5 (media K5), dan Helix.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian dan Karakteristik Lindi

Lindi merupakan hasil dekomposisi sampah yang terlarut akibat masuknya air eksternal ke dalam timbunan sampah. Air tersebut dapat berasal dari hujan, saluran drainase, air tanah atau sumber lain. Banyak faktor yang mempengaruhi kualitas lindi, seperti curah hujan dan usia TPA. Tingkat polusi dalam lindi sangat bervariasi akibat curah hujan dan perubahan musim (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Komponen utama lindi adalah zat organik dan amonium-nitrogen, sedangkan sisanya terdiri atas logam berat, garam anorganik, dan zat organik terklorinasi lain. Polutan pada lindi selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Polutan pada Lindi

No.	Jenis Polutan Lindi	Komponen
1	Senyawa organik	Asam, alkohol, aldehida dan lain-lain biasanya dikualifikasikan sebagai COD (<i>Chemical Oxygen Demand</i>), BOD (<i>Biochemical Oxygen Demand</i>), DOC (<i>Dissolved Organic Carbon</i>), asam lemak volatil, senyawa fulvat, dan senyawa humat.
2	Senyawa anorganik	Sulfat, klorida, amonium, kalsium, magnesium, natrium, kalium, hidrogen karbonat, besi, mangan dan logam berat (timah, nikel, tembaga, kadmium, kromium, dan seng)
3	Senyawa organik xenobiotika (tidak terjadi secara alami di alam)	Hidrokarbon aromatik, fenol, diklorinasi alifatik, pestisida dan plastik termasuk PCB, dioksin, PAH, dan lain-lain.

Sumber: (Lee *et al.*, 2010)

Keberadaan lindi sangat berpotensi mencemari lingkungan, seperti pencemaran tanah, badan air permukaan, dan air tanah (Ngoc and Schnitzer, 2009). Kuantitas timbunan lindi dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu curah hujan, aliran permukaan, infiltrasi, evaporasi, transpirasi, suhu, kelembaban, kedalaman, dan ketinggian timbunan sampah di TPA. Sedangkan kualitas lindi dipengaruhi oleh faktor usia timbunan, curah hujan, iklim dan komposisi sampah (Renou *et al.*, 2008). Lindi yang berasal dari TPA dengan komposisi sampah perkotaan memiliki karakteristik yang relatif sama, yaitu memiliki konsentrasi organik *biodegradable* rendah yang ditunjukkan dengan 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).

Berdasarkan usia TPA lindi dikelompokkan menjadi 3 kelompok, 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	<i>Intermediate</i>	Tua
	(<5 tahun)	(5-10 tahun)	(>10 tahun)
pH	06.05	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 (Melidis, 2014). Beberapa parameter uji yang dapat digunakan untuk karakteristik lindi antara lain 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 (amonia-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 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 Gresik

Parameter	Satuan	Nilai
COD	mg/L	7062
NH ₄ -N	mg/L	602,9
NO ₃ -N	mg/L	42,86
BOD ₅	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 meskipun 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 ₅	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

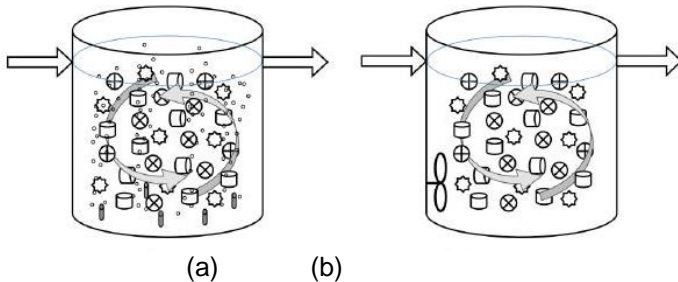
Sumber: (Kementrian Lingkungan Hidup, 2016)

2.2 Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)

Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) merupakan pengembangan teknologi pengolahan biologis dari proses *activated sludge* dan *fluidized bed reactor* (Chen *et al.*, 2008). MBBR dapat mereduksi senyawa organik dan nitrogen secara efektif 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 lindi itu sendiri. Selama beroperasi, media dijaga agar terus bergerak dan tersirkulasi di dalam reaktor dikarenakan lebih dari 90% biomassa tumbuh dan berkembangbiak di dalam media tersebut (Kawan *et al.*, 2016). (Metcalf and Eddy, 2014) Perbedaan utama dari MBBR dengan sistem *activated sludge* konvensional adalah tidak diperlukannya resirkulasi lumpur (Metcalf and Eddy, 2014). Hal ini berkaitan dengan pertumbuhan biomassa di dalam reaktor. MBBR menggunakan seluruh volume reaktornya untuk pertumbuhan biomassa sehingga mengakibatkan tidak adanya tempat untuk resirkulasi lumpur.

MBBR lebih adaptif apabila dioperasikan dalam sistem kontinyu 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 and Eddy, 2014). Dibandingkan dengan sistem *activated sludge* lainnya, 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 and Kotangale, 2013). Namun MBBR membutuhkan energi yang lebih besar untuk meningkatkan konsentrasi DO pada reaktor. Hal ini dikarenakan MBBR membutuhkan sistem aerasi untuk mendukung proses aerobik di dalam reaktor. MBBR juga terbatas dalam mereduksi kandungan fosfor dan pengolahan lindi dapat berjalan efektif apabila rasio BOD_5/COD lebih dari 0,4. Sehingga diperlukan juga *pre-treatment* untuk meningkatkan kualitas influen MBBR (Melidis, 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.*, 2008). Dalam menciptakan kondisi aerobik, MBBR menggunakan sistem aerasi untuk mendukung ketersediaan oksigen. Sistem aerasi dapat diciptakan dengan penggunaan *coarse bubble* (gelembung 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.



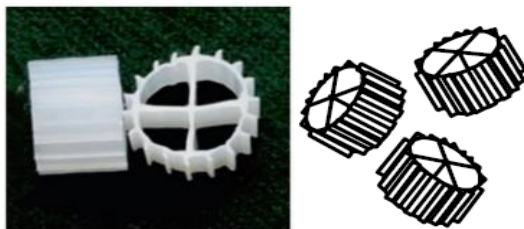
Gambar 2.1 (a) Kondisi Aerobik dan (b) Kondisi Anoksik pada MBBR

Sumber: (Kawan *et al.*, 2016)

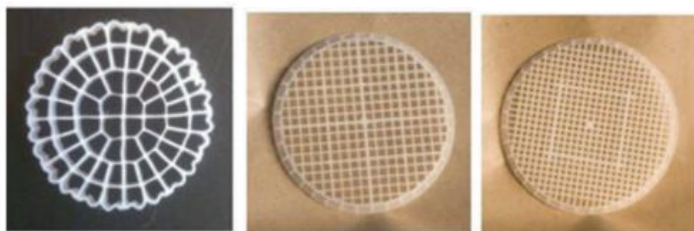
Media merupakan ciri khas utama MBBR. Media yang umum digunakan adalah Kaldnes tipe 1 (K1) terbuat dari *High Density Polyethylene* (HDPE) dan berbentuk silinder kecil dengan diameter 9,1 mm, panjang 7,2 mm, dan *specific gravity* 0,95 dengan luas area spesifik mencapai $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Rusten *et al.*, 2006). Pada penelitian ini menggunakan 3 jenis media, yaitu media Kaldnes tipe 1 (K1), Kaldnes tipe 5 (K5), dan Helix. Media Kaldnes K5 sama seperti K1 terbuat dari *High Density Polyethylene* (HDPE) dan berbentuk silinder kecil, namun memiliki ukuran yang beda. Untuk Kaldnes K5 berdiameter 25 mm, panjang 3,5 mm, dan *specific gravity* 0,96 dengan luas area spesifik mencapai $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Dezotti *et al.*, 2018). Untuk media Helix (merk Numa) berdiameter 17 mm, panjang 15 mm, dan luas area spesifik mencapai $720 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

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. Penggunaan media dalam MBBR mempengaruhi penyisihan senyawa organik dan nitrogen.

Ketebalan lapisan biofilm menunjukkan tingkat pertumbuhan mikroorganismenya (Odegaard *et al.*, 2000). Adanya sirkulasi di dalam MBBR menyebabkan mikroorganismenya terus beregenerasi sehingga mampu menurunkan senyawa organik dan nitrogen dengan baik. Selain itu, jenis dan jumlah media yang digunakan dapat mempengaruhi efisiensi pengadukan. Jumlah media yang besar dapat menurunkan efisiensi pengadukan di dalam MBBR (Kawan *et al.*, 2016). Gambar beberapa jenis media MBBR dapat dilihat pada Gambar 2.2. Pada Tabel 2.5 terdapat beberapa media dengan ukuran dan spesifikasi yang beragam dan penelitian terdahulu tentang MBBR dapat dilihat pada Tabel 2.6.



(a) Kaldnes K1



(b) Kaldnes K5^a

(c) Biofilm Chip M^a

(d) Biofilm Chip P^a



(e) F3^a

(f) Z series^a



(g) Media Helix^b



(h) Bio-Carriers^c

Gambar 2.2 Jenis Media Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR)

Sumber: (Al-Rekabi, 2015), ^a(Dezotti *et al.*, 2018)

^bMerk Numa, ^c(Gulhane and Kotangale, 2013)

Tabel 2.5 Jenis Media dan Spesifikasinya

Type of Biofilm Carrier	Specific				
	Nominal diameter (mm)	Nominal height (mm)	Bulk density (kg/m ³)	Specific biofilm surface area (in bulk) (m ² /m ³)	Specific biofilm surface area at 60% fill (m ² /m ³)
K1	9,1	7,2	150	500	300
K2	15	15	95	350	210
K3	25	10	100	500	300
K5 ^a	25	3,5	-	800	480
Natrix C2 ^a	36	30	-	220	132
Natrix F3 ^a	46	37	-	200	120
Biofilm Chip M ^a	48	2,2	0,96	1200	720
Biofilm Chip P ^a	45	3	0,96	900	540
Z-200 ^a	30	-	0,95	-	-
Z-400 ^a	30	-	0,95	-	-
Helix ^b	17	15	-	720	-
Bio-Carrier	10	15	0,95	500	260

Sumber: (Rusten *et al.*, 2006), ^a(Dezotti *et al.*, 2018), ^bMerk Numa

Tabel 2.6 Penelitian Terdahulu tentang MBBR

No	Penelitian	Sampel	HRT	Durasi aerobik-anoksik optimum	Konsentrasi awal (mg/l)				Efisiensi removal (%)				Nama peneliti (tahun)	Media
					COD	NH4-N	NH3-N	NO3	COD	NH4-N	NH3-N	NO3		
1	Peengolahan dengan MBBR. Variasi kecepatan (650 L/hari, 720 L/hari, 864 L/hari). Yang paling efisien 720 L/hari	Lindi	38 jam	13 hari anoksik; 18 hari aerobik	1259	360	-	3,1	85	-	-	-	(Eldyasti <i>et al.</i> , 2010)	Lava rock particles dengan diameter rata-rata 600 m (300-1000 m)
2	Pengolahan dengan MBBR. Reaktor berbentuk tabung, diameter 6,6 cm, volume 500 mL	Air limbah industri	6 jam	-	4100	47	-	2.9	77	95	-	-	(Bachmann Pinto <i>et al.</i> , 2018)	Media Kaldnes K1 (diisi 50% dari volume MBBR)
3	Pengolahan dengan MBBR dengan rasio BOD/COD 0,4 Reaktor proses	Lindi	30 jam (1,25 hari)	-	2464	400	-	-	95	97	-	-	(Chen <i>et al.</i> , 2008)	Media bio-carrier (diisi 40% di anaerobik, 60% di aerobik)

No	Penelitian	Sampel	HRT	Durasi aerobik-anoksik optimum	Konsentrasi awal (mg/l)				Efisiensi removal (%)				Nama peneliti (tahun)	Media
					COD	NH4-N	NH3-N	NO3	COD	NH4-N	NH3-N	NO3		
	anaerobik (silinder, volume 4,2 L) Reaktor proses aerobik (<i>rectangular</i> , volume 2,1 L)													
4	MBBR yang dioperasikan secara SBR. Reaktor berbentuk silinder 10 L	Lindi	24 jam	16 jam aerobik; 8 jam anoksik	-	211.5	-	-	-	60	-	-	(Xiong <i>et al.</i> , 2018)	Media bio-carrier dari pengolahan air limbah (diisi 50% dari volume MBBR)
5	Pengolahan dengan MBBR menggunakan proses aerobik	Air limbah laundry	8 jam	-	944	-	-	0.9	94	-	-	-	(Bering <i>et al.</i> , 2018)	Media Kaldnes K5 (surface area 800 m ² /m ³)
6	Pengolahan dengan SBR dan MBBR dengan variasi	Air limbah industri dan	48 jam	-	-	55	-	-	-	80	-	-	(Bassin <i>et al.</i> , 2011)	Media kaldnes K3, pretreatm

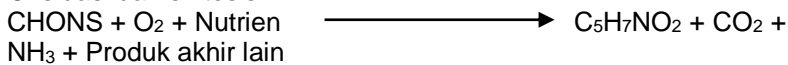
No	Penelitian	Sampel	HRT	Durasi aerobik-anoksik optimum	Konsentrasi awal (mg/l)				Efisiensi removal (%)				Nama peneliti (tahun)	Media
					COD	NH4-N	NH3-N	NO3	COD	NH4-N	NH3-N	NO3		
	pretreatment (tanpa pretreatment, ozonisasi, activated carbon)	domestik												ent ozonisasi
7	Pengolahan dengan MBBR (suhu rendah)	Air limbah domestik kota	14 jam	7 jam aerobik; 7 jam anerobik	755	121	31.9	-	92	90	93	-	(Laureni <i>et al.</i> , 2016)	Media Kaldnes K5 (surface area 800 m ² /m ³)
9	Pengolahan MBBR dengan <i>pre-treatment</i> secara kimiawi	Lindi	45 jam	36 jam aerobik 9 jam anoksik	26000	67,71	-	24,20	92	65,98	-	13,05	(Imania, 2018)	Media Kaldnes K1 (diisi 20% dari volume MBBR)

2.3 Degradasi Zat Organik dan Nitrogen Pada Aerobik dan Anoksik

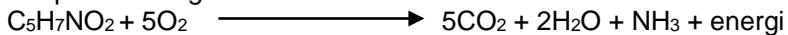
Penyisihan konsentrasi senyawa organik dan nitrogen dapat dilakukan dengan dua proses utama, yaitu asimilasi dan nitrifikasi-denitrifikasi. Pada bagian asimilasi, total nitrogen dikonversi menjadi biomassa oleh mikroorganisme.

Pada proses oksidasi aerobik, konversi dari senyawa organik (CHON) ditunjukkan pada reaksi seperti berikut:

Oksidasi dan sintesis:

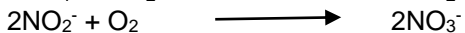
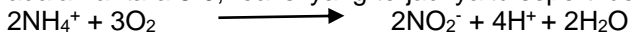


Respirasi *Endogenous*:

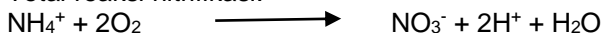


Sel bakteri sebagian besar terdiri dari air (80%) dan sisanya merupakan materi kering (20%). Materi kering tersebut terdiri dari 10% bahan anorganik dan 90% bahan organik ($\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$). CHON digunakan untuk merepresentasikan senyawa organik di dalam air limbah, yang menjadi donor elektron ketika oksigen menjadi akseptor elektron. Pada respirasi *endogenous* dihasilkan energi dan produk akhir yang relatif sederhana dan stabil.

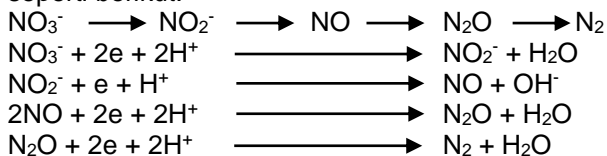
Pada nitrifikasi-denitrifikasi, degradasi senyawa nitrogen dimulai dari perubahan nitrogen organik seperti protein yang didekomposisi oleh bakteri menjadi amonium-nitrogen. Kemudian dari amonium-nitrogen dikonversi menjadi nitrit dan nitrat dengan oksidasi melalui proses nitrifikasi. Kemudian nitrat dikonversi menjadi nitrogen bebas melalui proses denitrifikasi. Nitrifikasi memanfaatkan bakteri *Nitrosococcus* atau *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter* pada kondisi aerobik dan menggunakan oksigen sebagai akseptor elektron. pH optimal untuk proses nitrifikasi adalah antara 8-9, reaksi yang terjadi yaitu seperti berikut:



Total reaksi nitrifikasi:



Sedangkan denitrifikasi terjadi dengan memanfaatkan bakteri *Pseudomonas denitrificans* (bakteri heterotrof) dengan menggunakan nitrat dan nitrit sebagai akseptor elektron alternatif pada kondisi anoksik/anaerobik. Reaksi reduksi nitrat, nitrat dikonversi menjadi nitrit (NO_2^-), kemudian menjadi oksida nitrogen (N_2O), oksida nitrat (NO), dan gas nitrogen (N_2), dengan reaksi seperti berikut:



(Metcalf and Eddy, 2014).

Selama proses nitrifikasi berlangsung, terjadi proses reduksi senyawa organik akibat adanya proses oksidasi aerobik. Proses oksidasi terjadi ketika zat organik memberikan satu atau lebih elektronnya kepada akseptor elektron (oksigen) (Al-Rekabi, 2015).

Pengoperasian MBBR proses oksidasi aerobik dan nitrifikasi berada pada awal proses pengolahan (*primary treatment*). Dikarenakan kedua proses tersebut mampu menyisahkan sebagian besar zat organik terlarut yang dapat menghambat pertumbuhan bakteri heterotrofik. Bakteri heterotrofik merupakan kompetitor bagi bakteri pereduksi nitrogen yang dapat mengganggu pertumbuhan bakteri pereduksi nitrogen pada lapisan biofilm. Selain itu, proses nitrifikasi mampu meningkatkan efisiensi pengolahan MBBR karena mampu menjamin ketersediaan nitrogen terolah untuk proses pengolahan selanjutnya (Metcalf and Eddy, 2014).

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*, tingkat oksigen terlarut atau *dissolved oxygen* (DO), ukuran dan bentuk media serta kecepatan pengadukan dan aerasi 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.

Semakin besar HRT maka waktu kontak mikroorganisme dalam mengolah senyawa organik dan nitrogen akan semakin besar. 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 dibawah 9 jam (Hajipour *et al.*, 2011).

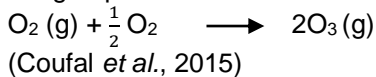
Untuk faktor beban permukaan, nilai beban yang besar dapat menyebabkan tingkat efisiensi pengolahan semakin menurun (Aygun *et al.*, 2008). Pengaruh tingkat DO menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi DO juga akan meningkatkan efisiensi pengolahan. Untuk mencapai efisiensi pengolahan yang optimum, dibutuhkan konsentrasi DO berkisar 2 mg/L atau lebih. Peningkatan DO dari 2 mg/L hingga 6 mg/L saat aerobik mampu meningkatkan efisiensi pengolahan hingga 5,8%. Konsentrasi DO yang terlalu rendah dapat mengakibatkan proses denitrifikasi pada lapisan dalam biofilm tidak terjadi (Al-Rekabi, 2015). Selain itu, ukuran dan bentuk media, persentase volume media dalam reaktor MBBR, kecepatan pengadukan serta tingkat pemberian sistem aerasi juga turut mempengaruhi tingkat efisiensi pengolahan MBBR (Kawan *et al.*, 2016).

2.5 Pre-treatment Menggunakan Ozon pada Pengolahan Lindi

Penambahan senyawa kimia sebagai *pre-treatment* pada pengolahan limbah menggunakan MBBR bisa menjadi langkah tambahan (Metcalf and Eddy, 2014). *Pre-treatment* menjadi rekomendasi MBBR untuk memperoleh efisiensi penyisihan zat organik kompleks pada lindi yang tidak mampu dicapai oleh pengolahan biologis dan proses nitrifikasi yang optimum. Karena dengan adanya *pre-treatment* dapat menurunkan beban organik yang akan masuk ke dalam MBBR dan dapat meminimalisasi pertumbuhan bakteri heterotropik yang menjadi kompetitor bagi bakteri nitrifikasi. Hal ini akan meningkatkan biodegradabilitas zat organik dan 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 ozonisasi (Singh *et al.*, 2014). *Pre-treatment* dengan ozon dipilih karena tidak menghasilkan produk sampingan seperti halnya penggunaan H₂O₂ yang dapat menghasilkan asam sehingga menghambat proses pengolahan selanjutnya.

Ozon adalah oksidator yang sangat kuat dan bersifat tidak stabil pada konsentrasi tinggi berupa gas diamagnetik biru (beracun dan bau menyengat). Ozon mengoksidasi semua logam kecuali emas dan platinum. Dalam aplikasinya, ozon akan meluruh dan berubah menjadi oksigen. Ozon terbentuk dalam reaksi endotermik dengan menggabungkan molekul oksigen dengan atom oksigen sesuai dengan persamaan reaksi sebagai berikut:

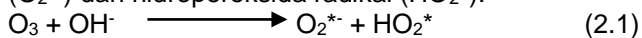


Penggunaan ozon pada *pre-treatment* dikarenakan ozon mengandung hidroksil bebas yang sangat reaktif dan merupakan salah satu oksidan terkuat. Lebih efektif untuk mengoksidasi lindi yang kompleks. Hidroksil bebas tersebut adalah ion OH⁻ radikal (OH*) hasil dari dekomposisi ozon (Van Aken *et al.*, 2019). Sifat reaktifnya banyak dimanfaatkan untuk mendegradasi senyawa organik di dalam limbah. Penambahan ozon dapat dilakukan dengan cara injeksi debit ozon menggunakan *ozonizer*. Penggunaan ozon sebagai *pre-treatment* dapat meningkatkan kemampuan proses biologis dalam pengolahan lindi secara efektif dengan meningkatkan tingkat biodegradabilitas lindi dengan cara mengubah zat organik *non-biodegradable* menjadi biodegradable. Senyawa organik *biodegradable* adalah unsur organik yang mampu diurai dengan menggunakan bantuan mikroorganisme. Perubahan sifat organik ini dapat terjadi karena peningkatan gas (dalam hal ini oksigen) yang memicu pembentukan senyawa organik *biodegradable* (Tizaoui *et al.*, 2007). Ozonisasi lindi dapat berlangsung secara efektif pada pH basa (Cortez *et al.*, 2010). Selain itu, pH basa juga dapat mempercepat reaksi peluruhan ozon sehingga dapat mempercepat terbentuknya senyawa radikal OH* (Rezagama, 2013).

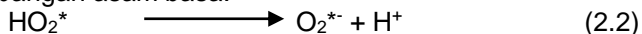
Reaksi ozon secara tidak langsung melibatkan ion-ion radikal. Langkah awal reaksi ini adalah terdekomposisinya molekul ozon yang diakselerasi oleh inisiator berupa (OH^\cdot) membentuk hidroksil radikal (OH^\cdot). Radikal hidroksil ini bereaksi dalam larutan secara cepat dan bersifat non-selektif dengan konstanta laju reaksi ($k=10^8 - 10^{10} \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$). Mekanisme reaksi ini terbagi menjadi tiga langkah yaitu:

1. Langkah Inisiasi

Reaksi antara ion hidroksida dengan ozon membentuk anion superoksida radikal ($\text{O}_2^{\cdot-}$) dan hidroperoksida radikal (HO_2^{\cdot}).

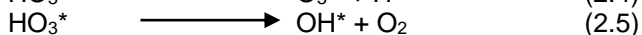
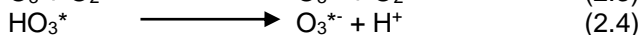
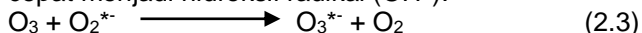


Dimana hidroperoksida radikal tersebut berada pada keseimbangan asam basa.

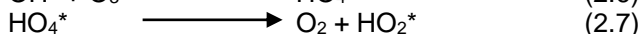
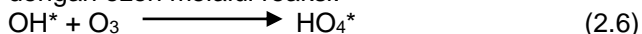


2. Rantai Radikal

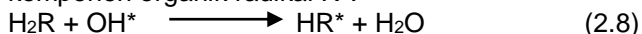
Tahap ini ditandai dengan terbentuknya anion ozon radikal ($\text{O}_3^{\cdot-}$) melalui reaksi antara ozon dengan anion superoksida radikal ($\text{O}_2^{\cdot-}$) dan terdekomposisi secara cepat menjadi hidroksil radikal (OH^\cdot).



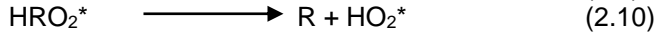
Hidroksil radikal (OH^\cdot) yang terbentuk dapat bereaksi dengan ozon melalui reaksi:



Dengan terurainya HO_4^{\cdot} menjadi O_2 dan HO_2^{\cdot} maka step rantai reaksi akan kembali ke awal step (2.2). Substansi senyawa kimia yang mengkonversi OH^\cdot menjadi radikal superoksida $\text{O}_2^{\cdot-}/\text{HO}_2^{\cdot}$ bereaksi sebagai *chain carriers* dan disebut sebagai promotor begitu pula dengan molekul organik (R) yang bereaksi dengan OH^\cdot membentuk komponen organik radikal R^\cdot .



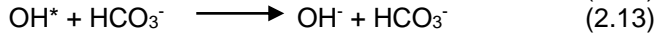
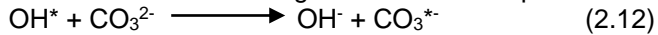
Jika terdapat molekul oksigen maka molekul organik peroksi radikal (ROO^\cdot) akan terbentuk. Reaksi selanjutnya adalah eliminasi $\text{O}_2^{\cdot-}/\text{HO}_2^{\cdot}$ dan kembali lagi ke rantai reaksi sebelumnya.



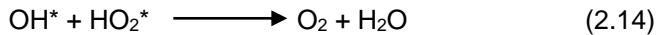
Terdekomposisinya molekul ozon karena terinisiasi ion hidroksida memicu terbentuknya hidroksi radikal yang bereaksi sangat cepat dan non-selektif.

3. Langkah Terminasi

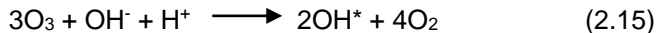
Beberapa senyawa kimia organik dan inorganik bereaksi dengan OH^* membentuk radikal sekunder dengan tidak membentuk $\text{O}_2^{\cdot-}/\text{HO}_2^*$. Jenis inhibitor ini menterminasi rantai reaksi dan mencegah ozon terdekomposisi.



Kemungkinan lain dari tahap terminasi adalah bereaksinya antara dua buah radikal.



Kombinasi reaksi (2.2 sampai 2.7) menunjukkan bahwa tiga buah molekul ozon dapat memproduksi dua buah OH^* .



(Staehelin and Hoigne, 1985).

Beberapa faktor yang mempengaruhi ozonisasi, yaitu waktu reaksi dan durasi yang digunakan. Semakin lama waktu reaksi maka efisiensi penyisihan COD akan semakin besar, dan biodegradabilitas akan semakin meningkat. Hal tersebut juga dipengaruhi oleh karakteristik pada lindi (Tizaoui *et al.*, 2007). Efisiensi optimum penyisihan COD menggunakan reaksi ozon dapat mencapai 60% dari konsentrasi awal. Tingkat biodegradabilitas yang dinyatakan dalam rasio BOD_5/COD juga mengalami kenaikan dari 0,2 menjadi 0,5 (Lopez *et al.*, 2004). Ozon juga dapat dikombinasikan dengan senyawa kimia lain seperti H_2O_2 . Penggunaan ozon bersamaan dengan H_2O_2 bahkan mampu menurunkan COD hingga 48% dan meningkatkan tingkat biodegradabilitas limbah hingga 0,7. Namun memiliki produk sampingan berupa asam (Tizaoui *et al.*, 2007). Peningkatan efisiensi pengolahan berbanding lurus dengan peningkatan debit ozon yang diinjeksikan (Sharma and Ruparella, 2017). Berikut adalah penelitian terdahulu tentang *pre-treatment* ozonisasi dapat dilihat pada Tabel 2.7.

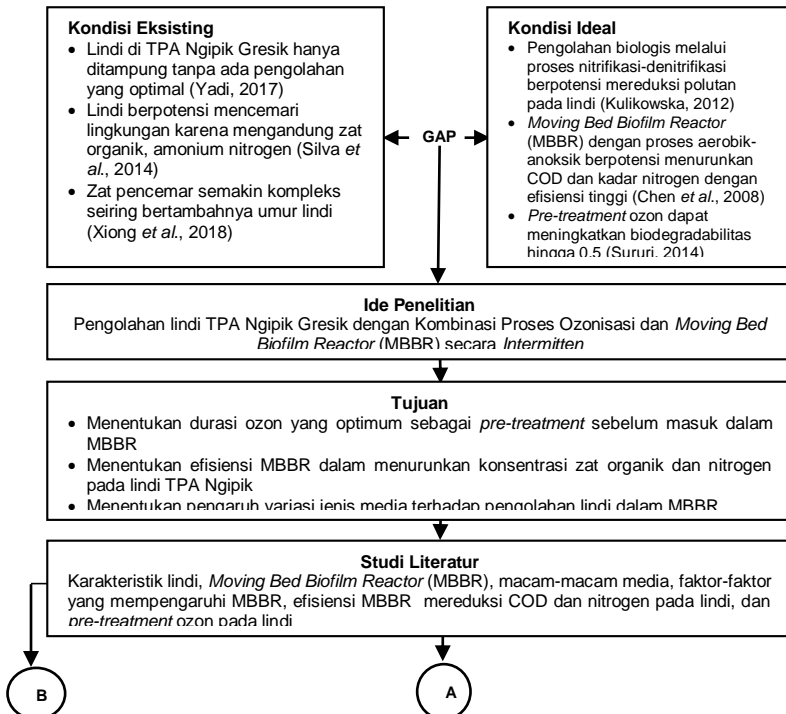
Tabel 2.7 Penelitian Terdahulu tentang *Pre-treatment* Ozonisasi

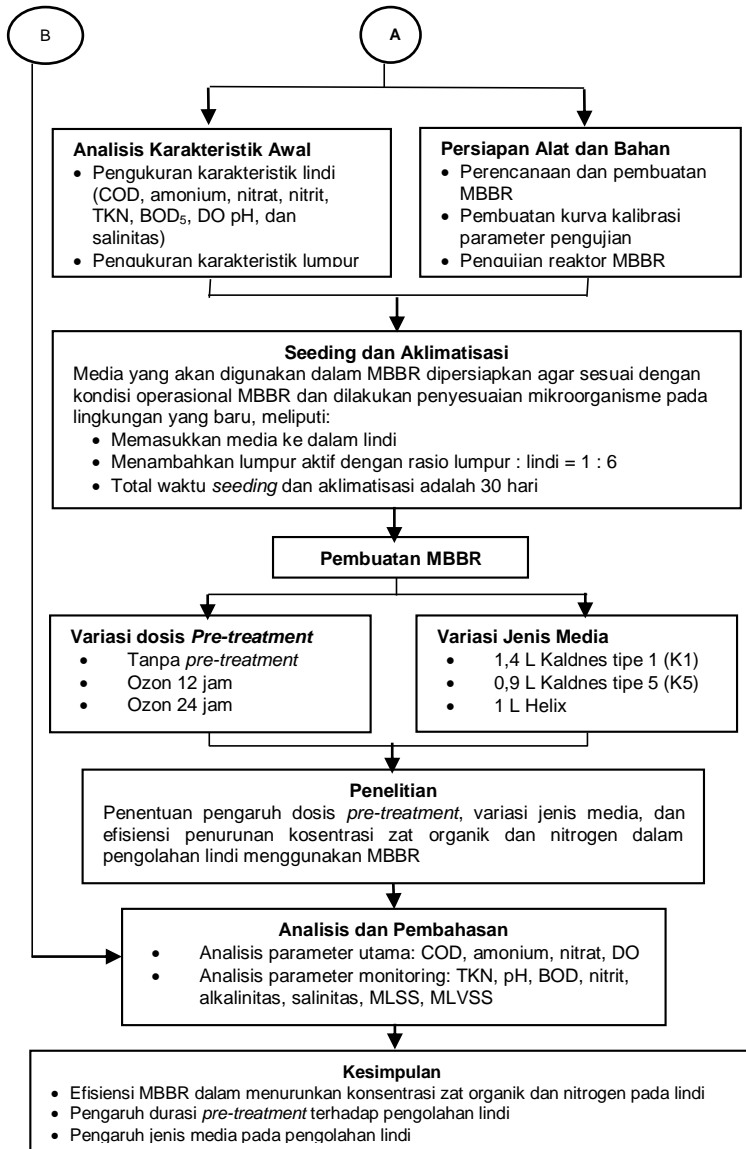
No	Penelitian	Sampel	Bahan Ozonisasi	Diinjeksikan		Efisiensi Penyisihan	Rasio BOD ₅ /COD		Sumber
				Dosis (g/L)	Waktu optimum		Sebelum ozonisasi	Setelah ozonisasi	
1	<i>Pre-treatment</i> ozonisasi sebelum pengolahan membran	Lindi	O ₃	0,06	10 menit	23% COD	0,02	-	(Singh <i>et al.</i> , 2014)
2	Ozonisasi untuk penyisihan toksisitas dan peningkatan biodegradabilitas	Lindi	O ₃	1,5	60 menit	15% COD	0,05	0,17 - 0,25	(Bila <i>et al.</i> , 2005)
				3		50% COD		0,2 - 0,3	
3	<i>Pre-treatment</i> lindi menggunakan proses oksidasi ozon dan persulfat	Lindi	O ₃	0,08	60 menit	15% COD	0,04	0,029	(Abu Amr <i>et al.</i> , 2013)
						0,25% NH ₃ -N			
4	<i>Ozonation</i> dan <i>perozonation</i> pada peningkatan biodegradabilitas lindi TPA	Lindi	O ₃	1,8	180 menit	34% COD	0,05	0,33	(Amaral-Silva <i>et al.</i> , 2016)

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Kerangka Penelitian

Kegiatan penelitian dilakukan dalam skala laboratorium. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berupa lindi dari TPA Ngipik Gresik dan lumpur aktif dari IPLT Keputih. Penelitian ini didasarkan atas adanya “GAP” antara kondisi eksisting dengan kondisi ideal sehingga dapat menentukan ide penelitian. Berikutnya, dilakukan persiapan awal penelitian yang terdiri dari persiapan alat dan bahan serta penelitian pendahuluan untuk memudahkan pelaksanaan penelitian. Kemudian 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 Pengujian

Sampel lindi diambil dari Instalasi Pengolahan Lindi (IPL) berupa ABR. IPL dipilih sebagai lokasi *sampling* karena merepresentasikan kondisi lindi yang ada di TPA Ngipik. Pengambilan sampel dilakukan dalam satu waktu karena kondisi lindi di 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* (RAS) unit *Clarifier* IPLT Keputih. Hal ini dikarenakan lumpur tersebut memiliki konsentrasi MLSS yang tinggi, yaitu 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 merupakan salah satu penelitian pendahuluan yang 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, TKN, BOD₅, DO, pH, dan salinitas pada lindi serta uji MLSS dan MLVSS pada lumpur aktif. Pada analisis karakteristik awal juga dilakukan *settleability solid test* untuk menentukan waktu pengendapan (Metcalf and Eddy, 2014) dan jumlah volume lumpur yang terendapkan. Dari analisis tersebut maka akan diperoleh jumlah lindi dan lumpur yang harus dimasukkan ke dalam reaktor MBBR. Gambar *settleability solid* dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Settleability Solid

3.4 Variabel Penelitian

Metode penelitian yang sistematis memerlukan variasi penelitian untuk mendapatkan hubungan sebab akibat yang dapat dianalisis. Variasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

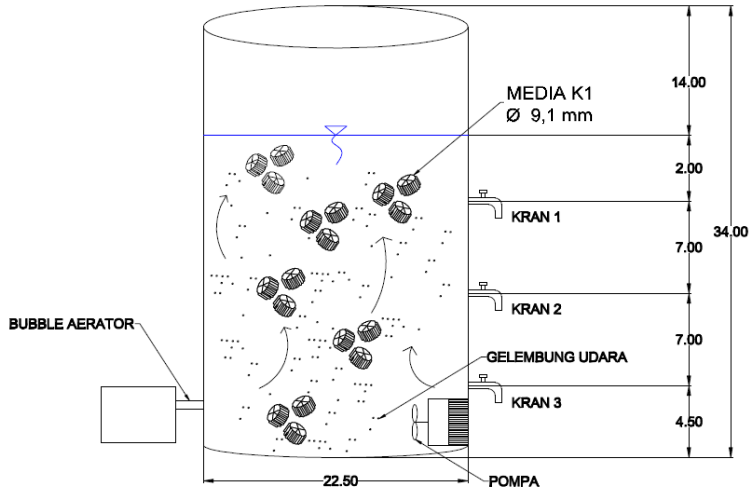
- a. Durasi *pre-treatment* ozonisasi
Membandingkan lindi yang melalui *pre-treatment* ozonisasi dengan variasi durasi 12 jam, 24 jam dan lindi tanpa *pre-treatment* ozonisasi. Durasi lindi dipilih berdasarkan penelitian pendahuluan yang telah dilakukan. Pada penelitian ini memilih ozon sebagai *pre-treatment* dikarenakan mengandung hidroksil bebas yang sangat reaktif dan merupakan salah satu oksidan terkuat. Lebih efektif untuk mengoksidasi lindi yang kompleks (Van Aken *et al.*, 2019).
- b. Jenis media pada *Moving Bed Biofilm Reactor* (MBBR)
Membandingkan jenis media yang optimum dalam penyisihan konsentrasi senyawa organik dan nitrogen pada lindi dengan menggunakan MBBR. Variasi media yang digunakan yaitu media Kaldnes K1 (diameter 9,1 mm), Kaldnes K5 (diameter 25 mm) dan Helix (diameter 17 mm). Berdasarkan literatur, efisiensi penyisihan COD menggunakan media Kaldnes K1 sebesar 77%

(Bachmann Pinto *et al.*, 2018) sedangkan efisiensi penyisihan COD menggunakan media Kaldnes K5 sebesar 94% (Bering *et al.*, 2018). Namun untuk efisiensi penyisihan COD menggunakan media Helix belum ada, dikarenakan media tersebut \pm 2 tahun diproduksi dari China dan belum banyak digunakan pada penelitian terdahulu dalam pengolahan limbah domestik maupun lindi. Dalam penelitian ini menggunakan Helix dikarenakan ketinggian media ini lebih tinggi (15 mm) dengan luas permukaan $720 \text{ m}^2/\text{m}^3$ sehingga luas permukaan yang dilindungi juga lebih tinggi daripada media yang tingginya lebih pendek (*bio-rings/cincin*) seperti Kaldnes.

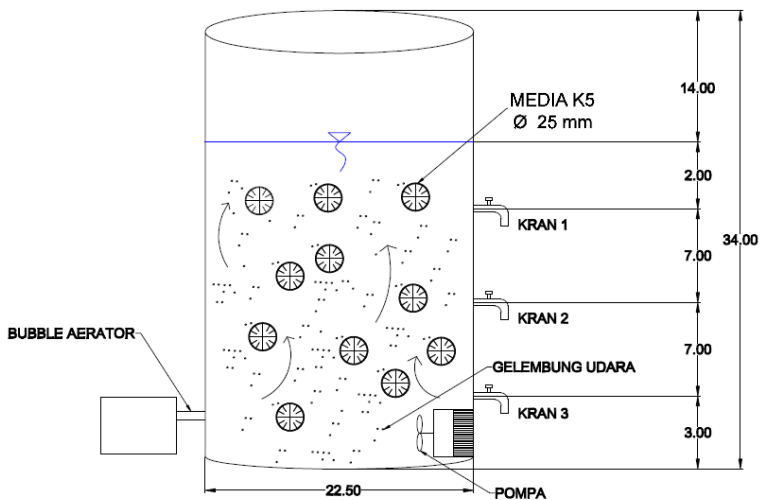
3.5 Pembuatan Reaktor MBBR

Reaktor MBBR terbuat dari plastik HDPE (*High Density Polyethylene*) dengan diameter 22,5 cm dan tinggi 34 cm dengan volume reaktor 13 L. Volume pengolahan pada reaktor MBBR adalah 7 L yang terdiri dari 1 L lumpur dan 6 L lindi. Berdasarkan penelitian sebelumnya, media Kaldnes K1 yang digunakan sebanyak 20% dari volume reaktor (Imania, 2018). Pada penelitian ini menggunakan tiga jenis media yaitu media Kaldnes K1, Kaldnes K5, dan Helix dengan masing-masing volume sebesar 1,4 L, 0,9 L, dan 1 L dimana volume media yang dimasukkan berdasarkan perhitungan luas permukaan (Lampiran 1). Reaktor yang dibutuhkan berjumlah sembilan reaktor yang terdiri dari tiga reaktor menggunakan media Kaldnes K1, tiga reaktor menggunakan media Kaldnes K5, dan tiga reaktor menggunakan media Helix. Dalam pengujian ini reaktor yang digunakan pada masing-masing media terdiri dari variasi durasi ozon 1,5 g/L, ozon 3 g/L dan tanpa *pre-treatment* sebagai reaktor kontrol. Untuk memudahkan pengujian maka dilakukan pengujian dengan dua kali tahapan. Tahap pertama untuk enam reaktor dan tahap kedua untuk tiga reaktor. Setiap reaktor dilengkapi dengan tiga keran yang berada di bagian atas, tengah dan bawah reaktor. Keran 1 digunakan untuk menyetarakan volume sehingga saat *intermitten* volume yang dikeluarkan dan ditambahkan sama yaitu sebanyak 1 L (*intermitten* dilakukan saat pergantian siklus atau saat 48 jam), keran 2 digunakan untuk mengambil sampel lindi dan keran 3

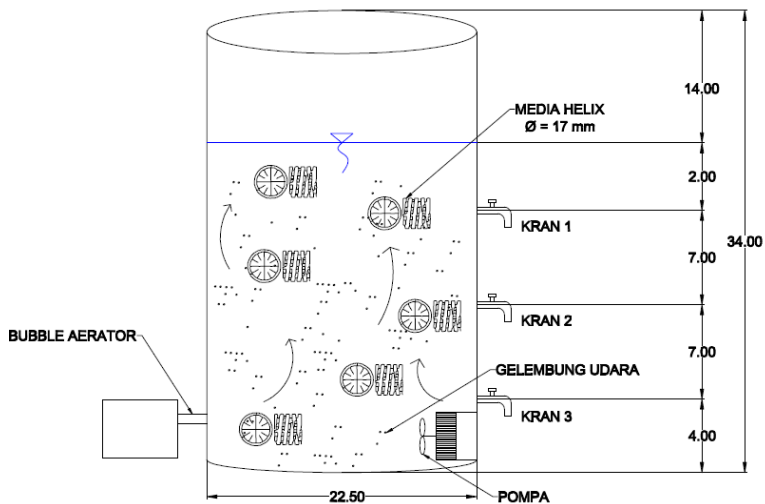
digunakan untuk mengambil sampel lumpur. Gambar reaktor MBBR berdasarkan media yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.3 hingga Gambar 3.5.



Gambar 3.3 Reaktor Uji MBBR dengan Media Kaldnes K1



Gambar 3.4 Reaktor Uji MBBR dengan Media Kaldnes K5



Gambar 3.5 Reaktor Uji MBBR dengan Media Helix

Dalam penelitian ini, reaktor dilengkapi dengan aerator dan propeller pengaduk. Aerator digunakan untuk menciptakan proses aerobik dengan memberikan suplai oksigen. Aerator akan dinyalakan pada prosesi aerobik dan akan dimatikan pada proses anoksik. Aerator yang digunakan merupakan Amara tipe BS-410 dengan debit output 3,5 L/menit. Penggunaan spesifikasi ini disesuaikan dengan kebutuhan debit aerator berdasarkan perhitungan (Lampiran 2), untuk menjamin tercapainya nilai DO > 2 mg/L pada kondisi aerobik. Propeller pengaduk digunakan untuk menjaga agar media tetap bergerak di dalam reaktor. Propeller pengaduk yang digunakan adalah Vosso tipe VS-804 dengan kapasitas pengadukan 1000 L/menit. Tinggi maksimal pengadukan oleh propeller pengaduk yaitu maksimal 2 meter.

3.6 Seeding dan Aklimatisasi

Proses *seeding* dan aklimatisasi terdiri dari 3 tahap (berlangsung selama 30 hari). *Seeding* merupakan proses mengembangbiakkan mikroorganisme yang berasal dari lumpur aktif sehingga mendapatkan jumlah biomassa yang cukup untuk mengolah polutan lindi di dalam reaktor MBBR. Dan aklimatisasi merupakan

proses penyesuaian atau adaptasi bagi mikroorganismenya untuk beroperasi pada lingkungan baru. Proses *seeding* dan aklimatisasi tahap 1 dilakukan dengan cara memasukkan media (media K1, K5, Helix yang akan digunakan dalam MBBR), lindi, dan lumpur aktif ke dalam tangki serta diaerasi dengan propeller pengaduk selama 10 hari pertama. Pada proses *seeding* dan aklimatisasi tahap 1 dilakukan memberikan sumber organik pada mikroorganismenya yang berasal dari sampel dan sumber organik tambahan yang berasal dari sukrosa. Sukrosa tersebut berasal dari gula pasir, dimana jumlah gula yang dimasukkan ke dalam reaktor bergantung pada karakteristik lindi yang digunakan (Lampiran 3). Gula berfungsi sebagai sumber organik bagi mikroorganismenya sebelum mengolah 100% lindi di dalam reaktor (Qaderi *et al.*, 2011). Perbandingan gula dan lindi yang dimasukkan ke dalam tangki sebesar 50%:50%.

Kemudian dilanjutkan *seeding* dan aklimatisasi tahap 2 dengan cara mengeluarkan lindi dan sukrosa yang digunakan pada tahap sebelumnya dan memasukkan lindi baru di dalam tangki yang diaerasi selama 10 hari kedua. Pada proses ini, sumber organik diganti dengan 100% lindi dikarenakan mikroorganismenya telah mampu mendegradasi senyawa organik kompleks di dalam lindi pada proses *seeding* dan aklimatisasi tahap 1. Kemudian dilakukan *seeding* dan aklimatisasi tahap 3 yaitu volume lumpur dimasukkan pada setiap reaktor MBBR sebanyak 1 L dan volume lindi sebanyak 6 L sehingga total volume pengolahan adalah 7 L. Serta memasukkan media yang telah digunakan pada *seeding* dan aklimatisasi tahap 1 dan tahap 2 ke dalam masing-masing reaktor MBBR. Volume total lindi dan lumpur yang diperlukan untuk 9 reaktor MBBR sebanyak 36 L dan 9 L. Lindi dan lumpur dicampur di dalam reaktor dan diaerasi selama 10 hari ketiga. Selama proses *seeding* dan aklimatisasi dilakukan pengukuran COD hingga diperoleh kondisi *steady state*. Kondisi tersebut diperoleh apabila efluen sampel telah mencapai nilai konsentrasi COD yang konstan atau stabil. Umumnya, kondisi *steady state* dapat dicapai apabila efluen sampel memiliki nilai konsentrasi COD yang dengan efisiensi penyisihan sebesar 80% (Chen *et al.*, 2008).

3.7 Penelitian Pendahuluan

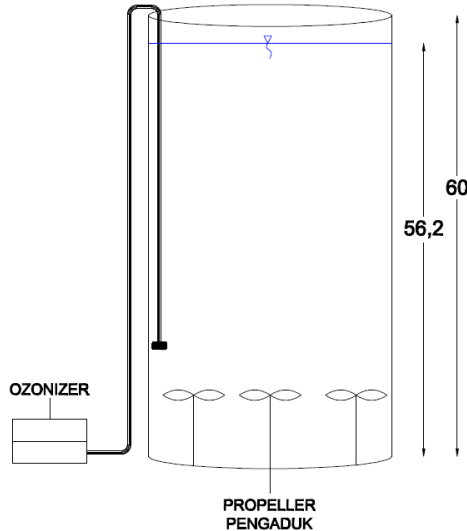
Pada penelitian pendahuluan dilakukan pembuatan reagen dan kurva kalibrasi untuk pengujian parameter. Kurva kalibrasi yang dibuat meliputi kurva kalibrasi amonium-nitrogen, nitrat-nitrogen, dan nitrit-nitrogen. Selain itu dilakukan pula *pre-treatment* terhadap lindi dengan variasi:

- Lindi tanpa *pre-treatment*
- *Pre-treatment* lindi menggunakan ozon variasi durasi 12 jam
- *Pre-treatment* lindi menggunakan ozon variasi durasi 24 jam

Penelitian pendahuluan ozonisasi dilakukan berdasarkan variasi durasi selama 0 menit, 6 jam, 12 jam hingga 48 jam (dilakukan pengambilan sampel dan analisis setiap 6 jam sekali), kemudian akan dipilih durasi yang paling optimum untuk digunakan sebagai *pre-treatment* dalam penelitian ini. Selain itu, pemilihan durasi ozonisasi memperhatikan jumlah zat organik dan nutrien yang ada pada sampel lindi yang akan digunakan untuk penelitian. Sifat ozon yang sangat reaktif mampu menurunkan zat organik dan nutrien dalam jumlah besar sehingga penggunaan ozon cocok untuk mengolah konsentrasi COD yang besar pada lindi.

Proses ozonisasi dilakukan dengan cara memasukkan seluruh lindi yang akan diolah sebanyak 36 L pada setiap reaktor. Reaktor untuk *pre-treatment* ozonisasi terdiri dari tiga reaktor yaitu dua reaktor dengan variasi durasi ozon yang diinjeksikan yaitu 12 jam, 24 jam serta satu reaktor untuk lindi tanpa *pre-treatment*. Injeksi ozon dilakukan menggunakan ozonizer dengan debit injeksi 3 g/h dan waktu operasi 2 jam (untuk 2 L lindi) dengan interval 15 menit. Gas ozon dilewatkan melalui selang menuju reaktor ozonisasi yang berisi lindi dan propeller pengaduk dikondisikan menyala agar terjadi kontak antara lindi dengan ozon secara merata. Propeller pengaduk pada reaktor tanpa *pre-treatment* juga dikondisikan menyala untuk mengaduk lindi. Selama proses *pre-treatment*, dilakukan pengambilan sampel sesuai dengan variasi ozon dan dianalisis untuk menentukan durasi optimum *pre-treatment* pada pengolahan lindi. Analisis yang dilakukan meliputi analisis COD, pH, amonium, dan nitrat. Setelah dilakukan *pre-treatment*, lindi disimpan di dalam tangki yang akan digunakan

untuk *seeding* dan aklimatisasi (tahap 1, 2, 3) dan untuk pengolahan biologis (MBBR). Gambar reaktor ozonisasi dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Reaktor *Pre-treatment* Ozonisasi

3.8 Pelaksanaan Penelitian

Penelitian dilakukan dengan menggunakan variasi durasi *pre-treatment*, dan jenis media dalam MBBR. Variasi durasi ozon dilakukan pada saat *pre-treatment* sedangkan variasi jenis media pada MBBR dilakukan pada penelitian utama. Penelitian utama dilakukan untuk menentukan efisiensi penyisihan konsentrasi organik dan nitrogen pada MBBR dalam pengolahan lindi. Variasi jenis media yang digunakan dalam MBBR berdasarkan *surface area* spesifik setiap media sehingga volume media yang digunakan berbeda-beda. Penelitian dilakukan selama 10 hari yang terdiri dari 5 siklus (pengulangan tahap aerobik-anoksik/anaerobik). Proses aerobik diciptakan dengan memberikan suplai oksigen dari aerator. Agar suplai oksigen di dalam reaktor terdistribusi dengan merata maka propeler pengaduk dikondisikan menyala. Proses anoksik/anaerobik diciptakan dengan memberikan sedikit atau

tanpa adanya suplai oksigen sehingga aerator dikondisikan dalam keadaan mati. Namun propeller pengaduk tetap menyala untuk menjaga sirkulasi media (tetap bergerak) 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 menentukan jenis media yang optimum bagi MBBR dalam mengolah lindi. Pada penelitian ini menggunakan duplo proses yaitu setelah 5 siklus pertama selesai, akan dilakukan kembali pengolahan lindi yang sama seperti 5 siklus sebelumnya. Volume lindi yang dimasukkan pada tiap reaktor sebanyak 6 L dan lumpur 1 L. Pada siklus 1 dimasukkan lindi sebanyak 6 L dan pada siklus 2 hingga siklus 5 (setiap pergantian siklus dilakukan *intermitten*) lindi pada tiap reaktor dikeluarkan sebanyak 1 L dan kemudian dimasukkan lindi baru sebanyak 1 L.

Setiap satu siklus dilakukan dilakukan tiga kali pengambilan sampel untuk parameter utama yaitu COD, amonium, nitrat, pH dan DO. Pengambilan sampel tersebut dilakukan saat *intermitten* atau sebelum aerobik (setelah masuk reaktor \pm 10 menit), setelah proses aerobik, dan setelah proses anoksik. Jumlah sampel untuk uji parameter utama sebanyak 270 sampel (duplo). Penjelasan mengenai variasi jenis media dan variasi *pre-treatment* dapat dilihat pada Tabel 3.1. Penjelasan mengenai jumlah sampel yang dianalisis dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Rancangan Penelitian dan Nama Reaktor

Reaktor	Durasi MBBR		Jenis Media	Keterangan
	Aerobik	Anoksik		
1K1	36 jam	9 jam	1,4 L Kaldnes K1	Tanpa <i>pre-treatment</i>
2K1				Ozon 12 jam
3K1				Ozon 24 jam
1K5			0,9 L Kaldnes K5	Tanpa <i>pre-treatment</i>
2K5				Ozon 12 jam
3K5				Ozon 24 jam
1H			1 L Helix	Tanpa <i>pre-treatment</i>
2H				Ozon 12 jam
3H				Ozon 24 jam

Pada proses aerobik-anoksik/anaerobik dikondisikan durasi waktu aerobik yang lebih lama. Hal ini 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. Dikarenakan konsentrasi amonium pada lindi sangat besar sedangkan jumlah nitrat untuk proses denitrifikasi pada saat anoksik masih sangat kecil.

Reaktor MBBR dioperasikan dengan sistem *intermitten*, yaitu lindi dan lumpur yang masuk akan diaduk secara sempurna dan diolah selama satu siklus kemudian keran 1 dibuka untuk mengeluarkan 1 L lindi. Sebelum siklus kedua dimulai, akan dimasukkan 1 L lindi baru (yang telah di ozonisasi) untuk menggantikan lindi yang telah dikeluarkan sebelumnya agar total volume lindi dan lumpur dalam MBBR tetap sama yaitu 7 L, kemudian diaduk dan diolah secara sempurna. *Intermitten* dilakukan pada setiap pergantian siklus. Berdasarkan penelitian sebelumnya, perbandingan durasi aerobik-anoksik/anaerobik yang paling efektif untuk pengolahan lindi dengan MBBR yaitu sebesar 80%-20% dari total waktu pengolahan (45 jam) dan waktu pengendapan selama 3 jam (Imania, 2018). Sehingga pada penelitian ini menggunakan durasi aerobik 36 jam dan durasi anoksik 9 jam. Kemudian dilanjutkan dengan proses pengendapan selama 3 jam.

Pada penelitian ini pengambilan sampel dilakukan sesuai dengan proses yang terjadi pada reaktor MBBR, yaitu saat *intermitten* atau sebelum aerobik (saat 10 menit lindi dimasukkan reaktor), setelah aerobik (36 jam), dan setelah anoksik (45 jam). Variabel yang digunakan yaitu variasi media (media Kaldnes K1, Kaldnes K5, dan Helix) dan variasi *pre-treatment* (tanpa *pre-treatment*, ozon 1, dan ozon 2. Jadi reaktor MBBR yang digunakan ada 9 reaktor dengan 9 variasi. Jumlah sampel setiap siklus sebanyak 27 sampel, dan total sampel dalam 5 siklus sebanyak 135 sampel. Waktu pengambilan sampel dan jumlah sampel yang dianalisis dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Jumlah Sampel yang Dianalisis

Jenis Media	Reaktor	Waktu Pengambilan Sampel																		
		Siklus 1			I N T E R M I T T E N	Siklus 2			I N T E R M I T T E N	Siklus 3			I N T E R M I T T E N	Siklus 4			I N T E R M I T T E N	Siklus 5		
		(X1)	(Y1)	(Z1)		(X2)	(Y2)	(Z2)		(X3)	(Y3)	(Z3)		(X4)	(Y4)	(Z4)		(X5)	(Y5)	(Z5)
Kaldnes K1 (K1)	1K1	1K1X1	1K1Y1	1K1Z1	1	1K1X2	1K1Y2	1K1Z2	2	1K1X3	1K1Y3	1K1Z3	3	1K1X4	1K1Y4	1K1Z4	4	1K1X5	1K1Y5	1K1Z5
	2K1	2K1X1	2K1Y1	2K1Z1		2K1X2	2K1Y2	2K1Z2		2K1X3	2K1Y3	2K1Z3		2K1X4	2K1Y4	2K1Z4		2K1X5	2K1Y5	2K1Z5
	3K1	3K1X1	3K1Y1	3K1Z1		3K1X2	3K1Y2	3K1Z2		3K1X3	3K1Y3	3K1Z3		3K1X4	3K1Y4	3K1Z4		3K1X5	3K1Y5	3K1Z5
Kaldnes K5 (K5)	1K5	1K5X1	1K5Y1	1K5Z1	1	1K5X2	1K5Y2	1K5Z2	2	1K5X3	1K5Y3	1K5Z3	3	1K5X4	1K5Y4	1K5Z4	4	1K5X5	1K5Y5	1K5Z5
	2K5	2K5X1	2K5Y1	2K5Z1		2K5X2	2K5Y2	2K5Z2		2K5X3	2K5Y3	2K5Z3		2K5X4	2K5Y4	2K5Z4		2K5X5	2K5Y5	2K5Z5
	3K5	3K5X1	3K5Y1	3K5Z1		3K5X2	3K5Y2	3K5Z2		3K5X3	3K5Y3	3K5Z3		3K5X4	3K5Y4	3K5Z4		3K5X5	3K5Y5	3K5Z5
Helix (H)	1H	1HX1	1HY1	1HZ1	1	1HX2	1HY2	1HZ2	2	1HX3	1HY3	1HZ3	3	1HX4	1HY4	1HZ4	4	1HX5	1HY5	1HZ5
	2H	2HX1	2HY1	2HZ1		2HX2	2HY2	2HZ2		2HX3	2HY3	2HZ3		2HX4	2HY4	2HZ4		2HX5	2HY5	2HZ5
	3H	3HX1	3HY1	3HZ1		3HX2	3HY2	3HZ2		3HX3	3HY3	3HZ3		3HX4	3HY4	3HZ4		3HX5	3HY5	3HZ5

Keterangan:

- 1 = Tanpa Ozon
- 2 = Ozon 1
- 3 = Ozon 2

- X = Sebelum proses aerobik (setelah masuk reaktor ±10 menit)
- Y = Setelah proses aerobik (saat 36 jam)
- Z = Setelah proses anoksik (saat 45 jam)

3.9 Metode Analisis Sampel dan Data

Parameter yang dianalisis pada penelitian ini terdiri dari parameter utama dan parameter tambahan. Analisis parameter utama meliputi analisis COD, amonium-nitrogen, nitrat-nitrogen, nitrit-nitrogen dan DO. Analisis parameter utama dilakukan setiap sebelum proses aerobik, setelah proses aerobik, dan setelah proses anoksik. Sedangkan analisis parameter tambahan meliputi analisis nitrit-nitrogen, BOD₅, TKN, salinitas, dan pH untuk lindi serta MLSS dan MLVSS untuk lumpur aktif. Analisis tambahan dilakukan setiap awal dan akhir siklus. Metode analisis yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Metode Analisis Parameter Utama

Analisis	Tujuan	Metode/Alat	Standar
<i>Chemical Oxygen Demand (COD)</i>	Menentukan besar degradasi organik	Metode <i>Closed reflux</i>	Standard Method 5220
Amonium-nitrogen	Mengetahui kandungan dan penurunan amonium dalam sampel	Metode Spektrofotometri (Nessler)	Standard Method 4500-NH ₃
Nitrat-nitrogen	Mengetahui kandungan dan penurunan nitrat dalam sampel	Metode Spektrofotometri (Brucin Asetat)	Standard Method 4500-NO ₃
<i>Dissolved Oxygen (DO)</i>	Mengetahui kecukupan oksigen di dalam reaktor, melihat proses yang terjadi di dalam reaktor (DO > 2 mg/L terjadi proses aerobik, DO < 2 mg/L terjadi proses	Metode Iodometri (Winkler)	Standard Method 4500-O

Analisis	Tujuan	Metode/Alat	Standar
	anaerobik, DO < 2 mg/L dan konsentrasi nitrat tinggi maka terjadi proses anoksik)		
pH	Menganalisis kondisi keasaman sampel	Metode elektrometrik (pH meter) menggunakan alat <i>Basic pH meter-03771 Denver Instrument</i>	Standard Method 4500-H ⁺

Tabel 3.4 Metode Analisis Parameter Tambahan

Parameter	Tujuan	Metode/Alat	Standar
<i>Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)</i>	Mengetahui jumlah nitrogen yang terikat pada organik secara total	Metode Spektrofotometri (Nessler)	Standard Method 4500-Norg
Nitrit-nitrogen	Mengetahui kandungan dan penurunan nitrit dalam sampel	Metode Spektrofotometri (NED)	Standard Method 54500-NO ₂
<i>Biochemical Oxygen Demand (BOD)</i>	Mengetahui tingkat biodegradabilitas sampel (Rasio BOD/COD)	Metode Yodometri (Winkler)	Standard Method 5210
Salinitas	Mengetahui kadar salinitas (kadar garam) sampel	Metode elektrometrik menggunakan alat <i>pH onlab-EC 10</i>	Standard Method 2520
Alkalinitas	Menganalisis kondisi keasaman sampel	Metode titrasi asam-basa	Standard Method 2320
TSS	Mendapatkan korelasi penurunan total suspended solid	Metode Gravimetri	Standard Method 2540

Parameter	Tujuan	Metode/Alat	Standar
Rasio F/M : <i>Mixed Liquor Suspended Solid (MLSS), Mixed Liquor Volatile Suspended Solid (MLVSS)</i>	Mengetahui kecukupan biomassa atau pertumbuhan biomassa (M)	Metode Gravimetri	Standard Method 2540 D

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* menggunakan ozon dan jenis media 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, dan grafik.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Karakteristik Awal 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, DO, pH, BOD₅, TSS, dan salinitas. Karakterisasi berguna untuk mengetahui kondisi sampel sebelum diolah 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 karakteristik awal lindi TPA Ngipik Gresik dan lumpur IPLT Keputih dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Analisis Karakteristik Awal Lindi dan Lumpur

Parameter	Satuan	Nilai
Lindi		
COD	mg/L	4000
NH ₄ -N	mg/L	87.71
NO ₃ -N	mg/L	20.92
NO ₂ -N	mg/L	19.16
BOD ₅	mg/L	268,33
pH	-	8.5
Salinitas	psu	4.4
TSS	mg/L	188
Lumpur		
MLSS	mg/L	5880
MLVSS	mg/L	5316

4.2 Seeding dan Aklimatisasi

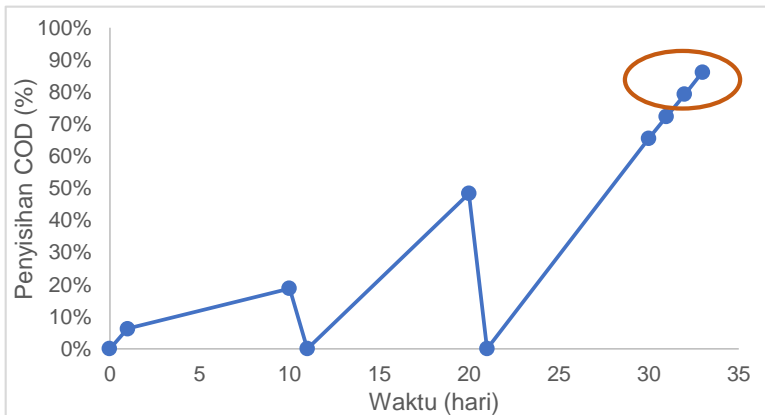
Seeding dilakukan untuk mengembangbiakkan mikroorganisme sehingga didapat jumlah biomassa yang cukup untuk mengolah lindi pada reaktor MBBR. Mikroorganisme diambil dari *Return Activated Sludge* (RAS) unit Clarifier IPLT Keputih. Pada proses *seeding* dilakukan memberikan sumber organik pada mikroorganisme 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.

Proses *seeding* dan aklimatisasi terdiri dari 3 tahap (berlangsung selama 30 hari). Pada proses *seeding* dan aklimatisasi tahap 1, lindi dan lumpur dicampur di dalam reaktor serta diaerasi selama 10 hari pertama. Sumber organik yang digunakan terdiri dari 50% lindi : 50% sukrosa. Kemudian proses *seeding* dan aklimatisasi tahap 2 dilakukan dengan cara memasukkan media (Kaldnes K1, Kaldnes K5, dan Helix yang akan digunakan dalam MBBR) pada reaktor serta diaerasi selama 10 hari kedua. Perbandingan sumber organik yang digunakan terdiri dari 70% lindi : 30 % sukrosa. Selanjutnya proses *seeding* dan aklimatisasi tahap 3 dilakukan aerasi selama 10 hari ketiga di dalam MBBR sesuai dengan durasi proses aerobik, dan proses anoksik serta volume lindi, lumpur dan media yang akan digunakan pada penelitian utama. Pada proses ini, sumber organik diganti dengan 100% lindi dikarenakan mikroorganisme telah mampu mendegradasi senyawa organik kompleks di dalam lindi pada proses *seeding* dan aklimatisasi tahap 2. Proses *seeding* dan 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.*, 2008). Pengukuran parameter COD dilakukan saat 10 hari pertama, 10 hari kedua, dan diukur setiap hari saat 10 hari terakhir 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

Tahap	Hari ke-	Konsentrasi COD (mg/L)	Penyisihan (%)
Tahap 1	0	3200	0%
	1	3000	6%
	10	2600	19%
Tahap 2	11	3100	0%
	20	1600	48%
Tahap 3	21	2900	0%
	30	1000	66%
	31	800	72%
	32	600	79%
	33	400	86%



Gambar 4.1 Penyisihan COD pada Tahap Aklimatisasi

Berdasarkan hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa penyisihan COD sudah mencapai lebih dari 80% pada hari ke-30 aklimatisasi. Penyisihan yang diperoleh pada tahap 3 (akhir) aklimatisasi mencapai 86% sehingga dapat dikatakan proses aklimatisasi selesai, dilakukan proses *decanting* (penuangan efluen). Sehingga di dalam reaktor hanya tertinggal lumpur yang

sudah aklimatisasi. 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 150 mL (Gambar 4.2). Hal ini menunjukkan bahwa jumlah lumpur yang dibutuhkan pada setiap reaktor MBBR berkapasitas 6 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

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 36 liter lindi (dengan pengoperasian tiap 2L). Volume tersebut merupakan kebutuhan lindi yang akan dimasukkan ke dalam MBBR sesuai dengan variasi ozon yang digunakan. Variasi durasi pengoperasian ozon yang digunakan adalah 12 jam (variasi ozon 1) dan 24 jam (variasi ozon 2) dengan waktu operasi aktif 2 jam

dan interval 15 menit. Waktu interval dilakukan untuk mencegah kondisi yang terlalu panas pada ozonizer. Selama tahap *pre-treatment*, dilakukan analisis COD setiap 6 jam. Hasil analisis pada tahap *pre-treatment* dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Analisis pada Tahap Pre-treatment

Waktu Operasi (jam)	Konsentrasi (mg/L)	Penyisihan (%)	Rasio BOD ₅ /COD
0	3259.26	0%	0,07
6	2672.59	18%	-
12	2477.04	24%	0,1
18	2172.84	33%	-
24	1530.86	53%	0,2

Tabel 4.4 Hasil Analisis Karakteristik Awal Lindi dan Lumpur Setelah Pre-treatment Ozon

Parameter	Satuan	Nilai		
		Tanpa Ozon	Ozon 1	Ozon 2
Lindi				
COD	mg/L	2516,8	1936	1548,8
NH ₄ -N	mg/L	54,65	91,9	91,4
NO ₃ -N	mg/L	63,56	57,4	11,1
NO ₂ -N	mg/L	19.01	64,2	64,2
BOD ₅	mg/L	28,9	33,4	80,2
BOD ₅ /COD	-	0,01	0,02	0,05
pH	-	7,4	7,5	7,8
Salinitas	psu	2,68	2,32	1,89
TSS	mg/L	228	172	148
Lumpur				
MLSS	mg/L	21950	23280	23220
MLVSS	mg/L	28170	27890	30530

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 24 jam.

4.4 Penelitian Utama

Penelitian utama berlangsung selama 10 hari di *workshop* Departemen 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 3 x 3 pasang reaktor (3 jenis media dimana setiap media memiliki 3 variasi *pre-treatment*). Reaktor dioperasikan dengan variasi 3 jenis media dan -konsentrasi COD lindi yang berbeda-beda, bergantung pada hasil *pre-treatment* menggunakan ozon. Kapasitas pengolahan setiap reaktor yaitu sebesar 7 L, yang terdiri dari 1 L lumpur dan 6 L lindi.

Penelitian utama yang digunakan merupakan pengolahan secara biologis menggunakan MBBR dengan durasi proses aerobik 36 jam, proses anoksik 9 jam, dan pengendapan 3 jam pada setiap siklusnya. Pengolahan biologis dipilih karena 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. Hal inilah yang tidak 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 BOD₅/COD lindi yang terlalu kecil, pengolahan lindi dengan MBBR dapat berjalan efektif apabila rasio BOD₅/COD lebih dari 0,4. Sehingga diperlukan juga *pre-treatment* untuk meningkatkan kualitas influen MBBR (Melidis, 2014).

4.4.1 Analisis Zat Organik

Analisis zat organik yang dilakukan pada penelitian ini adalah analisis COD dan BOD₅. Analisis COD dilakukan setiap awal siklus atau saat *intermitten* (sebelum proses aerobik), setelah proses aerobik, dan setelah proses anoksik. Sedangkan untuk analisis

BOD₅ hanya dilakukan pada siklus 1 (hari ke-0) dan siklus 4 (hari ke-8). Analisis COD dilakukan dengan menggunakan metode *close reflux* dan analisis BOD₅ dilakukan dengan menggunakan metode Iodometri (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 terikat 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 atau saat *intermitten* (sebelum proses aerobik), setelah proses aerobik, dan setelah proses anoksik. Berdasarkan hasil analisis parameter COD, akumulasi efisiensi penyisihan tiap siklus semakin meningkat pada semua media dan yang paling tinggi terdapat pada siklus 4.

Pada media Kaldnes K1 akumulasi efisiensi penyisihan saat siklus 4 pada reaktor tanpa *pre-treatment* (tanpa ozon), ozon 1, dan ozon 2, yaitu sebesar 77%, 78%, dan 91% dengan efisiensi penyisihan tiap siklus sebesar 48%, 43%, dan 74%. Sedangkan akumulasi efisiensi penyisihan proses pada siklus 4 saat proses aerobik, yaitu sebesar 51%, 41%, dan 43% serta saat proses anoksik sebesar 18%, 29%, dan 38%. Efisiensi penyisihan tiap proses pada siklus 4 saat proses aerobik, yaitu sebesar 18%, 7%, dan 9% serta saat proses anoksik sebesar 37%, 39%, dan 72%. Peningkatan efisiensi penyisihan COD terjadi sebanding dengan *pre-treatment* yang dilakukan sebelum pengolahan di dalam reaktor MBBR. Namun pada awal siklus (siklus 1) menunjukkan rendahnya penyisihan COD. Hal ini dikarenakan adanya masa adaptasi

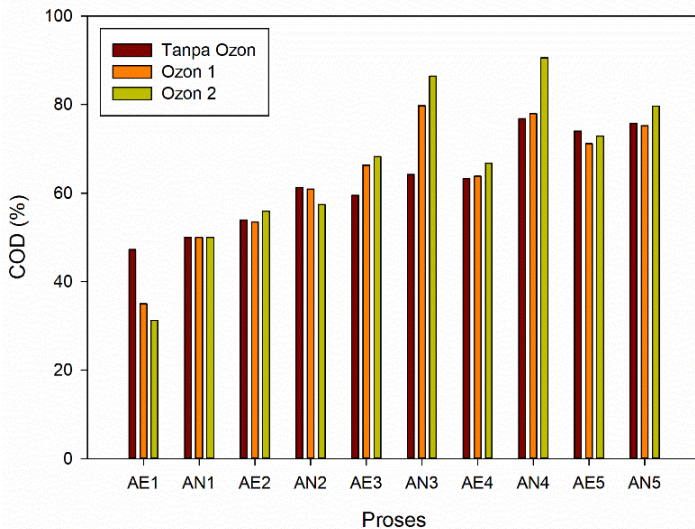
bakteri dalam mengolah lindi sebagai substratnya (Hajipour *et al.*, 2011). Persentase penyisihan konsentrasi COD untuk media Kaldnes K1 dapat dilihat pada Gambar 4.3 sampai Gambar 4.6.

Pada media Kaldnes K5 akumulasi efisiensi penyisihan COD saat siklus 4 pada reaktor tanpa *pre-treatment*, ozon 1, dan ozon 2 sebesar 65%, 80%, dan 90% dengan efisiensi penyisihan tiap siklus sebesar 42%, 47%, dan 71%. Sedangkan untuk akumulasi efisiensi penyisihan proses pada siklus 4 saat proses aerobik, yaitu sebesar 37%, 62%, dan 50% serta saat anoksik sebesar 15%, 16%, dan 34%. Efisiensi penyisihan tiap proses pada siklus 4 saat proses aerobik, yaitu sebesar 17, 25%, dan 15% serta saat proses anoksik sebesar 30%, 29%, dan 66%. Peningkatan yang stabil pada penyisihan COD menunjukkan bahwa proses nitrifikasi juga mulai stabil sehingga dapat menurunkan konsentrasi amonium lebih banyak dibandingkan dengan jumlah amonium yang terbentuk pada kondisi anoksik. Sehingga 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. Persentase penyisihan konsentrasi COD untuk media Kaldnes K5 dapat dilihat pada Gambar 4.7 sampai Gambar 4.10.

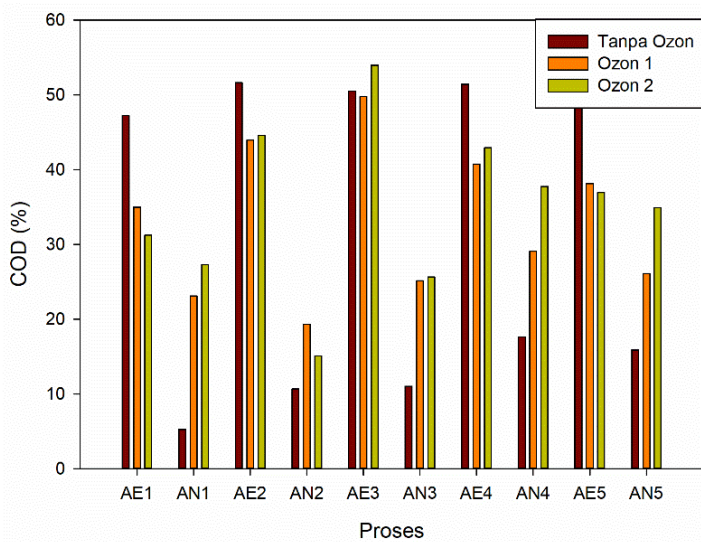
Hal yang sama juga diperlihatkan oleh reaktor dengan media Helix. Pada reaktor ini, akumulasi efisiensi penyisihan COD saat siklus 4 pada reaktor tanpa *pre-treatment*, ozon 1, dan ozon 2 sebesar 78%, 82%, dan 94% dengan efisiensi penyisihan tiap siklus sebesar 55%, 46%, dan 81%. Sedangkan akumulasi efisiensi penyisihan proses pada siklus 4 saat proses aerobik, yaitu sebesar 37%, 49%, dan 57% serta saat proses anoksik sebesar 28%, 31%, dan 38%. Efisiensi penyisihan tiap proses pada siklus 4 saat proses aerobik, yaitu sebesar 24%, 21%, dan 30% serta saat proses anoksik sebesar 41%, 31%, dan 73%. Sama seperti reaktor yang menggunakan media Kaldnes K1 dan Kaldnes K5, reaktor dengan media Helix ini juga menunjukkan rendahnya penyisihan COD pada saat aerobik. Hal ini dikarenakan saat *intermitten* lindi yang ada di dalam reaktor akan dikeluarkan sebanyak 1 L dan akan diganti atau dimasukkan lindi baru

sebanyak 1 L berdasarkan variasi *pre-treatment* sehingga konsentrasi lindi akan meningkat namun tidak seperti saat awal siklus 1. Persentase penyisihan konsentrasi COD untuk media Helix dapat dilihat pada Gambar 4.11 sampai Gambar 4.14.

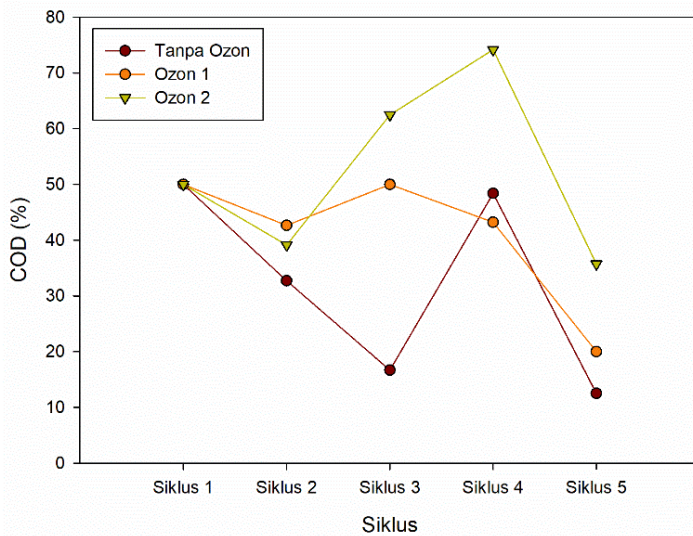
Pada semua media terlihat bahwa efisiensi akumulasi penyisihan COD dari tiap siklus saat setelah proses aerobik dan proses anoksik menunjukkan hasil yang cukup tinggi. Penyisihan COD tertinggi terjadi pada siklus 4 dan kemudian mengalami penurunan penyisihan COD pada siklus 5. Hal ini dikarenakan faktor beban permukaan dapat mempengaruhi pengolahan, dimana beban yang besar dapat menyebabkan tingkat efisiensi pengolahan semakin menurun (Aygün *et al.*, 2008). Selain itu juga dikarenakan mikroorganisme mengalami respirasi *endogenous* dimana mikroorganisme akan mendegradasi senyawa organik yang lebih sederhana yaitu mikroorganisme itu sendiri (saling mendegradasi satu dengan yang lainnya).



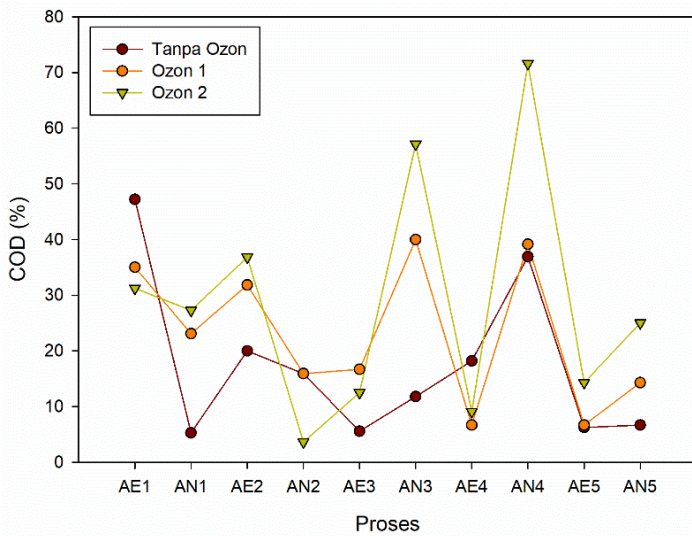
Gambar 4.3 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Siklus pada Media Kaldnes K1



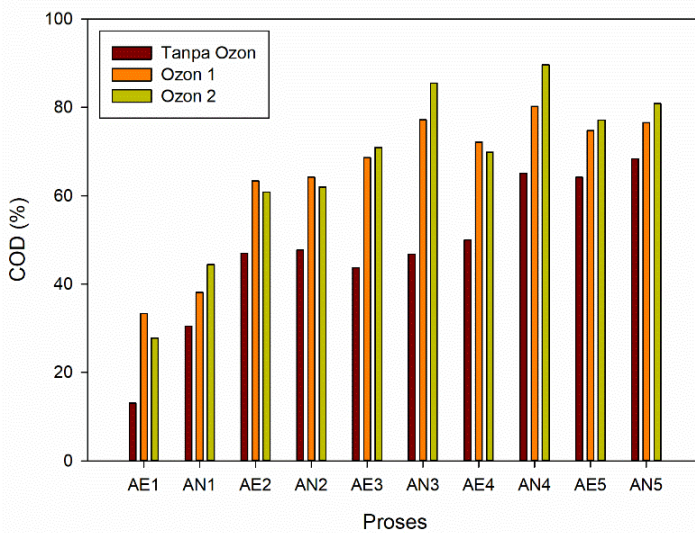
Gambar 4.4 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Proses pada Media Kaldnes K1



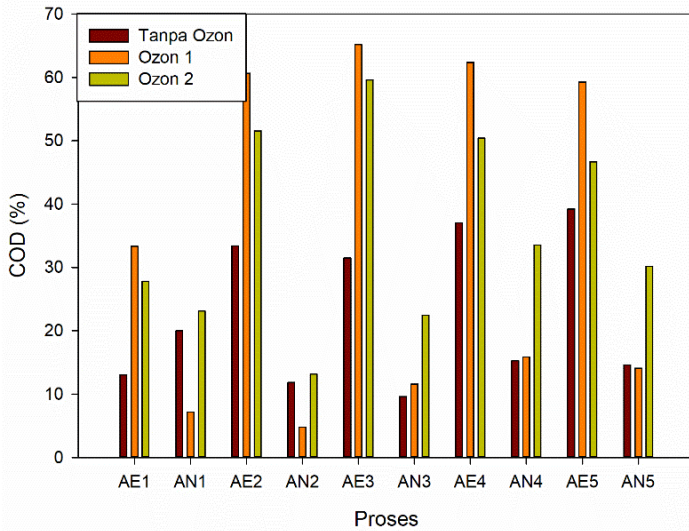
Gambar 4.5 Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Siklus pada Media Kaldnes K1



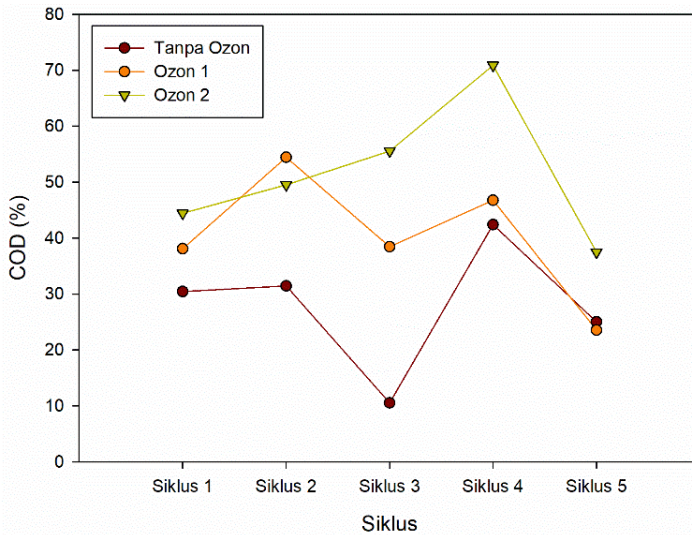
Gambar 4.6 Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Proses pada Media Kaldnes K1



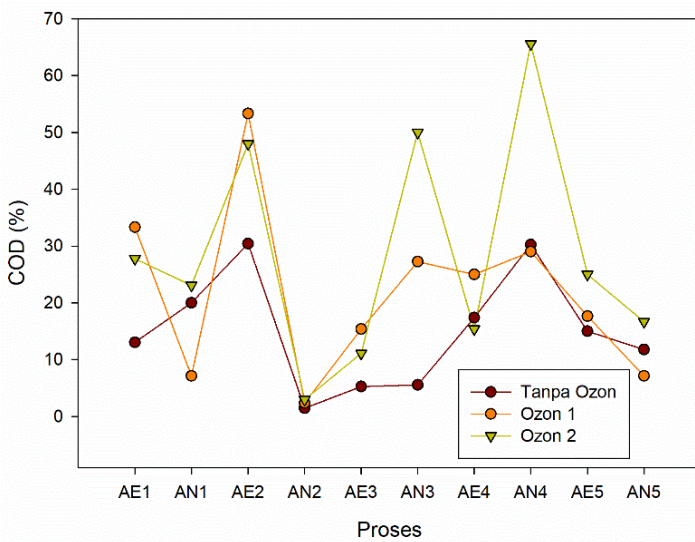
Gambar 4.7 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Siklus pada Media Kaldnes K5



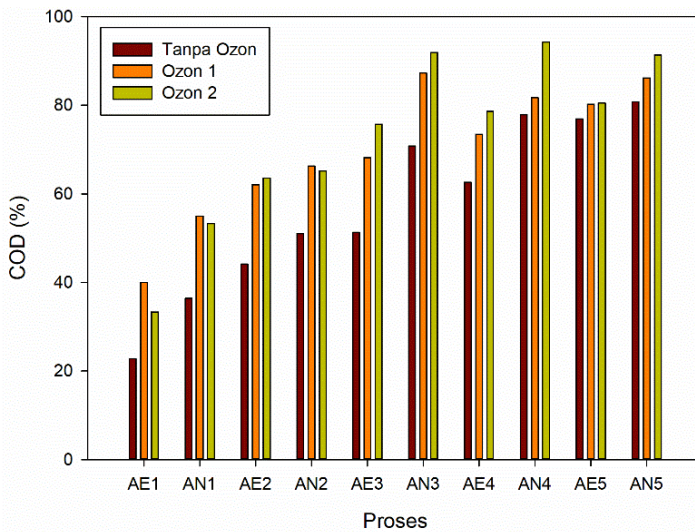
Gambar 4.8 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Proses pada Media Kaldnes K5



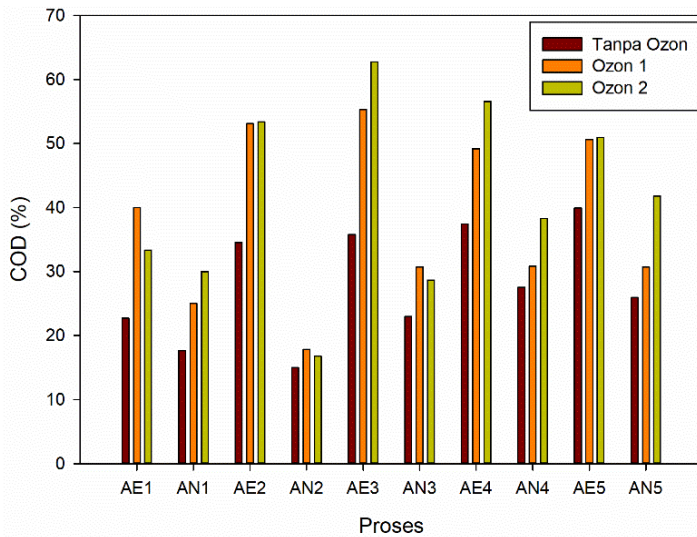
Gambar 4.9 Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Siklus pada Media Kaldnes K5



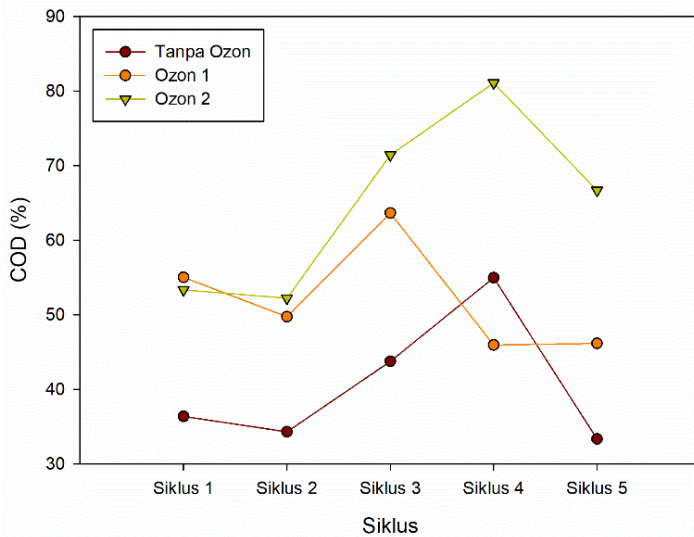
Gambar 4.10 Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Proses pada Media Kaldnes K5



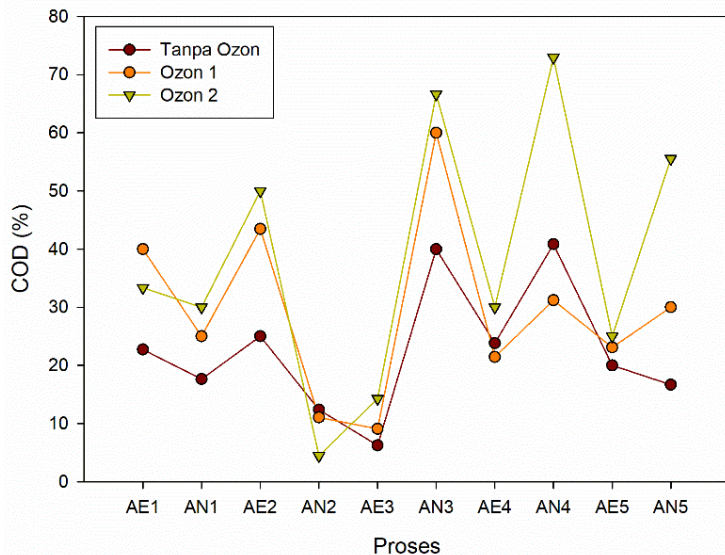
Gambar 4.11 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Siklus pada Media Helix



Gambar 4.12 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Proses pada Media Helix



Gambar 4.13 Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Siklus pada Media Helix



Gambar 4.14 Penyisihan Konsentrasi COD Tiap Proses pada Media Helix

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 media terjadi penurunan konsentrasi COD yang cukup baik. Akumulasi efisiensi penyisihan paling tinggi terjadi pada media Helix. Sedangkan akumulasi efisiensi penyisihan COD paling rendah terjadi pada media Kaldnes K5.

Peningkatan jumlah mikroorganisme sesuai dengan besarnya luas permukaan pada media yang digunakan (Said, 2005). Hal ini menunjukkan bahwa ukuran luas permukaan spesifik dan bentuk media memungkinkan terjadi pembentukan biofilm yang lebih banyak sehingga mampu meningkatkan penyisihan COD pada lindi (Al Kholif and Febrianti, 2019). Luas permukaan spesifik

media Kaldnes K1, Kaldnes K5, dan Helix sebesar $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$, $800 \text{ m}^2/\text{m}^3$, dan $720 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (Rusten *et al.*, 2006). Namun media Kaldnes K1 memiliki rata-rata total penyisihan lebih besar dibandingkan dengan media Kaldnes K5 meskipun luas permukaan spesifik media Kaldnes K5 lebih besar daripada media Kaldnes K1. Hal ini dikarenakan media Kaldnes K1 memiliki tinggi media yang lebih besar daripada media Kaldnes K5 yaitu 7,2 mm untuk K1 dan 3,5 mm untuk K5, selain itu pada reaktor MBBR dilakukan pengadukan yang dapat mempengaruhi pertumbuhan biofilm sehingga biofilm yang melekat pada media tersebut akan lebih terjaga (tidak mudah rusak saat resirkulasi) pada media K1.

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 CO_2 . 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 CO_2 sedangkan sisanya akan tetap menjadi zat organik non-sel di dalam lindi. Perhitungan *mass balance* COD dapat dilihat pada Tabel 4.5, sedangkan skema *mass balance* untuk masing-masing media dapat dilihat pada Gambar 4.15 sampai Gambar 4.17.

Tabel 4.5 Mass Balance COD Proses Biologis MBBR

Reaktor	Mass Balance COD												%Removal COD		
	IN (mg/L)	Massa IN (gr)	AE (mg/L)	Massa AE (gr)	AN (mg/L)	Massa AN (gr)	IN4 (mg/L)	Massa IN4 (gr)	AE4 (mg/L)	Massa AE4 (gr)	AN4 (mg/L)	Massa AN4 (gr)	IN	AE	AN
1K1	11453,60	80,18	8740,00	61,18	7353,60	51,48	2288	16,02	1872,00	13,10	1180,80	8,27	80%	79%	84%
2K1	8191,20	57,34	6458,40	45,21	4773,60	33,42	1560	10,92	1456,00	10,19	885,60	6,20	81%	77%	81%
3K1	6600,80	46,21	5070,40	35,49	3300,00	23,10	1144	8,01	1040,00	7,28	295,20	2,07	83%	79%	91%
1K5	10600,80	74,21	8856,80	62,00	7561,60	52,93	2392	16,74	1976,00	13,83	1377,60	9,64	77%	78%	82%
2K5	9431,20	66,02	6356,80	44,50	5461,60	38,23	1664	11,65	1248,00	8,74	885,60	6,20	82%	80%	84%
3K5	7853,60	54,98	5564,00	38,95	3886,40	27,20	1352	9,46	1144,00	8,01	393,60	2,76	83%	79%	90%
1H	9610,40	67,27	7664,00	53,65	5676,00	39,73	2184	15,29	1664,00	11,65	984,00	6,89	77%	78%	83%
2H	7889,60	55,23	5488,80	38,42	3804,80	26,63	1456	10,19	1144,00	8,01	787,20	5,51	82%	79%	79%
3H	6390,40	44,73	4184,00	29,29	2435,20	17,05	1040	7,28	728,00	5,10	196,80	1,38	84%	83%	92%

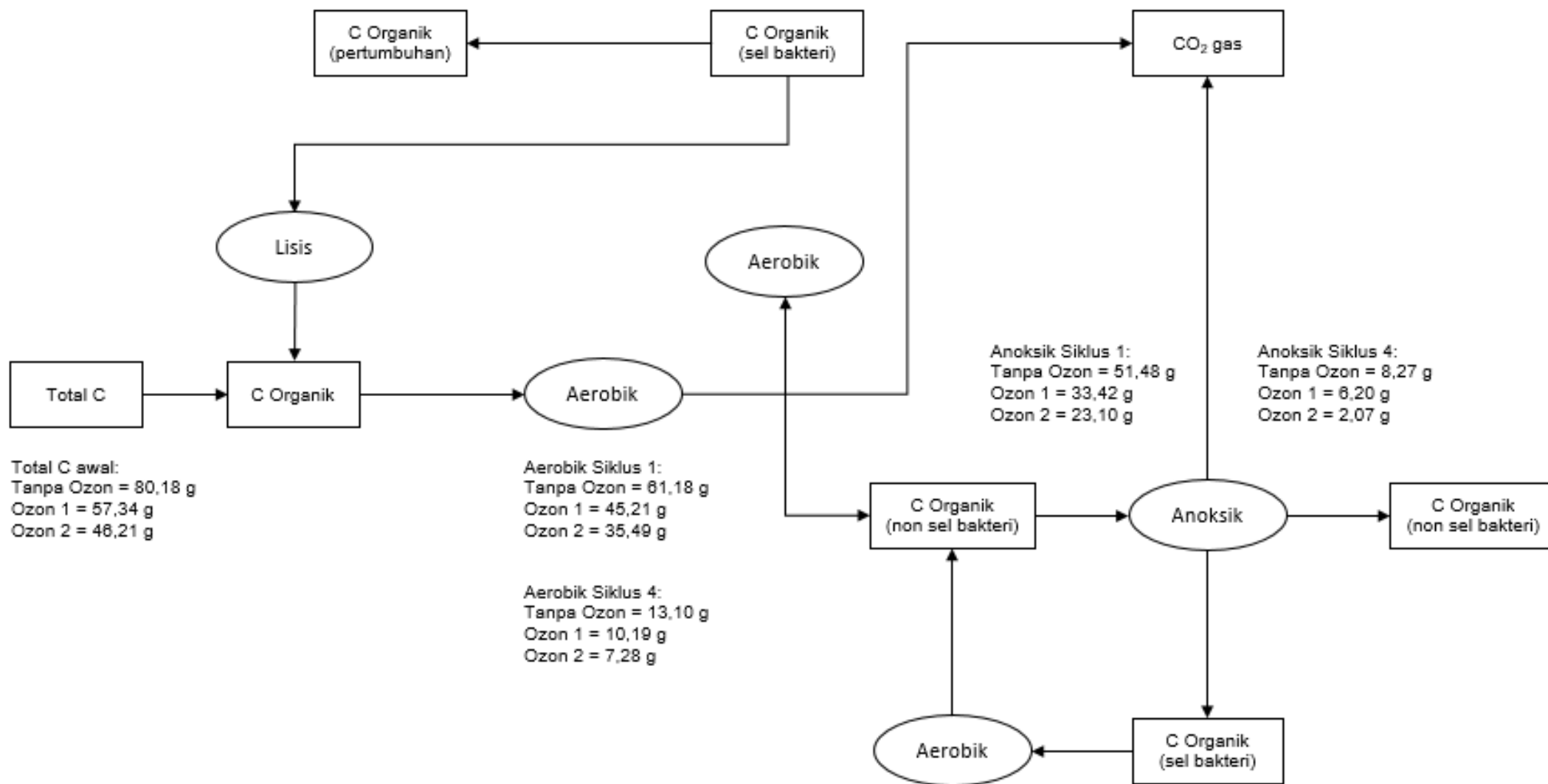
Keterangan:

1K1 : Tanpa Ozon Kaldnes K1
 2K1 : Ozon 1 Kaldnes K1
 3K1 : Ozon 2 Kaldnes K1

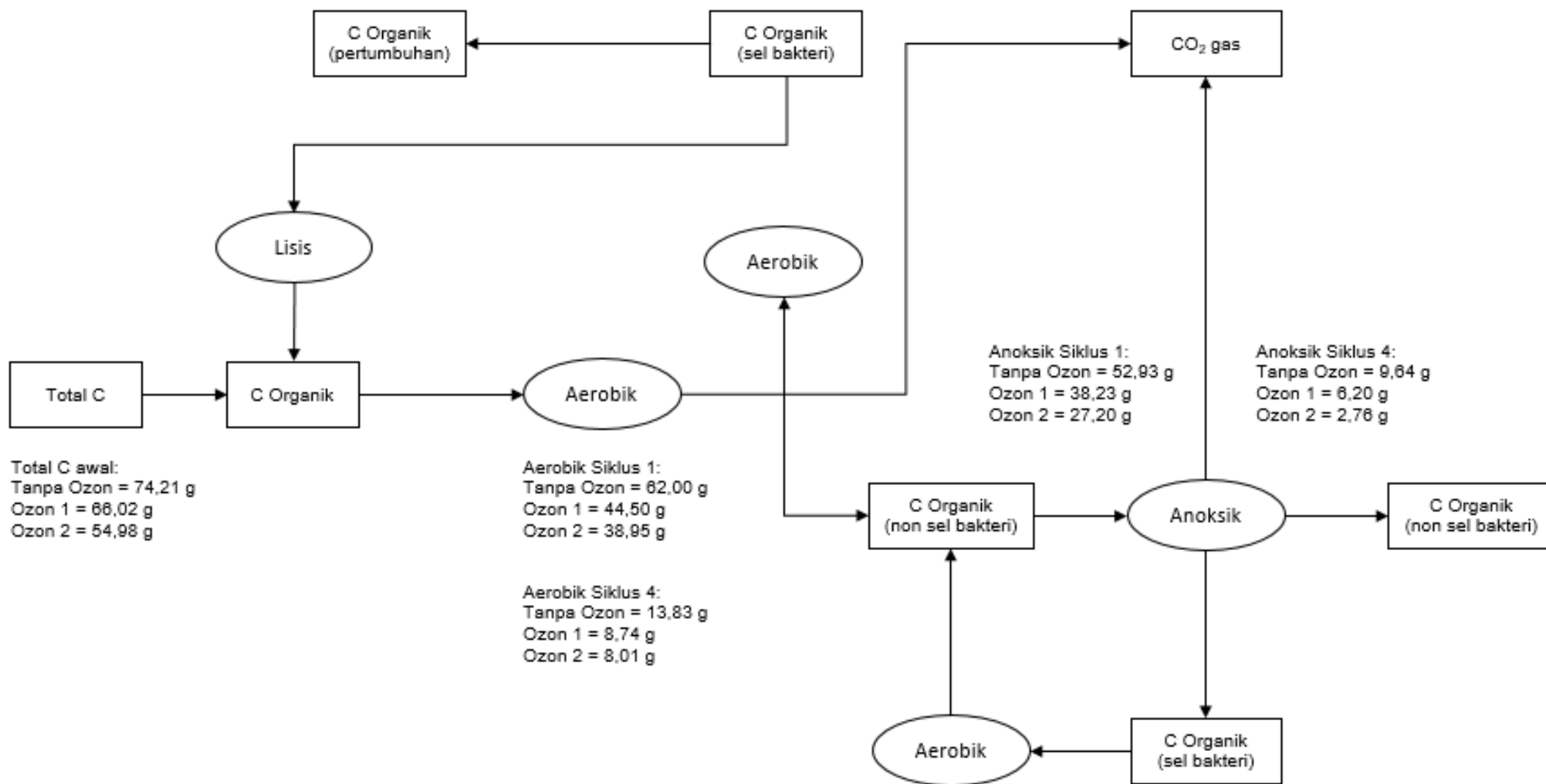
 1K5 : Tanpa Ozon Kaldnes K5
 2K5 : Ozon 1 Kaldnes K5
 3K5 : Ozon 2 Kaldnes K5

1H : Tanpa Ozon Helix
 2H : Ozon 1 Helix
 3H : Ozon 2 Helix

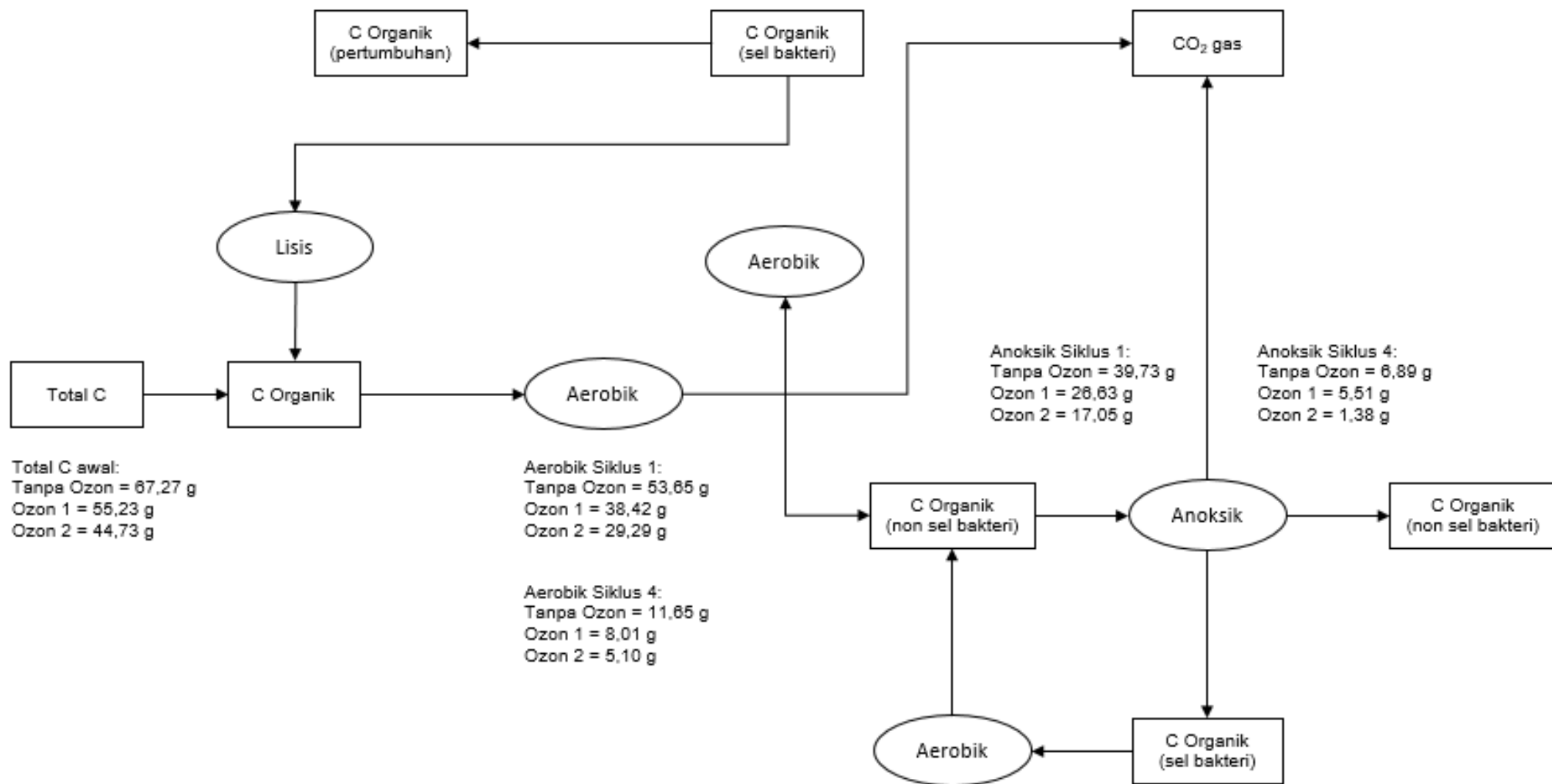
 IN : Intermitten
 AE : Aerobik
 AN : Anoksik



Gambar 4.15 Mass Balance COD pada Media Kaldnes K1



Gambar 4.16 Mass Balance COD pada Media Kaldnes K5



Gambar 4.17 Mass Balance COD pada Media Helix

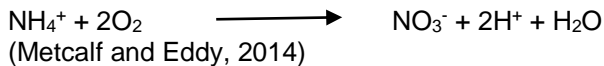
4.4.2 Hasil Penurunan Konsentrasi Nitrogen

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 atau saat *intermitten* (sebelum proses aerobik), setelah proses aerobik, dan setelah proses anoksik. Sedangkan untuk analisis TKN hanya dilakukan pada siklus 1 (hari ke-0), dan siklus 4 (hari ke-8). Analisis amonium-nitrogen dilakukan dengan menggunakan metode *Nessler*, analisis nitrat-nitrogen dilakukan dengan menggunakan metode *Brucine Sulfat*, analisis nitrit-nitrogen dengan menggunakan metode NED dan analisis TKN dilakukan dengan 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 nitrifikasi-denitrifikasi, penurunan nitrogen juga dapat diakibatkan oleh pengambilan senyawa nitrogen untuk proses pembentukan sel mikroorganisme (asimilasi) pada kedua kondisi tersebut (nitrifikasi-denitrifikasi).

4.4.2.1 Hasil Penurunan Konsentrasi Amonium-Nitrogen (NH₄-N)

Penurunan konsentrasi amonium-nitrogen dapat terjadi pada proses aerobik dan anoksik. Namun yang paling berpengaruh pada penurunan kadar amonium-nitrogen adalah adanya proses nitrifikasi (amonium-nitrogen diubah menjadi nitrat) yang melibatkan mikroorganisme dalam kondisi aerobik. Bentuk reaksi total oksidasi yang terjadi pada proses aerobik adalah sebagai berikut:



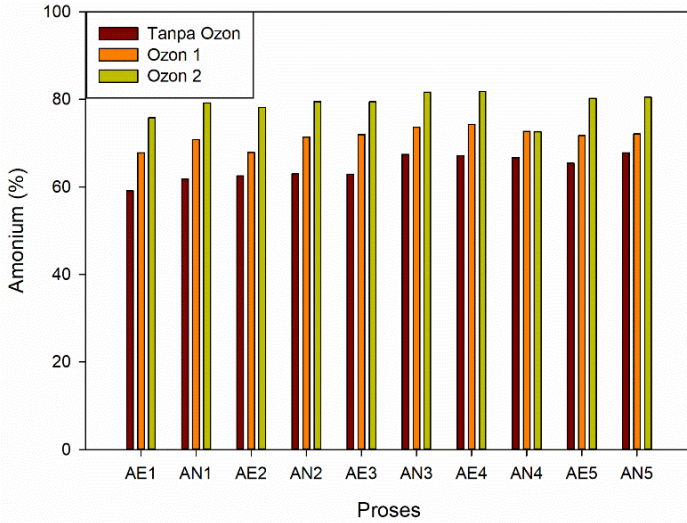
Proses nitrifikasi dapat berlangsung secara optimum dalam kondisi aerobik pada konsentrasi oksigen terlarut (DO) >2 mg/L (Al-Rekabi, 2015) dan pada pH berkisar antara 7,7 - 8,9 (Shammas, 1986). Selain itu, pada proses aerobik penyisihan konsentrasi amonium-nitrogen diakibatkan karena adanya *uptake* oleh mikroorganisme autotrof untuk pertumbuhan sel (asimilasi). Sedangkan pada proses anoksik penyisihan konsentrasi tersebut juga terjadi karena *uptake* oleh bakteri heterotrof.

Ketiga media menunjukkan bahwa penyisihan amonium-nitrogen terlihat mulai meningkat setelah memasuki siklus 2. Pada media Kaldnes K1, akumulasi efisiensi penyisihan saat siklus 4 pada reaktor tanpa *pre-treatment* (tanpa ozon), ozon 1, dan ozon 2, yaitu sebesar 67%, 73%, dan 73% dengan efisiensi penyisihan tiap siklus sebesar 6%, 4%, dan -38%. Sedangkan akumulasi efisiensi penyisihan proses pada siklus 4 saat proses aerobik, yaitu sebesar 30%, 37%, dan 48% serta saat proses anoksik sebesar 5%, 5%, dan -3%. Efisiensi penyisihan tiap proses pada siklus 4 saat proses aerobik, yaitu sebesar 7%, 9%, dan 8% serta saat proses anoksik sebesar -1%, -6%, dan -50%. Efisiensi penyisihan meningkat saat memasuki siklus 2, hal ini menunjukkan bahwa bakteri nitrifikasi telah mampu beradaptasi dengan kondisi di dalam reaktor MBBR sehingga proses nitrifikasi dapat berjalan dengan baik. Berdasarkan hasil analisis, penyisihan konsentrasi amonium-nitrogen akan optimum ketika HRT saat aerobik di dalam MBBR lebih dari 1,25 hari (>30 jam) akibat adanya proses nitrifikasi dan asimilasi mikroorganisme (Chen *et al.*, 2008). Persentase penyisihan konsentrasi amonium-nitrogen untuk media Kaldnes K1 dapat dilihat pada Gambar 4.18 sampai Gambar 4.21.

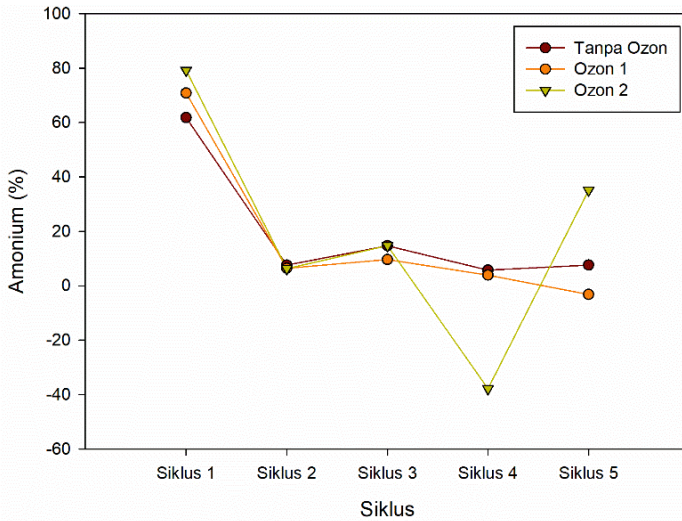
Pada media Kaldnes K5 akumulasi efisiensi penyisihan amonium-nitrogen saat siklus 4 pada reaktor tanpa *pre-treatment*, ozon 1, dan ozon 2 sebesar 64%, 72%, dan 78% dengan efisiensi penyisihan tiap siklus sebesar 2%, 1%, dan -4%. Sedangkan untuk akumulasi efisiensi penyisihan proses pada siklus 4 saat proses aerobik, yaitu sebesar 30%, 37%, dan 48% serta saat anoksik sebesar 5%, 5%, dan -3%. Efisiensi penyisihan tiap proses pada siklus 4 saat proses aerobik, yaitu sebesar 7, 32%, dan -25% serta saat proses anoksik sebesar -5%, -44%, dan 17%. Saat kondisi

aerobik efisiensi penyisihan amonium-nitrogen lebih besar dari pada saat kondisi anoksik. Hal ini dikarenakan penyisihan amonium-nitrogen melalui proses nitrifikasi yang dapat terjadi saat kondisi aerobik (Al-Rekabi, 2015). Namun saat kondisi anoksik tetap terjadi penyisihan amonium-nitrogen meskipun sangat rendah, hal yang diakibatkan oleh uptake bakteri heterotrof. Persentase penyisihan konsentrasi amonium-nitrogen untuk media Kaldnes K5 dapat dilihat pada Gambar 4.22 sampai Gambar 4.25.

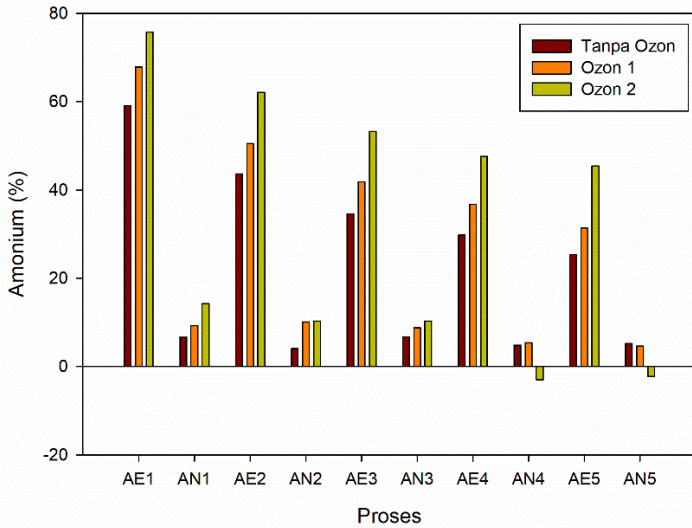
Hal yang sama juga diperlihatkan oleh reaktor dengan media Helix. Pada reaktor ini, akumulasi efisiensi penyisihan amonium-nitrogen saat siklus 4 pada reaktor tanpa *pre-treatment*, ozon 1, dan ozon 2 sebesar 67%, 72%, dan -21% dengan efisiensi penyisihan tiap siklus sebesar 23%, 4%, dan -8%. Sedangkan akumulasi efisiensi penyisihan proses pada siklus 4 saat proses aerobik, yaitu sebesar 31%, 37%, dan 15% serta saat proses anoksik sebesar 6%, 6%, dan 19%. Efisiensi penyisihan tiap proses pada siklus 4 saat proses aerobik, yaitu sebesar 24%, 7%, dan 24% serta saat proses anoksik sebesar -1%, -3%, dan -43%. Selama proses nitrifikasi berlangsung, terjadi proses reduksi senyawa organik akibat adanya proses oksidasi aerobik. Proses oksidasi terjadi ketika zat organik memberikan satu atau lebih elektronnya kepada akseptor elektron (oksigen) (Al-Rekabi, 2015). Sehingga penurunan efisiensi penyisihan amonium-nitrogen sebanding dengan peningkatan efisiensi penyisihan COD. Selain itu penurunan efisiensi penyisihan tersebut juga dikarenakan proses oksidasi amonium-nitrogen lebih kecil daripada degradasi nitrogen organik menjadi amonia (amonifikasi) sehingga terjadi penambahan konsentrasi amonium dari asimilasi bakteri nitrat-nitrit saat kondisi anoksik (Hibban *et al.*, 2016). Kestabilan penyisihan amonium-nitrogen berdasarkan pada gambar dibawah saat memasuki siklus 2 menunjukkan bahwa bakteri nitrifikasi telah mampu beradaptasi dengan kondisi di dalam reaktor MBBR sehingga proses nitrifikasi dapat berjalan dengan baik. Persentase penyisihan konsentrasi amonium-nitrogen untuk media Helix dapat dilihat pada Gambar 4.26 sampai Gambar 4.29.



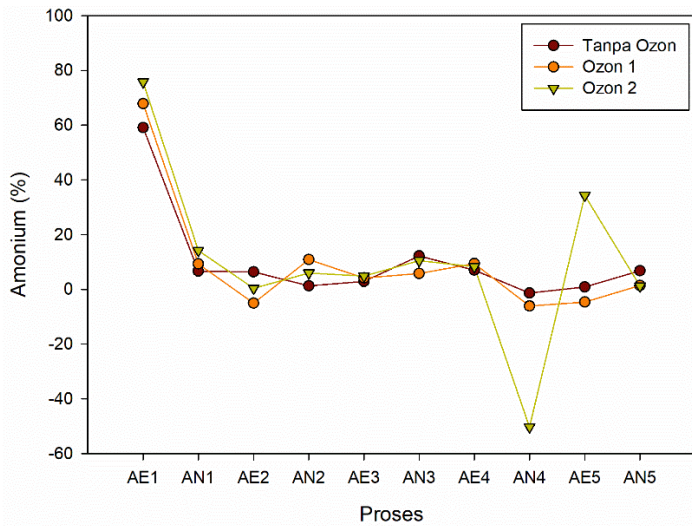
Gambar 4.18 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Kaldnes K1



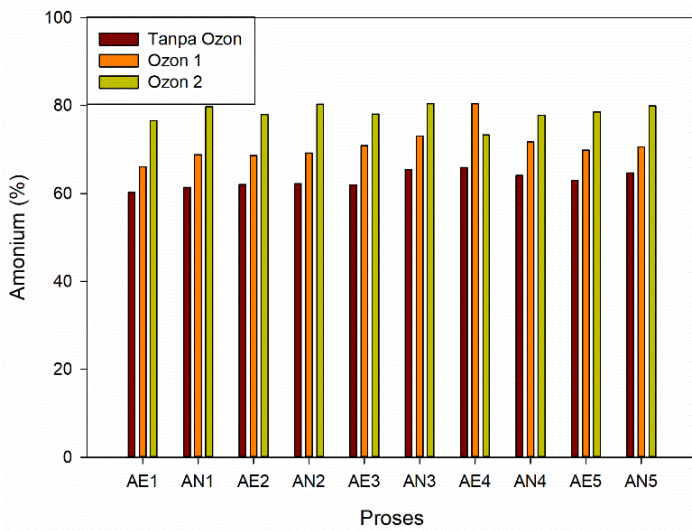
Gambar 4.19 Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Kaldnes K1



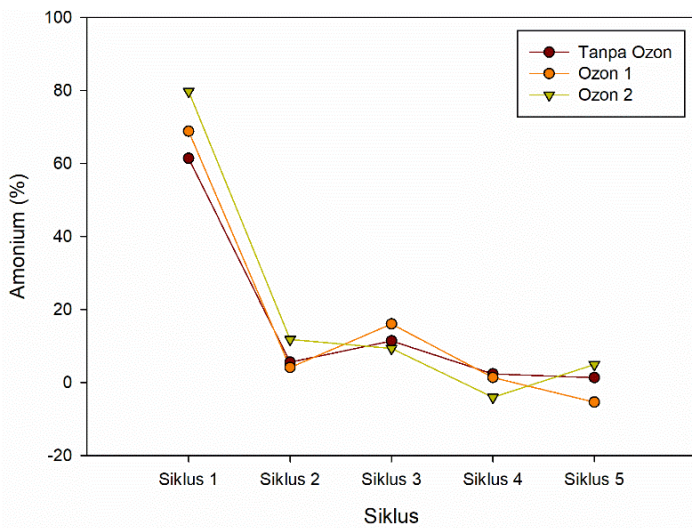
Gambar 4.20 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Proses pada Media Kaldnes K1



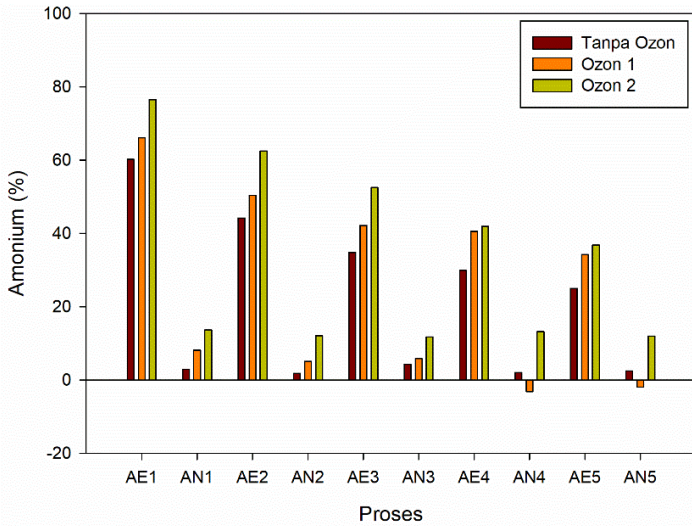
Gambar 4.21 Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Proses pada Media Kaldnes K1



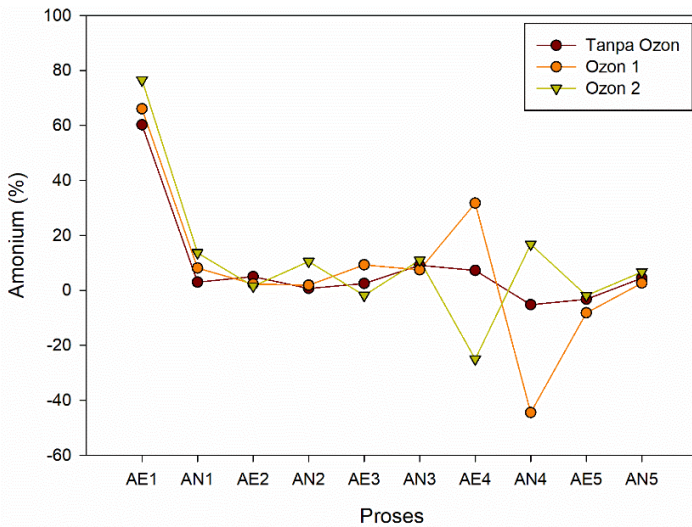
Gambar 4.22 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Kaldnes K5



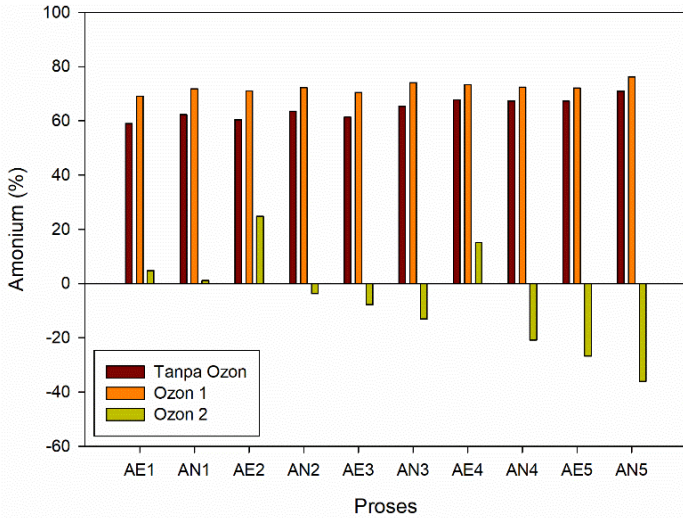
Gambar 4.23 Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Kaldnes K5



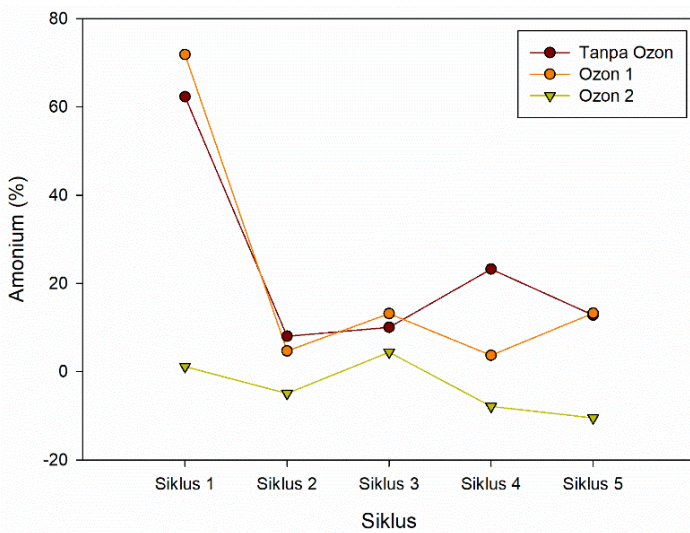
Gambar 4.24 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Proses pada Media Kaldnes K5



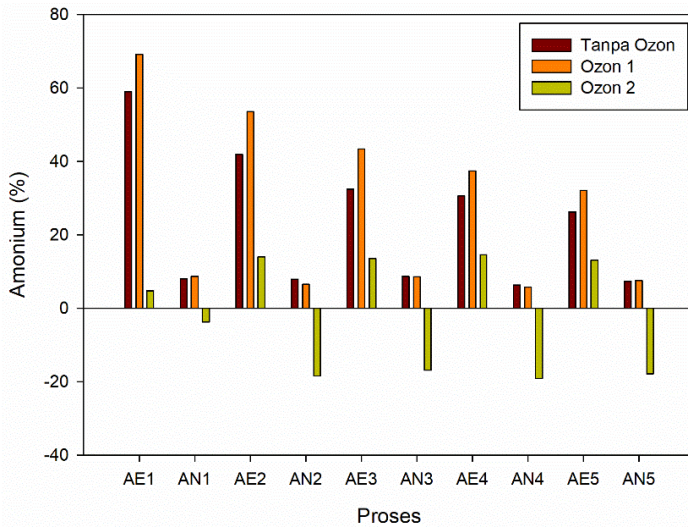
Gambar 4.25 Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Proses pada Media Kaldnes K5



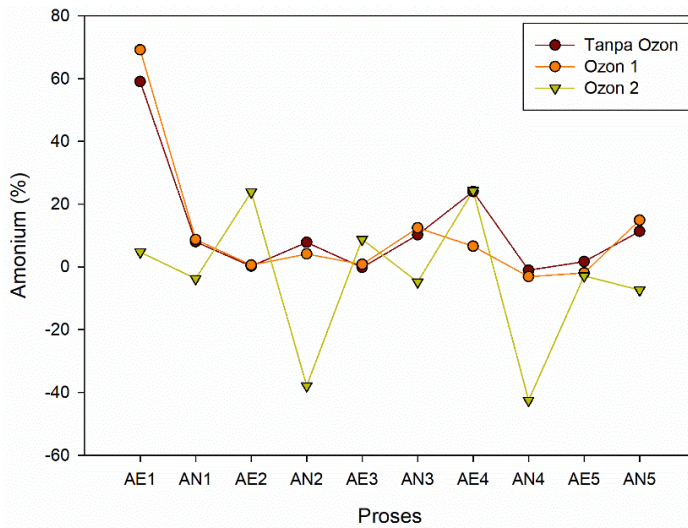
Gambar 4.26 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Helix



Gambar 4.27 Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Helix



Gambar 4.28 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Proses pada Media Helix



Gambar 4.29 Penyisihan Konsentrasi Amonium-Nitrogen Tiap Proses pada Media Helix

Berdasarkan hasil analisis tersebut, terlihat bahwa efisiensi penyisihan amonium-nitrogen paling rendah terjadi pada media Helix (media yang memiliki efisiensi penyisihan konsentrasi COD paling optimum). Produksi amonium akibat kondisi anoksik tidak bisa teratasi karena jumlah amonium yang terolah atau tersisihkan lebih kecil dibanding dengan amonium yang terbentuk, hal ini diakibatkan dari besarnya penyisihan COD yang dapat menurunkan penyisihan amonium.

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

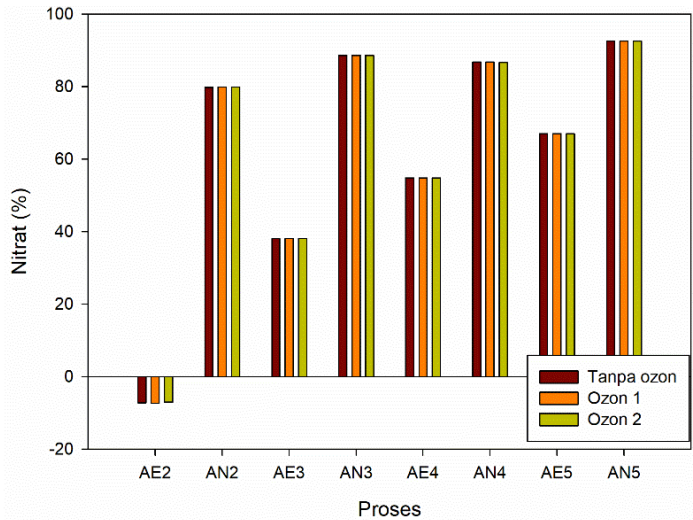
Denitrifikasi biologis yang terjadi di dalam reaktor yaitu dengan mengaplikasikan jenis proses denitrifikasi berupa *postanoxic denitrification*. Proses aerobik dilakukan di awal kemudian dilanjutkan dengan proses anoksik. Kondisi aerobik dilakukan untuk mempersiapkan kecukupan oksigen terikat yang dibutuhkan pada proses anoksik. Ketika *postanoxic denitrification* memiliki laju reaksi yang lebih lambat dibandingkan dengan *preanoxic denitrification*. Hal ini dikarenakan proses denitrifikasi yang hanya bergantung pada respirasi *endogeneous* untuk mendapatkan energi (Metcalf and Eddy, 2014). Proses denitrifikasi dapat berlangsung secara optimum dalam kondisi anoksik pada konsentrasi oksigen terlarut (DO) <2 mg/L (Kawan *et al.*, 2016) dan pada kondisi pH berkisar antara 7,0 - 8,5 (Metcalf and Eddy, 2014).

Di dalam reaktor MBBR, kondisi anoksik terjadi setelah kondisi aerobik berlangsung dengan mematikan aerator di dalam reaktor. Berdasarkan hasil analisis pada semua media, akumulasi efisiensi penyisihan nitrat-nitrogen saat aerobik lebih rendah dari pada saat anoksik. Hal ini dikarenakan nitrat-nitrogen merupakan hasil dari proses nitrifikasi saat kondisi aerobik, sedangkan penurunan konsentrasi nitrat-nitrogen dikarenakan oleh proses denitrifikasi pada kondisi anoksik (Suganda *et al.*, 2014). Pada media Kaldnes K1, akumulasi efisiensi penyisihan saat siklus 4 pada reaktor tanpa *pre-treatment* (tanpa ozon), ozon 1, dan ozon 2, yaitu sebesar 87%, 87%, dan 87% dengan efisiensi penyisihan tiap siklus sebesar 69%, 69%, dan 68%. Sedangkan akumulasi efisiensi penyisihan proses pada siklus 4 saat proses anoksik sebesar 77%, 77%, dan 77%. Efisiensi penyisihan tiap proses pada siklus 4 saat

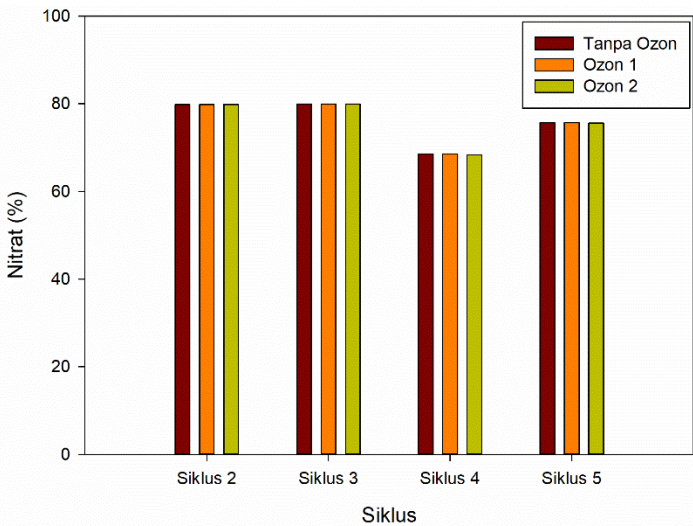
proses anoksik sebesar 71%, 71%, dan 70%. Efisiensi penyisihan meningkat saat memasuki siklus 2, hal ini menunjukkan bahwa bakteri denitrifikasi telah mampu beradaptasi dengan kondisi di dalam reaktor MBBR sehingga proses denitrifikasi dapat berjalan dengan baik. Persentase penyisihan konsentrasi nitrat-nitrogen untuk media Kaldnes K1 dapat dilihat pada Gambar 4.30 sampai Gambar 4.33.

Pada media Kaldnes K5 akumulasi efisiensi penyisihan nitrat-nitrogen saat siklus 4 pada reaktor tanpa *pre-treatment*, ozon 1, dan ozon 2 sebesar 87%, 87%, dan 87% dengan efisiensi penyisihan tiap siklus sebesar 68%, 68%, dan 69%. Sedangkan untuk akumulasi efisiensi penyisihan proses pada siklus 4 saat anoksik sebesar 77%, 77%, dan 77%. Efisiensi penyisihan tiap proses pada siklus 4 saat proses anoksik sebesar 70%, 71%, dan 71%. Saat kondisi aerobik efisiensi penyisihan nitrat-nitrogen lebih rendah dari pada saat kondisi anoksik. Hal ini dikarenakan penyisihan nitrat-nitrogen melalui proses denitrifikasi yang dapat terjadi saat kondisi anoksik (Metcalf and Eddy, 2014). Pada media Kaldnes K1 dan Kaldnes K5 memiliki efisiensi penyisihan nitrat-nitrogen yang hampir sama, hal ini dikarenakan tidak stabilnya pembentukan nitrat-nitrogen saat proses nitrifikasi. Persentase penyisihan konsentrasi nitrat-nitrogen untuk media Kaldnes K5 dapat dilihat pada Gambar 4.34 sampai Gambar 4.37.

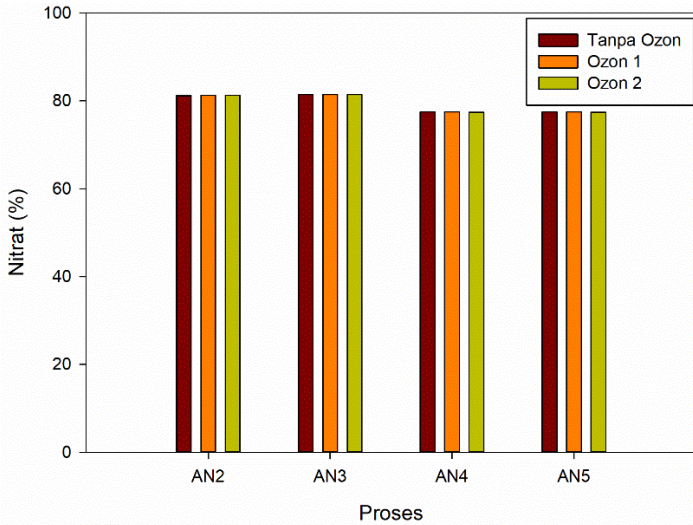
Hal yang sama juga diperlihatkan oleh reaktor dengan media Helix. Pada reaktor ini, akumulasi efisiensi penyisihan amonium-nitrogen saat siklus 4 pada reaktor tanpa *pre-treatment*, ozon 1, dan ozon 2 sebesar 86%, 87%, dan 89% dengan efisiensi penyisihan tiap siklus sebesar 68%, 68%, dan 55%. Sedangkan akumulasi efisiensi penyisihan proses pada siklus 4 saat proses anoksik sebesar 77%, 77%, dan 73%. Efisiensi penyisihan tiap proses pada siklus 4 saat proses anoksik sebesar 70%, 70%, dan 61%. Pada media Helix memiliki efisiensi penyisihan lebih besar dari pada media lainnya. Hal ini dikarenakan proses denitrifikasi telah berjalan dengan stabil, namun nitrat yang terbentuk saat proses nitrifikasi sangat kecil. Persentase penyisihan konsentrasi nitrat-nitrogen untuk media Helix dapat dilihat pada Gambar 4.38 sampai Gambar 4.41.



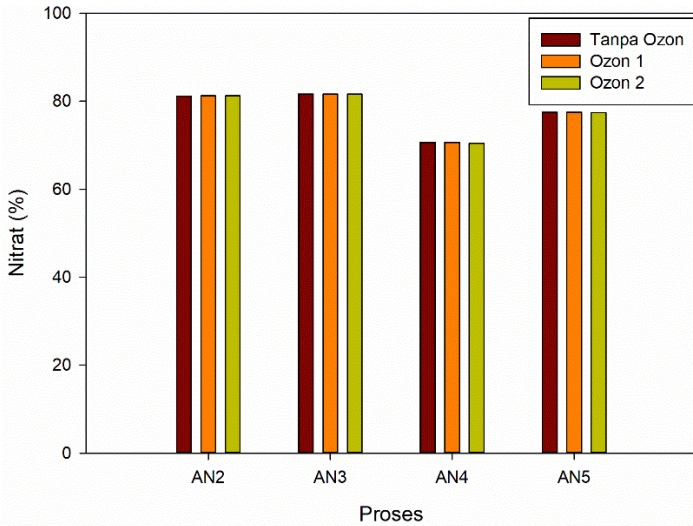
Gambar 4.30 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Kaldnes K1



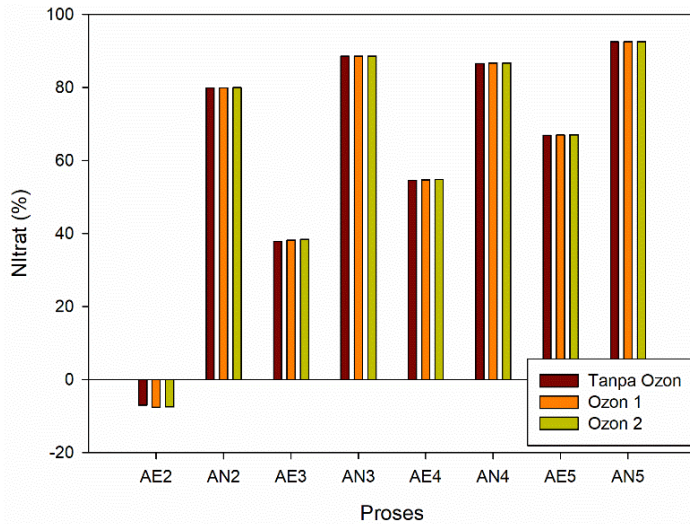
Gambar 4.31 Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Kaldnes K1



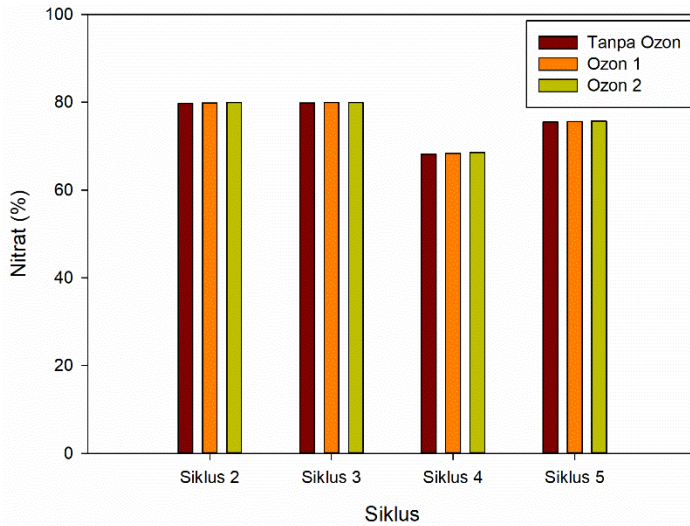
Gambar 4.32 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Proses pada Media Kaldnes K1



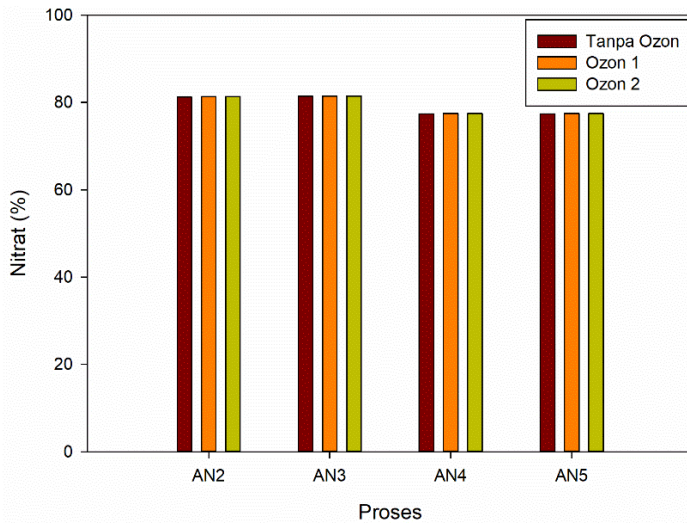
Gambar 4.33 Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Proses pada Media Kaldnes K1



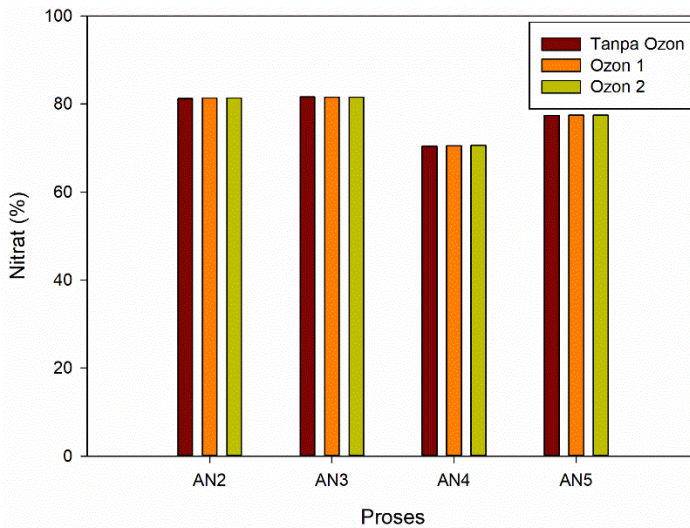
Gambar 4.34 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Kaldnes K5



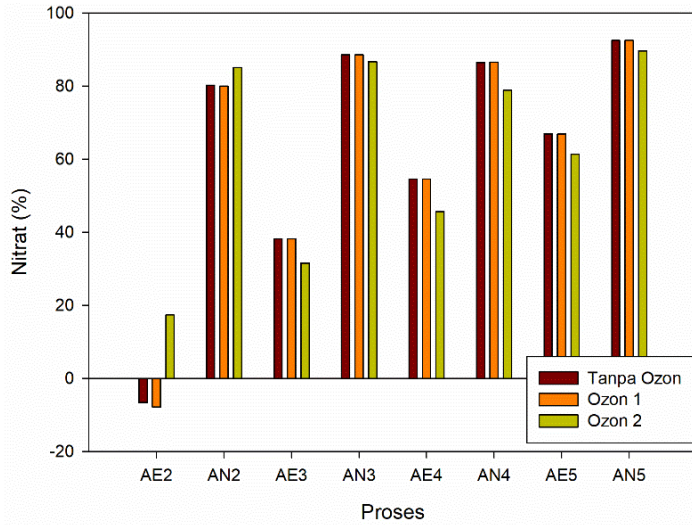
Gambar 4.35 Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Kaldnes K5



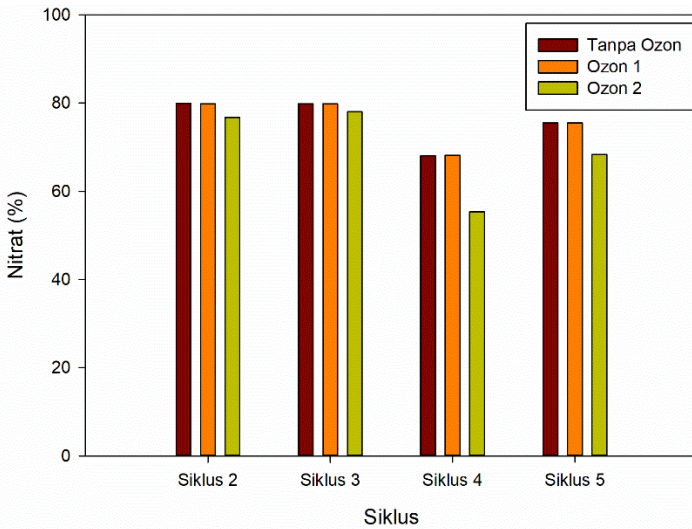
Gambar 4.36 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Proses pada Media Kaldnes K5



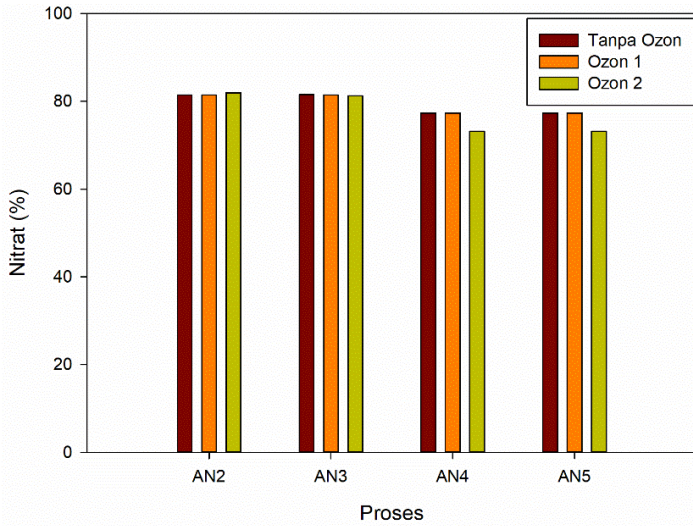
Gambar 4.37 Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Proses pada Media Kaldnes K5



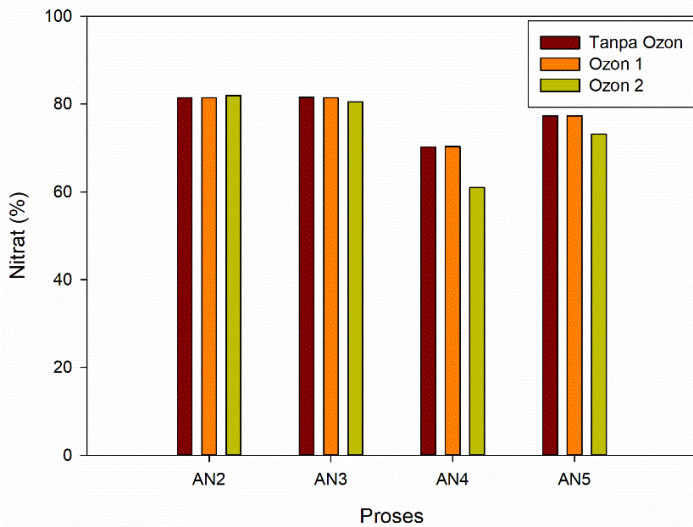
Gambar 4.38 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Helix



Gambar 4.39 Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Siklus pada Media Helix



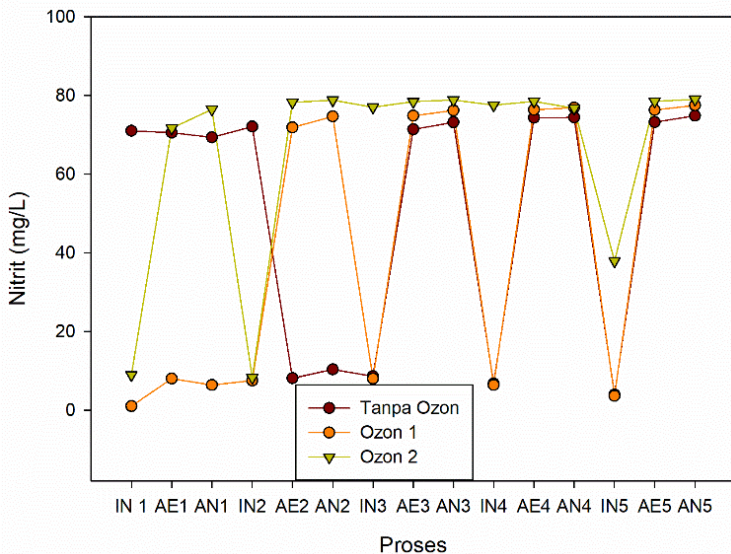
Gambar 4.40 Akumulasi Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Proses pada Media Helix



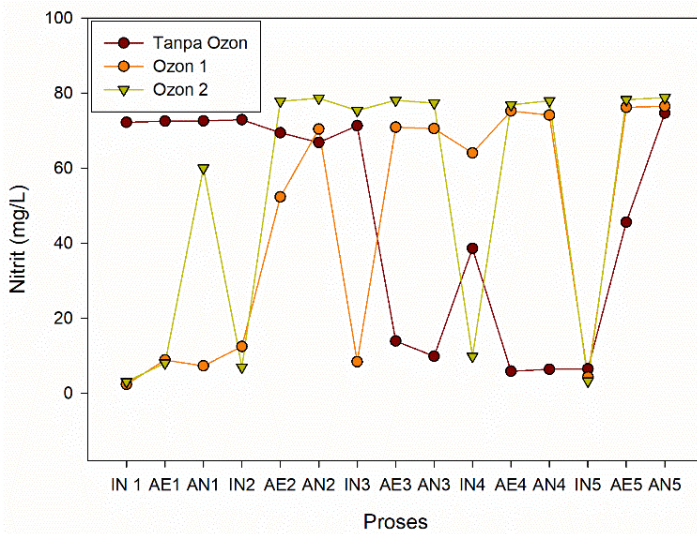
Gambar 4.41 Penyisihan Konsentrasi Nitrat-Nitrogen Tiap Proses pada Media Helix

4.4.2.3 Hasil Penurunan Konsentrasi Nitrit-Nitrogen ($\text{NO}_2\text{-N}$)

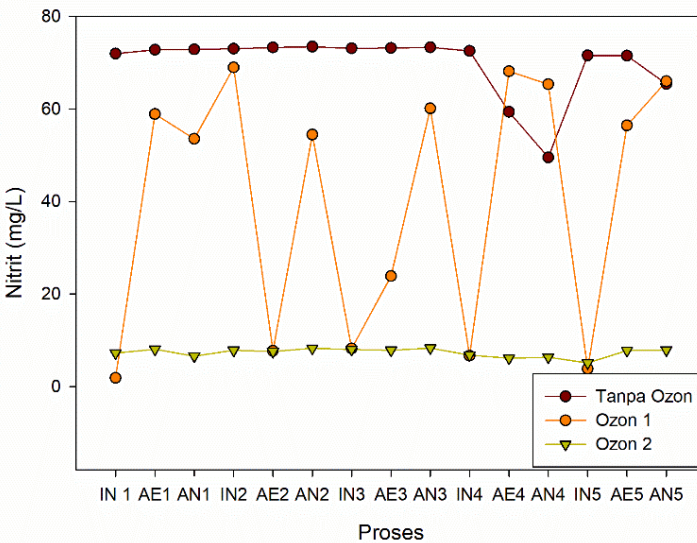
Nitrit-nitrogen merupakan fase transisi dari perubahan amonium-nitrogen menjadi nitrat-nitrogen melalui proses nitrifikasi. Pada penelitian ini parameter nitrit-nitrogen menjadi salah satu parameter tambahan untuk memastikan berlangsungnya proses nitrifikasi di dalam reaktor MBBR, sehingga analisis nitrit-nitrogen dilakukan bersamaan dengan analisis amonium-nitrogen dan nitrat-nitrogen. Sehingga pengambilan sampel analisis untuk nitrit-nitrogen dilakukan pada saat setiap awal siklus atau saat *intermitten* (sebelum proses aerobik), setelah proses aerobik, dan setelah proses 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 pada setiap media dapat dilihat pada Gambar 4.42 sampai Gambar 4.44.



Gambar 4.42 Konsentrasi Nitrit-Nitrogen pada Media Kaldnes K1



Gambar 4.43 Konsentrasi Nitrit-Nitrogen pada Media Kaldnes K5



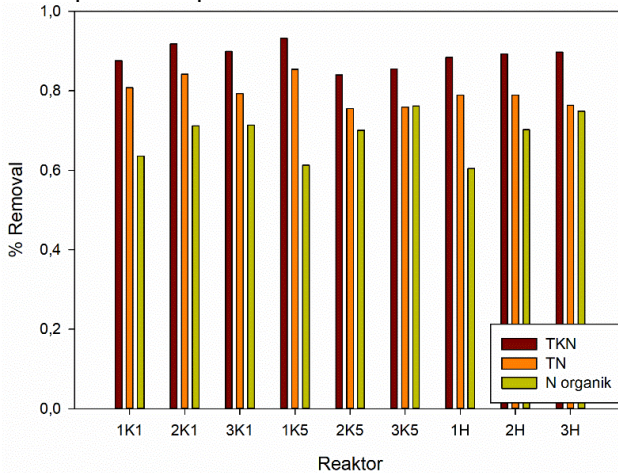
Gambar 4.44 Konsentrasi Nitrit-Nitrogen pada Media Helix

Berdasarkan hasil analisis tersebut, ketiga media menunjukkan peningkatan dan penurunan konsentrasi nitrit-nitrogen terjadi secara fluktuatif. Kecenderungan terjadi penurunan konsentrasi nitrit-nitrogen pada saat *intermitten* (proses sebelum aerobik) dan setelah proses aerobik. Penurunan konsentrasi nitrit-nitrogen tersebut terjadi karena pada kondisi aerobik terjadi proses nitrifikasi dimana amonium didegradasi menjadi nitrit dan kemudian nitrit akan didegradasi menjadi nitrat oleh bakteri nitrifikasi. Saat kondisi aerobik terjadi proses nitrifikasi yang kurang maksimal sehingga dapat menyebabkan peningkatan dan penurunan konsentrasi nitrit-nitrogen. Peningkatan konsentrasi nitrit-nitrogen saat kondisi aerobik dikarenakan proses nitrifikasi hanya sampai pada tahap degradasi amonium menjadi nitrit dan belum didegradasi menjadi nitrat. Sedangkan penurunan konsentrasi nitrit-nitrogen saat kondisi aerobik dikarenakan karena rendahnya proses degradasi konsentrasi amonium-nitrogen menjadi nitrit-nitrogen. Pada kondisi anoksik terjadi peningkatan konsentrasi nitrit-nitrogen sebagai akibat terbentuknya kembali amonium-nitrogen yang kemudian diubah menjadi nitrit-nitrogen. Hal ini menunjukkan bahwa produksi amonium-nitrogen pada kondisi anoksik tidak lebih banyak dibandingkan dengan jumlah amonium-nitrogen yang diolah melalui proses nitrifikasi sehingga jumlah nitrit-nitrogen yang terbentuk pun menjadi lebih sedikit.

4.4.2.4 Hasil Penurunan Konsentrasi *Total Kjeldahl Nitrogen* (TKN), Total Nitrogen (TN), N Organik, dan *Mass Balance Nitrogen*

Total nitrogen merupakan gabungan dari *Total Kjeldahl Nitrogen* (TKN) dan nitrat-nitrogen, sedangkan nitrogen organik merupakan gabungan dari *Total Kjeldahl Nitrogen* (TKN) dan amonium-nitrogen. Penurunan konsentrasi total nitrogen dan nitrogen organik paling optimum terjadi pada media Kaldnes K5 dengan efisiensi penyisihan sebesar 85% dan 61% pada reaktor tanpa ozon, 75% dan 70% pada reaktor ozon 1 serta 76% dan 76% pada reaktor ozon 2. Hal ini sebanding dengan penurunan konsentrasi amonium dan nitrat yang juga optimum pada media tersebut. Sedangkan penurunan konsentrasi total nitrogen dan nitrogen organik yang paling rendah terjadi pada media Helix dengan

efisiensi penyisihan sebesar 79% dan 60% pada reaktor tanpa ozon, 79% dan 70% pada reaktor ozon 1 serta 76% dan 75% pada reaktor ozon 2. Persentase penyisihan konsentrasi TKN, TN, dan N organik dapat dilihat pada Gambar 4.45.



Gambar 4.45 Penyisihan Konsentrasi TKN, TN, dan N Organik

Melalui removal total nitrogen dapat ditentukan *mass balance* dari siklus nitrogen. Melalui *mass balance* terlihat penyisihan konsentrasi nitrogen pada proses aerobik maupun anoksik. Pada kondisi aerobik terjadi removal amonium karena adanya proses nitrifikasi amonium menjadi nitrat dan proses asimilasi oleh sel bakteri autotrofik (*uptake*), yang ditunjukkan oleh siklus (1). Removal ammonia-nitrogen karena proses nitrifikasi ditunjukkan oleh siklus (2). Siklus (3) menunjukkan asimilasi ammonia oleh sel bakteri autotrofik (*uptake*) yang berupa ion ammonium (NH_4^+). Siklus (4) menunjukkan total removal nitrat-nitrogen karena proses denitrifikasi menjadi N_2 gas dan *uptake* anoksik. Pada kondisi anoksik terjadi proses denitrifikasi nitrat menjadi N_2 gas dengan memanfaatkan bakteri heterotrofik, yang ditunjukkan pada siklus (5). Siklus (6) menunjukkan adanya proses *uptake* nitrat oleh sel bakteri akibat kondisi anoksik di dalam reaktor (Metcalf and Eddy, 2014). Perhitungan *mass balance* nitrogen dapat dilihat pada Tabel 4.6, sedangkan untuk skema *mass balance* pada setiap media dapat dilihat pada Gambar 4.46 sampai Gambar 4.48.

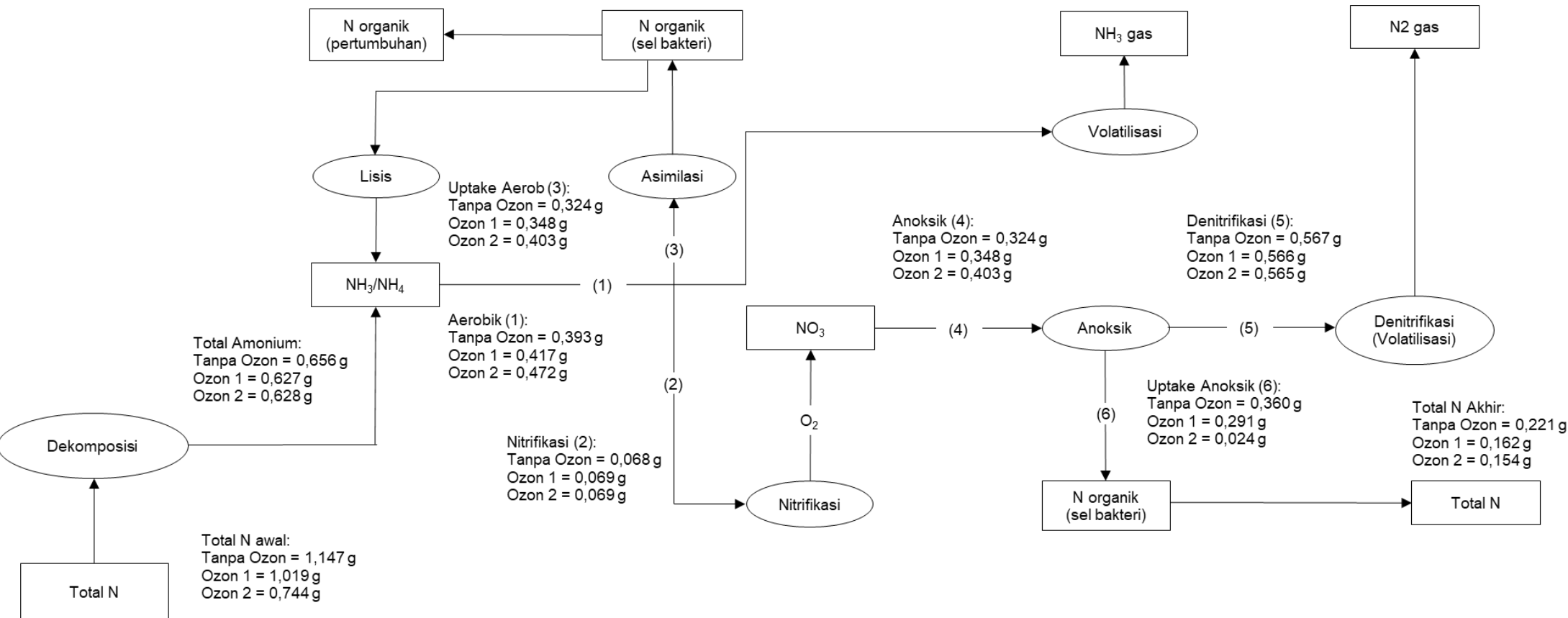
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Tabel 4.6 Perhitungan *Mass Balance Nitrogen*

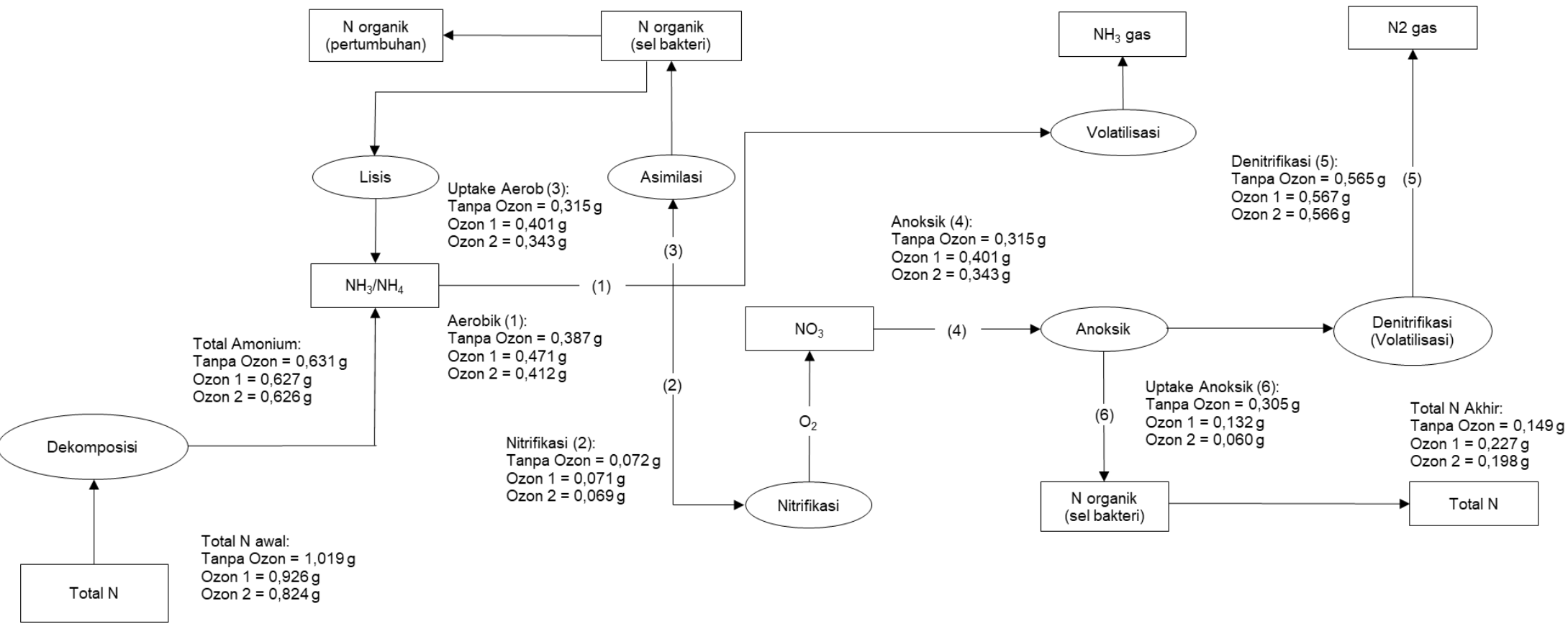
Media	Pre-treatment	Massa (g)												
		Total NH ₄ -N	Total N Awal	Total N Akhir	Removal Amonium					Removal Nitrat				
					Aerobi+ Anoksik	Aerobik	Nitrifikasi	Uptake aerob	Uptake Anoksik	Aerobik	Anoksik	Denitrifikasi	Uptake anoksik	Removal Total N
K1	Tanpa Ozon	0,656	1,147	0,221	0,752	0,393	0,068	0,324	0,360	0,068	0,324	0,567	0,360	0,567
	Ozon 1	0,627	1,019	0,162	0,709	0,417	0,069	0,348	0,291	0,069	0,348	0,566	0,291	0,566
	Ozon 2	0,628	0,744	0,154	0,496	0,472	0,069	0,403	0,024	0,069	0,403	0,565	0,024	0,565
K5	Tanpa Ozon	0,631	1,019	0,149	0,692	0,387	0,072	0,315	0,305	0,072	0,315	0,565	0,305	0,565
	Ozon 1	0,627	0,926	0,227	0,604	0,471	0,071	0,401	0,132	0,071	0,401	0,567	0,132	0,567
	Ozon 2	0,626	0,824	0,198	0,472	0,412	0,069	0,343	0,060	0,069	0,343	0,566	0,060	0,566
H	Tanpa Ozon	0,708	0,834	0,176	0,514	0,417	0,071	0,346	0,096	0,071	0,346	0,562	0,096	0,562
	Ozon 1	0,654	0,773	0,163	0,476	0,432	0,073	0,360	0,043	0,073	0,360	0,567	0,043	0,567
	Ozon 2	0,600	0,685	0,162	0,299	0,206	0,128	0,078	0,093	0,128	0,078	0,429	0,093	0,429

Pre-treatment	Removal Amonium (%)			
	Aerobik	Nitrifikasi	Uptake Aerobik	Uptake Anoksik
Media Kaldnes K1				
Tanpa Ozon	59,88	10,42	49,46	54,91
Ozon 1	66,53	11,07	55,46	46,47
Ozon 2	75,12	10,93	64,19	3,89
Media Kaldnes K5				
Tanpa Ozon	61,23	11,42	49,81	48,32
Ozon 1	75,16	11,29	63,88	21,09
Ozon 2	65,77	10,99	54,78	9,59
Media Kaldnes H				
Tanpa Ozon	58,91	10,06	48,85	13,62
Ozon 1	66,16	11,10	55,06	6,61
Ozon 2	34,36	21,32	13,04	15,55

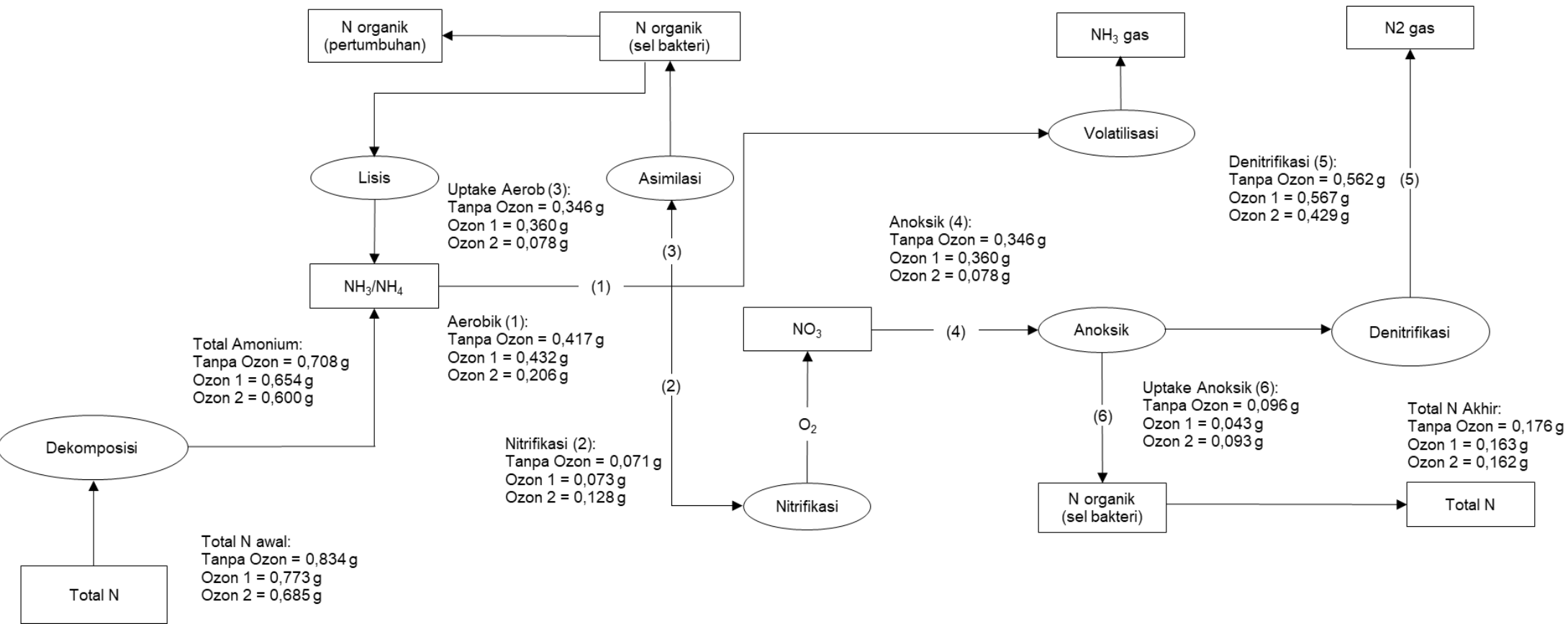
Pre-treatment	Removal Nitrat (%)			
	Aerobik	Anoksik	Denitrifikasi	Uptake Anoksik
Media Kaldnes K1				
Tanpa Ozon	8,53	96,52	65,15	31,38
Ozon 1	8,67	93,70	65,12	28,59
Ozon 2	8,58	68,36	65,07	3,28
Media Kaldnes K5				
Tanpa Ozon	9,05	95,00	65,06	29,93
Ozon 1	8,84	79,33	65,05	14,28
Ozon 2	8,59	72,35	65,06	7,29
Media Kaldnes H				
Tanpa Ozon	8,98	76,53	64,97	11,56
Ozon 1	9,07	70,57	64,98	5,59
Ozon 2	22,58	75,49	61,86	13,63



Gambar 4.46 Mass Balance Nitrogen pada Media Kaldnes K1



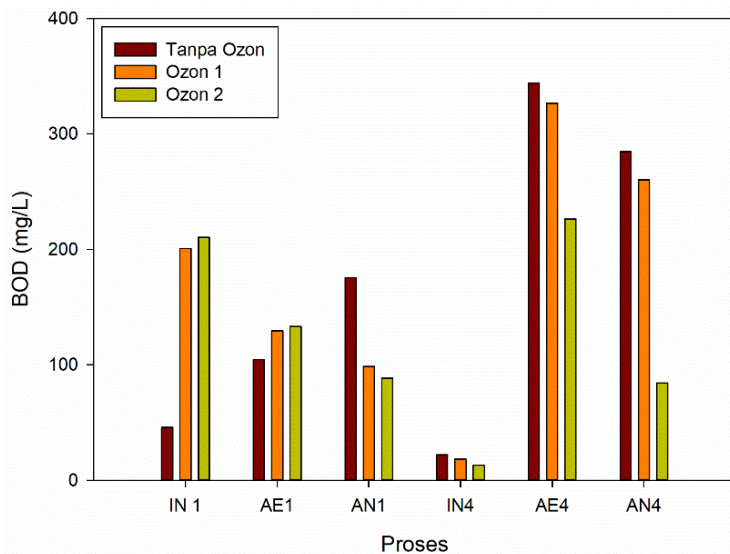
Gambar 4.47 Mass Balance Nitrogen pada Media Kaldnes K5



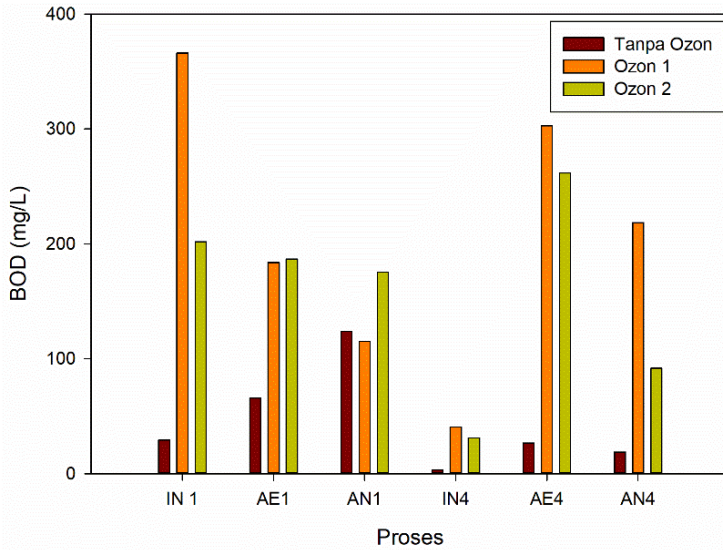
Gambar 4.48 Mass Balance Nitrogen pada Media Helix

4.4.3 Analisis BOD₅ dan BOD₅/COD

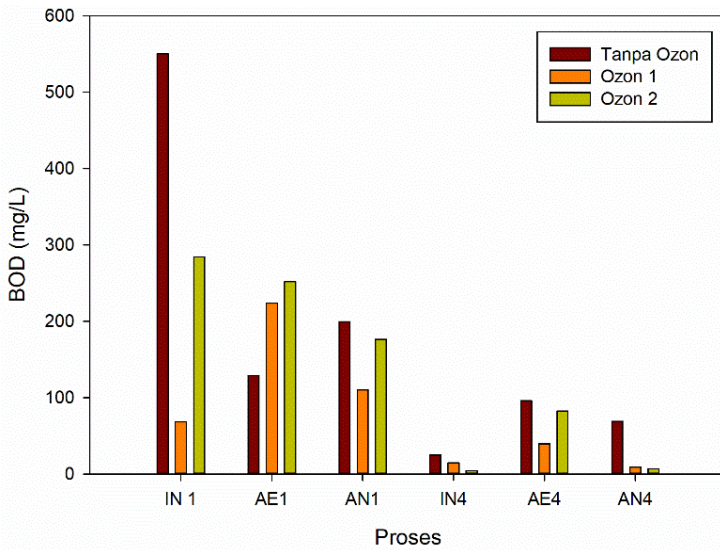
Analisis BOD₅ merupakan parameter tambahan pada penelitian ini sehingga dilakukan analisis pada siklus 1 (hari ke-0), dan siklus 4 (hari ke-8). Nilai BOD₅ yang digunakan pada penelitian ini adalah nilai BOD₅. Berdasarkan hasil analisis, peningkatan dan penurunan konsentrasi BOD₅ terjadi secara fluktuatif. Peningkatan BOD₅ dikarenakan adanya peningkatan efisiensi penyisihan zat organik (COD terdegradasi menjadi zat organik BOD₅ atau *biodegradable*). Konsentrasi BOD₅ yang paling rendah saat siklus 4 yaitu pada media Kaldnes K5 (tanpa ozon). Penyisihan BOD₅ paling tinggi terjadi pada variasi ozon 2, hal ini sesuai dengan kemampuan mikroorganisme yang dapat mendegradasi bahan organik dengan cepat pada konsentrasi yang rendah. Hasil analisis BOD₅ pada setiap media dapat dilihat pada Gambar 4.49 sampai Gambar 4.51



Gambar 4.49 Konsentrasi BOD₅ pada Media Kaldnes K1

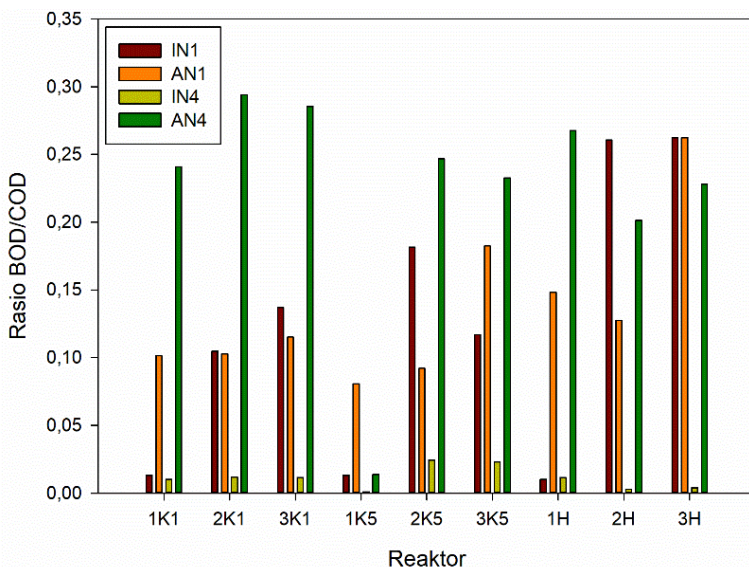


Gambar 4.50 Konsentrasi BOD₅ pada Media Kaldnes K5



Gambar 4.51 Konsentrasi BOD₅ pada Media Helix

Meski mengalami penurunan konsentrasi BOD₅ seperti halnya konsentrasi COD, namun pada media Kaldnes K5 (tanpa ozon) saat siklus 4 memiliki rasio BOD₅/COD yang paling rendah. Hal ini dikarenakan rendahnya tingkat penyisihan konsentrasi COD sehingga kadar polutan *non-biodegradable* masih tinggi. Rasio BOD₅/COD yang dihasilkan setelah pengolahan mengalami peningkatan dibandingkan kondisi sebelum pengolahan. Rasio BOD₅/COD tertinggi saat siklus 4 yaitu 0,29 pada reaktor 2K1 (media Kaldnes K1, ozon 1). Rasio BOD₅/COD pada awal dan akhir siklus dapat dilihat pada Gambar 4.52 dan Tabel 4.7.



Gambar 4.52 Rasio BOD₅/COD pada MBBR pada Setiap Media

Tabel 4.7 Rasio BOD₅/COD pada MBBR pada Setiap Media

Reaktor	BOD ₅ /COD					
	IN 1	AE1	AN1	IN4	AE4	AN4
1K1	0,01	0,06	0,10	0,01	0,18	0,24
2K1	0,10	0,10	0,10	0,01	0,22	0,29
3K1	0,14	0,13	0,12	0,01	0,22	0,29

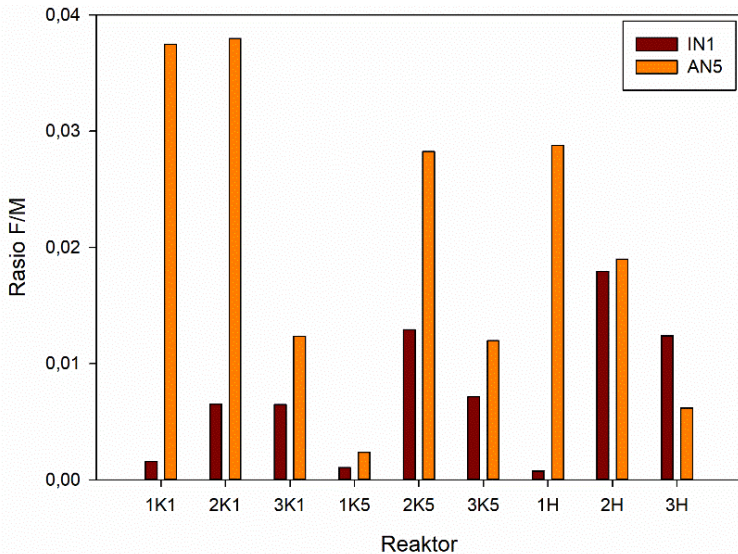
Reaktor	BOD ₅ /COD					
	IN 1	AE1	AN1	IN4	AE4	AN4
1K5	0,01	0,03	0,08	0,00	0,01	0,01
2K5	0,18	0,14	0,09	0,02	0,24	0,25
3K5	0,12	0,15	0,18	0,02	0,23	0,23
1H	0,01	0,08	0,15	0,01	0,25	0,27
2H	0,26	0,19	0,13	0,00	0,23	0,20
3H	0,26	0,26	0,26	0,00	0,30	0,23

4.4.4 Analisis F/M

Rasio F/M merupakan sebuah parameter proses yang biasanya digunakan untuk mendesain karakteristik proses dan keadaan operasi yaitu rasio substrat (BOD₅) per mikroorganisme (biomassa atau MLVSS). Secara keseluruhan pada setiap reaktor saat awal siklus memiliki rasio F/M yang rendah dan saat akhir siklus mengalami peningkatan yang disebabkan karena meningkatnya konsentrasi BOD₅. Selain itu peningkatan rasio F/M juga dapat diakibatkan karena terjadi penurunan jumlah mikroorganisme, hal ini ditandai dengan menurunnya rasio MLVSS/MLSS. Sehingga pada setiap reaktor memiliki kelebihan makanan yang dapat mengakibatkan menurunnya tingkat penyisihan bahan organik (Fitrahani *et al.*, 2012). Namun, rasio F/M masih berada pada batas minimum rasio F/M untuk proses biologis yang tergolong *high rate process*, yaitu 0,04-1,0 g organik/g biomassa.hari (Metcalf and Eddy, 2014).

Rasio F/M yang rendah menunjukkan bahwa mikroorganisme dalam kondisi lapar, semakin rendah rasio F/M pengolahan akan semakin efisien. Pada media Kaldnes K1, rasio F/M hari ke-0 (siklus 1) berkisar antara 0,002 – 0,007 dan pada hari ke-8 (siklus 4) berkisar antara 0,01 – 0,04. Pada media Kaldnes K5, rasio F/M hari ke-0 (siklus 1) berkisar antara 0,001 – 0,007 dan pada hari ke-8 (siklus 4) berkisar antara 0,002 – 0,02. Pada media Helix, rasio F/M hari ke-0 (siklus 1) berkisar antara 0,0007 – 0,01 dan pada hari ke-8 (siklus 4) berkisar antara 0,006 – 0,03. Rasio F/M saat siklus 4 pada semua reaktor mengalami peningkatan, kecuali pada

reaktor 3H (media Helix, ozon 2). Hal ini dikarenakan pada reaktor 3H mengalami penurunan konsentrasi BOD₅ (paling rendah) sehingga rasio F/M juga paling rendah. Hasil analisis rasio F/M pada semua media dapat dilihat pada Gambar 4.53.



Gambar 4.53 Rasio F/M pada MBBR pada Setiap Media

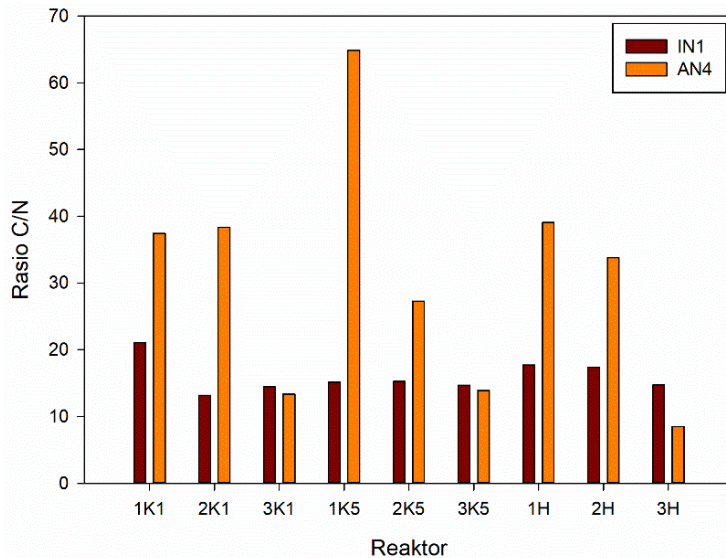
4.4.5 Analisis COD/TN

Salah satu faktor yang mempengaruhi pengolahan biologis yaitu adanya ketersediaan nutrisi untuk mikroorganisme. Nutrisi merupakan faktor yang berpengaruh besar dalam proses sintesis dan pertumbuhan sel, serta dalam aktivitas enzim yang dihasilkan oleh bakteri untuk mendegradasi polutan. Beberapa nutrisi penting yang dibutuhkan mikroorganisme adalah karbon dan nitrogen. Pada dasarnya semua mikroorganisme memerlukan karbon sebagai sumber energi untuk melakukan aktivitasnya. Nitrogen juga merupakan penyusun senyawa-senyawa penting dalam sel yang menentukan aktivitas pertumbuhan mikroorganisme. Kedua unsur ini harus ada dalam rasio yang tepat agar tercapai pertumbuhan bakteri yang optimal. Rasio COD/TN tergantung dari

kontaminan yang ingin didegradasi, bakteri serta dari jenis nitrogen yang digunakan. Pada penelitian ini nilai yang digunakan berasal nilai konsentrasi COD, dan konsentrasi TN (TKN+NO₃-N).

Pada media Kaldnes K1, rasio COD/TN hari ke-0 (siklus 1) berkisar antara 13,19 – 21,09 dan pada hari ke-8 (siklus 4) berkisar antara 13,39 – 38,36. Pada media Kaldnes K5, rasio COD/TN hari ke-0 (siklus 1) berkisar antara 14,68 – 15,24 dan pada hari ke-8 (siklus 4) berkisar antara 13,90 – 64,85. Pada media Helix, rasio COD/TN hari ke-0 (siklus 1) berkisar antara 14,72 – 17,72 dan pada hari ke-8 (siklus 4) berkisar antara 8,50 – 39,06. Terlihat bahwa sejak awal proses (hari ke-0) semua reaktor lindi telah memenuhi rasio COD/TN optimum, yaitu 10 atau 864:80 dengan efisiensi penyisihan COD mencapai 98% (Mannina *et al.*, 2017) dan untuk rasio COD/TN sebesar 9,3 memiliki efisiensi penyisihan COD mencapai 95% (Fu *et al.*, 2009). Namun, rasio C/N pada reaktor 3H (media Helix, ozon 2) hanya 8,5 atau terendah meskipun pada reaktor tersebut memiliki efisiensi penyisihan COD tertinggi (94%). Hal ini dikarenakan rendahnya efisiensi penyisihan TN sehingga meningkatkan emisi nitrogen yang dapat menghambat perkembangbiakan bakteri. Rasio COD/TN pada semua media dapat dilihat pada Gambar 4.54.

Berdasarkan grafik dibawah, terlihat bahwa secara keseluruhan pada semua reaktor terjadi penurunan rasio COD/TN. Rasio COD/TN yang turun menunjukkan bahwa unsur karbon dan bahan organik lainnya telah didekomposisi oleh bakteri. Beberapa penelitian yang mengaplikasikan proses aerobik di dalam pengolahan biologis menunjukkan bahwa rasio COD/TN optimum untuk proses biodegradasi adalah 10,8 atau 864:80 (Fu *et al.*, 2009). Pada akhir siklus rasio COD/TN tidak ada yang mencapai kondisi optimum. Karena konsentrasi nitrogen pada lindi yang sejak awal tinggi sehingga menjadi toksik bagi mikroorganismenya.



Gambar 4.54 Rasio COD/TN pada MBBR pada Setiap Media

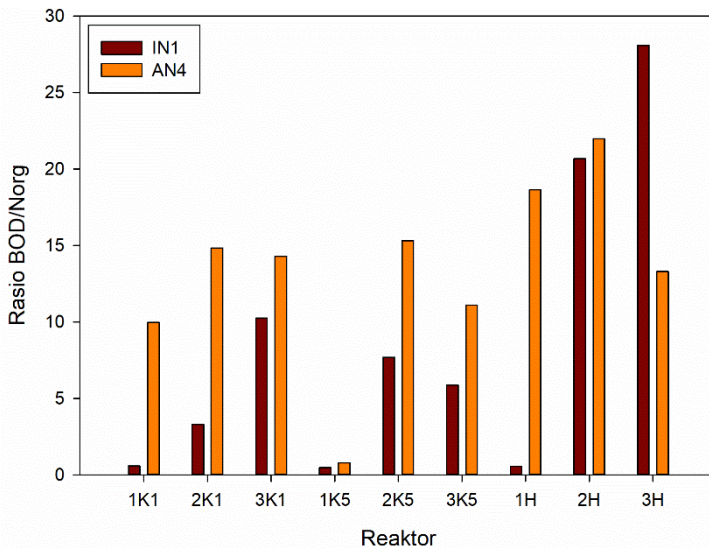
4.4.6 Analisis BOD₅/Nitrogen Organik

Pada pengolahan biologis, mikroorganisme dapat lebih mudah mendegradasi zat organik yang *biodegradable*. Banyaknya zat organik *biodegradable* merupakan hasil dari degradasi zat organik *non-biodegradable* (semakin besar tingkat efisiensi penyisihan COD maka semakin besar pula konsentrasi zat organik yang *biodegradable*), sehingga semakin mudah untuk diurai oleh mikroorganisme. Kemampuan mikroorganisme dalam mendegradasi zat organik dapat dilihat dari rasio BOD₅/N organik.

Pada media Kaldnes K1, rasio BOD₅/N organik hari ke-0 (siklus 1) berkisar antara 0,58 – 10,24 dan pada hari ke-8 (siklus 4) berkisar antara 9,96 – 14,83. Pada media Kaldnes K5, hari ke-0 (siklus 1) berkisar antara 0,47-7,68 dan pada hari ke-8 (siklus 4) berkisar antara 0,79-15,32. Pada media Helix, hari ke-0 (siklus 1) berkisar antara 0,56-28,09 dan pada hari ke-8 (siklus 4) berkisar antara 13,29-21,98. Terlihat bahwa sejak awal proses (hari ke-0) semua reaktor lindi belum memenuhi rasio BOD₅/N organik optimum, yaitu

20,4 atau 100:4,9 namun pada rasio tersebut nitrogen melebihi dari yang dibutuhkan untuk metabolisme karbon (zat organik) (Slade *et al.*, 2011). Rasio BOD₅/N organik pada semua media dapat dilihat pada Gambar 4.55.

Berdasarkan grafik dibawah, terlihat bahwa pada awal siklus pada penelitian ini memiliki rasio BOD₅/N organik yang sangat rendah sehingga menyatakan bahwa zat organik *biodegradable* yang masih rendah atau tingginya konsentrasi COD sehingga untuk awal siklus proses degradasi zat organik masih rendah atau belum stabil. Sedangkan pada akhir siklus rasio BOD₅/N organik lebih besar yang menandakan bahwa degradasi karbon telah stabil dan memiliki kelebihan nitrogen organik. Namun, pada reaktor 3H (Helix ozon 2) saat akhir siklus memiliki rasio yang rendah dari pada awal siklus, hal ini dikarenakan efisiensi penyisihan senyawa kompleks COD yang tinggi menyebabkan mikroorganisme pada nitrogen yang besar hanya dapat mendegradasi sebagian. Selain itu juga disebabkan oleh penurunan zat organik *biodegradable* yang lebih besar dari pada penurunan total nitrogennya.



Gambar 4.55 Rasio BOD₅/N Organik pada MBBR pada Setiap Media

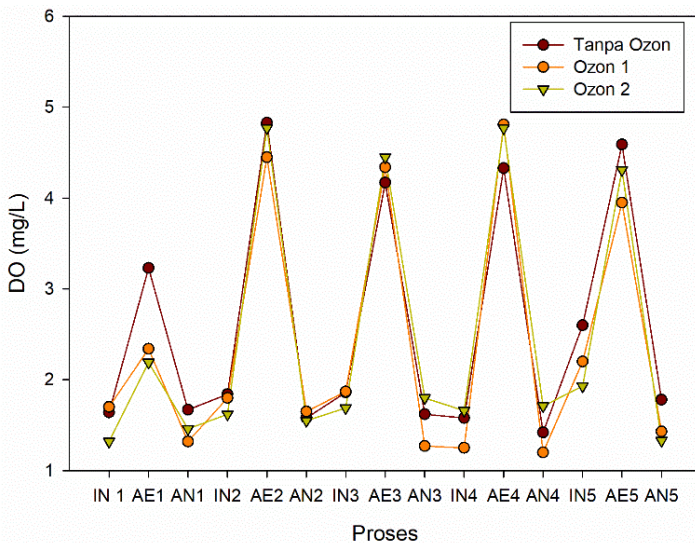
4.4.7 Analisis Dissolved Oxygen

Analisis Dissolved Oxygen (DO) dilakukan pada setiap siklus fase sebelum aerobik (*intermitten*), setelah aerobik, dan setelah anoksik. Hal ini bertujuan untuk mengetahui kecukupan oksigen serta memastikan proses yang terjadi di dalam reaktor. Pada kondisi aerobik terjadi proses nitrifikasi, dimana salah satu faktor yang mempengaruhi yaitu konsentrasi oksigen terlarut. Agar proses nitrifikasi dapat berlangsung dibutuhkan konsentrasi DO > 2 mg/L, DO hingga 6 mg/L dapat meningkatkan efisiensi pengolahan hingga 5,8% (Al-Rekabi, 2015) 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 (Kawan *et al.*, 2016). Hal ini menunjukkan bahwa oksigen yang ada pada kondisi anoksik merupakan oksigen terikat, bukan oksigen bebas seperti fase aerobik. Kadar DO yang demikian mengakibatkan terjadinya proses denitrifikasi pada kondisi anoksik. Pengukuran DO dilakukan menggunakan DO meter.

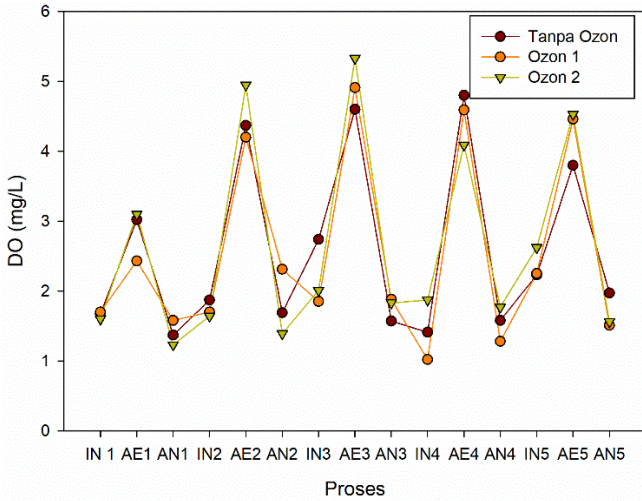
Berdasarkan hasil analisis, konsentrasi DO media Kaldnes K1 pada kondisi aerobik yaitu sebesar 2,19 mg/L–4,83 mg/L. Konsentrasi DO paling rendah terjadi pada siklus pertama. Hal ini dikarenakan reaktor baru dioperasikan sehingga oksigen terlarut yang tersedia masih sedikit. Tetapi secara keseluruhan konsentrasi oksigen terlarut pada proses aerobik masih berada pada kondisi cukup untuk proses nitrifikasi, dengan rata-rata konsentrasi DO pada kondisi aerobik yaitu 4,10 mg/L. Pada kondisi anoksik konsentrasi DO berada pada rentang 1,20 mg/L–1,80 mg/L, dengan rata-rata konsentrasi DO yaitu 1,52 mg/L. Hasil analisis DO pada media Kaldnes K1 dapat dilihat pada Gambar 4.56.

Pada media Kaldnes K5, konsentrasi DO pada semua reaktor untuk kondisi aerobik yaitu sebesar 2,43 mg/L–5,33 mg/L dengan rata-rata konsentrasi DO sebesar 4,21 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa setiap reaktor sudah berada pada kondisi siap untuk proses nitrifikasi. Sementara pada kondisi anoksik konsentrasi DO berada pada rentang 1,23 – 1,97 mg/L yang menunjukkan bahwa setiap reaktor sudah memiliki konsentrasi DO untuk proses denitrifikasi dengan rata-rata konsentrasi DO sebesar 1,63 mg/L. Konsentrasi DO media Kaldnes K5 dapat dilihat pada Gambar 4.57.

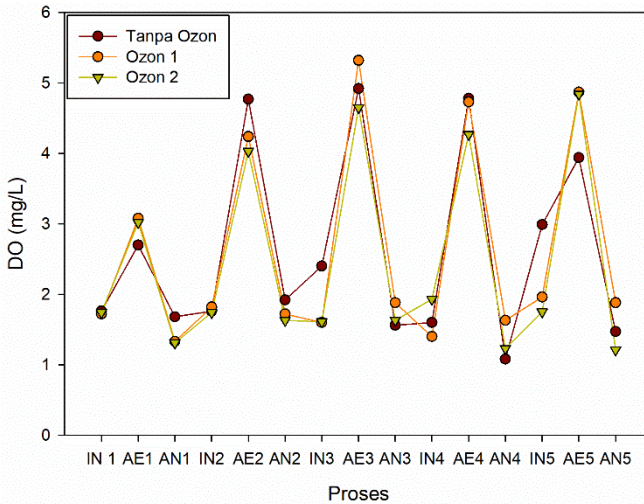
Pada media Helix, konsentrasi DO pada kondisi aerobik maupun anoksik sama seperti media lainnya, sudah berada pada konsentrasi DO untuk proses nitrifikasi dan denitrifikasi. Konsentrasi DO saat kondisi aerobik yaitu 2,03 mg/L-5,32 mg/L dengan rata-rata konsentrasi DO sebesar 4,28 mg/L. Sedangkan konsentrasi DO saat kondisi anoksik yaitu 1,08 mg/L-1,92 mg/L dengan rata-rata konsentrasi DO sebesar 1,45 mg/L. Konsentrasi DO media Helix dapat dilihat pada Gambar 4.58.



Gambar 4.56 Hasil Analisis Dissolved Oksigen pada Media K1



Gambar 4.57 Hasil Analisis Dissolved Oksigen pada Media K5



Gambar 4.58 Hasil Analisis Dissolved Oksigen pada Media Helix

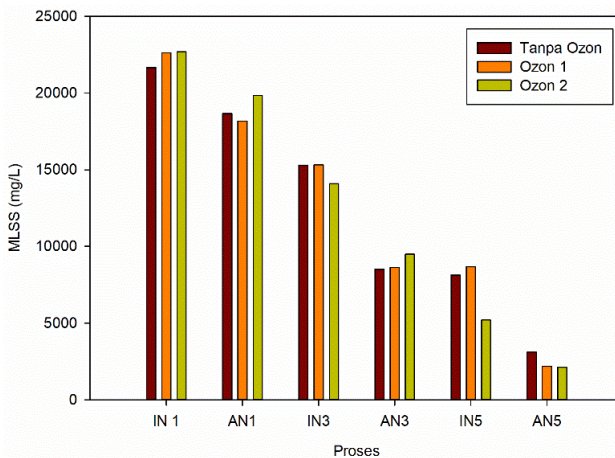
Hasil pengukuran konsentrasi DO, rata-rata konsentrasi DO saat kondisi aerobik yang paling tinggi terdapat pada media Helix

sebesar 4,28 mg/L dan DO saat kondisi anoksik yang paling rendah terdapat pada media Helix sebesar 1,45 mg/L.

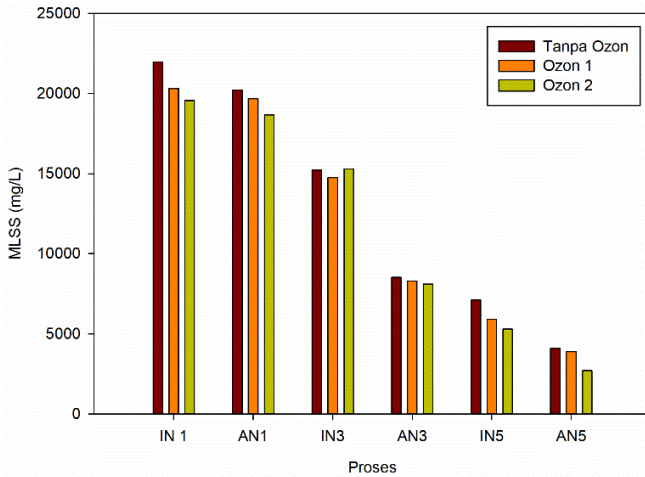
4.4.8 Analisis Biomass Sebagai MLSS

Analisis MLSS dilakukan pada siklus 1 (hari ke-0), siklus 3 (hari ke-6), dan siklus 5 (hari ke-8). MLSS merupakan jumlah padatan organik dan mineral yang tersuspensi, termasuk mikroorganisme di dalam larutan yang tercampur. Ketersediaan mikroorganisme di dalam reaktor dapat diketahui melalui pengukuran MLSS.

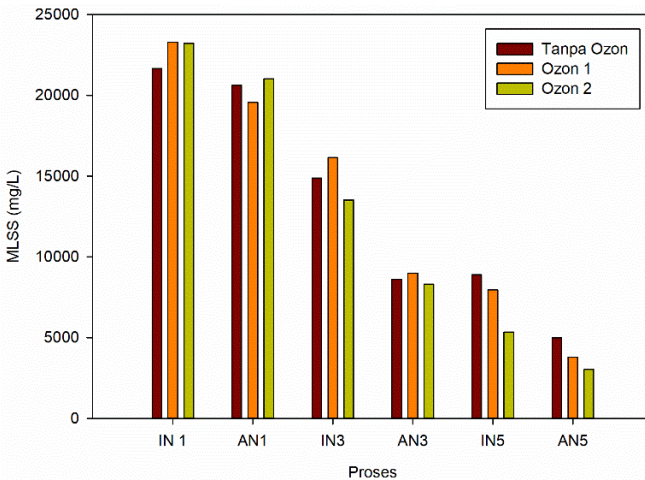
Pada media Kaldnes K1, konsentrasi MLSS pada siklus 1 berkisar antara 18000 mg/L–22800 mg/L, pada siklus 3 terjadi penurunan konsentrasi MLSS sehingga berkisar antara 8500 mg/L–15500 mg/L, dan pada siklus 5 berkisar antara 2200 mg/L–8700 mg/L. Pada media Kaldnes K5, konsentrasi MLSS pada siklus 1, yaitu berkisar antara 18700 mg/L–22000 mg/L, pada siklus 3 berkisar antara 8500 mg/L–15300 mg/L, dan siklus 5 berkisar antara 2700 mg/L–7100 mg/L. Pada media Helix, konsentrasi MLSS pada siklus 1, yaitu berkisar antara 19600 mg/L–23300 mg/L, siklus 3 berkisar antara 8300 mg/L–16200 mg/L, dan siklus 5 berkisar antara 3100 mg/L–8900 mg/L. Konsentrasi MLSS pada setiap media dapat dilihat pada Gambar 4.59 sampai Gambar 4.61.



Gambar 4.59 Konsentrasi MLSS pada Media Kaldnes K1



Gambar 4.60 Konsentrasi MLSS pada Media Kaldnes K5



Gambar 4.61 Konsentrasi MLSS pada Media Helix

Berdasarkan gambar diatas dapat dilihat bahwa pada setiap media (semua reaktor) terjadi penurunan konsentrasi MLSS. Hal ini dapat disebabkan karena terjadi respirasi *endogeneous* yaitu penggunaan oksigen terikat (NO_3) sebagai akseptor elektron untuk

mengoksidasi senyawa organik selain lindi, yang didalam 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 mikroorganisme yang satu dengan yang lainnya (Metcalf and Eddy, 2014).

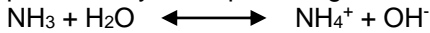
4.4.9 Analisis pH

Analisis pH dilakukan pada setiap reaktor saat sebelum aerobik (*intermitten*), setelah aerobik, dan setelah anoksik. Hal ini bertujuan 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. Mikroorganisme yang berperan dalam nitrifikasi yaitu *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter*. pH optimum untuk *Nitrosomonas* berkisar antara 7,5–8,5 dan pH optimum untuk *Nitrobacter* berkisar antara 8,3-9,3 (Shammas, 1986). Proses ini akan terhenti pada pH dibawah 6,0. Sedangkan pH paling efektif untuk proses denitrifikasi berkisar antara 7,0–8,5 dan optimumnya yaitu 7,0 (Metcalf and Eddy, 2014).

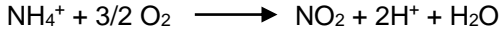
Berdasarkan hasil pengukuran pH pada semua reaktor, secara umum saat *intermitten* berada pada nilai pH yang relatif sama dan masih berada pada kisaran nilai pH netral, dan pada kondisi aerobik-anoksik semua reaktor berada pada rentang pH optimum untuk nitrifikasi dan denitrifikasi. Pada setiap reaktor media Kaldnes K1, nilai pH berada pada rentang 6,5-7,7 saat intermitten, 7,1-7,9 saat kondisi aerobik, dan 7,2-7,7 saat kondisi anoksik. Nilai pH pada setiap reaktor media Kaldnes K5 saat *intermitten* yaitu 6,8-7,8, saat kondisi aerobik yaitu 7,0-7,9, dan saat kondisi anoksik yaitu 7,2-7,7. Nilai pH pada setiap reaktor media Helix saat *intermitten* yaitu 6,9-7,8, saat kondisi aerobik yaitu 7,2-7,9, dan saat kondisi anoksik yaitu 7,4-7,8. Namun nilai pH pada semua reaktor saat kondisi aerobik siklus 1 dan siklus 2 masih rendah

(dibawah pH optimum nitrifikasi), tetapi pada siklus 3 hingga siklus 5 nilai pH telah optimum untuk nitrifikasi.

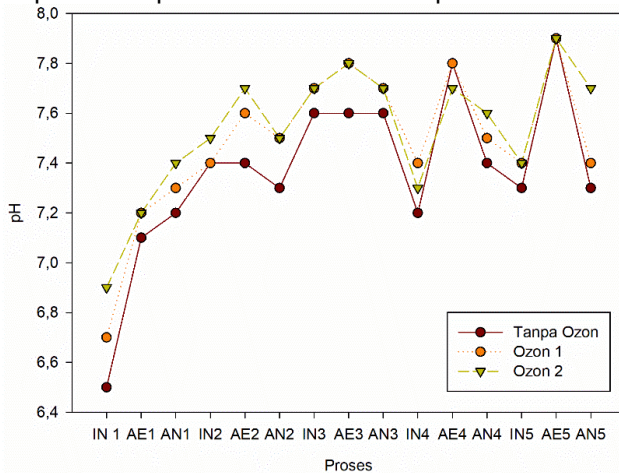
Pada masing-masing reaktor uji terjadi fluktuasi nilai pH. Kenaikan pH ini dapat diakibatkan dari perubahan bentuk amonia-nitrogen menjadi bentuk ion yang berupa amonium jika terlarut dalam air. Sehingga ion OH⁻ didalam lindi akan menjadi naik yang berdampak pada naiknya nilai pH sebagaimana reaksi berikut:



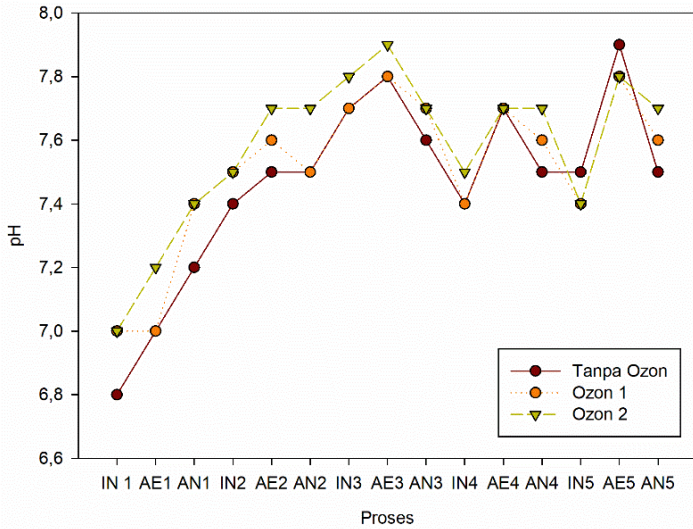
Selain itu, pH di dalam reaktor juga dapat mengalami penurunan jika terjadi proses pembentukan nitrat (Al Kholif and Febrianti, 2019) dengan reaksi sebagai berikut:



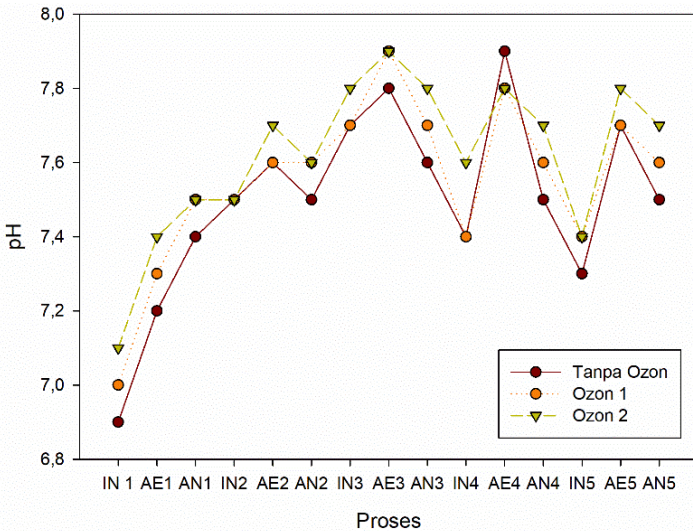
Reaksi diatas menunjukkan bahwa setiap mol amonium yang dioksidasi akan memproduksi 2 mol ion hidrogen, yang hasilnya akan menurunkan nilai pH pada lingkungan yang nilai buffernya rendah (Tarre and Green, 2004). Hal ini menunjukkan bahwa bakteri autotrofik yang ada pada proses nitrifikasi sangat sensitif terhadap nilai pH. Akan tetapi, kenaikan dan penurunan nilai pH pada semua reaktor tidak signifikan, nilainya relatif hampir sama dan masih berada pada kisaran nilai pH netral. Nilai pH pada setiap media dapat dilihat pada Gambar 4.62 sampai Gambar 4.64.



Gambar 4.62 Nilai pH pada Media Kaldnes K1



Gambar 4.63 Nilai pH pada Media Kaldnes K5

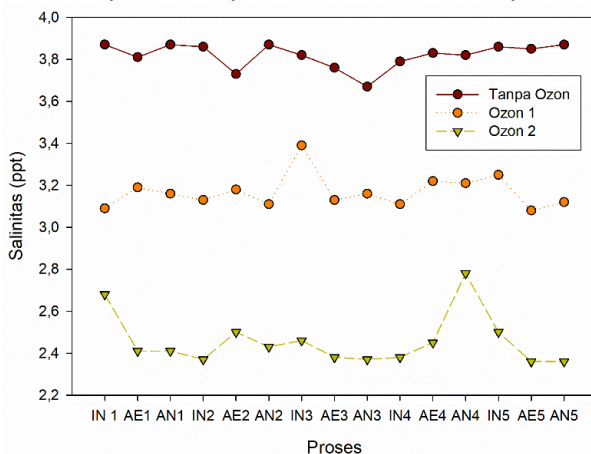


Gambar 4.64 Nilai pH pada Media Helix

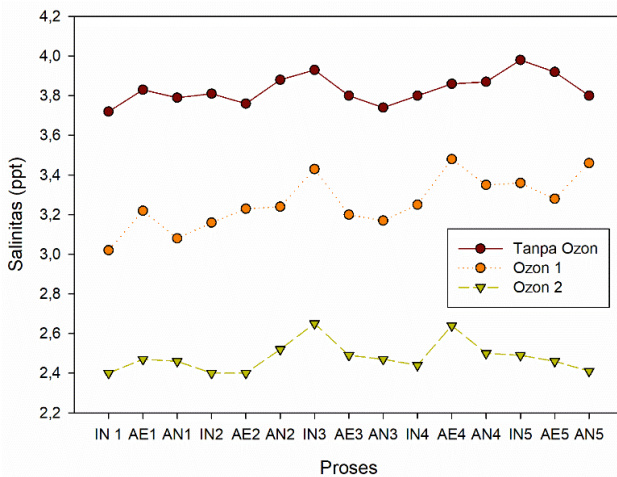
4.4.10 Analisis Salinitas

Analisis salinitas merupakan parameter tambahan di dalam penelitian ini. Pengukuran salinitas dilakukan pada semua siklus saat *intermitten*, kondisi aerobik, dan kondisi anoksik. Pengukuran salinitas dengan menggunakan Salinometer. Nilai salinitas di semua durasi *intermitten* (sebelum aerobik), setelah aerobik, dan setelah anoksik menunjukkan nilai yang hampir sama untuk setiap reaktor, dimana semakin tinggi konsentrasi lindi maka salinitas akan semakin tinggi.

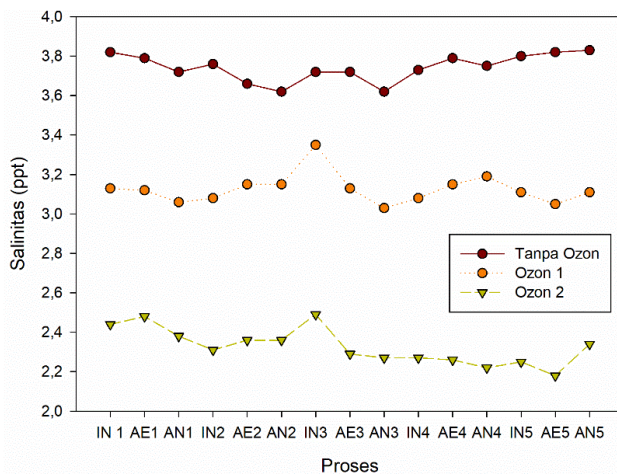
Hasil pengukuran salinitas pada setiap reaktor yaitu berkisar antara 2,36–3,87 ppt pada media Kaldnes K1, 2,4–3,98 ppt pada media Kaldnes K5, dan 2,18-3,83 ppt pada media Helix. Nilai salinitas tersebut masih tergolong oligohaline yang termasuk sebagai kondisi air payau dengan salinitas rendah yaitu rentang 0,5-5 ppt (Anonim, 2006) sehingga nilai salinitas tidak mempengaruhi proses biologis yang ada di dalam reaktor. Apabila nilai salinitas yang tinggi dapat menyebabkan terjadinya plasmolisis pada mikroorganisme. Apabila kadar garam tinggi dalam lindi, maka bakteri memerlukan energi tambahan untuk fiksasi karbon dan untuk mempertahankan tekanan osmotik (Jusepa and Herumurti, 2016). Hasil pengukuran salinitas untuk semua media dapat dilihat pada Gambar 4.65 sampai 4.67.



Gambar 4.65 Nilai Salinitas pada Media Kaldnes K1



Gambar 4.66 Nilai Salinitas pada Media Kaldnes K5



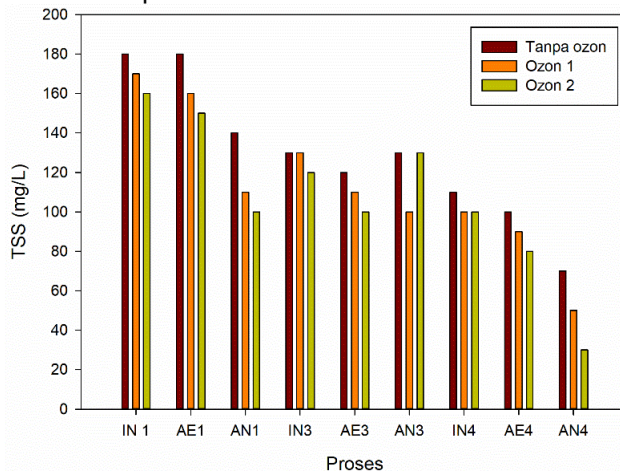
Gambar 4.67 Nilai Salinitas pada Media Helix

4.4.11 Analisis Total Suspended Solid (TSS)

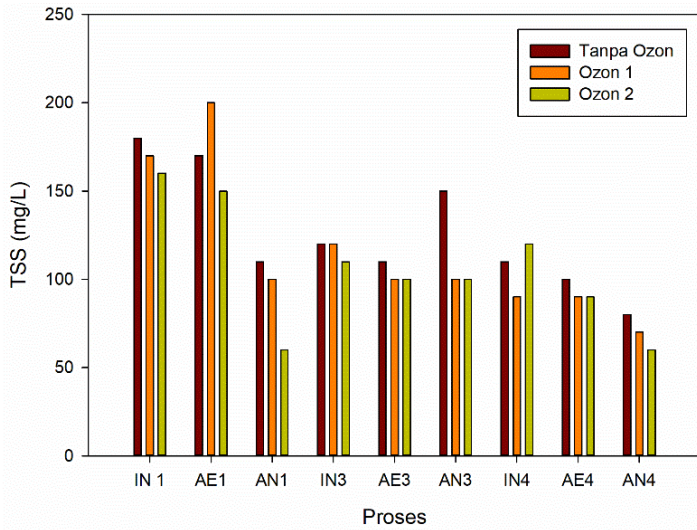
Analisis TSS dilakukan pada saat *intermitten*, kondisi aerobik, dan kondisi anoksik pada siklus 1 (hari ke-0), siklus 3 (hari ke-6), dan siklus 4 (hari ke-8). MLSS merupakan total padatan tersuspensi

yang menyebabkan kekeruhan air, tidak dapat larut, dan tidak dapat mengendap secara langsung. Pada media Kaldnes K1, konsentrasi TSS pada siklus 1 berkisar antara 100 mg/L–180mg/L, pada siklus 3 terjadi penurunan konsentrasi TSS sehingga menjadi 100 mg/L–130 mg/L, dan siklus 4 berkisar antara 30 mg/L–100 mg/L. Pada media Kaldnes K5, konsentrasi TSS pada siklus 1 yaitu berkisar antara 60 mg/L–200 mg/L, siklus 3 berkisar antara 100 mg/L–150 mg/L dan siklus 4 berkisar antara 60 mg/L - 120 mg/L. Pada media Helix, konsentrasi TSS pada siklus 1, yaitu berkisar antara 50 mg/L–180 mg/L, siklus 3 berkisar antara 80 mg/L–140 mg/L dan siklus 4 berkisar antara 20 mg/L–100 mg/L.

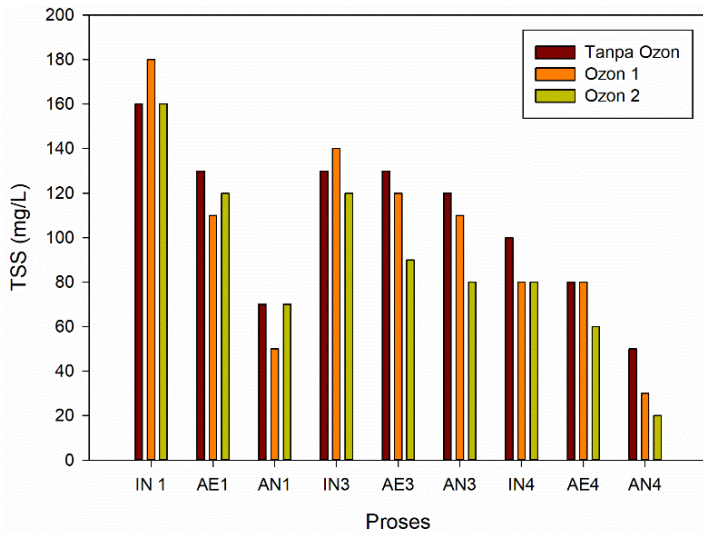
Penurunan konsentrasi TSS masih menunjukkan terjadinya kenaikan dan penurunan yang tidak stabil (fluktuatif). Kenaikan TSS tersebut dikarenakan tidak adanya proses penyaringan sehingga tidak sesuai ketentuan dimana semakin lama waktu tinggal hidrolis seharusnya dapat menurunkan konsentrasi TSS (Sayoga *et al.*, 2013). Penurunan konsentrasi TSS ini dipengaruhi oleh resirkulasi dan waktu tinggal dikarenakan semakin lama lindi berada di dalam reaktor maka semakin banyak padatan tersuspensi yang terserap pada lapisan biofilm yang ada pada media. Konsentrasi TSS pada setiap media dapat dilihat pada Gambar 4.68 sampai Gambar 4.70.



Gambar 4.68 Konsentrasi TSS pada Media Kaldnes K1



Gambar 4.69 Konsentrasi TSS pada Media Kaldnes K5



Gambar 4.70 Konsentrasi TSS pada Media Helix

4.5 Penentuan Pengaruh Jenis Media dan *Pre-treatment* Terhadap Penyisihan Zat Organik dan Nitrogen

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, kemudian dilakukan analisis dengan menggunakan metode statistika untuk mengetahui pengaruh antara jenis media dan *pre-treatment* terhadap parameter organik (parameter COD), nitrogen (parameter amonium-nitrogen, nitrat-nitrogen, nitrit-nitrogen, TKN, total nitrogen, dan nitrogen organik), dan BOD₅. Ada dua tahapan untuk menentukan parameter yang paling berpengaruh. Tahap pertama yaitu menentukan parameter apa saja yang berpengaruh terhadap jenis media dan *pre-treatment*. Setelah diketahui parameter yang berpengaruh kemudian dilanjutkan dengan tahap kedua yaitu menentukan pengaruh dari jenis media dan *pre-treatment* terhadap parameter yang berpengaruh tersebut.

Tahap pertama yang dilakukan yaitu dengan menggunakan uji ANOVA (*Analysis of Variance*) yang bertujuan untuk mengetahui apakah variasi media dan *pre-treatment* berpengaruh terhadap parameter yang digunakan. Uji ANOVA dilakukan dengan menggunakan *one-way* ANOVA. Program yang digunakan untuk uji ANOVA ini yaitu *software* SPSS 16 dengan tingkat signifikansi (α) 95%. Adapun hipotesis uji ANOVA yang dilakukan, sebagai berikut:

Hipotesis:

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

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

$$\alpha = 0,05$$

Hasil *running* jenis media terhadap parameter dan variasi *pre-treatment* terhadap parameter dengan menggunakan program SPSS dapat dilihat pada Tabel 4.8 dan Tabel 4.9.

Tabel 4.8 Hasil Uji ANOVA Jenis Media Terhadap Parameter dengan Program SPSS 16

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
COD Reactor	Between Groups	59,480	2	29,740	0,314	0,742
	Within Groups	568,210	6	94,702		

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
NH ₄ Reactor	Total	627,689	8			
	Between Groups	1955,828	2	977,914	1,044	0,408
	Within Groups	5622,093	6	937,015		
	Total	7577,921	8			
NO ₃ Reactor	Between Groups	15,095	2	7,548	1,146	0,379
	Within Groups	39,499	6	6,583		
	Total	54,594	8			
NO ₂ Reactor	Between Groups	332504,449	2	166252,225	0,723	0,523
	Within Groups	1380470,840	6	230078,473		
	Total	1712975,289	8			
TKN	Between Groups	7,722	2	3,861	0,395	0,690
	Within Groups	58,584	6	9,764		
	Total	66,306	8			
TN	Between Groups	17,986	2	8,993	0,677	0,543
	Within Groups	79,677	6	13,280		
	Total	97,663	8			
N organic	Between Groups	0,629	2	0,314	0,007	0,993
	Within Groups	259,764	6	43,294		
	Total	260,393	8			
BOD	Between Groups	17529,034	2	8764,517	0,321	0,737
	Within Groups	163889,195	6	27314,866		
	Total	181418,229	8			
COD aerobic	Between Groups	36,037	2	18,018	0,189	0,832
	Within Groups	570,535	6	95,089		
	Total	606,572	8			
NH ₄ aerobic	Between Groups	211,209	2	105,605	1,210	0,362

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Within Groups	523,781	6	87,297		
	Total	734,990	8			
COD anoxic	Between Groups	173,656	2	86,828	1,083	0,397
	Within Groups	480,962	6	80,160		
	Total	654,619	8			
NH ₄ anoxic	Between Groups	66,054	2	33,027	0,327	0,733
	Within Groups	605,615	6	100,936		
	Total	671,668	8			

Tabel 4.9 Hasil Uji ANOVA Variasi *Pre-treatment* Terhadap Parameter dengan Program SPSS 16

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
COD Reactor	Between Groups	508,252	2	254,126	12,766	0,007
	Within Groups	119,437	6	19,906		
	Total	627,689	8			
NH ₄ Reactor	Between Groups	1410,171	2	705,085	0,686	0,539
	Within Groups	6167,750	6	1027,958		
	Total	7577,921	8			
NO ₃ Reactor	Between Groups	13,128	2	6,564	0,950	0,438
	Within Groups	41,466	6	6,911		
	Total	54,594	8			
NO ₂ Reactor	Between Groups	563121,810	2	281560,905	1,469	0,302
	Within Groups	1149853,479	6	191642,246		
	Total	1712975,289	8			
TKN	Between Groups	3,726	2	1,863	0,179	0,841

		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
	Within Groups	62,580	6	10,430		
	Total	66,306	8			
TN	Between Groups	30,344	2	15,172	1,352	0,328
	Within Groups	67,319	6	11,220		
	Total	97,663	8			
N organic	Between Groups	242,193	2	121,097	39,923	0,000
	Within Groups	18,200	6	3,033		
	Total	260,393	8			
BOD ₅	Between Groups	124005,582	2	62002,791	6,480	0,032
	Within Groups	57412,647	6	9568,775		
	Total	181418,229	8			
COD aerobic	Between Groups	141,929	2	70,965	0,916	0,449
	Within Groups	464,642	6	77,440		
	Total	606,572	8			
NH ₄ aerobic	Between Groups	100,493	2	50,246	0,475	0,643
	Within Groups	634,497	6	105,750		
	Total	734,990	8			
COD anoxic	Between Groups	422,729	2	211,365	5,469	0,044
	Within Groups	231,890	6	38,648		
	Total	654,619	8			
NH ₄ anoxic	Between Groups	89,203	2	44,601	0,459	0,652
	Within Groups	582,466	6	97,078		
	Total	671,668	8			

Berdasarkan hasil *output* SPSS 16, maka dapat diketahui bahwa hanya nilai parameter COD, nitrogen organik, BOD₅, dan COD saat anoksik yang berpengaruh signifikan terhadap *pre-treatment* dan

tidak ada parameter yang berpengaruh terhadap jenis media. Hal ini dapat dilihat dari nilai signifikansi hasil analisis ANOVA yang berada pada nilai $\leq 0,05$. Selanjutnya melihat apakah *pre-treatment* berpengaruh terhadap parameter COD, nitrogen organik, BOD₅, dan COD saat anoksik dengan menggunakan uji Tukey. Uji Tukey dilakukan dengan cara membandingkan setiap variasi *pre-treatment*. Adapun hipotesis dari Uji Tukey adalah sebagai berikut:

Hipotesis:

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

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

$$\alpha = 0,05$$

Hasil analisis uji Tukey dapat dilihat pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Hasil Uji Tukey Variasi *Pre-treatment* dengan Program SPSS 16

COD Reactor			
Tukey HSD ^a			
Ozon duration	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
0 hour	3	73,2733	
12 hours	3	79,9867	
24 hours	3		91,4733
Sig.		0,235	1,000
N organic			
Tukey HSD ^a			
Ozon duration	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
0 hour	3	61,7500	
12 hours	3		70,4833
24 hours	3		74,1100
Sig.		1,000	0,096
BOD₅			
Tukey HSD ^a			
Ozon duration	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
12 hours	3	-10,1867	
24 hours	3	19,2333	19,2333
0 hour	3		252,2200
Sig.		0,929	0,060

COD anoxic			
Tukey HSD ^a			
Ozon duration	N	Subset for alpha = 0.05	
		1	2
0 hour	3	20,1348	
12 hours	3	25,2654	25,2654
24 hours	3		36,5429
Sig.		0,597	0,146

Berdasarkan hasil *running* program SPSS 16 menunjukkan bahwa parameter COD, nitrogen organik, BOD₅, dan COD saat anoksik berpengaruh terhadap variasi *pre-treatment*. Berdasarkan hasil uji Tukey tersebut dapat dilihat bahwa *pre-treatment* dengan ozon 2 lebih baik dari pada tanpa ozon dan ozon 1, hal ini ditunjukkan dari kolom subset 2 pada Tabel 4.9.

4.6 Rigkasan Kinerja MBBR

Pada pengolahan lindi dengan *pre-treatment* ozon dan proses aerobik-anoksik menggunakan MBBR secara *intermitten*, menunjukkan kinerja yang cukup baik dalam menurunkan konsentrasi COD dan nitrogen. Penurunan konsentrasi COD pada *pre-treatment* ozon optimum dengan durasi operasi selama 24 jam efisiensi penyisihan sebesar 53%. Sedangkan pada MBBR, penurunan konsentrasi COD dan nitrogen paling baik terjadi pada media Helix dengan efisiensi penyisihan mencapai 94% dan 75%. Hasil optimum pada media Helix ini didukung oleh hasil dari parameter tambahan seperti BOD, MLSS, pH, dan salinitas serta memiliki rasio BOD₅/COD 0,23.

Berdasarkan 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, efluen pengolahan lindi dengan menggunakan MBBR (media Helix dengan variasi durasi ozon 24 jam) telah memenuhi baku mutu. Untuk parameter COD sebesar 197 mg/L, BOD₅ sebesar 44,89 mg/L, TSS sebesar 20 mg/L dan pH sebesar 7,7.

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 24 jam dengan nilai penyisihan COD sebesar 53%.
2. Media yang paling optimum dalam pengolahan lindi menggunakan MBBR adalah Helix dengan efisiensi penyisihan COD mencapai 94% dan nitrogen organik mencapai 75%.

5.2 Saran

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

1. Rentang untuk durasi ozon dibuat lebih bervariasi supaya menghasilkan effluen lebih baik (zat organik maupun nitrogen).
2. Durasi aerobik dan anoksik lebih bervariasi untuk menghilangkan nitrit-nitrogen.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, A., Guo, J.-S., Zhi Ping, L., Ying Ya, P., Al-Rekabi, W. 2009. *Review on Landfill Leachate Treatments* (Vol. 6).
- Abu Amr, S. S., Aziz, H. A., Adlan, M. N., Bashir, M. J. K. 2013. Pretreatment of stabilized leachate using ozone/persulfate oxidation process. *Chemical Engineering Journal*, 221, 492–499.
- Al Kholif, M., Febrianti, E. 2019. Penerapan Teknologi Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) Bermedia Kaldnes dalam Menurunkan Pencemar Air Lindi, 2.
- Aljumriana. 2015. *Pengolahan Lindi Menggunakan Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) Pada Proses Aerobik-Anoksik*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS.
- Al-Rekabi, W. 2015. *Mechanisms of Nutrient Removal in Moving Bed Biofilm Reactors* (Vol. 6).
- Amaral-Silva, N., Martins, R. C., Castro-Silva, S., Quinta-Ferreira, R. M. 2016. Ozonation and perozonation on the biodegradability improvement of a landfill leachate. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 527–533.
- Anonim. 2006. *Voluntary Estuary Monitoring: A Methods Manual* (Second Edition, Vol. 14).
- Aygun, A., Nas, B., Bertay, A. 2008. Influence of High Organic Loading Rates on COD Removal and Sludge Production in Moving Bed Biofilm Reactor. *Environmental Engineering Science*, 25, 1311–1316.
- Bachmann Pinto, H., Miguel de Souza, B., Dezotti, M. 2018. Treatment of a pesticide industry wastewater mixture in a moving bed biofilm reactor followed by conventional and membrane processes for water reuse. *Journal of Cleaner Production*, 201, 1061–1070.
- Bassin, J. P., Dezotti, M., Sant'Anna, G. L. 2011. Nitrification of industrial and domestic saline wastewaters in moving bed biofilm reactor and sequencing batch reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 185(1), 242–248.
- Bering, S., Mazur, J., Tarnowski, K., Janus, M., Mozia, S., Morawski, A. W. 2018. The application of moving bed bio-

- reactor (MBBR) in commercial laundry wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, 627, 1638–1643.
- Bhalla, B., Saini, M., Jha, M. 2013. Effect of age and seasonal variations on leachate characteristics of municipal solid waste landfill. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2(8).
- Bila, D. M., Filipe Montalvão, A., Silva, A. C., Dezotti, M. 2005. Ozonation of a landfill leachate: evaluation of toxicity removal and biodegradability improvement. *Journal of Hazardous Materials*, 117(2), 235–242.
- 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.
- Cortez, S., Teixeira, P., Oliveira, R., Mota, M. 2010. Ozonation as polishing treatment of mature landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 182(1), 730–734.
- Coufal, M., Václavík, V., Dvorský, T., Bendová, M. 2015. *Application of Ozonation in Pretreatment of Naturally Aggressive Groundwater with High Content of Iron and Manganese*.
- Dezotti, M., Lippel, G., Bassin, J. 2018. *Advanced Biological Processes for Wastewater Treatment*. Springer Nature.
- 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), 289–297.
- Fitrahani, L. Z., Indrasti, N. S., Suprihatin. 2012. Karakterisasi Kondisi Operasi dan Optimasi Proses Pengolahan Air Limbah Industri Pangan. *E-Jurnal Agroindustri Indonesia*, 1, 110–117.
- Fu, Z., Yang, F., Zhou, F., Xue, Y. 2009. Control of COD/N ratio for nutrient removal in a modified membrane bioreactor (MBR) treating high strength wastewater. *Bioresource Technology*, 100(1), 136–141.
- Gulhane, Kotangale. 2013. Moving Bed Biofilm Reactor – New Innovation in The Field of Conventional Biological

- Wastewater Treatment. *International Journal of Scientific Research*, 2(12), 167–170.
- Hajipour, A., Moghadam, N., Nosrati, M., Shojaosadati, S. 2011. Aerobic Thermophilic Treatment of Landfill Leachate in a Moving Bed Biofilm Bioreactor. *Iran Journal Environmental, Health, and Science Engineering*, 8, 3–14.
- Hibban, M., Rezagama, A., Purwono. 2016. Studi Penurunan Konsentrasi Amonia dalam Limbah Cair Domestik dengan Teknologi Biofilter Aerobmdia Tubular Plastik pada Awal Pengolahan. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 5(2).
- 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.
- Imania, A. 2018. *Pengolahan Lindi Menggunakan Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) dengan Pre-treatment Kimiawi untuk Menurunkan Konsentrasi Organik dan Nitrogen*. Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan FTSP ITS.
- Jusepa, N. R., Herumurti, W. 2016. Pengolahan Lindi Menggunakan Moving Bed Biofilm Reactor dengan Proses Anaerobik-Aerobik-Anoksik. *Jurnal Teknik ITS*, 5(2).
- Kawan, J., Abu Hasan, H., Suja, F., Jaafar, O., Abd-Rahman, R. 2016. *A review on sewage treatment and polishing using moving bed bioreactor (Mbbf)* (Vol. 11).
- Kementrian Lingkungan Hidup. 2016. *Baku Mutu Lindi Bagi Usaha dan Atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Sampah*.
- Kermani, M., Bina, B., Movahedian, H., Amin, M., Nikaein, M. 2008. Application of Moving Bed Biofilm Process for Biological Organics and Nutrients Removal from Municipal Wastewater. *American Journal of Environmental Sciences*, 4(6), 682–689.
- Kulikowska, D. 2012. *Nitrogen removal from landfill leachate via the nitrite route* (Vol. 29).
- Laureni, M., Falås, P., Robin, O., Wick, A., Weissbrodt, D. G., Nielsen, J. L., ... Joss, A. 2016. Mainstream partial nitrification and anammox: long-term process stability and effluent quality at low temperatures. *Water Research*, 101, 628–639.

- Lee, A., Nikraz, H., Hung, Y. 2010. Influence of Waste Age on Landfill Leachate Quality. *International Journal of Environmental Science and Development*, 1.
- 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.
- Lopez, A., Pagano, M., Volpe, A., Claudio Di Pinto, A. 2004. Fenton's pre-treatment of mature landfill leachate. *Chemosphere*, 54(7), 1005–1010.
- Mannina, G., Ekama, G. A., Capodici, M., Cosenza, A., Di Trapani, D., Ødegaard, H. 2017. Moving bed membrane bioreactors for carbon and nutrient removal: The effect of C/N variation. *Biochemical Engineering Journal*, 125, 31–40.
- Melidis, P. 2014. Landfill Leachate Nutrient Removal Using Intermittent Aeration. *Environmental Processes*, 1(3), 221–230.
- Metcalf, Eddy. 2014. *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed., Vol. 1). McGraw-Hill.
- Miao, L., Wang, K., Wang, S., Zhu, R., Li, B., Peng, Y., Weng, D. 2014. Advanced nitrogen removal from landfill leachate using real-time controlled three-stage sequence batch reactor (SBR) system. *Bioresource Technology*, 159, 258–265.
- Ngoc, U. N., Schnitzer, H. 2009. Sustainable solutions for solid waste management in Southeast Asian countries. *Waste Management*, 29(6), 1982–1995.
- Odegaard, H., Gisvold, B., Strickland, J. 2000. The Influence of Carrier Size and Shape in The Moving Bed Biofilm Process. *Water Science and Technology*, 41, 383–391.
- Qaderi, F., Ayati, B., Ganjidoust, H. 2011. Role of Moving Bed Biofilm Reactor and Sequencing Batch Reactor in Biological Degradation of Formaldehyde Wastewater. *Iran Journal Environmental, Health, and Science Engineering*, 8, 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. *Jurnal Teknik*, 34(2), 82–87.
- Rusten, B., Eikebrokk, B., Ulgenes, Y., Lygren, E. 2006. Design and operations of the Kaldnes moving bed biofilm reactors. *Design and Selection of Biological Filters for Freshwater and Marine Applications*, 34(3), 322–331.
- Said, N. I. 2005. Aplikasi Bio-Ball untuk Media Biofilter Studi Kasus Pengolahan Air Limbah Pencucian Jean. *Pusat Pengkajian Dan Penerapan Teknologi Lingkungan*, 1.
- Sayoga, N. B., Nur, H., Sakunda, H. 2013. Peningkatan Kualitas Effluent Limbah Cair Tahu dengan Menggunakan Sistem Wastewater Double Treatment (Aerob-Anaerob). *Fakultas Teknologi Pertanian. Universitas Brawijaya*.
- Shammas, N. K. 1986. Interactions of Temperature, pH, and Biomass on the Nitrification Process. *Journal Water Pollution Control Federation*, 58(1), 52–59.
- Sharma, S., Ruparella, J. 2017. Synergistic Effect of O3UV-PS Process for Oxidation of Reactive Dyes Effects of Operating Parameters. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 8(2), 49–57.
- Silva, A. C., Dezotti, M., Sant'Anna, G. L. 2004. Treatment and detoxification of a sanitary landfill leachate. *Chemosphere*, 55(2), 207–214.
- Singh, S. K., Moody, C. M., Townsend, T. G. 2014. Ozonation pretreatment for stabilized landfill leachate high-pressure membrane treatment. *Desalination*, 344, 163–170.
- Slade, A. H., Thorn, G. J. S., Dennis, M. A. 2011. The relationship between BOD:N ratio and wastewater treatability in a nitrogen-fixing wastewater treatment system. *Water Science and Technology*, 627.
- Staehelein, J., Hoigne, J. 1985. Decomposition of Ozone in Water in the Presence of Organic Solutes Acting as Promoters and Inhibitors of Radical Chain Reactions. *Environmental Science Technology*, 19(12).
- 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*, 3(58–86).
- Sururi, M., Ainun, S., Krisna, A. 2014. Pengolahan Lindi dengan Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Ozon, 15, 20–26.
- Tarre, S., Green, M. 2004. *High-Rate Nitrification at Low pH in Suspended- and Attached-Biomass Reactors* (Vol. 70).
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. 1993. *Integrated Solid Waste Management*. New York: McGraw-Hill.
- 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), 316–324.
- Van Aken, P., Lambert, N., Luyten, J., Degreve, J., Liers, S. 2019. *Ozonation of a pretreated landfill leachate: Evaluation of recalcitrance removal*.
- Xiong, J., Zheng, Z., Yang, X., He, J., Luo, X., Gao, B. 2018. Mature landfill leachate treatment by the MBBR inoculated with biocarriers from a municipal wastewater treatment plant. *Process Safety and Environmental Protection*, 119, 304–310.
- Yadi, K. 2017. *Identifikasi Persebaran Air Lindi di TPA Ngipik Kabupaten Gresik Menggunakan Metode Very Low Frequency Electromagnetic (VLF-EM)*. Departemen Teknik Geofisika ITS.

LAMPIRAN 1 PERHITUNGAN VOLUME MEDIA UNTUK MBBR

a. Media Kaldnes K1

Reaktor yang menggunakan media Kaldnes K1 sebanyak 3 reaktor, setiap reaktor membutuhkan 1,4 L media. Total media Kaldnes yang diperlukan sebanyak 4,2 L dengan rincian perhitungan sebagai berikut:

Volume media Kaldnes K1 yang diperlukan:

$$= 20\% \times \text{volume pengolahan}$$

$$= 20\% \times 7 \text{ L} = 1,4 \text{ L}$$

Zona pertumbuhan biofilm pada Kaldnes K1:

$$= 500 \text{ m}^2/\text{m}^3 = 0,5 \text{ m}^2/\text{L}$$

Luas permukaan media yang diperlukan:

$$= 1,4 \text{ L} \times 0,5 \text{ m}^2/\text{L} = 0,7 \text{ m}^2$$

b. Media Kaldnes K5

Reaktor yang menggunakan media Kaldnes K5 sebanyak 3 reaktor, setiap reaktor membutuhkan 0,9 L media. Total media Kaldnes yang diperlukan sebanyak 2,7 L dengan rincian perhitungan sebagai berikut:

Luas permukaan media yang diperlukan = $0,7 \text{ m}^2$

Zona pertumbuhan biofilm pada Kaldnes K1:

$$= 800 \text{ m}^2/\text{m}^3 = 0,8 \text{ m}^2/\text{L}$$

Volume media Kaldnes K5 yang diperlukan:

$$= 0,7 \text{ m}^2 / 0,8 \text{ m}^2/\text{L} = 0,875 \text{ L} = 0,9 \text{ L}$$

c. Media Helix

Reaktor yang menggunakan media Helix sebanyak 3 reaktor, setiap reaktor membutuhkan 1 L media. Total media Kaldnes yang diperlukan sebanyak 3 L dengan rincian perhitungan sebagai berikut:

Luas permukaan media yang diperlukan = $0,7 \text{ m}^2$

Zona pertumbuhan biofilm pada Kaldnes K1:

$$= 720 \text{ m}^2/\text{m}^3 = 0,72 \text{ m}^2/\text{L}$$

Volume media Kaldnes K5 yang diperlukan:

$$= 0,7 \text{ m}^2 / 0,72 \text{ m}^2/\text{L} = 0,972 \text{ L} = 1 \text{ L}$$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN 2 PERHITUNGAN DEBIT AERATOR

Menghitung kebutuhan oksigen secara teori:

$$\begin{aligned} \text{BOD}_{\text{needed}} &= \frac{Q (S_o - S_e)}{1000 \times f} \\ &= \frac{7 \text{ L/hari} \times (1000 - 12) \text{ mg/L}}{1000 \times 0,68} \\ &= 10,17 \times 10^{-3} \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_x &= \frac{Y_x Q (S_o - S_e)}{1000 \times (1 + K_d \times \theta_c)} \\ &= \frac{0,6 \times 7 \text{ L/hari} \times (1000 - 12) \text{ mg/L}}{1000 \times (1 + 0,06 \times 15)} \\ &= 2,18 \times 10^{-3} \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{O}_2 \text{ demand} &= \frac{Q (S_o - S_e)}{1000 \times f} - 1,42 P_x \\ &= 10,17 \times 10^{-3} \text{ kg/hari} - 1,42 (2,18 \times 10^{-3} \text{ kg/hari}) \\ &= 7 \times 10^{-3} \text{ kg/hari} \end{aligned}$$

Menghitung volume udara yang dibutuhkan:

$$\begin{aligned} p_{\text{udara}} &= \gamma_{\text{udara}} = 1,201 \text{ kg/m}^3 \\ \text{Volume O}_2 &= 23,2\% V_{\text{udara}} \\ V_{\text{udara}} &= \frac{7 \times 10^{-3} \text{ kg/hari}}{1,201 \times 0,232} = 0,025 \text{ m}^3/\text{hari} \\ \text{O}_2 \text{ transfer di dalam udara} &= 8\% \\ V_{\text{udara}} \text{ aktual} &= \frac{0,025 \text{ m}^3/\text{hari}}{0,08} = 0,313 \text{ m}^3/\text{hari} \end{aligned}$$

Faktor keamanan dan kebutuhan nitrifikasi = 2

$$\begin{aligned} \text{O}_2 \text{ yang dibutuhkan} &= 2 \times 0,313 \text{ m}^3/\text{hari} \times 1/1440 \text{ menit} \times 1000 \\ &= 0,43 \text{ L/menit} \end{aligned}$$

Karena dalam penelitian ini menggunakan media Kaldnes K1, Kaldnes K5, dan Helix yang dibuat melayang di dalam air maka debit udara yang dibutuhkan minimum 5x lipat dari kebutuhan udara aktual.

Sehingga, O_2 minimum yang dibutuhkan = $5 \times 0,43 \text{ L/menit} = 2,15 \text{ L/menit}$. Aerator yang digunakan menyediakan debit sebesar $3,5 \text{ L/menit}$ 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 ($\text{kg VSS} / \text{kg BOD}$)

Kd = koefisien endogenous ($\text{massa sel} / \text{waktu}$)

θ_C = umur lumpur (hari)

ρ_{udara} = masa jenis udara (kg/m^3)

LAMPIRAN 3
PERHITUNGAN KEBUTUHAN GULA UNTUK SEEDING

Zat organik pada lindi TPA Ngipik berdasarkan analisis COD pada karakteristik awal adalah 4000 mg/L

Perbandingan penggunaan lindi dan sukrosa = 1 : 1

Sehingga kebutuhan sukrosa adalah 2000 mg/L



$$\text{Mr C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} = 342$$

$$\text{Mr } 12 \text{O}_2 = 384$$

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

Sehingga massa sukrosa yang dibutuhkan:

$$\begin{aligned} \frac{1 \text{ mg C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}}{x \text{ mg C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}} &= \frac{1,12 \text{ mg O}_2}{2000 \text{ mg O}_2} \\ x \text{ mg C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} &= \frac{2000 \text{ mg O}_2}{1,12 \text{ mg O}_2} \\ &= 1785,71 \text{ mg} \\ &= 1786 \text{ gram C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} \text{ (untuk tiap liter)} \end{aligned}$$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN 4
PEMBUATAN REAGEN, PROSEDUR ANALISIS, DAN KALIBRASI

A. Analisis *Chemical Oxygen Demand* (COD)

1. Pembuatan Reagen

a. Larutan K₂Cr₂O₇ 0,1 N

Timbang dengan teliti 4,9036 gram K₂Cr₂O₇ yang telah dikeringkan di oven. Larutkan dengan aquades hingga 1 L menggunakan labu pengencer 1 L.

b. Larutan Ferro Amonium Sulfat (FAS) 0,1 N

Timbang dengan teliti 39,2 gram Fe(NH₄)₂(SO₄)₂·6H₂O kemudian tambahkan dengan 8 mL H₂SO₄ pekat. Encerkan dengan aquades hingga 1 L dengan menggunakan labu pengencer 1 L.

c. Larutan Campuran Asam (Ag₂SO₄)

Larutkan 10 gram Ag₂SO₄ ke dalam 1 L H₂SO₄ hingga larut sempurna.

d. Larutan Indikator Ferroin

Larutkan 1,485 gram Orthophenanthroline dan 0,695 gram FeSO₄·7H₂O ke dalam 100 mL aquades dengan menggunakan labu pengencer 100 mL.

2. Prosedur Analisis

Metode analisis COD dilakukan dengan menggunakan prinsip *closed reflux* metode titimetrik berdasarkan (Greenberg *et al.*, 2005), seperti berikut:

- Disiapkan sampel yang akan dianalisis kadar CODnya.
- Diambil 1 mL sampel kemudian diencerkan sampai 100 kali.
- Disiapkan 2 buah tabung COD, kemudian dimasukkan sampel yang telah diencerkan sebanyak 1 mL dan aquades sebanyak 1 mL sebagai blanko.
- Larutan Kalium dikromat (K₂Cr₂O₇) ditambahkan sebanyak 1,5 mL.
- Larutan campuran asam (Ag₂SO₄) ditambahkan sebanyak 2,5 mL.

- Alat pemanas dinyalakan dan diletakkan tabung COD pada rak tabung COD di atas alat pemanas selama 2 jam.
- Setelah 2 jam, alat pemanas dimatikan dan tabung COD dibiarkan hingga dingin.
- Ditambahkan indikator ferroin sebanyak 1 tetes.
- Sampel di dalam tabung COD dipindahkan ke dalam Erlenmeyer kemudian dititrasi menggunakan larutan standard FAS 0,0125 N hingga warna biru-hijau berubah menjadi merah-coklat yang tidak hilang selama 1 menit.
- Perhitungan nilai COD dilakukan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{COD (mg O}_2\text{/L)} = \frac{(A-B) \times N \times 8000}{\text{Volume sampel}} \times p$$

Dimana:

A = mL FAS titrasi blanko

B = mL FAS titrasi sampel

N = normalitas larutan FAS

P = nilai pengenceran

B. Analisis *Biochemical Oxygen Demand* (BOD)

1. Pembuatan Reagen

a. Larutan Buffer Fospat

Campur dan larutkan KH_2PO_4 0,85 gram, K_2HPO_4 0,2175 gram, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,334 gram dan NH_4Cl 0,17 gram ke dalam 100 mL aquades dengan menggunakan labu pengencer 100mL.

b. Larutan MgSO_4

Larutkan 0,225 gram $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ke dalam 100 mL aquades dengan menggunakan labu pengencer 100mL.

c. Larutan CaCl_2

Larutkan 0,275 gram CaCl_2 ke dalam 100mL aquades dengan menggunakan labu pengencer 100 mL.

d. Larutan FeCl_3

Larutkan 0,025 gram $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ke dalam 100 mL aquades dengan menggunakan labu pengencer 100 mL.

Untuk membuat 1 L air pengencer maka dibutuhkan masing-masing 1 mL larutan Buffer Fospat, larutan MgSO_4 , larutan CaCl_2 , larutan FeCl_3 dan larutan benih 1 mL (sampel).

e. Larutan MnCl_2 20%

Larutkan 20 gram MnCl_2 ke dalam 100 mL aquades dengan menggunakan labu pengencer 100 mL.

f. Larutan Pereaksi Oksigen

Campur dan larutkan 40 gram NaOH , 15 gram KI dan 2 gram $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ke dalam 100 mL aquades dengan menggunakan labu pengencer 100 mL.

g. Larutan Indikator Amilum 1%

Larutkan 1 gram amilum dengan 100 mL aquades yang sudah dididihkandi dalam labu pengencer 100 mL dan ditambahkan sedikit Hgl_2 sebagai pengawet.

h. Larutan Thiosulfat 0,01 N

Larutkan 24,82 gram $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ke dalam 1 L aquades yang telah dididihkan dan didinginkan dengan menggunakan labu pengencer 1 L. Kemudian ditambahkan dengan 1 gram NaOH sebagai buffer.

i. H_2SO_4 pekat

2. Prosedur Analisis

Metode analisis BOD dilakukan dengan menggunakan prinsip winklermetode titimetri berdasarkan Greenberg *et al.* (2005), seperti berikut:

- Untuk menentukan angka pengencerannya maka dibutuhkan angka KMnO_4 :

$$P = \frac{\text{Angka KMnO}_4}{3 \text{ atau } 5 \text{ (tergantung dari pH sampel)}}$$

- Siapkan 1 buah labu pengencer 500 mL dan tuangkan sampel sesuai dengan perhitungan pengenceran, tambahkan air pengencer hingga batas labu.
- Siapkan 2 buah botol winkler 300 mL dan 2 buah botol winkler 150 mL.

- Tuangkan air dalam labu pengencer tadi ke dalam botol winkler 300 mL dan 150 mL sampai tumpah.
- Bungkus kedua botol winkler 300 mL dengan menggunakan plastik wrap agar kedap udara. Kemudian masukkan kedua botol tersebut ke dalam inkubator 0 selama 5 hari.
- Kedua botol winkler 150 mL yang berisi air dianalisis oksigen terlarutnya dengan prosedur sebagai berikut:
 - Tambahkan 1 mL larutan MnCl₂.
 - Tambahkan 1 mL larutan Pereaksi Oksigen.
 - Botol ditutup dengan hati-hati agar tidak ada gelembung udara di dalam botol kemudian dikocok beberapa kali.
 - Biarkan gumpalan mengendap selama ± 10 menit.
 - Tambahkan 1 mL H₂SO₄ pekat, tutup dan kocok kembali.
 - Tuangkan 100 mL larutan ke dalam Erlenmeyer 250 mL
 - Tambahkan 3 tetes indikator amilum.
 - Titrasikan dengan larutan Natrium Thiosulfat 0.0125 N sampai warna biru hilang.
- Setelah 5 hari, analisis kedua larutan dalam winkler 300 mL seperti analisis oksigen terlarut.
- Hitung oksigen terlarut dan BOD dengan rumus berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{OT (mg O}_2\text{/L)} &= \frac{a \times N \times 8000}{100 \text{ mL}} \\
 \text{BOD}_5^{20} \text{ (mg/L)} &= \frac{[(X_0 - X_5) - (B_0 - B_5)]}{P} \\
 P &= \frac{\text{mL sampel}}{\text{volume hasil pengenceran (500 mL)}}
 \end{aligned}$$

Dimana:

X₀ = oksigen terlarut sampel pada t = 0

X₅ = oksigen terlarut sampel pada t = 5

B₀ = oksigen terlarut blanko pada t = 0

B₅ = oksigen terlarut blanko pada t = 5

P = derajat pengenceran

a = volume titran (mL)
N = Normalitas Natrium Thiosulfat

C. Analisis Nitrit (Metode Spektrofotometri)

1. Pembuatan Reagen :

a. Sulfanic Acid

1 gram sulfanic acid ditambah 5 mL HCL pekat kemudian dilarutkan dalam aquades sampai 100 mL.

b. NED dihydrochloride

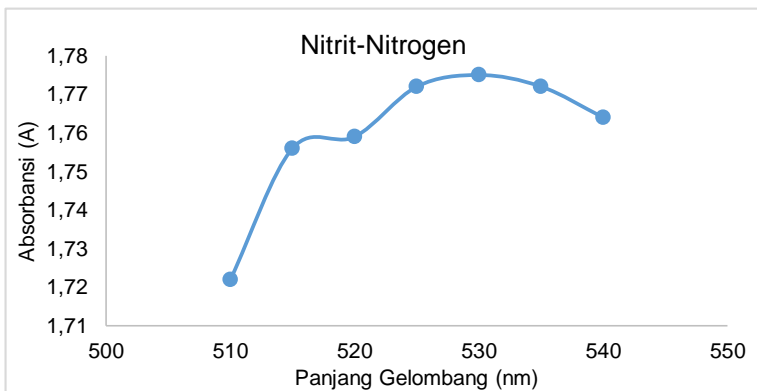
100 NED dihydrochloride kemudian larutkan dalam aquades sampai 100 mL.

2. Kalibrasi :

Sebelum melakukan kalibrasi maka terlebih dahulu dilakukan penentuan panjang gelombang maksimum untuk analisis nitrit-nitrogen.

a. Penentuan Panjang Gelombang

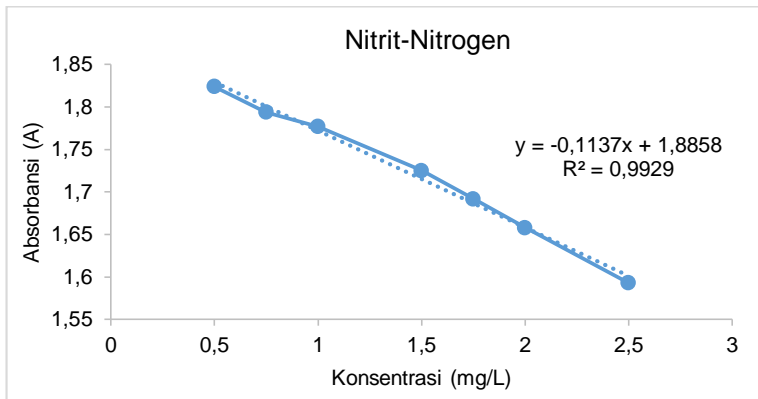
Panjang Gelombang (nm)	Absorbansi (A)
510	1,722
515	1,756
520	1,759
525	1,772
530	1,775
535	1,772
540	1,764



b. Kurva Kalibrasi

Digunakan panjang gelombang 530 nm sesuai dengan hasil penentuan panjang gelombang optimum.

Konsentrasi (mg/L)	Absorbansi (A)
0,5	1,824
0,75	1,794
1	1,777
1,5	1,725
1,75	1,692
2	1,658
2,5	1,593



3. Prosedur kerja analisis :

- Ditimbang sampel kompos dengan neraca analitik sebesar 0,5 gram
- Sampel diencerkan sampai 100 ml dengan aquades menggunakan labu pengencer 100 mL
- Diambil 25 ml larutan dengan gelas ukur dan dimasukkan ke erlenmeyer 250 mL
- Tambahkan 0,5 mL sulfanic acid, kocok, lalu diamkan selama 2 menit
- Tambahkan 0,5 mL larutan NED, diamkan selama 10 menit

- Baca pada spektrofotometer dengan panjang gelombang sesuai dengan hasil kalibrasi yaitu 520 nm
- Blanko yang digunakan adalah aquades dengan penambahan reagen seperti pada sampel
- Hasil absorbansi spektrofotometer diplotkan pada persamaan hasil kalibrasi

D. Analisis Nitrat-Nitrogen (Metode Spektrofotometri)

1. Pembuatan Reagen :

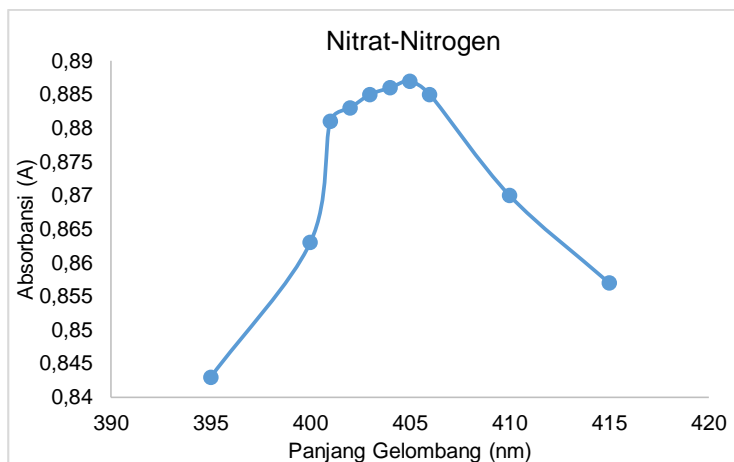
- a. Brucine Asetat 0,5%
Larutkan 0,5 gram serbuk brucine dengan 100 mL acetic acid glacial (CH_3COOH) di dalam labu pengencer 100 mL, kocok hingga larut sempurna.
- b. H_2SO_4 pekat
- c. Larutan Standar Nitrat (100 ppm atau 100 mg/L)
Timbang dengan teliti 721,8 mg KNO_3 kemudian larutkan ke dalam aquades sebanyak 1 L di dalam labu pengencer 1 L.

2. Kalibrasi :

Sebelum melakukan kalibrasi maka terlebih dahulu dilakukan penentuan panjang gelombang maksimum untuk analisis nitrat-nitrogen.

a. Penentuan Panjang Gelombang

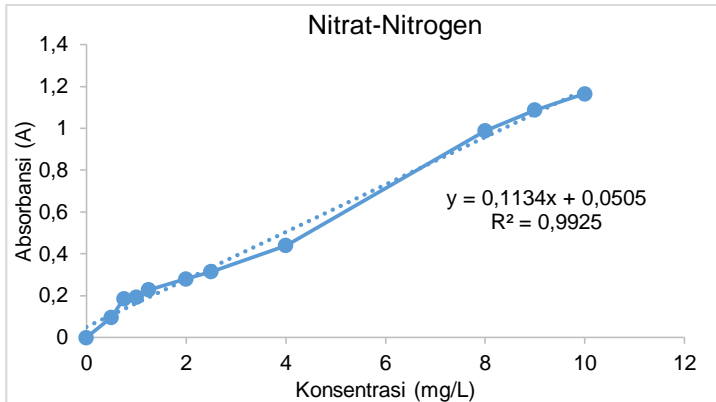
Panjang Gelombang (nm)	Absorbansi (A)
395	0,843
400	0,863
401	0,881
402	0,883
403	0,885
404	0,886
405	0,887
406	0,885
410	0,87
415	0,857



b. Kurva Kalibrasi

Digunakan panjang gelombang 405 nm sesuai dengan hasil penentuan panjang gelombang optimum.

Konsentrasi (mg/L)	Absorbansi (A)
0	0
0,5	0,097
0,75	0,186
1	0,192
1,25	0,228
2	0,28
2,5	0,315
4	0,44
8	0,988
9	1,087
10	1,165



3. Prosedur Analisis :

- Disiapkan sampel yang akan dianalisis kadar nitratnya
- Diambil 2 mL sampel (diencerkan jika sampel terlalu pekat) dan masukkan ke dalam labu erlenmeyer 100 ml
- Ditambahkan 2 mL larutan Brucin Asetat
- Ditambahkan 4 mL larutan H₂SO₄ pekat
- Diaduk dan dibiarkan selama ± 10 menit
- Dibaca dengan spektrofotometer dengan panjang gelombang sesuai dengan hasil kalibrasi panjang gelombang
- Blanko yang digunakan adalah larutan sampel (tanpa reagen)
- Hitung nilai nitrat dengan rumus dari kurva kalibrasi

E. Analisis Amonium-Nitrogen

1. Pembuatan Reagen

a. Nessler

Campur dan haluskan 50 gram serbuk HgI₂ dan 35 gram KI kemudian dilarutkan dengan 80 gram NaOH yang sudah dilarutkan dengan aquades hingga 500 mL. Biarkan mengendap dan diambil supernatannya.

b. Garam Signet

Larutkan 50 gram K.Na.Tatrat ke dalam 500 mL aquades, kemudian ditambahkan 5 mL larutan nessler sebagai pengawet.

c. Larutan Standar Amonium (100 ppm atau 100 mg/L)

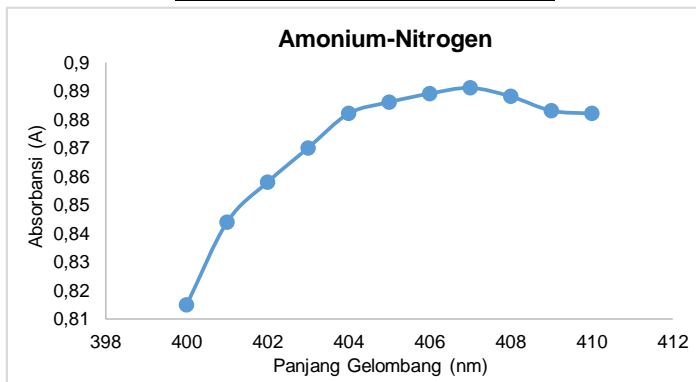
Timbang dengan teliti 382,14 mg NH₄Cl kemudian larutkan ke dalam aquades sebanyak 1 L di dalam labu pengencer 1 L. Ditambahkan 3 tetes toluen sebagai pengawet.

2. Kalibrasi

Sebelum melakukan kalibrasi maka terlebih dahulu dilakukan penentuan panjang gelombang maksimum untuk analisis nitrat-nitrogen.

a. Penentuan Panjang Gelombang

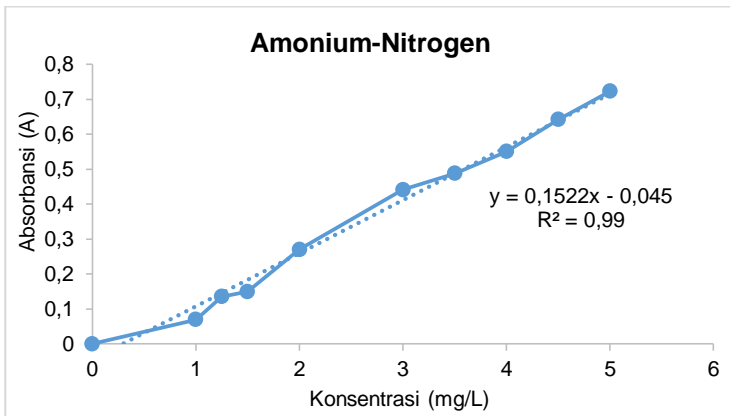
Panjang Gelombang (nm)	Absorbansi (A)
400	0,815
401	0,844
402	0,858
403	0,87
404	0,882
405	0,886
406	0,889
407	0,891
408	0,888
409	0,883
410	0,882



b. Kurva Kalibrasi Amonium-Nitrogen

Digunakan panjang gelombang 407 nm sesuai dengan hasil penentuan panjang gelombang optimum.

Konsentrasi (mg/L)	Absorbansi (A)
0	0
1	0,07
1,25	0,135
1,5	0,15
2	0,27
3	0,441
3,5	0,488
4	0,55
4,5	0,642
5	0,723



3. Prosedur Analisis

- Disiapkan sampel yang akan dianalisis kadar amoniannya.
- Diambil 25 mL sampel (diencerkan jika sampel terlalu pekat)
- Ditambahkan 1 mL larutan nessler

- Ditambahkan 1,25 mL larutan garam signet
- Diaduk dan didiamkan selama \pm 10 menit
- Dibaca dengan spektrofotometer
- Blanko yang digunakan adalah aquades dengan penambahan reagen seperti pada sampel.

F. Prosedur Analisis Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)

1. Pembuatan Reagen :

a. Campuran CuSO_4

Dibuat dengan mencampurkan 1,55 gram CuSO_4 anhidrat, 96,9 gram Na_2SO_4 anhidrat dan 1,55 gram Selenium kemudian dihaluskan.

b. H_2SO_4 pekat

Digunakan langsung dari botolnya tanpa dituang ke beaker glass.

c. Nessler

Campur dan haluskan 50 gram serbuk HgI_2 dan 35 gram KI kemudian dilarutkan dengan 80 gram NaOH yang sudah dilarutkan dengan aquades hingga 500 mL. Biarkan mengendap dan diambil supernatannya.

d. Garam Signet

Larutkan 50 gram K.Na.Tartrat ke dalam 500 mL aquades, kemudian ditambahkan 5 mL larutan nessler sebagai pengawet.

2. Prosedur kerja analisis :

- Timbang 0,2 gram sampel dengan timbangan anallitis
- Masukkan ke dalam labu kjehdahl
- Tambahkan 10 mL reagen $\text{CuSO}_4.\text{H}_2\text{SO}_4$ pekat
- Panaskan dengan alat Kjedahl selama 4 jam hingga warna berubah hijau
- Dinginkan hasil destilasi. Kemudian encerkan menjadi 100 mL, setelah itu ambil 1 mL dan masukkan ke dalam labu erlenmeyer 100 mL
- Encerkan larutan menjadi 25 mL dengan menggunakan aquades
- Tambahkan 0,6 mL garam signet dan 0,5 mL nessler

- Diamkan selama 10 menit
- Lakukan tahap sebelumnya pada aquades dan blanko
- Baca dengan spektrofotometer dengan panjang gelombang sesuai dengan hasil kalibrasi yaitu 395 nm
- Hitung total kjehdahl nitrogen dengan rumus dari kurva kalibrasi

G. Prosedur Analisis Derajat Keasaman (pH)

Analisis pH menggunakan pH meter dengan bacaan digital. Prosedur analisis menggunakan modifikasi dari Greenberg *et al.* (2005) sebagai berikut:

- pH meter distandarisasi menggunakan larutan buffer pH pada pH 4, 7, dan 10. Standarisasi dilakukan dengan mencelupkan probe pH meter bergantian ke dalam larutan buffer dengan urutan: buffer pH 4 □ buffer pH 7 □ buffer pH 10 □ buffer pH 7.
- Diambil sejumlah sampel dan diletakkan ke dalam *beaker glass*.
- Dichelupkan probe pH meter ke dalam sampel yang diukur nilai pH nya.
- Dibaca nilai pH sampel pada monitor pembaca.

H. Analisis Dissolved Oxygen (DO)

Analisis DO menggunakan DO meter dengan bacaan digital. Prosedur analisis sebagai berikut:

- Diambil sejumlah sampel dan diletakkan ke dalam *beaker glass*.
- Dichelupkan probe DO meter ke dalam sampel yang diukur nilai DO nya.
- Dibaca nilai DO sampel pada monitor pembaca.

I. Analisis Salinitas

Analisis salinitas menggunakan pH onlab dengan bacaan digital. Prosedur analisis menggunakan modifikasi dari Greenberg *et al.* (2005) sebagai berikut:

- pH *onlab* disetting untuk mengukur salinitas dengan menekan *enter/mode* hinggapada layer muncul tulisan

“sal”. Kemudian distandarisasi menggunakan larutan buffer pH 7. Standarisasi dilakukan dengan mencelupkan probe pH *onlab* ke dalam larutan buffer.

- Diambil sejumlah sampel dan diletakkan ke dalam *beaker glass*.
- Dichelupkan probe pH *onlab* ke dalam sampel yang diukur nilai salinitasnya.
- Dibaca nilai salinitas sampel pada monitor pembaca.

J. Analisis MLSS (Mixed Liquor Suspended Solid)

Teknik analisis MLSS dalam penelitian ini menggunakan metode gravimetri berdasarkan modifikasi dari metode analisis TSS pada Greenberg *et al.* (2005) seperti berikut:

1. Cawan porselin dipanaskan pada furnace dengan suhu 550°C selama 1 jam, kemudian dimasukkan ke dalam oven dengan suhu 105°C selama 5 menit.
2. Disiapkan kertas saring dan dimasukkan ke dalam oven dengan suhu 105°C selama 1 jam.
3. Kertas saring dan cawan dimasukkan ke dalam desikator selama 15 menit.
4. Cawan dan kertas saring ditimbang bersamaan dengan menggunakan neraca analitik. Hasil penimbangan cawan dicatat sebagai a (mg), dan hasil penimbangan kertas saring dicatat sebagai b (mg).
5. Kertas saring yang telah ditimbang, diletakkan pada vacuum filter.
6. Sampel disaring dengan menggunakan vacuum filter yang telah dipasang kertas saring yang telah ditimbang. Sampel disaring hingga kering. Dicatat volume sampel yang disaring sebagai c (mL).
7. Diambil kertas saring yang telah digunakan pada langkah 6 kemudian diletakkan pada cawan yang sama dengan yang digunakan pada langkah 4.
8. Cawan yang berisi kertas saring dimasukkan ke dalam oven dengan suhu 105°C selama 1 jam.
9. Cawan yang berisi kertas saring dipindahkan ke dalam desikator selama 15 menit.

10. Cawan yang berisi kertas saring ditimbang dengan menggunakan neraca analitik. Hasil penimbangan dicatat sebagai d (mg).
11. Dilakukan perhitungan jumlah zat padat tersuspensi (TSS) dalam sampel dengan rumus:

$$\text{TSS (mg/L)} = \frac{d(a+b)}{c} \times 1000 \times 1000$$

K. Analisis MLVSS (Mixed Liquor VolatileSuspended Solid)

Teknik analisis MLVSS dalam penelitian ini menggunakan metode gravimetri berdasarkan modifikasi dari metode analisis VSS pada Greenberg *et al.* (2005). Analisis MLVSS ini merupakan lanjutan dari hasil analisis MLSS seperti berikut:

- Cawan yang berisis kertas saring, yang mengandung residu dari hasil analisis MLSS dimasukkan ke dalam *furnace* dengan suhu 550°C selama jam.
- Setelah di *furnace*, cawan dan kertas saring dipindahkan ke dalam oven dengan suhu 105°C selama 5 menit.
- Cawan yang berisi kertas saring kemudian dimasukkan ke dalam desikator selama 15 menit.
- Cawan dan kertas saring ditimbang menggunakan neraca analitik. Hasil penimbangan cawan dicatat sebagai e (mg).
- Dihitung jumlah zat padat tersuspensi organik (VSS) dalam sampel dengan rumus:

$$\text{FSS (mg/L)} = \frac{d(a+b)}{c} \times 1000 \times 1000$$

$$\text{VSS (mg/L)} = \text{TSS} - \text{FSS}$$

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN 5 DATA HASIL ANALISIS LABORATORIUM

A. Konsentrasi COD

Reaktor	COD (mg/L)														
	IN 1	AE1	AN1	IN2	AE2	AN2	IN3	AE3	AN3	IN4	AE4	AN4	IN5	AE5	AN5
1K1	3456	1824	1728	2340	1872	1574	1872	1768	1560	2288	1872	1181	1498	1404	1310
2K1	1920	1248	960	2059	1404	1181	1248	1040	624	1560	1456	886	1404	1310	1123
3K1	1536	1056	768	1778	1123	1082	832	728	312	1144	1040	295	1310	1123	842
1K5	2208	1920	1536	2153	1498	1476	1976	1872	1768	2392	1976	1378	1872	1591	1404
2K5	2016	1344	1248	2808	1310	1279	1352	1144	832	1664	1248	886	1591	1310	1217
3K5	1728	1248	960	2340	1217	1181	936	832	416	1352	1144	394	1498	1123	936
1H	2112	1632	1344	2246	1685	1476	1664	1560	936	2184	1664	984	1404	1123	936
2H	1920	1152	864	2153	1217	1082	1144	1040	416	1456	1144	787	1217	936	655
3H	1440	960	672	2059	1030	984	728	624	208	1040	728	197	1123	842	374

Keterangan:

1K1 : Tanpa Ozon Kaldnes K1

2K1 : Ozon 1 Kaldnes K1

3K1 : Ozon 2 Kaldnes K1

1K5 : Tanpa Ozon Kaldnes K5

2K5 : Ozon 1 Kaldnes K5

3K5 : Ozon 2 Kaldnes K5

1H : Tanpa Ozon Helix

2H : Ozon 1 Helix

3H : Ozon 2 Helix

IN : Intermitten

AE : Aerobik

AN : Anoksik

B. Konsentrasi Amonium-Nitrogen (NH₄-N)

Reaktor	Amonium-Nitrogen (mg/L)														
	IN 1	AE1	AN1	IN2	AE2	AN2	IN3	AE3	AN3	IN4	AE4	AN4	IN5	AE5	AN5
1K1	85,5	35,0	32,6	35,3	33,1	32,6	34,3	33,4	29,3	33,1	30,8	31,2	33,4	33,1	30,9
2K1	84,7	27,2	24,7	26,4	27,7	24,7	25,5	24,4	23,0	25,4	23,0	24,4	24,1	25,3	24,9
3K1	85,7	20,8	17,8	19,0	18,9	17,8	19,0	18,1	16,2	17,8	16,3	24,6	28,0	18,4	18,2
1K5	83,5	33,2	32,2	34,1	32,4	32,2	34,0	33,1	30,1	33,1	30,8	32,4	32,2	33,3	31,8
2K5	84,7	28,7	26,4	27,5	26,9	26,4	28,1	25,5	23,6	25,7	17,5	25,3	24,8	26,8	26,1
3K5	83,2	19,5	16,8	19,1	18,8	16,8	18,9	19,2	17,1	19,1	23,9	19,9	18,6	18,9	17,7
1H	83,5	34,2	31,5	34,2	34,1	31,5	34,3	34,3	30,8	43,0	32,6	33,0	34,0	33,4	29,6
2H	86,3	26,6	24,3	25,5	25,3	24,3	26,7	26,5	23,2	26,7	24,9	25,7	25,5	26,0	22,1
3H	84,4	80,4	83,4	79,5	60,5	83,4	19,2	17,5	18,3	19,6	14,9	21,2	19,4	20,0	21,5

Keterangan:

1K1 : Tanpa Ozon Kaldnes K1
 2K1 : Ozon 1 Kaldnes K1
 3K1 : Ozon 2 Kaldnes K1

1H : Tanpa Ozon Helix
 2H : Ozon 1 Helix
 3H : Ozon 2 Helix

1K5 : Tanpa Ozon Kaldnes K5
 2K5 : Ozon 1 Kaldnes K5
 3K5 : Ozon 2 Kaldnes K5

IN : Intermitten
 AE : Aerobik
 AN : Anoksik

C. Konsentrasi Nitrat-Nitrogen (NO₃-N)

Reaktor	Nitrat-Nitrogen (mg/L)											
	IN2	AE2	AN2	IN3	AE3	AN3	IN4	AE4	AN4	IN5	AE5	AN5
1K1	29,9	32,1	6,0	31,3	34,2	6,3	35,6	38,2	11,2	32,3	34,8	7,8
2K1	29,9	32,1	6,0	31,2	34,1	6,3	35,6	38,2	11,2	32,2	34,8	7,8
3K1	29,8	32,1	6,0	31,2	34,0	6,3	35,6	38,2	11,3	32,2	34,8	7,9
1K5	29,7	32,1	6,0	31,2	34,1	6,3	35,6	38,2	11,3	32,2	34,8	7,9
2K5	29,8	32,2	6,0	31,3	34,0	6,3	35,7	38,3	11,3	32,3	34,8	7,9
3K5	29,9	32,2	6,0	31,2	34,0	6,3	35,6	38,2	11,2	32,3	34,8	7,8
1H	29,5	31,9	5,9	30,9	33,7	6,2	35,5	38,1	11,3	32,0	34,6	7,8
2H	29,8	32,3	6,0	31,3	34,0	6,3	35,8	38,4	11,4	32,3	34,9	7,9
3H	19,2	24,7	4,5	22,7	25,6	5,0	29,3	33,5	13,1	23,7	28,0	7,5

Keterangan:

1K1 : Tanpa Ozon Kaldnes K1

2K1 : Ozon 1 Kaldnes K1

3K1 : Ozon 2 Kaldnes K1

1K5 : Tanpa Ozon Kaldnes K5

2K5 : Ozon 1 Kaldnes K5

3K5 : Ozon 2 Kaldnes K5

1H : Tanpa Ozon Helix

2H : Ozon 1 Helix

3H : Ozon 2 Helix

IN : Intermitten

AE : Aerobik

AN : Anoksik

D. Konsentrasi Nitrit-Nitrogen

Reaktor	Nitrit-Nitrogen (mg/L)														
	IN 1	AE1	AN1	IN2	AE2	AN2	IN3	AE3	AN3	IN4	AE4	AN4	IN5	AE5	AN5
1K1	71,0	70,5	69,3	72,1	8,1	10,3	8,6	71,4	73,2	6,7	74,4	74,4	3,9	73,2	74,8
2K1	1,0	8,0	6,4	7,5	71,8	74,7	8,0	74,8	76,2	6,4	76,4	76,9	3,6	76,3	77,5
3K1	8,9	71,7	76,5	8,3	78,2	78,8	77,0	78,4	78,8	77,5	78,5	76,7	37,9	78,5	79,0
1K5	72,2	72,6	72,6	72,9	69,4	66,8	71,3	13,9	9,8	38,6	5,8	6,4	6,5	45,6	74,7
2K5	2,3	8,8	7,2	12,4	52,3	70,4	8,3	70,9	70,5	64,1	75,2	74,1	4,3	76,2	76,5
3K5	3,1	8,0	60,0	6,9	77,8	78,6	75,4	78,1	77,3	9,8	76,9	78,0	3,2	78,3	78,8
1H	71,9	72,8	72,9	73,0	73,3	73,4	73,1	73,2	73,3	72,5	59,4	49,5	71,5	71,5	65,4
2H	1,8	58,9	53,5	68,9	7,7	54,4	8,2	23,8	60,1	6,6	68,1	65,3	3,8	56,4	66,0
3H	7,2	8,0	6,5	7,8	7,6	8,3	8,0	7,8	8,3	6,8	6,1	6,3	5,1	7,8	7,9

Keterangan:

1K1 : Tanpa Ozon Kaldnes K1

2K1 : Ozon 1 Kaldnes K1

3K1 : Ozon 2 Kaldnes K1

1K5 : Tanpa Ozon Kaldnes K5

2K5 : Ozon 1 Kaldnes K5

3K5 : Ozon 2 Kaldnes K5

1H : Tanpa Ozon Helix

2H : Ozon 1 Helix

3H : Ozon 2 Helix

IN : Intermitten

AE : Aerobik

AN : Anoksik

E. Konsentrasi TKN, TN, dan N Organik

Reaktor	TKN		Nitrogen Organik		Total Nitrogen	
	IN1	AN4	IN1	AN4	IN1	AN4
1K1	163,88	20,32	78,38	28,58	163,88	31,53
2K1	145,61	11,89	60,89	17,55	145,61	23,09
3K1	106,25	10,77	20,55	5,89	106,25	22,04
1K5	145,61	9,92	62,08	24,06	145,61	21,24
2K5	132,31	21,17	47,66	14,27	132,31	32,44
3K5	117,71	17,09	34,53	8,24	117,71	28,31
1H	119,19	13,86	35,74	14,13	119,19	25,19
2H	110,47	11,89	24,20	7,21	110,47	23,28
3H	97,82	10,06	13,45	3,38	97,82	23,14

Keterangan:

1K1 : Tanpa Ozon Kaldnes K1

2K1 : Ozon 1 Kaldnes K1

3K1 : Ozon 2 Kaldnes K1

1K5 : Tanpa Ozon Kaldnes K5

2K5 : Ozon 1 Kaldnes K5

3K5 : Ozon 2 Kaldnes K5

1H : Tanpa Ozon Helix

2H : Ozon 1 Helix

3H : Ozon 2 Helix

IN : Intermitten

AN : Anoksik

F. Konsentrasi BOD₅

Variasi Pre-treatment	BOD ₅ (mg/L)					
	IN 1	AE1	AN1	IN4	AE4	AN4
1K1	45,70	104,55	175,24	22,20	344,26	284,55
2K1	200,93	129,38	98,57	18,47	326,72	260,40
3K1	210,45	133,16	88,46	13,14	226,50	84,25
1K5	29,19	65,71	123,85	3,25	26,74	18,96
2K5	366,23	184,00	115,00	40,58	302,80	218,59
3K5	202,07	186,88	175,24	31,08	261,65	91,58
1H	20,13	128,80	199,33	25,00	419,91	263,44
2H	500,32	223,43	110,00	4,42	261,65	158,42
3H	377,86	251,90	176,33	4,19	221,03	44,89

Keterangan:

1K1 : Tanpa Ozon Kaldnes K1
2K1 : Ozon 1 Kaldnes K1
3K1 : Ozon 2 Kaldnes K1

1H : Tanpa Ozon Helix
2H : Ozon 1 Helix
3H : Ozon 2 Helix

1K5 : Tanpa Ozon Kaldnes K5
2K5 : Ozon 1 Kaldnes K5
3K5 : Ozon 2 Kaldnes K5

IN : Intermitten
AE : Aerobik
AN : Anoksik

G. Rasio BOD₅/COD, Rasio F/M, Rasio COD/TN, dan Rasio BOD/N Organik

Reaktor	BOD ₅ /COD						Rasio F/M		Rasio COD/TN		Rasio BOD / Norg	
	IN 1	AE1	AN1	IN4	AE4	AN4	IN1	AN5	IN1	AN4	IN1	AN4
1K1	0,01	0,06	0,10	0,01	0,18	0,24	0,002	0,037	21,09	37,45	0,58	9,96
2K1	0,10	0,10	0,10	0,01	0,22	0,29	0,007	0,038	13,19	38,36	3,30	14,83
3K1	0,14	0,13	0,12	0,01	0,22	0,29	0,006	0,012	14,46	13,39	10,24	14,30
1K5	0,01	0,03	0,08	0,00	0,01	0,01	0,001	0,002	15,16	64,85	0,47	0,79
2K5	0,18	0,14	0,09	0,02	0,24	0,25	0,013	0,028	15,24	27,30	7,68	15,32
3K5	0,12	0,15	0,18	0,02	0,23	0,23	0,007	0,012	14,68	13,90	5,85	11,11
1H	0,01	0,08	0,15	0,01	0,25	0,27	0,001	0,029	17,72	39,06	0,56	18,64
2H	0,26	0,19	0,13	0,00	0,23	0,20	0,018	0,019	17,38	33,81	20,67	21,98
3H	0,26	0,26	0,26	0,00	0,30	0,23	0,012	0,006	14,72	8,50	28,09	13,29

Keterangan:

1K1 : Tanpa Ozon Kaldnes K1

2K1 : Ozon 1 Kaldnes K1

3K1 : Ozon 2 Kaldnes K1

1K5 : Tanpa Ozon Kaldnes K5

2K5 : Ozon 1 Kaldnes K5

3K5 : Ozon 2 Kaldnes K5

1H : Tanpa Ozon Helix

2H : Ozon 1 Helix

3H : Ozon 2 Helix

IN : Intermitten

AE : Aerobik

AN : Anoksik

H. Konsentrasi DO

Reaktor	DO (mg/L)														
	IN 1	AE1	AN1	IN2	AE2	AN2	IN3	AE3	AN3	IN4	AE4	AN4	IN5	AE5	AN5
1K1	1,64	3,23	1,67	1,84	4,83	1,58	1,86	4,17	1,62	1,58	4,33	1,42	2,60	4,59	1,78
2K1	1,70	2,34	1,32	1,80	4,45	1,65	1,87	4,34	1,27	1,25	4,81	1,20	2,20	3,95	1,43
3K1	1,32	2,19	1,46	1,62	4,77	1,55	1,69	4,45	1,80	1,66	4,77	1,71	1,93	4,31	1,33
1K5	1,67	3,02	1,37	1,87	4,37	1,69	2,74	4,60	1,57	1,41	4,80	1,58	2,23	3,80	1,97
2K5	1,70	2,43	1,58	1,70	4,20	2,31	1,85	4,91	1,88	1,02	4,59	1,28	2,25	4,46	1,51
3K5	1,60	3,10	1,23	1,64	4,95	1,39	2,01	5,33	1,83	1,87	4,09	1,77	2,62	4,53	1,56
1H	1,76	2,70	1,68	1,76	4,77	1,92	2,40	4,92	1,56	1,60	4,78	1,08	2,99	3,94	1,47
2H	1,72	3,08	1,33	1,82	4,24	1,72	1,60	5,32	1,88	1,40	4,73	1,63	1,96	4,87	1,88
3H	1,74	3,02	1,31	1,74	2,03	1,63	1,61	2,65	1,63	1,93	3,27	1,23	1,75	3,84	1,21

Keterangan:

1K1 : Tanpa Ozon Kaldnes K1

2K1 : Ozon 1 Kaldnes K1

3K1 : Ozon 2 Kaldnes K1

1K5 : Tanpa Ozon Kaldnes K5

2K5 : Ozon 1 Kaldnes K5

3K5 : Ozon 2 Kaldnes K5

1H : Tanpa Ozon Helix

2H : Ozon 1 Helix

3H : Ozon 2 Helix

IN : Intermitten

AE : Aerobik

AN : Anoksik

I. Konsentrasi MLSS

Reaktor	MLSS (mg/L)					
	IN 1	AN1	IN3	AN3	IN5	AN5
1K1	21660	18650	15300	8500	8130	3100
2K1	22610	18160	15320	8610	8670	2200
3K1	22680	19840	14090	9490	5200	2120
1K5	21950	20220	15220	8520	7100	4100
2K5	20310	19670	14750	8300	5920	3900
3K5	19560	18670	15290	8110	5290	2700
1H	21650	20620	14880	8620	8890	4980
2H	23280	19570	16140	9000	7960	3800
3H	23220	21020	13520	8300	5350	3030

Keterangan:

1K1 : Tanpa Ozon Kaldnes K1
 2K1 : Ozon 1 Kaldnes K1
 3K1 : Ozon 2 Kaldnes K1

1H : Tanpa Ozon Helix
 2H : Ozon 1 Helix
 3H : Ozon 2 Helix

1K5 : Tanpa Ozon Kaldnes K5
 2K5 : Ozon 1 Kaldnes K5
 3K5 : Ozon 2 Kaldnes K5

IN : Intermitten
 AN : Anoksik

J. Konsentrasi MLVSS

Reaktor	MLVSS (mg/L)					
	IN 1	AN1	IN3	AN3	IN5	AN5
1K1	29240	23710	20750	17440	11850	7590
2K1	30810	24370	20460	17520	12150	6860
3K1	32500	27200	19810	18030	10200	6820
1K5	28170	21680	19810	15990	9800	8030
2K5	28370	22860	20100	15560	11030	7740
3K5	28300	24860	20140	16140	11570	7660
1H	27090	21540	19810	16760	12510	9160
2H	27890	21440	21220	17590	13940	8340
3H	30530	23870	19110	16900	12140	7260

Keterangan:**1K1 : Tanpa Ozon Kaldnes K1****2K1 : Ozon 1 Kaldnes K1****3K1 : Ozon 2 Kaldnes K1****1H : Tanpa Ozon Helix****2H : Ozon 1 Helix****3H : Ozon 2 Helix****1K5 : Tanpa Ozon Kaldnes K5****2K5 : Ozon 1 Kaldnes K5****3K5 : Ozon 2 Kaldnes K5****IN : Intermitten****AN : Anoksik**

K. Konsentrasi pH

Reaktor	pH														
	IN 1	AE1	AN1	IN2	AE2	AN2	IN3	AE3	AN3	IN4	AE4	AN4	IN5	AE5	AN5
1K1	6,50	7,10	7,20	7,40	7,40	7,30	7,60	7,60	7,60	7,20	7,80	7,40	7,30	7,90	7,30
2K1	6,70	7,20	7,30	7,40	7,60	7,50	7,70	7,80	7,70	7,40	7,80	7,50	7,40	7,90	7,40
3K1	6,90	7,20	7,40	7,50	7,70	7,50	7,70	7,80	7,70	7,30	7,70	7,60	7,40	7,90	7,70
1K5	6,80	7,00	7,20	7,40	7,50	7,50	7,70	7,80	7,60	7,40	7,70	7,50	7,50	7,90	7,50
2K5	7,00	7,00	7,40	7,50	7,60	7,50	7,70	7,80	7,70	7,40	7,70	7,60	7,40	7,80	7,60
3K5	7,00	7,20	7,40	7,50	7,70	7,70	7,80	7,90	7,70	7,50	7,70	7,70	7,40	7,80	7,70
1H	6,90	7,20	7,40	7,50	7,60	7,50	7,70	7,80	7,60	7,40	7,90	7,50	7,30	7,70	7,50
2H	7,00	7,30	7,50	7,50	7,60	7,60	7,70	7,90	7,70	7,40	7,80	7,60	7,40	7,70	7,60
3H	7,10	7,40	7,50	7,50	7,70	7,60	7,80	7,90	7,80	7,60	7,80	7,70	7,40	7,80	7,70

Keterangan:

1K1 : Tanpa Ozon Kaldnes K1

2K1 : Ozon 1 Kaldnes K1

3K1 : Ozon 2 Kaldnes K1

1K5 : Tanpa Ozon Kaldnes K5

2K5 : Ozon 1 Kaldnes K5

3K5 : Ozon 2 Kaldnes K5

1H : Tanpa Ozon Helix

2H : Ozon 1 Helix

3H : Ozon 2 Helix

IN : Intermitten

AE : Aerobik

AN : Anoksik

L. Konsentrasi Salinitas

Reaktor	Salinitas (ppt)														
	IN 1	AE1	AN1	IN2	AE2	AN2	IN3	AE3	AN3	IN4	AE4	AN4	IN5	AE5	AN5
1K1	3,87	3,81	3,87	3,86	3,73	3,87	3,82	3,76	3,67	3,79	3,83	3,82	3,86	3,85	3,87
2K1	3,09	3,19	3,16	3,13	3,18	3,11	3,39	3,13	3,16	3,11	3,22	3,21	3,25	3,08	3,12
3K1	2,68	2,41	2,41	2,37	2,50	2,43	2,46	2,38	2,37	2,38	2,45	2,78	2,50	2,36	2,36
1K5	3,72	3,83	3,79	3,81	3,76	3,88	3,93	3,80	3,74	3,80	3,86	3,87	3,98	3,92	3,80
2K5	3,02	3,22	3,08	3,16	3,23	3,24	3,43	3,20	3,17	3,25	3,48	3,35	3,36	3,28	3,46
3K5	2,40	2,47	2,46	2,40	2,40	2,52	2,65	2,49	2,47	2,44	2,64	2,50	2,49	2,46	2,41
1H	3,82	3,79	3,72	3,76	3,66	3,62	3,72	3,72	3,62	3,73	3,79	3,75	3,80	3,82	3,83
2H	3,13	3,12	3,06	3,08	3,15	3,15	3,35	3,13	3,03	3,08	3,15	3,19	3,11	3,05	3,11
3H	2,44	2,48	2,38	2,31	2,36	2,36	2,49	2,29	2,27	2,27	2,26	2,22	2,25	2,18	2,34

Keterangan:

1K1 : Tanpa Ozon Kaldnes K1

2K1 : Ozon 1 Kaldnes K1

3K1 : Ozon 2 Kaldnes K1

1H : Tanpa Ozon Helix

2H : Ozon 1 Helix

3H : Ozon 2 Helix

1K5 : Tanpa Ozon Kaldnes K5

2K5 : Ozon 1 Kaldnes K5

3K5 : Ozon 2 Kaldnes K5

IN : Intermitten

AE : Aerobik

AN : Anoksik

M. Konsentrasi *Total Suspended Solid* (TSS)

Reaktor	TSS (mg/L)								
	IN 1	AE1	AN1	IN3	AE3	AN3	IN4	AE4	AN4
1K1	180	180	140	130	120	130	110	100	70
2K1	170	160	110	130	110	100	100	90	50
3K1	160	150	100	120	100	130	100	80	30
1K5	180	170	110	120	110	150	110	100	80
2K5	170	200	100	120	100	100	90	90	70
3K5	160	150	60	110	100	100	120	90	60
1H	160	130	70	130	130	120	100	80	50
2H	180	110	50	140	120	110	80	80	30
3H	160	120	70	120	90	80	80	60	20

Keterangan:

1K1 : Tanpa Ozon Kaldnes K1
 2K1 : Ozon 1 Kaldnes K1
 3K1 : Ozon 2 Kaldnes K1

1H : Tanpa Ozon Helix
 2H : Ozon 1 Helix
 3H : Ozon 2 Helix

1K5 : Tanpa Ozon Kaldnes K5
 2K5 : Ozon 1 Kaldnes K5
 3K5 : Ozon 2 Kaldnes K5

IN : Intermitten
 AE : Aerobik
 AN : Anoksik

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LAMPIRAN 6
DOKUMENTASI PENELITIAN



Pengambilan sampel lindi



Seeding-Aklimatisasi



Pre-treatment Ozonisasi



Reaktor penelitian



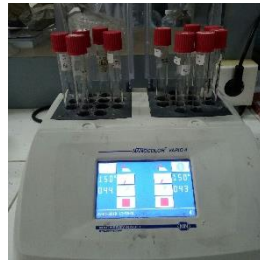
Media awal



Media setelah penelitian



Analisis BOD₅



Analisis COD



Analisis Amonium, Nitrat, Nitrit



Analisis MLSS/MLVSS



Analisis TSS



Pengukuran volume lumpur

BIOGRAFI PENULIS



Penulis berasal dari Surabaya namun dilahirkan di Sidoarjo. Penulis menghabiskan masa pendidikan wajibnya di Surabaya dengan mengenyam pendidikan di SDN Kebraon 1/436 Surabaya (2003-2009), SMPN 22 Surabaya (2009-2012), dan SMAN 15 Surabaya (2012-2015). Penulis kemudian melanjutkan pendidikan S1 di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan (FTSLK), ITS Surabaya (2015-2019).

Selama masa perkuliahan, penulis aktif mengikuti berbagai organisasi seperti Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL), Ikatan Mahasiswa Teknik Lingkungan Indonesia (IMTLI), Kelompok Pecinta dan Pemerhati Lingkungan (KPPL) HMTL ITS. 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 dan Mikrobiologi. Penulis juga berkesempatan untuk kerja praktek di PT Pertamina (Persero) Refinery Unit VI Balongan – Indramayu pada divisi Health Safety Security Environment (HSSE) dan mengevaluasi emisi gas rumah kaca sumber bergerak dan tidak bergerak. Penulis dapat dihubungi melalui email rofiqohalghani16@gmail.com.



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN-ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948886, Fax: 031-5928387

KTA-S1-TL-03 TUGAS AKHIR

Kode/BKS : RE141581 (0/6/0)

Periode: Genap 2018/2019

No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR KTA-02

Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing
Seminar Kemajuan Tugas Akhir

Hari, tanggal : Kamis, 9 Mei 2019

Nilai TOEFL : 477

Pukul : 11.00 - 12.00

Lokasi : TL - 101

Judul : Pengolahan Lindi TPA Ngipik Gresik dengan Kombinasi Proses Ozonisasi dan *Moving Bed Reactor* (MBBR) Secara *Intermitten*

Nama : Rofiqoh Al Ghani

Tanda Tangan

NRP. : 03211540000020

Topik : Penelitian

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Seminar Kemajuan Tugas Akhir
	<p>- Data akumulasi removal - Kesimpulan disusun dari kondisi yang sama - Grafik dan</p> <p style="text-align: right;">3/15 <i>[Signature]</i></p>

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir KTA-02 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus mahasiswa dibawa saat asistensi kepada Dosen Pembimbing
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Berdasarkan hasil evaluasi Dosen Pengarah dan Dosen Pembimbing, dinyatakan mahasiswa tersebut:

1. Dapat melanjutkan ke Tahap Ujian Tugas Akhir
2. Tidak dapat melanjutkan ke Tahap Ujian Tugas Akhir

Dosen Pembimbing

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

[Signature]



DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

FORM FTA-03

KEGIATAN ASISTENSI TUGAS AKHIR

Nama : POFIQOH AL GHANI
NRP : 03211640000020
Judul : Pengolahan Limbah IPA Nipah Gresik dengan Kombinasi Proses Oksidasi dan Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) Secara Intermiten

No	Tanggal	Keterangan Kegiatan / Pembahasan	Paraf
1.	13 Mei 2019	Asistensi MBBR Duplo, ozon & lumpur - PR Cella MLSS, health mikroba bakteri - COD ozon	
2.	21 Mei 2019	Asistensi karakteristik awal lindi setelah pre-treatment (ozon) - Cella Lengah semanya.	
3.	26 Mei 2019	Asis selulur 1 COD, amonium, nitrat-nitrit, MLSS	
4.	28 Mei 2019	Asis selulur 2	
5.	1 Juni 2019	Asis BOD, FTKN.	
6.	10 Juni 2019	Asis hasil COD, amonium, nitrat-nitrit Selulur 1 - 3	
7.	15 Juni 2019	Asis BOD, FTKN	
8.	20 Juni 2019	Asis Laporan	
9.	22 Juni 2019	Asis laporan	
10.	25 Juni 2019	Asis laporan akhir	

Surabaya,
Dosen Pembimbing



PROGRAM SARJANA DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN - ITS
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111. Telp: 031-5948888, Fax: 031-5928387

UTA-S1-TL-02 TUGAS AKHIR
Periode: Genap 2018-2019

Kode/SKS : RE184804 (0/6/0)
No. Revisi: 01

FORMULIR TUGAS AKHIR UTA-02
Formulir Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing
Ujian Tugas Akhir

Hari, tanggal : Senin, 15 Juli 2019
Pukul : 13.00 - 15.00 WIB
Lokasi : TL 102
Judul : Pengolahan Lindi TPA Ngipik Gresik dengan Kombinasi Proses Ozonisasi dan Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) secara Intermitten

Nilai TOEFL 477

Nama : Rofiqoh Al Ghani
NRP. : 0321154000020
Topik : Penelitian

Tanda Tangan

No./Hal.	Ringkasan dan Saran Dosen Pembimbing Ujian Tugas Akhir
	<p><i>Kesetimin banyak dapat bantu leri</i></p> <p>Acc 20/7 2019</p>

Dosen Pembimbing akan menyerahkan formulir UTA-02 ke Sekretariat Program Sarjana
Formulir ini harus dibawa mahasiswa saat asistansi kepada Dosen Pembimbing
Formulir dikumpulkan bersama revisi buku setelah mendapat persetujuan Dosen Pembimbing

Berdasarkan hasil evaluasi Dosen Penguji dan Dosen Pembimbing, dinyatakan mahasiswa tersebut:

- Lulus Ujian Tugas Akhir
- harus mengulang Ujian Tugas Akhir semester berikutnya
- Tugas Akhir dinyatakan gagal atau harus mengganti Tugas Akhir (lebih dari 2 semester)

Dosen Pembimbing
Welly Herumurti ST., M.Sc.



DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL LINGKUNGAN DAN KEBUMIHAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

FORM FTA-05

FORMULIR PERBAIKAN LAPORAN TUGAS AKHIR

Nama : ROFIQOH AL GHANI
NRP : 03211540000020
Judul Tugas Akhir : Pengolahan Limbah IPA Nijipik Gresik dengan Kombinasi Proses Ozonisasi dan Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) secara Intermiten.

No	Saran Perbaikan (sesuai Form UTA-02)	Tanggapan / Perbaikan (bila perlu, sebutkan halaman)
1.	Perbaiki Keseimbangan / Mass Balance Nitrogen & penjelasannya	hal 78-80 telah diperbaiki
2.	Perbaiki penulisan terkait reaktor dengan pengisian berkaitan reaktor	ok
3.	Karakteristik limas setelah ozonisasi	hal 43
4.	Belajar dan pahami konsep pengolahan metode biologis	ok
5.	Penulisan : - daftar tabel, gambar, iii - halaman ke.sang - hal-43	ok
6.	Bagaimana menentukan jumlah untuk volume media	lampiran 1

Dosen Pembimbing,

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

Mahasiswa, Ybs.,

Rofiqoh Al Ghani