



UNIVERSITAS INDONESIA

**OPTIMASI KONSENTRASI LARUTAN NUTRISI SINTETIK
Nitrobacter winogradskyi YANG DIINOKULASI DALAM
ZEOLIT ALAM LAMPUNG PADA PROSES BIOFILTRASI
N₂O**

SKRIPSI

**NURHAFIZAH PUTRI
0806460540**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

HALAMAN JUDUL

**OPTIMASI KONSENTRASI LARUTAN NUTRISI SINTETIK
Nitrobacter winogradskyi YANG DIINOKULASI DALAM
ZEOLIT ALAM LAMPUNG PADA PROSES BIOFILTRASI
N₂O**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
gelar Sarjana Teknik**

**NURHAFIZAH PUTRI
0806460540**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNOLOGI BIOPROSES
DEPOK
JUNI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Nurhafizah Putri

NPM : 0806460540

Tanda Tangan :



Tanggal : 25 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Nurhafizah Putri
NPM : 0806460540
Program Studi : Teknologi Bioproses
Judul Skripsi : Optimasi Konsentrasi Larutan Nutrisi Sintetik *Nitrobacter winogradskyi* yang Diinokulasi Dalam Zeolit Alam Lampung pada Proses Biofiltrasi N₂O

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknologi Bioproses pada Program Studi Teknologi Bioproses, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Tania Surya Utami, ST., MT

Penguji : Dr. Dianursanti, ST., MT.

Penguji : Ir. Rita Arbianti, MSi.

Penguji : Dr. Ir. Nelson Saksono, MT.

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 25 Juni 2012



KATA PENGANTAR

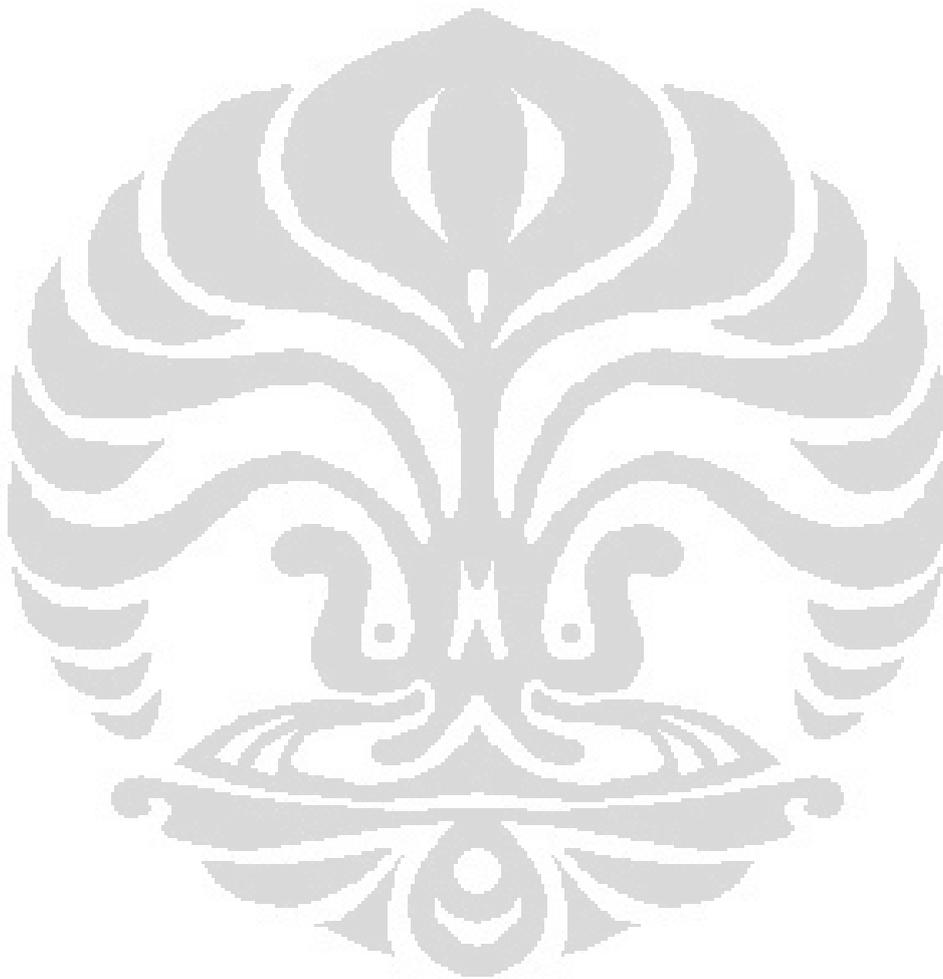
Puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat, rahmat dan karunia-Nya, saya dapat menyelesaikan makalah seminar ini. Saya sangat menyadari bahwa sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan makalah seminar ini tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan hingga penyusunan makalah ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga yang senantiasa memberikan dukungan baik materi maupun moril.
2. Ibu Dr. Tania Surya Utami ST., MT selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan seminar, penelitian, PKMP hingga makalah skripsi ini.
3. Ir. Rita Arbianti M.Si., selaku dosen pembimbing akademik yang telah menyediakan waktu dan membantu permasalahan akademik perkuliahan selama ini.
4. Seluruh dosen Departemen Teknik Kimia UI yang telah mengajar dan memberi saya wawasan sebagai mahasiswa Teknologi Biproces Departemen Teknik Kimia.
5. Aditya Nugraha, Nava, Dhea, Priska, Fallah, Lisa, dan Nanda Indriani, Asti, Dini, sahabat dan orang terdekat saya yang selalu memberikan motivasi dan bantuan dalam menyelesaikan makalah ini.
6. Seluruh Laboran Departemen Teknik Kimia UI yang telah membantu dalam penelitian.
7. Nindya Sani W, teman satu penelitian biofilter yang selalu bersama baik suka maupun duka dalam menyelesaikan makalah ini. Juga Laili dan Ota atas kerjasama yang telah dijalin selama penelitian ini.
8. Semua teman-teman satu jurusan di Teknologi Bioproces 2008 yang sudah memberikan dorongan dan suka dan duka bersama, serta pihak lain yang membantu namun tidak dapat saya sebutkan satu-persatu.

Akhir kata, saya berharap semoga Allah berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga makalah seminar ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan kedepannya.

Depok, 10 Juni 2011

Penulis



HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Nurhafizah Putri

NPM : 0806460540

Program Studi : Teknologi Bioproses

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

“Optimasi Konsentrasi Larutan Nutrisi Sintetik *Nitrobacter winogradskyi* yang Diinokulasi dalam Zeolit Alam Lampung pada Proses Biofiltrasi N_2O ”

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 2 Juli 2012

Yang menyatakan



(Nurhafizah Putri)

ABSTRAK

Nama : Nurhafizah Putri
Program Studi : Teknologi Bioproses
Judul : Optimasi Konsentrasi Larutan Nutrisi Sintetik Bakteri
Nitrobacter winogradskyi yang Diinokulasi dalam Zeolit Alam
Lampung pada Proses Biofiltrasi N₂O

Gas dinitrogen monoksida (N₂O) atau yang dikenal dengan sebutan gas tawa merupakan gas rumah kaca terbanyak keempat di atmosfer, namun gas ini memberi kontribusi terbesar pada pemanasan global. Dalam rangka mengurangi emisi gas NO_x yang berbahaya bagi lingkungan, diperlukan suatu cara untuk mereduksi gas tersebut dari udara. Teknologi biofilter merupakan suatu teknologi yang sangat efektif dan efisien dalam mengontrol emisi udara, ramah lingkungan, dan hanya membutuhkan biaya operasional yang murah. Pada penelitian ini digunakan peralatan sederhana dalam skala laboratorium yang dioperasikan selama 24 jam dengan laju alir gas 88 cc/menit. Medium filter yang digunakan berupa zeolit alam Lampung teraktivasi yang diinokulasi oleh *Nitrobacter winogradskyi*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja biofiltrasi oleh medium zeolit alam teraktivasi dan pengaruh konsentrasi larutan nutrisi sintetik terhadap kinerja biofiltrasi dengan memvariasikan % berat jumlah nutrisi dan pelarut yang digunakan dalam nutrisi sintetik agar diperoleh kondisi optimum. Efisiensi tertinggi dihasilkan oleh proses biofiltrasi pada variasi konsentrasi larutan 0,31% berat wt/wt yaitu sebesar 61,5%. Proses biofiltrasi dengan penambahan bakteri menghasilkan efisiensi reduksi rata-rata lebih besar 28% dibandingkan biofiltrasi tanpa bakteri.

Kata kunci:

Biofilter, nutrisi, zeolit alam, N₂O, *Nitrobacter winogradskyi*

ABSTRACT

Name : Nurhafizah Putri
Study Programe : Bioprocess Engineering
Title : Optimization Concentration of Synthetic Nutrient Solution of Nitrobacter winogradskyi that inoculated to Zeolite Lampung In N₂O Biofiltration

Nitrogen oxide (N₂O) or known as laughing gas is the fourth largest greenhouse gases in the atmosphere, but it gives the biggest contribution to global warming. So, in order to reduce N₂O emissions that are harmful to the environment, we need a technology to reduce these gases from the air. Biofilter technology is a technology that very effective and efficient in controlling air emission and environmentally friendly. This research used simple laboratory scale equipment that operated for 24 hours with gas flow rate measured at 88 cc/min. Zeolite Lampung that inoculated by Nitrobacter winogradskyi is a filter that used in this research. This research aims to study ability of zeolite and the effect of nutrient solution's concentration on the performance of biofiltration by varying the %weight of total nutrient and solution in synthetic nutrients solution in order to get optimum condition. The highest efficiency obtained at variation 0,31% weight wt/wt that is equal to 61, 6%. Biofiltration process with the addition of the bacteria produce an average reduction efficiency 28% greater than biofiltration without bacteria.

Key words:

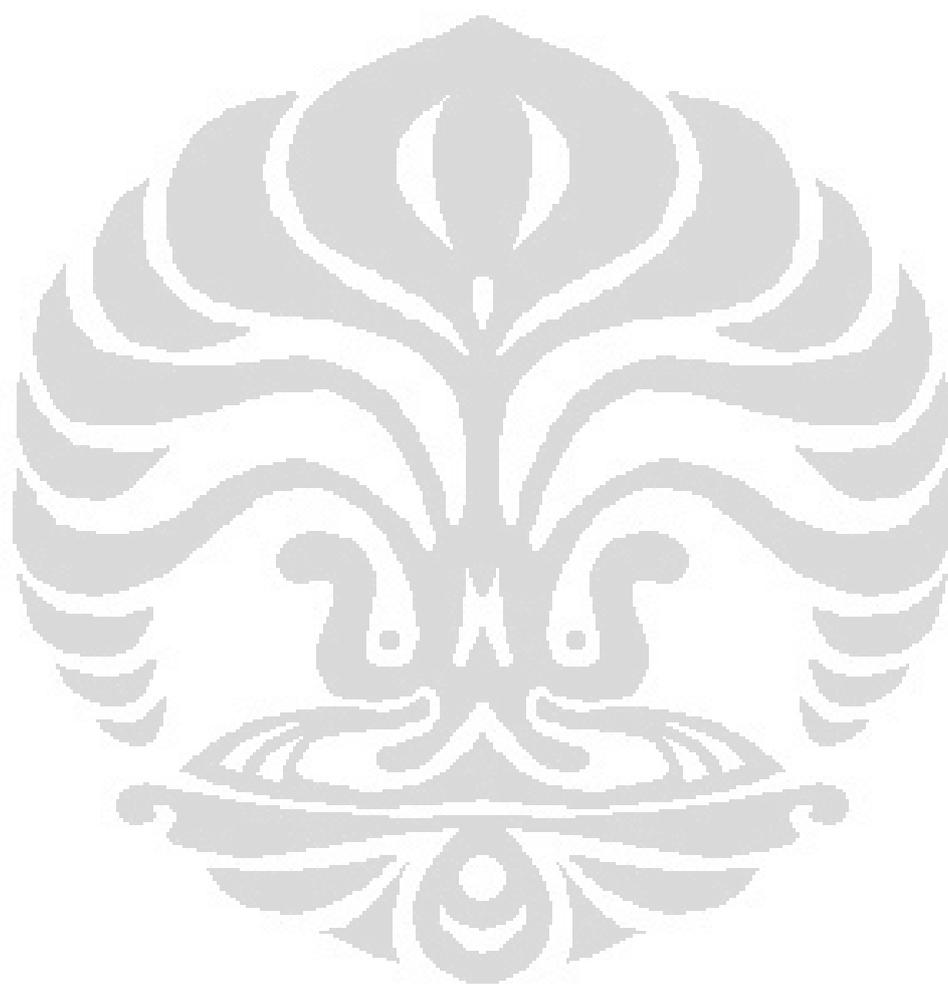
Biofilter, zeolite, nutrient, N₂O, Nitrobacter winogradskyi

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Gas Dinitrogen Monoksida (N ₂ O).....	6
2.2 Teknologi Biofilter	7
2.2.1 Parameter-Parameter dalam Sistem Biofilter	9
2.2.2 Mekanisme Biofiltrasi.....	11
2.2.3 Medium Filter	13
2.3 Zeolit Alam.....	14
2.3.1 Aktivasi Zeolit dengan Metode Dealuminasi	16
2.4 Siklus Nitrogen.....	16
2.5 Bakteri Penitrifikasi.....	18
2.6 Adsorpsi.....	19
2.6.1 Adsorpsi Isotermis Langmuir	21
2.6.2 Adsorpsi Isotermis Freundlich.....	23
2.7 State of The Art	24
2.7.1 Biofiltrasi NO _x Tanpa Penambahan Bakteri.....	25

2.7.2 Biofiltrasi NO _x dengan Penambahan Bakteri	26
2.7.3 Biofiltrasi Menggunakan Nitrifying dan Denitrifying Bacteria	28
2.7.4 Biofiltrasi N ₂ O yang Dilakukan Di Universitas Indonesia	29
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	33
3.1 Diagram Alir Penelitian	33
3.2 Alat dan Bahan	35
3.2.1 Alat.....	35
3.2.2 Bahan	36
3.3 Prosedur Penelitian	36
3.3.1 Persiapan peralatan Biofilter.....	36
3.3.2 Persiapan Medium Biofilter (Zeolit Alam Lampung)	39
3.3.3 Persiapan Kultur Bakteri.....	41
3.3.4 Kalibrasi Gas N ₂ O	46
3.3.5 Uji Kebocoran Alat.....	47
3.4 Eksperimen Biofiltrasi.....	48
3.4.1 Eksperimen Biofiltrasi Tanpa Penambahan Bakteri.....	48
3.4.2 Eksperimen Biofiltrasi dengan Variasi Konsentrasi Medium Sintetik.....	49
3.5 Analisis Biofiltrasi.....	50
3.5.1 Analisis Gas N ₂ O Menggunakan <i>Gas Chromatography</i> (GC).....	50
3.5.2 Analisis Bakteri dengan Metode TPC	51
3.5.3 Analisis Perkembangan Bakteri Menggunakan SEM.....	52
3.6 Variabel Penelitian	52
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	53
4.1 Kalibrasi gas N ₂ O	53
4.2 Eksperimen Biofiltrasi.....	54
4.2.1 Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N ₂ O dengan Medium Zeolit Alam Tanpa Penambahan Bakteri	54
4.2.2 Pengaruh Variasi Konsentrasi Larutan Nutrisi Sintetik terhadap Kinerja Biofiltrasi	56
4.2.3 Perubahan Kelembapan dan Suhu Medium Selama Proses Biofiltrasi.....	60
4.2.4 Hasil Uji Perkembangan Mikroba Selama Proses Biofiltrasi.....	63
4.3 Permodelan Biofiltrasi.....	67
4.3.1 Permodelan Adsorpsi Langmuir	67
4.3.2 Permodelan Adsorpsi Freundlich.....	70
4.4 Perbandingan Hasil Biofiltrasi N ₂ O dengan Menggunakan Medium Zeolit Alam Lampung dan Karbon Aktif	73

BAB 5 KESIMPULAN	75
DAFTAR ISTILAH	76
DAFTAR REFERENSI	77
LAMPIRAN.....	83



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Hasil pengukuran konsentrasi Nitrous Oksida (N ₂ O) dari tahun 2004 sampai dengan Pebruari 2011	7
Gambar 2. 2. Degradasi Polutan Pada Biofiltrasi Oleh Mikroorganisme	12
Gambar 2. 3. Proses adsorpsi pada biofilter.....	13
Gambar 2. 4 Struktur tetrahedral zeolit (Las, 2006)	15
Gambar 2. 5 Jalur metabolisme nitrogen (Hudepohl, 1999).....	17
Gambar 2. 6 <i>Nitrobacter winogradskyi</i>	19
Gambar 2. 7 Mekanisme proses adsorpsi.....	20
Gambar 2. 8 Lima tipe jenis kurva adsorpsi isoterm	21
Gambar 2. 9 Grafik hasil penelitian oleh Klason, K. H. Thomas et al., 2001	27
Gambar 2. 10 Desain biofilter M. Barnes, Joni 1994	29
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian proses biofiltrasi.....	34
Gambar 3. 2 Peralatan biofilter yang digunakan dalam penelitian ini.....	38
Gambar 3. 3 Skema peralatan biofiltrasi dalam 3 dimensi	39
Gambar 3. 4 Tahap persiapan zeolit alam Lampung melalui metode dealuminasi	40
Gambar 3. 5 Tahap persiapan medium filte	41
Gambar 3. 6 Tahapan pengkulturan bakteri dalam nutrient broth	42
Gambar 3. 7 Dokumentasi kultur bakteri dengan nutrien broth.....	43
Gambar 3. 8 Tahap pengkulturan bakteri dalam media agar	44
Gambar 3. 9 Proses kultur bakteri dengan medium agar	45
Gambar 3. 10. Pengkulturan bakteri dalam medium sintetik.....	46
Gambar 3. 11 Kurva yang terdeteksi pada	47
Gambar 3. 12 Prosedur tahap uji kebocoran	48
Gambar 3. 13 Diagram alir analisis GC	51
Gambar 3. 14 Peralatan yang digunakan dalam analisi TPC.....	51
Gambar 4. 1 Grafik hasil kalibrasi gas N ₂ O.....	53
Gambar 4. 2 Grafik uji kinerja biofilter dalam mereduksi gas N ₂ O dengan medium zeolit alam tanpa penambahan bakteri.....	55

Gambar 4. 3 Grafik pengaruh variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik terhadap kinerja biofiltrasi.....	57
Gambar 4. 4 Grafik efisiensi reduksi rata-rata variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik.....	59
Gambar 4. 5 Grafik suhu medium filter terhadap waktu biofiltrasi.....	61
Gambar 4. 6 Grafik perbandingan kelembapan medium terhadap waktu biofiltrasi	61
Gambar 4. 7 Reaksi reduksi gas N ₂ O pada penelitian ini.....	62
Gambar 4. 8 Hasil analisa TPC pada variasi konsentrasi larutan 0,31% setiap sampel.....	64
Gambar 4. 9 Hasil Uji SEM pada medium zeolit alam Lampung kering	65
Gambar 4. 10 Hasil Uji SEM pada medium zeolit alam Lampung sebelum biofiltrasi.....	65
Gambar 4. 11 Hasil Uji SEM pada medium zeolit alam Lampung setelah biofiltrasi.....	66
Gambar 4. 12 Grafik hasil permodelan Langmuir tiap variasi.....	68
Gambar 4. 13 Grafik hasil permodelan Freundlich tiap variasi	71

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 State of the art proses biofiltrasi dengan gas NO _x	24
Tabel 2. 2 State of the art riset grup Teknologi Bioproses	30
Tabel 3. 1 Peralatan yang digunakan dalam penelitian.....	35
Tabel 3. 2 Spesifikasi GC dalam penelitian	50
Tabel 4. 1 Hasil analisis TPC pada variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik (CFU/mL)	63
Tabel 4. 2 Nilai konstanta Langmuir pada berbagai variasi.....	69
Tabel 4. 3 Nilai konstanta Freundlich pada berbagai variasi	72
Tabel 4.4 Perbandingan efisiensi reduksi dan hasil analisis TPC zeolit alam dan karbon aktif.....	73

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Masalah lingkungan merupakan bahan pembicaraan yang sedang marak dibicarakan di mana saja. Pencemaran lingkungan oleh limbah terutama limbah industri dan aktivitas transportasi dapat menyebabkan terjadinya pemanasan global. Pemanasan global tidak dapat terlepas dari adanya efek rumah kaca, tetapi masih banyak masyarakat yang belum mengerti dan bagaimana efek buruk yang ditimbulkan dari pemanasan global. Berdasarkan data yang diketahui, Indonesia merupakan penghasil emisi gas rumah kaca ketiga di dunia (Indonesia.mongabay.com, 2010). Gas dinitrogen monoksida (N_2O) atau yang dikenal dengan sebutan gas tawa merupakan gas rumah kaca terbanyak keempat di atmosfer, namun gas ini memberi kontribusi terbesar pada pemanasan global. Konsentrasi gas ini telah meningkat sebesar 16% dibandingkan masa pre-industri (Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, 2011). Dalam rangka mengurangi emisi gas NO_x yang berbahaya bagi lingkungan, diperlukan suatu cara untuk mereduksi gas tersebut dari udara.

Teknologi tradisional yang telah banyak digunakan sebelumnya yaitu *selective catalytic reduction* (SCR) dan *selective non-catalytic reduction* (SNCR). Namun kedua teknologi tersebut membutuhkan biaya instalasi dan operasi yang tinggi (Yang, Wa-Fa, 2007). Sebagai alternatif untuk mengurangi emisi gas NO_x yaitu dengan menggunakan teknologi biofilter. Teknologi ini merupakan suatu teknologi yang sangat efektif dalam mengontrol emisi udara dengan menggunakan mikroorganisme untuk menghilangkan gas kontaminan dan mengubahnya menjadi zat yang tidak berbahaya. Biofilter banyak digunakan sebagai teknologi dalam mengontrol emisi udara bukan hanya membutuhkan biaya operasional yang murah, tetapi juga merupakan teknologi yang ramah lingkungan tanpa menghasilkan kontaminan lainnya (Lee et al., 2003; Yudelso & Tinari, 1995).

Dalam mendesain suatu sistem biofilter, pemilihan media biofilter yang digunakan sangat penting. Efisiensi dari teknologi biofilter ini tergantung pada bahan pengisi kolom dan mikroorganisme yang digunakan. Untuk kontaminan gas N_2O pada penelitian ini, media yang digunakan yaitu berupa zeolit alam yang telah diaktivasi melalui proses dealuminasi. Zeolit alam merupakan sumber daya alam yang melimpah dan potensial untuk digunakan sebagai bahan pengisi kolom biofilter, memiliki struktur yang stabil, dan porositas yang tinggi. Selain itu, pemilihan mikroorganisme yang digunakan harus disesuaikan dengan kontaminan yang akan direduksi. Bakteri yang digunakan merupakan bakteri penitrifikasi *Nitrobacter winogradskyi* yang dapat mengoksidasi nitrit menjadi nitrat.

Penelitian biofiltrasi gas N_2O ini telah dilakukan sejak tahun 2008 di riset grup Teknologi Bioproses Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia. Penelitian yang telah dilakukan bertujuan untuk mereduksi senyawa N_2O dengan menggunakan berbagai jenis medium antara lain kompos pupuk kandang, kompos sapi, kompos kambing, zeolit alam, dan karbon aktif. Pada penelitian ini digunakan peralatan sederhana dalam skala laboratorium dimana gas N_2O dialirkan melewati media filter dengan proses sirkulasi menggunakan pompa peristaltik. Gas tersebut kemudian diabsorb oleh lapisan biofilm dan didegradasi oleh kultur bakteri yang hidup di dalam lapisan tersebut. Proses sirkulasi gas dilakukan dengan sistem *batch* selama 24 jam dan laju alir 88 cc/menit, yang merupakan laju alir yang menghasilkan efisiensi reduksi mencapai 75,9% (Utami et al., 2009).

Parameter yang dilakukan pada penelitian ini yaitu variasi larutan konsentrasi larutan nutrisi sintetik. Hal ini dilakukan karena nutrisi sintetik merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kinerja biofiltrasi, dimana nutrisi sintetik yang optimal akan mengoptimalkan proses biofiltrasi. Gas N_2O yang berhasil didegradasi oleh bakteri dan medium kemudian akan dianalisis dengan menggunakan *Gas Chromatography* (GC). Setelah itu dilakukan analisis metode TPC (*Total Plate Count*) sebelum dan sesudah proses biofiltrasi untuk mengetahui populasi mikroorganisme pada kondisi awal dan akhir selama proses biofiltrasi. Hasil dari perhitungan TPC akan direpresentasikan dalam satuan *Colony Forming Units* (CFU) per gram medium campuran yang diuji. Selain itu

juga dilakukan analisis *Scanning Electron Microscope* (SEM) terhadap struktur zeolit baik sebelum diinokulasi bakteri, setelah inokulasi, dan setelah proses biofiltrasi.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini yaitu:

1. Berapa persen kadar N_2O yang mampu didegradasi oleh media zeolit alam Lampung teraktivasi dalam teknologi biofilter?
2. Bagaimana pengaruh konsentrasi larutan nutrisi sintetik pada media zeolit alam Lampung teraktivasi yang diinokulasi oleh bakteri *N. winogradskyi* dalam proses biofiltrasi N_2O ?
3. Bagaimana pengaruh inokulasi bakteri *N. winogradskyi* dalam medium zeolit alam teraktivasi terhadap kinerja biofiltrasi N_2O ?
4. Bagaimana pertumbuhan bakteri *N. winogradskyi* selama proses pengkulturan dan setelah proses biofiltrasi?
5. Bagaimana perubahan suhu dan kelembapan medium selama proses biofiltrasi berlangsung dan pengaruhnya kinerja biofiltrasi?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Memperoleh persen kadar N_2O yang mampu didegradasi menggunakan media zeolit alam Lampung teraktivasi dalam teknologi biofilter.
2. Mengetahui konsentrasi larutan nutrisi sintetik optimal dalam media zeolit alam Lampung yang diinokulasi oleh bakteri *N. winogradskyi* pada proses biofiltrasi N_2O .
3. Mengetahui pengaruh inokulasi *N. winogradskyi* pada zeolit alam Lampung yang telah teraktivasi terhadap kinerja biofiltrasi gas N_2O
4. Mengetahui pertumbuhan bakteri *N. winogradskyi* selama proses pengkulturan dan setelah proses biofiltrasi N_2O .
5. Mengetahui perubahan suhu dan kelembapan medium filter selama proses biofiltrasi berlangsung terhadap kinerja biofiltrasi.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang akan dikaji pada penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Zat yang didegradasi adalah gas N_2O menjadi gas N_2 .
2. Media yang digunakan sebagai pengisi kolom biofilter merupakan media zeolit alam Lampung yang teraktivasi sebanyak 4000 g.
3. Bakteri yang digunakan adalah *Nitrobacter winogradskyi* Winslow et al.
4. Laju alir gas N_2O yaitu 88 cc/menit dan konsentrasi gas N_2O yaitu 15000 ppm dalam udara.
5. Parameter dalam penelitian ini yaitu konsentrasi larutan nutrisi sintetik.
6. Penelitian dilakukan di Laboratorium Bioproses Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia, Depok.
7. Peralatan biofilter yang digunakan untuk penelitian merupakan peralatan dalam skala laboratorium dengan ukuran tinggi 120 cm dan diameter 8 cm.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari makalah ini adalah sebagai berikut:

BAB 1. PENDAHULUAN

Pada bab ini diuraikan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian ini.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini berisi tentang studi literatur secara umum dan secara khusus mengenai teori dan hal-hal yang berkaitan dengan penelitian, seperti gas N_2O , teknologi biofilter, zeolit alam, proses adsorpsi, bakteri penitrifikasi serta pembahasan jurnal-jurnal internasional dan nasional yang terkait dengan biofilter.

BAB 3. METODE PENELITIAN

Bab ini membahas diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan, prosedur kerja yang dilakukan, variabel penelitian serta cara pengambilan data dan pengolahan data dari data yang diperoleh.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil pengolahan data-data hasil eksperimen dan analisisnya. Bagaimana kadar N_2O yang mampu direduksi, pengaruh variasi konsentrasi larutan sintetik terhadap kinerja biofilter, dan kinerja bakteri pada sistem biofilter.

BAB 5. KESIMPULAN

Bab ini membahas kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian yang dilakukan.



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gas Dinitrogen Monoksida (N₂O)

Gas dinitrogen monoksida merupakan senyawa kimia dengan rumus kimia N₂O yang umumnya dikenal sebagai gas tawa karena efek *euforia* yang ditimbulkan ketika menghirupnya. Pada suhu kamar, gas ini tidak berwarna, mudah terbakar, dan sedikit berbau manis. Gas ini juga tidak bereaksi dengan ozon, oksigen, dan hidrokarbon yang ada di udara. Dinitrogen monoksida (N₂O) umumnya digunakan sebagai senyawa anestetik dalam dunia kedokteran. Gas ini pertama kali dihasilkan pada tahun 1775 oleh Joseph Priestley. Gas dinitrogen monoksida ini juga kadang digunakan dalam dunia otomotif sebagai penambah kecepatan dan digunakan pula dalam penyelaman untuk mempersiapkan para penyelam terhadap efek *nitrogen narcosis*. Gas ini merupakan gas insulator panas yang sangat kuat.

Adapun ambang batas terekspos gas ini ialah sekitar 50-100 ppm. Dinitrogen monoksida dapat dihasilkan dari proses alami dan kegiatan manusia. Secara alami, N₂O diproduksi dari sejumlah besar kegiatan mikroba dalam tanah dan air. Kegiatan pertanian seperti penanganan limbah binatang dan penyuburan tanah dapat memicu bakteri untuk memproduksi N₂O lebih banyak. Sektor peternakan dan perindustrian seperti pada produksi nylon, asam adipat, asam nitrat serta pembakaran bahan bakar pada mesin pembakaran internal juga menghasilkan N₂O.

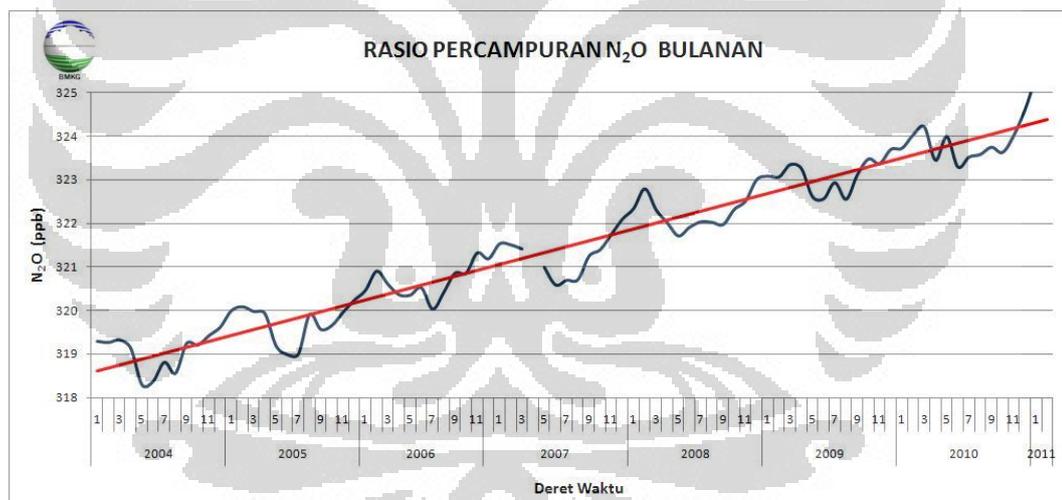
Konsentrasi N₂O berasal dari sumber alam. Gas dinitrogen monoksida secara umum dihasilkan dari pemanasan amonium nitrat yang terdekomposisi menjadi dinitrogen oksida dan uap air.



Gas ini merupakan gas rumah kaca terbanyak keempat di atmosfer setelah CO₂, CH₄, dan uap air. Gas N₂O sangat sulit terurai di atmosfer dan diperkirakan mempunyai waktu tinggal di atmosfer sekitar 170 tahun. Gas N₂O juga merupakan salah satu gas yang memberi kontribusi terbesar pada pemanasan

global. Gas ini diidentifikasi sebagai gas penyerap aktif pada radiasi di troposfer dan memberikan kontribusi pada pemanasan global di permukaan bumi. Satu molekul N_2O sama dengan 300 kali lebih efektif berpengaruh dalam proses pemanasan atmosfer dibandingkan molekul CO_2 (Ashok Pandey, 2004). Selain itu, peningkatan N_2O troposfer merupakan sumber terbesar dari pemanasan lapisan stratosfer yang memberikan pengaruh pada kerusakan Ozon sampai 70%. Oleh karenanya pengendalian emisi N_2O menjadi suatu yang penting dalam pengendalian lingkungan.

Berdasarkan informasi yang diperoleh, N_2O memberikan kontribusi 10% dari total emisi efek rumah kaca yang ada. (LIPI, 200 Yokoyama et al 1992). Berdasarkan data yang diperoleh dari Badan Meteorologi Kimatologi dan Geofisika, 2011, hasil pengukuran konsentrasi Nitrogen Oksida (N_2O) dari tahun 2004 sampai dengan Pebruari 2011, menunjukkan adanya kecenderungan kenaikan yang meningkat, seperti pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. 1 Hasil pengukuran konsentrasi Nitrous Oksida (N_2O) dari tahun 2004 sampai dengan Pebruari 2011

(Sumber : BMKG, 2011)

2.2 Teknologi Biofilter

Teknologi biofilter merupakan alternatif yang tepat dalam pengendalian pencemaran udara (*malodor*) (Setiadi et al., 2007). Biofilter dapat didefinisikan sebagai reaktor biokimia *fixed-bed* dimana terdapat mikroorganisme pada permukaan medium filter untuk mengkonsumsi udara yang terserap. Zat-zat

kontaminan yang terdapat di udara diserap dan dikonsumsi oleh mikroorganisme (M. Schlegelmilch, J. Streese, R. Stegmann, 2005). Pada prinsipnya teknologi ini menyaring gas-gas yang dialirkan kedalam suatu kolom, di mana pada kolom biofilter tersebut terdapat bahan pengisi (medium) sebagai tempat hidup bagi mikroorganisme yang akan digunakan. Mikroorganisme akan terimobilisasi pada bahan pengisi dan membentuk suatu lapisan tipis yang disebut biofilm (Yani, Mohamad et al., 2004). Saat ini, penerapan teknologi biofilter tidak terbatas hanya pada penurunan bau, namun juga telah dikembangkan menjadi suatu teknik pengendalian pencemaran udara (Ottengraf, 1986).

Perlakuan biologis dengan menggunakan teknologi biofilter merupakan alternatif yang tepat dalam mengolah limbah gas yang terdiri dari hidrogen sulfida (Oyazun et al., 2003). Beberapa kelebihan dari teknik biofilter antara lain, tercapainya efisiensi yang tinggi dalam mereduksi gas polutan, biaya instalasi dan operasi yang rendah, kondisi operasi yang aman dan konsumsi energi yang rendah, tidak menghasilkan produk samping, dan dapat mengkonversi banyak campuran organik dan inorganik menjadi produk oksidasi yang tak berbahaya (Govind, 1999). Biofiltrasi telah memperoleh pengakuan sebagai teknologi pengendalian polusi udara ekonomis pada penghilangan aliran gas yang mengandung senyawa organik dan inorganik yang dapat terurai pada konsentrasi rendah (Kennes & Veiga, 2001).

Biofilter juga tidak mengeluarkan produk samping yang tidak diinginkan dan dapat mengkonversi banyak senyawa organik dan anorganik ke dalam produk oksidasi yang tidak berbahaya (Govind, 1998). Disamping berbagai kelebihan, teknologi ini juga memiliki kekurangan yaitu biofiltrasi tidak dapat secara sukses menghilangkan beberapa senyawa organik, terutama yang memiliki adsorpsi rendah atau laju degradasi rendah. Ini biasanya berlaku untuk VOC terklorinasi. Biofilter yang mengandung konsentrasi mikroorganisme dalam jumlah yang tinggi dapat melepaskan mikroorganisme tersebut ke atmosfer (Martens et.al., 2001).

2.2.1 Parameter-Parameter dalam Sistem Biofilter

Dalam sistem biofilter, parameter-parameter yang perlu dikontrol antara lain kelembapan, temperatur, tingkat keasaman (pH), nutrisi, dan *pressure drop*.

2.2.1.1 Kelembapan (*Humidity*)

Kelembapan dalam sistem biofilter sangat penting untuk kelangsungan hidup mikroorganisme dan juga memberikan kontribusi pada kapasitas *buffer* filter (Van Lith et al., 1997). Gas yang masuk biofilter harus memiliki kelembapan lebih besar dari 95% kelembapan udara relatif (Selvi B. Anit dan Robert J. Artuz). Kadar kelembapan yang rendah dapat mengakibatkan terjadinya *channeling* dan menimbulkan celah pada material filter. Selain itu, rendahnya kelembapan menyebabkan kadar air bagi mikroorganisme berkurang sehingga mengakibatkan penurunan laju degradasi. Sedangkan kadar kelembapan yang berlebihan akan menimbulkan dampak seperti dapat menghalangi transfer oksigen dan polutan hidrofobik ke dalam sistem, menghambat laju reaksi, dan terjadinya gas *channeling* dalam medium filter. Kadar kelembapan medium filter optimal yang direkomendasikan berkisar antara 40 – 60 % (Ottengraf 1986).

2.2.1.2 Temperatur

Pengaturan temperatur sangat penting dalam biofiltrasi, yaitu untuk mencegah terjadinya *thermal shocks*. Temperatur sistem biofilter dipengaruhi oleh temperatur aliran udara masuk dan juga oleh reaksi biologi secara eksotermik di dalam isian (Corsi & Seed, 1995). Seiring meningkatnya temperatur, metabolisme dan laju pertumbuhan sel juga meningkat, akan tetapi kemampuan biosorpsi menurun (McNevin & Barford, 2000). Temperatur yang disarankan dalam proses biofiltrasi yaitu dalam jangkauan 15-40⁰C (Leson & Winter, 1991). Apabila temperatur gas polutan > 40⁰C, maka gas tersebut harus didinginkan terlebih dahulu sebelum memasuki kolom biofilter. Sedangkan apabila temperatur gas polutan <10⁰C, maka gas tersebut harus dipanaskan terlebih dahulu karena

mikroorganisme menjadi tidak aktif (*inactive*) pada temperatur yang rendah (Erica, 2010).

2.2.1.3 Tingkat Keasaman (pH)

Sebagian besar mikroorganisme aktif pada rentang pH tertentu, sehingga perubahan pH dapat sangat mempengaruhi aktivitas mereka. Tingkat keasaman dalam medium filter harus dipertahankan pada kondisi netral (pH 7). Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan larutan *buffer* sebelum memulai proses biofiltrasi. Banyak bakteri memiliki pH optimum antara 6 dan 8 (Leson & Winer, 1991; Ottengraf, 1986). Tidak semua bahan-bahan yang digunakan sebagai medium filter bersifat netral, ada juga diantaranya yang bersifat sebagai penyangga yang diperlukan untuk mendapatkan kondisi yang optimum terutama untuk mengolah gas polutan yang mengandung klorin, sulfida, dan amonia (Irwan, 2010).

2.2.1.4 Nutrisi

Mikroorganisme memerlukan nutrisi yang seimbang agar dapat bertahan hidup dan berkembangbiak. Jika medium filter tidak dapat menyediakan beberapa nutrisi dengan baik, maka mikroba akan berhenti tumbuh dan mati, seperti halnya pada medium sintetik *rockwool*. Medium ini tidak mengandung kebutuhan nutrisi yang sesuai, sehingga diperlukan adanya penambahan nutrisi secara terpisah selama operasi. Penambahan nutrisi seperti nitrogen, fosfor, mineral, dan lain-lain, sangat diperlukan oleh mikroorganisme dalam biofilter agar dihasilkan performansi biofilter yang memiliki kinerja yang baik (Auria et al. 1996). Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Meilinda pada tahun 2010 mengenai pengaruh kedalaman dan waktu inkubasi medium kompos berbasis kotoran kambing dalam biofiltrasi gas N₂O, efisiensi reduksi gas N₂O oleh kompos yang diinkubasikan dengan larutan nutrisi sintetik lebih tinggi dibandingkan dengan efisiensi reduksi gas N₂O oleh kompos kering.

2.2.1.5 Pressure Drop

Pressure drop berhubungan dengan kandungan air dalam medium filter dan ukuran pori-pori dari medium filter. Peningkatan kandungan air

dan penurunan ukuran pori-pori dapat meningkatkan *pressure drop*. *Pressure drop* dipengaruhi oleh kondisi, jenis medium filter dan juga kandungan *moisture*. Berdasarkan penelitian terdapat hubungan yang linear antara *pressure drop* yang meningkat dengan laju alir (Yang & Allen, 1994). Selain itu pada laju alir tertentu, *pressure drop* akan meningkat secara eksponensial terhadap meningkatnya biomassa (Morgan-Sagastume et al. 2001) dan ukuran partikel yang semakin kecil khususnya untuk ukuran partikel yang lebih kecil dari 1 mm. Pada umumnya *pressure drop* berada dalam jangkauan 1-10 hPa.

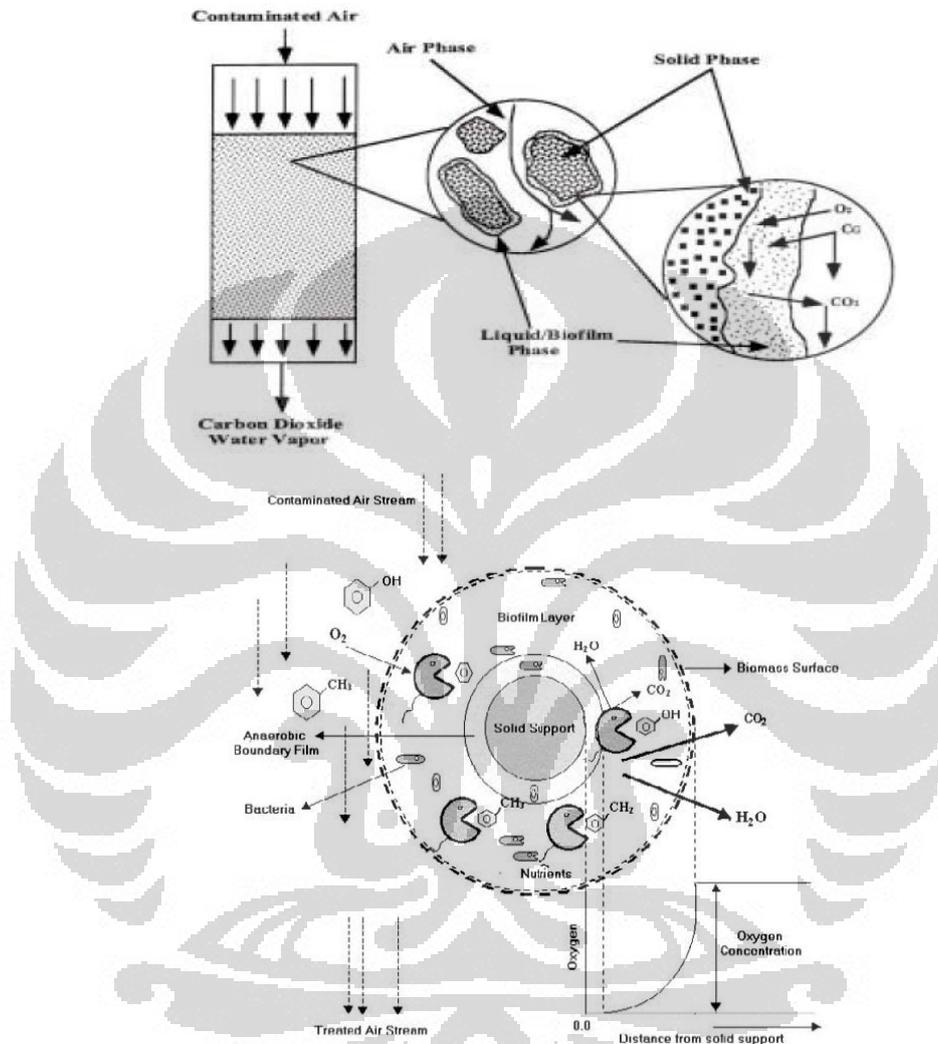
2.2.2 Mekanisme Biofiltrasi

Biofiltrasi merupakan proses dua fasa yang terdiri dari transfer senyawa dari fasa udara ke fasa air dan oksidasi senyawa terabsorpsi oleh mikroorganisme yang ada pada medium filter. Prinsip dari biofiltrasi yaitu aliran udara yang terkontaminasi dilewatkan melalui medium yang berpori dimana terimobilisasi mikroorganisme yang dapat mendegradasi polutan. Ketika udara terkontaminasi melalui medium, kontaminan dalam aliran udara terabsorpsi oleh biofilm dan kontaminan ini akan teroksidasi untuk menghasilkan biomassa seperti CO_2 , H_2O , NO_3^- , dan SO_4^{2-} .

Kontaminan terlarut ditransportasikan dengan difusi dan adveksi dalam udara. Ketika udara mengalir di sekitar partikel, transfer massa kontinyu terjadi antara fasa gas dan *biofilm*. Ketika melewati medium filter, kontaminan akan terabsorpsi baik ke dalam medium filter atau ke biomassa. Laju biodegradasi dari kontaminan ini dibatasi oleh laju transfer massa dari fasa gas ke biofilm dan laju difusi dalam biomassa. *Biofilm* menyediakan nutrisi penting untuk aktivitas biologis, menjaga kelembapan untuk pertumbuhan bakteri, bertindak sebagai inter-fasa untuk transport massa, dan menerima berbagai macam produk samping reaksi.

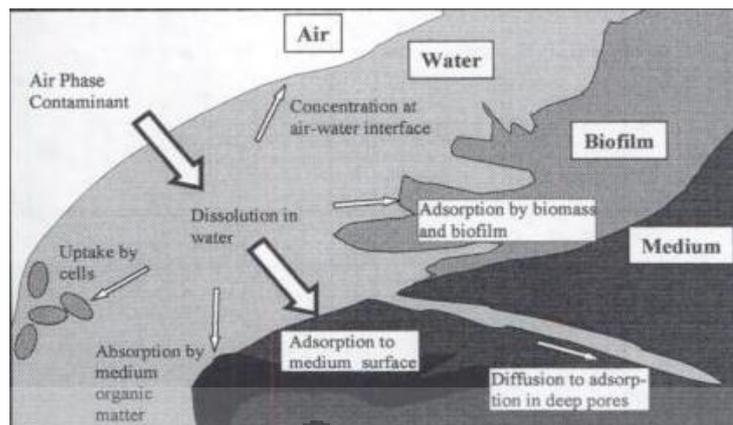
Pada biofiltrasi, terdapat mikroorganisme (bakteri dan fungi) terimobilisasi dalam bentuk *biofilm* pada media berpori seperti gambut, tanah, kompos, zat sintetik atau kombinasinya. Zat polutan ditransfer dari aliran udara ke *biofilm* yang terdapat pada permukaan substrat organik di mana

mikroorganisme akan mendegradasi polutan tersebut. Komponen polutan ditransfer dari fasa gas ke fasa liquid dan solid oleh partikel dalam medium filter (Epstein, 1997). Gambar berikut ini merupakan mekanisme degradasi polutan oleh mikroorganisme pada biofiltrasi.



Gambar 2. 2. Degradasi Polutan Pada Biofiltrasi Oleh Mikroorganisme

Sumber: Shareefdeen, Zarook., Singh Ajay. 2005. *Biotechnology for Odor and Air Pollution Control*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer.



Gambar 2. 3. Proses adsorpsi pada biofilter

Sumber : Devinny et.al, 1999

Gambar di atas menggambarkan proses yang terjadi dalam medium filter ketika dialiri kontaminan. Terjadi kontak antara fasa gas sebagai kontaminan, fasa cair dan *biofilm* sebagai permukaan medium filter dan fasa padat sebagai partikel padatan medium filter. Transformasi kontaminan dari fasa gas ke air dan padat pada partikel kompos adalah langkah dasar dari perlakuan degradasi kontaminan dengan adsorpsi. Proses ini merupakan proses yang kompleks dan sulit untuk dipahami. Molekul kontaminan mudah terlarut di fasa cair dan kemudian akan didegradasi oleh mikroba dan diadsorpsi oleh permukaan medium filter pada lapisan *biofilm*. Dalam lapisan cair ini terjadi degradasi oleh mikroba. Disamping itu, di daerah cair inilah kontaminan mengalami disolusi dan teradsorpsi pada lapisan *biofilm* dan sebagian terabsorpsi oleh bahan medium organik. Beberapa kontaminan juga ada yang berdifusi masuk ke bagian dalam dari poros medium filter untuk diadsorpsi.

2.2.3 Medium Filter

Material packing dalam sistem biofilter berfungsi sebagai habitat dan pemasok nutrisi dan air. Kinerja biofilter tergantung pada substansial material packing yang digunakan. Pemilihan medium biofilter merupakan hal yang paling penting dalam mendesain dan kinerja biofilter. Karakteristik medium biofilter menurut Hirai et al., 2001 yaitu:

- Kemampuan dalam menyerap air untuk menjaga kelembapan lapisan *biofilm*.

- Memiliki porositas dan luas permukaan yang besar, baik untuk adsorpsi kontaminan maupun untuk pertumbuhan mikroba.
- Kemampuan untuk menyerap nutrisi dan menyuplainya ketika dibutuhkan oleh mikroba.
- Memiliki densitas yang rendah.
- Kemampuan menahan aliran udara (*pressure drop* udara dan kekuatan angin yang dikeluarkan blower).
- Perubahan bentuk yang sedikit setelah digunakan dalam waktu tertentu.
- Material yang digunakan bersifat ekonomis dan relatif murah.
- Karakteristik fisik, seperti kestabilan fisik dan kemudahan dalam penanganan.

Sedangkan ciri-ciri medium filter yang baik (Rakesh Govind, 2009) :

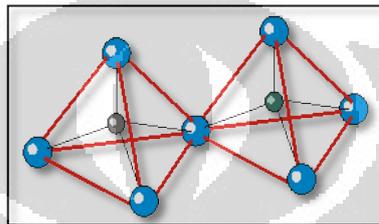
- Memiliki fraksi kekosongan (*void fraction*) yang tinggi. Fraksi kekosongan dalam media sintetik harus besar (>80%). Hal ini memungkinkan biofilm untuk berkembang dan perkembangan dari biomassa tidak mudah untuk menyumbat media filter.
- Luas permukaan / unit volume dari *bed* biofilter yang tinggi. Biofilm hanya dapat berkembang pada permukaan media pendukung.
- Memiliki *pressure drop* yang rendah. Pada umumnya total *pressure drop* gas kurang dari 0,3 inch dari air.
- Memiliki permukaan yang hidrofilik, untuk membantu menyerap air. Sangatlah penting untuk menjaga dan mempertahankan kandungan air dalam lapisan biofilm.
- Memiliki harga yang murah dan terjangkau. Faktor ini merupakan faktor terpenting dalam memilih medium filter yang akan digunakan.

2.3 Zeolit Alam

Zeolit merupakan suatu mineral aluminosilikat yang memiliki struktur kerangka yang melingkupi rongga-rongga (*pores, channels, cages*) dimana dalam rongga tersebut akan ditempati oleh ion-ion logam dan molekul-molekul air. Ion logam dan molekul air memiliki derajat kebebasan bergerak yang cukup tinggi, sehingga dapat dilakukan proses pertukaran ion dan dehidrasi secara *reversible*

(Noorsyamsu, 1996). Zeolit merupakan pengadsorpsi yang selektif terhadap molekul polar dan dapat memisahkan molekul berdasarkan ukuran molekul. Zeolit alam Lampung merupakan jenis zeolit alam yang banyak digunakan sebagai adsorben.

Struktur zeolit mengandung kerangka tiga dimensi tetrahedral SiO_4 dan AlO_4 , masing-masing mengandung atom silikon atau alumina di pusatnya dan saling berhubungan melalui atom O. Struktur tetrahedral zeolit terlihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2. 4 Struktur tetrahedral zeolit (Las, 2006)

Batuan yang mengandung zeolit diperoleh sebagai hasil alterasi dari gelas vulkanik. Butiran-butiran gelas vulkanik yang halus merupakan sumber zeolit alam yang memiliki reaktivitas tinggi, komposisi dan permukaan luas. Zeolit dapat direpresentasikan dengan rumus empiris sebagai berikut:



di mana:

- n : Valensi kation M (alkali / alkali tanah)
- x , y : Jumlah tetrahedron per unit sel
- m : Jumlah molekul air per unit sel
- M : Kation alkali / alkali tanah

Sifat-sifat zeolit seperti pertukaran ion, sistim kanal, menyebabkan zeolit banyak digunakan sebagai absorban gas, cairan, ion, dan katalis. Zeolit dicirikan oleh substitusi kompleks dari Na, Al, oleh Si atau Ca oleh Na atau Na oleh K (Rustiadi Purawardi, 1999). Sifat-sifat zeolit yaitu:

- Zeolit dapat melepaskan molekul air dari dalam rongga permukaan.
- Zeolit dapat berfungsi sebagai penukar ion, bergantung pada banyaknya pertukaran kation pada zeolit.

- Zeolit berfungsi sebagai katalis yang mengakibatkan terjadinya dilusi molekul ke dalam ruang bebas antar kristal serta terjadi reaksi kimia pada permukaan saluran kosong zeolit.
- Zeolit memiliki struktur berongga dan biasanya rongga ini berisi air dan kation-kation yang dapat dipertukarkan dan memiliki ukuran pori tertentu. Berikut ini gambar yang menunjukkan karakteristik zeolit yaitu berongga.

2.3.1 Aktivasi Zeolit dengan Metode Dealuminasi

Aktivasi zeolit dilakukan untuk meningkatkan mutu zeolit, agar dapat diperoleh sifat-sifat yang diinginkan sehingga diharapkan zeolit dapat digunakan sebagai adsorben. Aktivasi zeolit mampu meningkatkan efisiensi adsorpsi dalam mengadsorpsi gas CO dari 1,14% menjadi 6,25% (Yuliusman et al., 2010). Aktivasi zeolit bertujuan untuk memperoleh zeolit dengan kemampuan yang tinggi dengan menghilangkan pengotor yang ada pada pori-pori zeolit. Salah satu metode aktivasi zeolit yaitu metode dealuminasi. Metode ini merupakan teknik yang digunakan untuk mengurangi kandungan aluminium zeolit. Proses ini menyebabkan pergeseran tetrahedral aluminium dari posisi rangka ke posisi non rangka tetapi tidak menghilangkan aluminium dari zeolit. Pada proses ini dilakukan pencucian zeolit dengan asam kuat. Larutan asam yang digunakan adalah asam florida dan klorida. Florida maupun klorida adalah zat yang sangat sensitif terhadap zeolit, dimana hal tersebut tergantung pada kondisi perlakuannya seperti konsentrasi, lamanya pencucian, kadar air, dan temperatur pencucian. (Yuliusman et al., 2010)

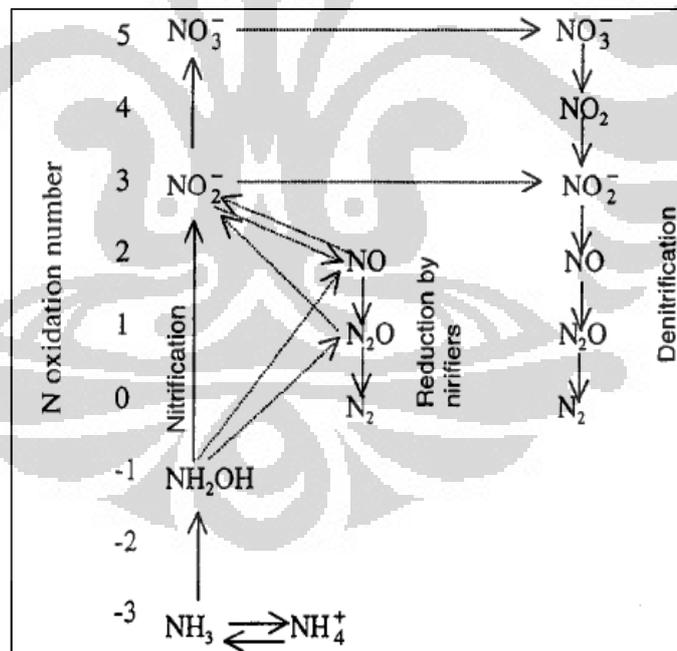
2.4 Siklus Nitrogen

Nitrogen merupakan nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan dalam jumlah besar, dan pada basis kering merupakan elemen ketiga yang paling banyak terdapat dalam jaringan. Transformasi bakteri dari nitrogen ada 5 macam, yaitu:

1. Respirasi atau denitrifikasi, penggunaan senyawa nitrogen atau ion-ion sebagai terminal akseptor nitrogen yang memiliki kegunaan yang sama dengan oksigen.
2. Nitrifikasi, penggunaan senyawa nitrogen sebagai sumber energi.

3. Asimilasi, penggabungan senyawa nitrogen atau ion-ion ke dalam jaringan sel baru.
4. Fiksasi, konversi nitrogen molekular menjadi amonia.
5. Produksi amonia melalui deaminasi amina.

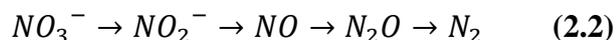
Sebagian besar spesies bakteri mampu mengasimilasi nitrogen pada berbagai jangkauan bilangan oksidasi, biasanya antara -3 (NH_3 , NH_4^+) dan +5 (NO_3^-). Nitrogen yang tergabung ke dalam senyawa sel seperti protein dan asam nukleat selalu berada dalam bilangan oksidasi -3. Jika nitrogen yang tersedia berada dalam bilangan oksidasi di atas -3, maka biasanya akan tereduksi melalui reaksi katalitik enzim. Sebagian besar nitrogen yang berada di alam ditemukan dalam bilangan oksidasi -3 atau +5, dan kebanyakan literatur mengenai metabolisme nitrogen menggambarkan situasi ini. Gambar metabolisme nitrogen secara keseluruhan yang menunjukkan titik dimana nitrifikasi dan denitrifikasi saling berhubungan dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 5 Jalur metabolisme nitrogen (Hudepohl, 1999)

Denitrifikasi, tidak seperti reduksi asimilatif nitrogen, dilakukan oleh sejumlah bakteri tertentu. Reaksi yang terlibat pada proses denitrifikasi masih belum dapat dimengerti sepenuhnya, namun NO_2^- , N_2O , dan NO telah

diidentifikasi sebagai intermediet (Shapleigh et al., 1985; Firestone et al., 1979; Ye et al., 1994; Tiedje et al., 1988). Tahapan reaksi reduksi dapat dilihat pada persamaan berikut.



Nitrifikasi yang terdiri dari dua tahap proses, hanya dilakukan oleh sekelompok bakteri. Tahap pertama nitrifikasi yaitu oksidasi dari amonia menjadi ion nitrit, dibawa oleh 4 genus bakteri yang memiliki nama Nitroso sebagai bagian dari nama (misal *Nitrosomonas europea*, *Nitrosococcus mobilis*), sedangkan tahap kedua dibawa oleh 3 genus bakteri yang memiliki nama Nitro sebagai bagian dari namanya (misal *Nitrobacter*, *Nitrospira*). Nitrifikasi terjadi pada kondisi aerobik, dengan aktivitas optimal pada suhu mesofilik dan netral terhadap pH alkalin, tanpa pertumbuhan atau aktivitas pada pH asam.

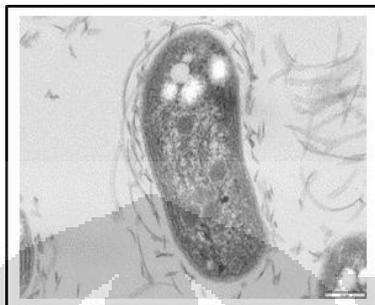
2.5 Bakteri Penitrifikasi

Bakteri penitrifikasi merupakan kelompok bakteri yang mampu menyusun senyawa nitrat dari senyawa amonia yang pada umumnya berlangsung secara aerob di dalam tanah. Kelompok bakteri ini bersifat kemolitotrof karena menggunakan senyawa nitrogen inorganik sebagai dalam siklus hidupnya. Metabolisme senyawa nitrogen ini memerlukan senyawa karbon dioksida sebagai sumber karbonnya yang diikat dalam siklus Calvin. Pada umumnya, bakteri nitrifikasi bersifat nonmotil (tidak dapat bergerak) sehingga cenderung untuk melekat pada permukaan benda yang ada di sekelilingnya.

Bakteri penitrifikasi dapat hidup tanpa nutrisi untuk lebih dari satu tahun. Bakteri tersebut hanya perlu untuk dipindahkan kedalam media baru setiap satu bulan (Eva Spieck & Eberhard Bock, 2005). Bakteri penitrifikasi berkembang biak dengan cara membelah diri, tetapi tidak dapat membentuk spora.

Nitrobacter merupakan bakteri yang sebagian besar berbentuk batang, gram negatif, dan *chemoautotrophic* bakteri. *Nitrobacter* memiliki ukuran yaitu 0,5-0,9 x 1,0-2,0 μm . Pertumbuhan litotrof dari bakteri pengoksidasi nitrit cukup lambat. Waktu pembentukan bervariasi mulai dari 8 jam hingga beberapa hari. Laju pertumbuhan dikontrol oleh konsentrasi substrat, suhu, pH, cahaya, dan konsentrasi oksigen. *Nitrobacter* memiliki peran penting dalam siklus nitrogen

dengan cara mengoksidasi nitrit menjadi nitrat dalam tanah. *Nitrobacter* memiliki pH optimal antara 7.3 – 7.5 dan akan mati pada suhu di atas 120°F (49°C) atau di bawah 32°F (0°C). Berikut ini merupakan gambar bakteri *Nitrobacter winogradskyi*.

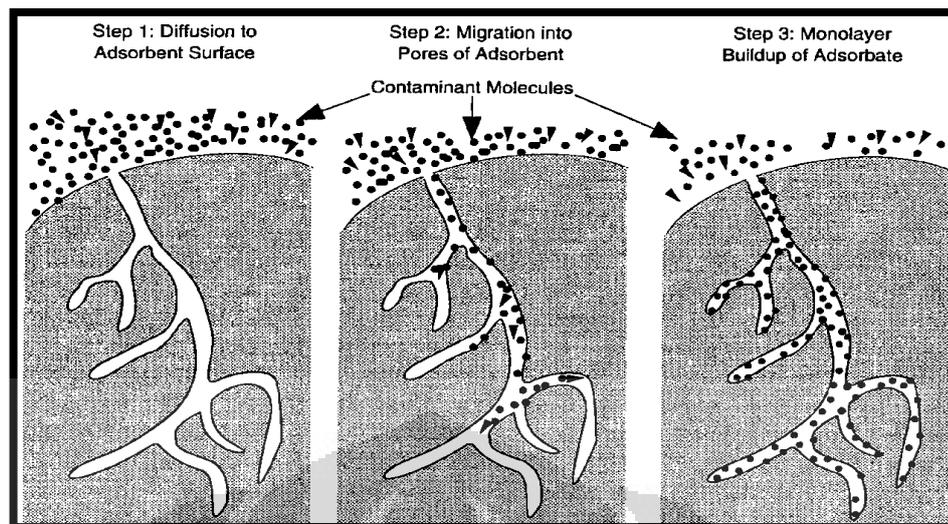


Gambar 2. 6 *Nitrobacter winogradskyi*

Sumber : TEM Image credit: W.J. Hickey, University of Wisconsin-Madison, 2006.

2.6 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan pengumpulan zat terlarut di permukaan media dan merupakan jenis adhesi yang terjadi pada zat padat atau zat cair yang kontak dengan zat lainnya. Proses ini menghasilkan akumulasi konsentrasi zat tertentu di permukaan media setelah terjadi kontak antarmuka atau bidang batas (*paras, interface*) cairan dengan cairan, cairan dengan gas, atau cairan dengan padatan dalam waktu tertentu. Contohnya: Dehumidifikasi, yaitu pengeringan udara dengan *desiccant* (penyerap), pemisahan zat yang tidak diinginkan dari udara atau air menggunakan karbon aktif, dan *ion exchanger* untuk zat terlarut di dalam larutan dengan ion dari media *exchanger*. Gambar berikut ini merupakan gambar yang menunjukkan mekanisme proses adsorpsi.

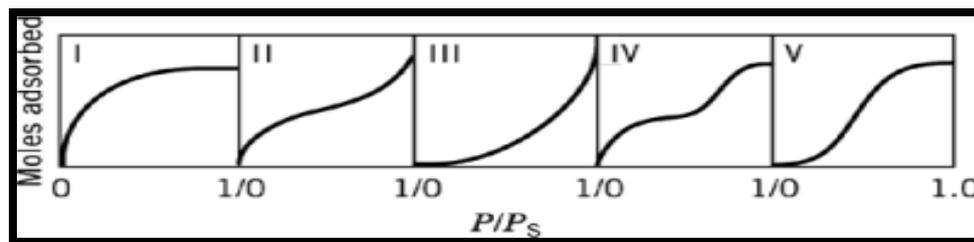


Gambar 2. 7 Mekanisme proses adsorpsi

Menurut Gede H. Cahyana, 2009, hal – hal yang mempengaruhi efektivitas adsorpsi, yaitu sebagai berikut:

1. Jenis adsorban, apakah berupa arang batok, batubara (antrasit), sekam, dan lain-lain.
2. Temperatur lingkungan (udara, air, cairan): proses adsorpsi makin baik jika temperaturnya makin rendah.
3. Jenis adsorbat, bergantung pada bangun molekul zat, kelarutan zat (makin mudah larut, makin sulit diadsorpsi), taraf ionisasi (zat organik yang tidak terionisasi lebih mudah diadsorpsi). Berdasarkan jenis adsorbatnya, tingkat adsorpsi digolongkan menjadi tiga, yaitu lemah (*weak*), terjadi pada zat anorganik kecuali golongan halogen (salah satunya adalah klor). Adsorpsi menengah (*medium*), terjadi pada zat organik alifatik, dan adsorpsi kuat (*strong*) terjadi pada senyawa aromatik (zat organik yang berbau (aroma) dengan struktur benzena, C_6H_6).

Salah satu jenis adsorpsi yaitu adsorpsi isotermis. Adsorpsi isoterm menunjukkan hubungan antara adsorbat (zat yang diadsorpsi/diserap) di adsorben (permukaan tempat terjadinya penyerapan) dengan kesetimbangan tekanan atau konsentrasi pada suhu yang tetap / konstan. Isoterm adsorpsi dibuat untuk menjelaskan bentuk interaksi yang terjadi antara gas N_2O dengan sorben. Berikut ini adalah lima jenis kurva yang dikemukakan oleh Brunauer.



Gambar 2. 8 Lima tipe jenis kurva adsorpsi isoterm

Kurva tipe pertama terjadi pada lapisan *monolayer*. Pada umumnya adsorpsi isoterm dengan adsorben mikropori termasuk dalam kurva tipe pertama. Hal ini disebabkan pada waktu tertentu, kurva akan konstan karena sudah memasuki fasa jenuh untuk memenuhi pori-pori adsorben tersebut.

2.6.1 Adsorpsi Isotermis Langmuir

Pada dasarnya, persamaan Langmuir adalah persamaan yang menghubungkan antara konsentrasi zat yang diserap oleh adsorben dengan konsentrasi zat adsorbat di fasa cairan atau gas disekelilingnya pada keadaan setimbang dan pada suatu suhu. Isoterm Langmuir digunakan untuk lapisan *monolayer* dengan kondisi luas area aktif teridentifikasi dengan persebaran yang sama. Reaksi adsorpsi yang terjadi di dalam zeolit dapat dituliskan sebagai berikut:



Karena adsorbat yang digunakan adalah N_2O , dapat dituliskan ke dalam bentuk berikut (Lin et al., 2004):

$$q_e = (C_0 - C_t) \frac{V}{m} \quad (2.4)$$

Dengan:

$q_e \sim C_{N_2O \cdot S}$ = Konsentrasi ekuilibrium pada adsorben (g/kg)

C_0 = Konsentrasi *inlet* gas N_2O (g/m^3)

C_t = Konsentrasi gas N_2O pada waktu t (g/m^3)

V = Volum *pack bed* pada kolom biofilter (m^3)

m = Massa adsorben yang dipakai (kg)

Dengan menggunakan persamaan gas ideal pada kondisi isothermal dan isovolum, perubahan tekanan \sim perubahan mol dan perubahan mol \sim perubahan massa per volum sampel. Karena konsentrasi gas N_2O dalam satuan massa, maka dilakukan konversi tekanan parsial menjadi massa seperti ditunjukkan pada persamaan di bawah ini.

$$PV = nRT = \text{konstan}$$

$$P \propto n \text{ (kondisi isotermik, isovolumik)}$$

$$m = n \times Mr$$

$$m_{N_2O} = n_{N_2O} \times Mr_{N_2O} \text{ dan } C_e = m_{N_2O}/V$$

$$C_e = \frac{n_{N_2O} \times Mr_{N_2O}}{V} \quad (2.5)$$

Persamaan 2.5 digunakan apabila gas N_2O yang teradsorp dalam satuan mol. Dengan menggabungkan persamaan 2.4 dan 2.5, maka diperoleh persamaan seperti di bawah ini.

$$\text{Laju desorpsi } N_2O = k_{-1} C_{N_2O \cdot S} = k_{-1} q_e$$

$$\text{Laju adsorpsi } N_2O = k_1 C_v p_{N_2O} = k_1 C_v C_e$$

Dengan:

C_v = Total massa lapisan medium yang masih dapat mengadsorp.

Jadi, persamaan laju reaksi pada permukaan medium zeolit:

$$r_{AD} = \text{laju adsorpsi } N_2O - \text{laju desorpsi } N_2O$$

$$r_{AD} = k_1 C_v C_e - k_{-1} q_e$$

$$r_{AD} = k_1 \left(C_v C_e - \frac{k_{-1}}{k_1} q_e \right) \text{ dengan } K_L = \frac{k_1}{k_{-1}}$$

$$r_{AD} = k_1 \left(C_v C_e - \frac{q_e}{K_L} \right) \quad (2.6)$$

Dengan:

K_L = Konstanta Langmuir (m^3/g)

Pada kondisi kesetimbangan adsorpsi dan desorpsi N_2O , laju kesetimbangannya bernilai sama, sehingga persamaan 2.6 menjadi persamaan berikut:

$$r_{AD} = 0$$

$$0 = k_1 \left(C_v C_e - \frac{q_e}{K_L} \right)$$

Asumsi: Gas N₂O merupakan satu-satunya gas yang teradsorp ke lapisan permukaan zeolit, jadi dapat ditulis: $q_m = q_e + C_v$, di mana q_m merupakan kapasitas penyerapan permukaan. Maka persamaan di atas dapat ditulis:

$$k_1 C_v C_e = k_1 \frac{q_e}{K_L}$$

$$(q_m - q_e) C_e = \frac{q_e}{K_L}$$

$$q_e = (q_m - q_e) C_e K_L$$

$$q_e = q_m C_e K_L - q_e C_e K_L$$

$$q_e + q_e C_e K_L = q_m C_e K_L$$

$$q_e (1 + C_e K_L) = q_m C_e K_L$$

$$\frac{q_e}{C_e} = \frac{q_m K_L}{1 + C_e K_L}$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1 + C_e K_L}{q_m K_L}$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (2.7)$$

Selanjutnya dilakukan plot data dengan C_e sebagai sumbu-x dan C_e/q_e sebagai sumbu-y.

2.6.2 Adsorpsi Isotermis Freundlich

Isoterm *Freundlich* adalah persamaan empirik yang dikembangkan berdasarkan adsorpsi *monolayer* dan digunakan untuk permukaan yang heterogen. Diasumsikan bahwa proses adsorpsi terjadi pada permukaan yang heterogen dan kemampuan adsorpsi berhubungan dengan konsentrasi adsorbat pada saat setimbang (Kaili Lin, 2009). Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$y = K_f P^{\frac{1}{n}} \quad (2.8)$$

Dengan:

$y \sim q_e$: Berat/volume (massa) gas yang teradsorpsi tiap satuan luas / massa adsorben (mg/g)

P : Tekanan saat kesetimbangan (atm)

K_f & n : Konstanta empiris yang bergantung pada keadaan adsorben dan adsorbat pada suhu yang diberikan

Berdasarkan persamaan gas ideal, yaitu persamaan berikut:

$$PV = nRT$$

$$P = \frac{n}{V}RT$$

$$P = C_e RT \quad (2.9)$$

Dengan C_e = Konsentrasi gas N₂O pada *outlet* (mg/L).

Dari persamaan di atas terlihat bahwa nilai $P \sim C$, sehingga persamaan 2.9 dapat ditulis menjadi:

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.10)$$

Jika persamaan di atas dikalikan kedua sisinya dengan logaritma, maka diperoleh persamaan berikut:

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.11)$$

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (2.12)$$

Setelah itu, dilakukan plot data dengan $\ln C_e$ sebagai sumbu-x dan $\ln q_e$ sebagai sumbu-y.

2.7 State of The Art

Telah banyak penelitian yang dilakukan untuk mengkaji proses biofiltrasi dengan menggunakan berbagai jenis medium filter dalam mereduksi senyawa nitrogen seperti NO_x. Proses biofiltrasi dapat dilakukan dengan atau tanpa penambahan bakteri. Penambahan bakteri dalam proses biofiltrasi dimaksudkan untuk meningkatkan proses biofiltrasi yang terjadi. Berikut ini merupakan tabel yang menunjukkan penelitian yang telah dilakukan.

Tabel 2. 1 State of the art proses biofiltrasi dengan gas NO_x

	Ceramic Balls	Wood Chips	Compost	Residual Calyey Schist (brick)	Carbon	Plastic foam packing	Zeolite
<i>Nitrobacter</i> sp						Klasson, K.Thomas et al.,2001	Penelitian ini (<i>Nitrobacter winogradsky i</i>)
<i>Xanthobacter autotropicus</i>				Gomez, Miguel Angel et al., 2005			
<i>Nitrosomoonas europaea</i>		Islam, G.M.R et al., 2006					
Tanpa penambahan bakteri					Chen, Jianmeng et al., 2006 (Carbon foam and lava)		
			Cadena, Erasmo et al., 2009 Del Nero Maia, G.et al., 2009				
			Yang, Wan-Fa et al.,2007				
nitrifying bacteria and denitrifying bacteria	Jiang, R et al., 2007		M. Barnes, Jony et al., 1994 (wood compost)				

2.7.1 Biofiltrasi NO_x Tanpa Penambahan Bakteri

Penelitian biofiltrasi dengan menggunakan NO_x telah banyak dilakukan. Salah satunya yaitu biofiltrasi tanpa penambahan bakteri. Penelitian ini telah dilakukan oleh Yang et al., 2007; M. Barnes, Joni 1994; Cadena, Erasmo et al., 2009 dan Chen, Jianmeng et al., 2006 (Carbon foam and lava).

Yang et al., 2007 meneliti efek dari parameter operasi pada kinerja biofiltrasi dalam penghilangan NO_x. Yang et al. menggunakan NO sebagai gas polutan yang ingin dibiofiltrasi. Beberapa parameter yang diteliti yaitu

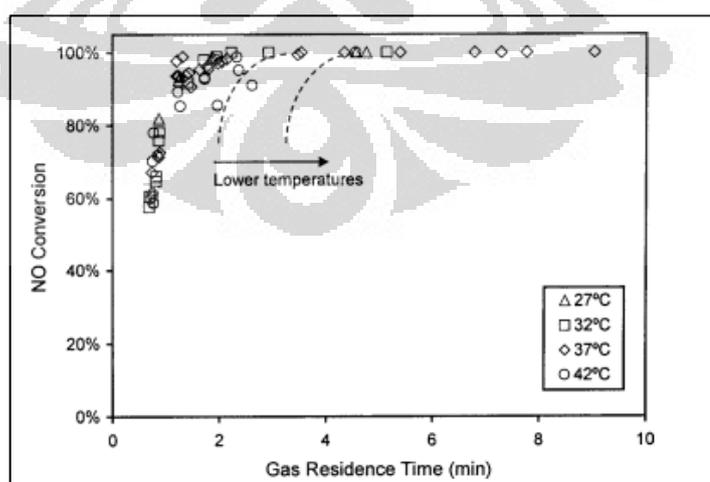
konsentrasi NO dan O₂, ketinggian kolom, laju alir, adanya sumber karbon eksternal. Pada penelitian tersebut digunakan medium filter mengandung kompos dan serpihan kayu, konsentrasi NO masukan sebesar 200 ppm, laju alir = 30 L/jam, kandungan oksigen 6%, dan penambahan glukosa sebanyak 1 g/hari. Gas diinjeksikan dari atas kolom dan laju alir gas diatur oleh suatu kontroler. Serpihan-serpihan kayu *Cyatheaceae* yang ditambahkan ke dalam kompos berfungsi sebagai *bulking agent* untuk meningkatkan adanya ruang kosong, mengurangi kepadatan, dan meningkatkan ventilasi udara dalam sistem. Hasil dari penelitian ini yaitu jumlah penghilangan NO bergantung pada tinggi material dalam kolom, semakin tinggi posisi kolom maka semakin baik kinerja penghilangan NO. Semakin banyak gas NO berkontak dengan mikroorganisme denitrifikasi terinokulasi pada media filter, semakin banyak NO yang dihilangkan. Efisiensi penghilangan sebesar 90% dapat dicapai dengan meningkatkan ketinggian kolom ke 6.5 m dengan kondisi oksigen di bawah 6%. Sementara itu, efisiensi penghilangan NO menurun dari 88% ke 40% dengan peningkatan konsentrasi gas NO masukan dari 60 sampai 500 ppm di bawah kondisi anaerobik dan tidak ada glukosa tambahan. Konsentrasi NO menurun secara signifikan ketika glukosa ditambahkan ke dalam kolom baik pada kondisi aerobik maupun anaerobik (Efisiensi Penghilangan NO anaerobik > aerobik).

2.7.2 Biofiltrasi NO_x dengan Penambahan Bakteri

Biofiltrasi senyawa NO_x dengan penambahan bakteri dilakukan oleh Islam, G.M.R et al., 2006, Gomez, Miguel Angel et al., 2005, Klason, K. H. Thomas et al., 2001. Islam, G.M.R et al., 2006 melakukan penelitian mengenai reduksi senyawa NO_x dalam udara oleh *Nitrosomonas europaea*. Bakteri ini merupakan bakteri yang berguna untuk mereduksi gas amonia dari udaradengan menggunakan wood charcoal. Hasil yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan dengan menggunakan *Nitrosomonas europaea* dalam lingkungan anaerobik mengindikasikan bahwa konsentrasi nitrat di atas 300mg/L dapat menghambat pertumbuhan bakteri. Reaktor biofilter yang berisikan *Nitrosomonas europaea* yang digunakan untuk mereduksi nitrat dapat

bekerja pada 100 sampai 500 mg/L tanpa adanya hambatan. Kolom biofilter mampu untuk mereduksi NO_x secara maksimal sehingga konsentrasi NO_x tidak terdeteksi.

Sementara itu *Xanthobacter autotrophicus* digunakan oleh Gomez, Miguel Angel et al., 2005 untuk mengetahui aktivitas denitrifikasi bakteri dalam reaktor *submerged fixed-film*. Strain bakteri terisolasi merupakan bakteri gram negatif yang mampu untuk tumbuh pada metanol, etanol, dan sukrosa. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini yaitu bahwa bakteri *Xanthobacter autotrophicus* mampu untuk bekerja pada reduksi nitrogen anorganik pada filter denitrifikasi *submerged*. Klason, K. H. Thomas et al., 2001 memanfaatkan *Pracoccus denitrifican* untuk mengetahui pengaruh temperatur operasi dalam *trickel-bed* biofilter. Nutrisi bakteri yang digunakan yaitu berupa 3.0 g KNO₃, 2.7 g CH₃COONa.3H₂O, 0.8 g K₂HPO₄, 0.3 g KH₂PO₄, 0.4 g NH₄Cl, 0.4 g MgSO₄.7H₂O, dan 2 mL *trace metal solution* per liter medium. pH medium yang digunakan yaitu 8.0 dengan NaOH sebelum dilakukan autoklaf pada suhu 120°C selama 30 menit. Sel bakteri secara aerobik tumbuh dalam medium selama 2 hari pada suhu 30°C sebelum diletakkan didalam lemari pendingin dengan suhu 4°C. Kolom biofilter yang digunakan terdiri dari *jacketed glass column* dan berisikan medium *porous foam*. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini dapat dilihat pada gambar berikut ini.

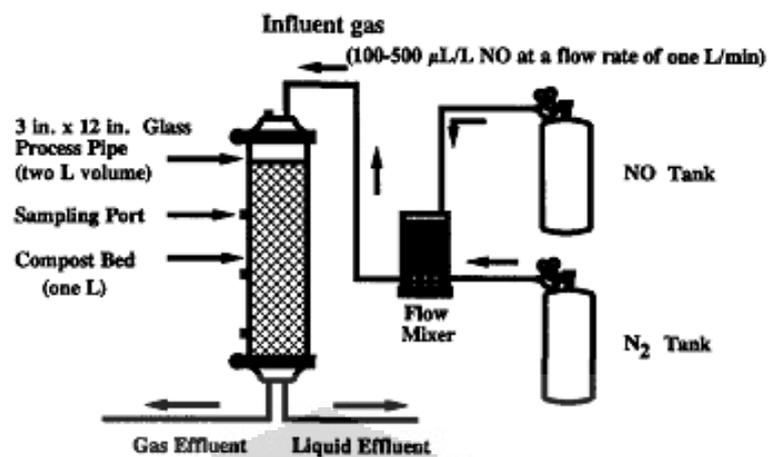


Gambar 2. 9 Grafik hasil penelitian oleh Klason, K. H. Thomas et al., 2001

Pada gambar di atas terlihat bahwa reduksi NO mencapai 100% pada laju alir yang berhubungan pada kolom kosong dengan waktu *residence time* 2 menit. Pada penelitian ini tidak terdapat pengaruh temperatur terhadap laju reduksi gas NO. Produksi Ngas N₂O intermediate tidak diukur pada penelitian ini.

2.7.3 Biofiltrasi Menggunakan Nitrifying dan Denitrifying Bacteria

Penelitian dengan menggunakan *nitrifying* dan *denitrifying bacteria* dilakukan oleh Jiang, R et al., 2007 dan M. Barnes, Joni 1994. Penelitian yang dilakukan oleh M. Barnes, Joni 1994 bertujuan untuk mengevaluasi kemungkinan yang mungkin terjadi pada proses biofiltrasi dalam mereduksi NO_x pada aliran gas. Pada penelitian ini dilakukan pengukuran jumlah NO_x yang mampu didegradasi oleh bakteri yang berasal dari *wood compost*. Peralatan biofilter yang digunakan terbuat dari pipa *glass* (3 in i.d. x 12 in) yang berisikan 1 L medium kompos. Konsentrasi NO_x (100-500 µl/l) diukur kedalam aliran nitrogen dan mengalirkannya menuju kolom biofilter dengan laju alir 1L/min di bawah kondisi *single pass*. Studi absorpsi dilakukan untuk membandingkan reduksi NO dalam autoklaf dan non-autoklaf biofilter dan diperkirakan sebanyak 3[^] dari reduksi NO berhubungan dengan *abiotic uptake*. Kontrol pH dalam sistem biofilter merupakan variabel yang sangat penting untuk memperoleh reduksi NO yang maksimal. Aktivitas bakteri denitrifikasi optimum pada pH 6-7. Laju reduksi NO meningkat dalam biofilter dengan menggunakan karbon eksternal dan sumber energi. Biofilter dengan penambahan buffer phosphate yang terdiri dari laktat dan dekstrose mampu untuk mereduksi lebih dari 90% gas NO.



Gambar 2. 10 Desain biofilter M. Barnes, Juni 1994

2.7.4 Biofiltrasi N_2O yang Dilakukan Di Universitas Indonesia

Penelitian mengenai proses biofiltrasi ini telah dilakukan beberapa kali sejak tahun 2008 di riset grup Teknologi Bioproses Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia. Penelitian yang telah dilakukan bertujuan untuk mereduksi senyawa N_2O dengan menggunakan berbagai jenis medium antara lain kompos pupuk kandang, kompos sapi, kompos kambing, zeolit dan karbon aktif. Penelitian untuk mereduksi senyawa N_2O telah dilakukan oleh Tania Surya Utami pada tahun 2009 dengan menggunakan kompos pupuk kandang sebagai medium. Untuk membandingkan efisiensi reduksi senyawa N_2O , Tania Surya Utami pada tahun 2011 dilakukan penelitian yang sama dengan medium yang berbeda yaitu kompos berbasis kotoran kambing. Selain itu juga pada tahun 2010 diperoleh model absorpsi pada lapisan biofilm di permukaan medium berdasarkan persamaan adsorpsi isothermis Langmuir oleh Tania Surya Utami. Berikut ini merupakan tabel yang menunjukkan penelitian yang telah dilakukan pada riset grup Teknologi Bioproses Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia.

Tabel 2. 2 State of the art riset grup Teknologi Bioproses

		N ₂ O	
		Eksperimen	Model Biosorpsi
Medium	Kompos pupuk kandang	Utami, 2009	
	Kompos kambing	Erika, 2010; Mei Linda, 2010	Utami, 2010 ; Utami, 2011
	Kompos sapi	Josia, 2008; Shilfa, 2009; Irwan, 2010; Cynthia, 2010	
	Karbon aktif	Laili, 2012; Qurota, 2012	
	Zeolit alam Lampung	Nindya, 2012; Penelitian ini	

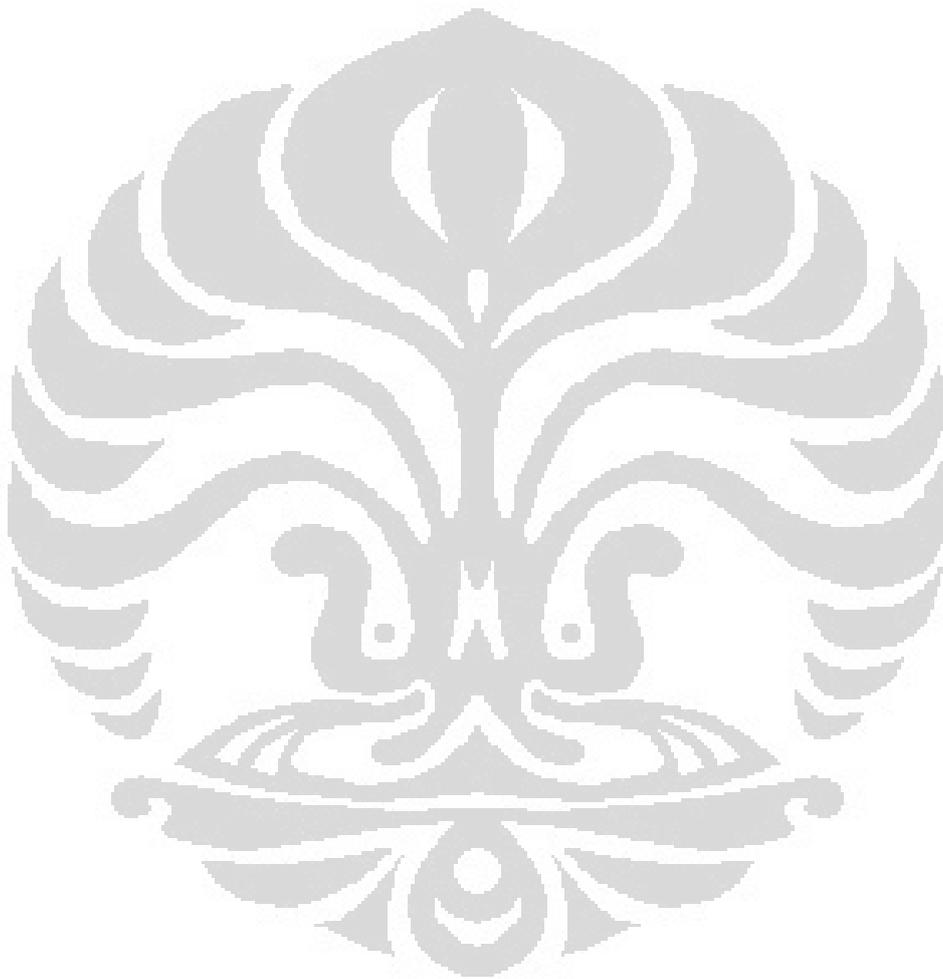
Biofiltrasi N₂O dengan menggunakan kompos kambing telah dilakukan oleh Erika, 2010 dan Mei Linda, 2009. Penelitian yang dilakukan oleh Mei Linda, 2009 bertujuan untuk mengetahui pengaruh kedalaman dan waktu inkubasi pada medium kompos berbasis kotoran kambing dalam biofiltrasi gas N₂O. Pada penelitian ini digunakan medium filter berbasis kotoran kambing dengan *cocopeat* dan sekam beras sebagai *bulking agentnya*. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh kedalaman dan waktu inkubasi terhadap efisiensi reduksi N₂O dan pertumbuhan mikroorganisme di dalam kompos. Penelitian ini dilakukan dengan sistem *semibatch* selama 9 jam waktu operasi. Selain itu akan dilakukan uji sifat kompos seperti densitas, pH, kandungan air, dan *pressure drop*. Analisis yang digunakan adalah analisis GC (*Gas Chromatography*), TPC (*Total Plate Column*), dan SEM (*Scanning Electron Microscope*). Adapun hasil yang diperoleh yaitu efisiensi reduksi tertinggi untuk laju alir 88cc/menit dapat dicapai pada kedalaman medium 100cm untuk variasi kedalaman kering, yaitu sebesar 78,63% dan efisiensi reduksi sebesar 100% dapat dicapai oleh kompos yang diinkubasikan dengan larutan nutrisi sintetik selama minimal 26,5 jam, dan hasil optimum dicapai oleh kompos masa inkubasi 131 jam yang memiliki sifat fisis, kimia, dan mekanis paling

stabil. Penelitian ini menghasilkan bahwa semakin tinggi porositas medium filter di dalam kolom, semakin lama waktu yang dibutuhkan oleh aliran gas polutan untuk mencapai fasa stabil. Medium filter kompos berbasis kotoran kambing memiliki kemampuan retensi air yang cukup baik, ditandai dengan penurunan *water content* yang tidak terlalu signifikan dari seluruh kompos setelah dioperasikan selama 12 jam, baik kompos untuk variasi kedalaman kering maupun kompos untuk variasi masa inkubasi dengan larutan nutrisi sintetik.

Penelitian biofiltrasi N_2O dengan menggunakan kompos sapi telah dilakukan oleh Josia, 2008, Shilfa, 2009, Irwan, 2010, Cynthia, 2010. Irwan, 2010 melakukan penelitian untuk mengetahui pengaruh ukuran pelet kompos dan pengaruh kandungan nutrisi medium pelet kompos terhadap reduksi gas N_2O . Dalam penelitian ini akan dikaji pengaruh variasi ukuran pelet kompos kambing terhadap efisiensi biofiltrasi gas N_2O dan pertumbuhan mikroorganisme pada medium filter, pengaruh penambahan larutan sintetik terhadap efisiensi biofiltrasi gas N_2O dan pertumbuhan mikroorganisme pada medium filter, kemampuan biofilter dalam menurunkan konsentrasi gas N_2O berdasarkan penurunan konsentrasi maksimum yang dihasilkan, besaran laju penghilangan maksimum (V_m) dan konstanta saturasi *half* (K_s) berdasarkan persamaan kinetika Michaelis Menten., dan perilaku adsorpsi dalam biofilter menurut adsorpsi Langmuir. Adapun hasil yang diperoleh yaitu efisiensi reduksi optimum dicapai pada ukuran pelet kompos 5x5 mm sebesar 25,31 %, kandungan nutrisi 40% pada pelet kompos merupakan kandungan nutrisi optimum dalam mereduksi N_2O dengan efisiensi reduksi sebesar 62,25 %, dan pH untuk biofiltrasi gas N_2O pada penelitian ini cenderung stabil di rentang pH 6 – 8 (pH untuk aktivitas optimum mikroorganisme). Kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O hingga mencapai efisiensi reduksi optimum diperoleh pada ukuran pelet 5x5 mm dan kandungan nutrisi 40% berat pelet kompos.

Penelitian dengan menggunakan karbon aktif sebagai medium juga telah dilakukan oleh Laili, 2012 dan Qurota, 2012. Pada penelitian yang dilakukan oleh Laili, 2012 bertujuan untuk mengkaji kinerja biofiltrasi dengan memvariasikan konsentrasi larutan nutrisi sintetik. Efisiensi reduksi tertinggi

dihasilkan oleh variasi konsentrasi 0,31% dengan efisiensi reduksi sebesar 85,68% dan efisiensi reduksi rata-rata tertinggi yaitu 0,31% dengan efisiensi reduksi rata-rata sebesar 61,1%. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kinerja biofiltrasi N_2O dengan kultur bakteri dan mengetahui efisiensi reduksi optimum proses biofiltrasi N_2O dengan cara memvariasikan konsentrasi larutan nutrisi sintetik.



BAB 3

METODE PENELITIAN

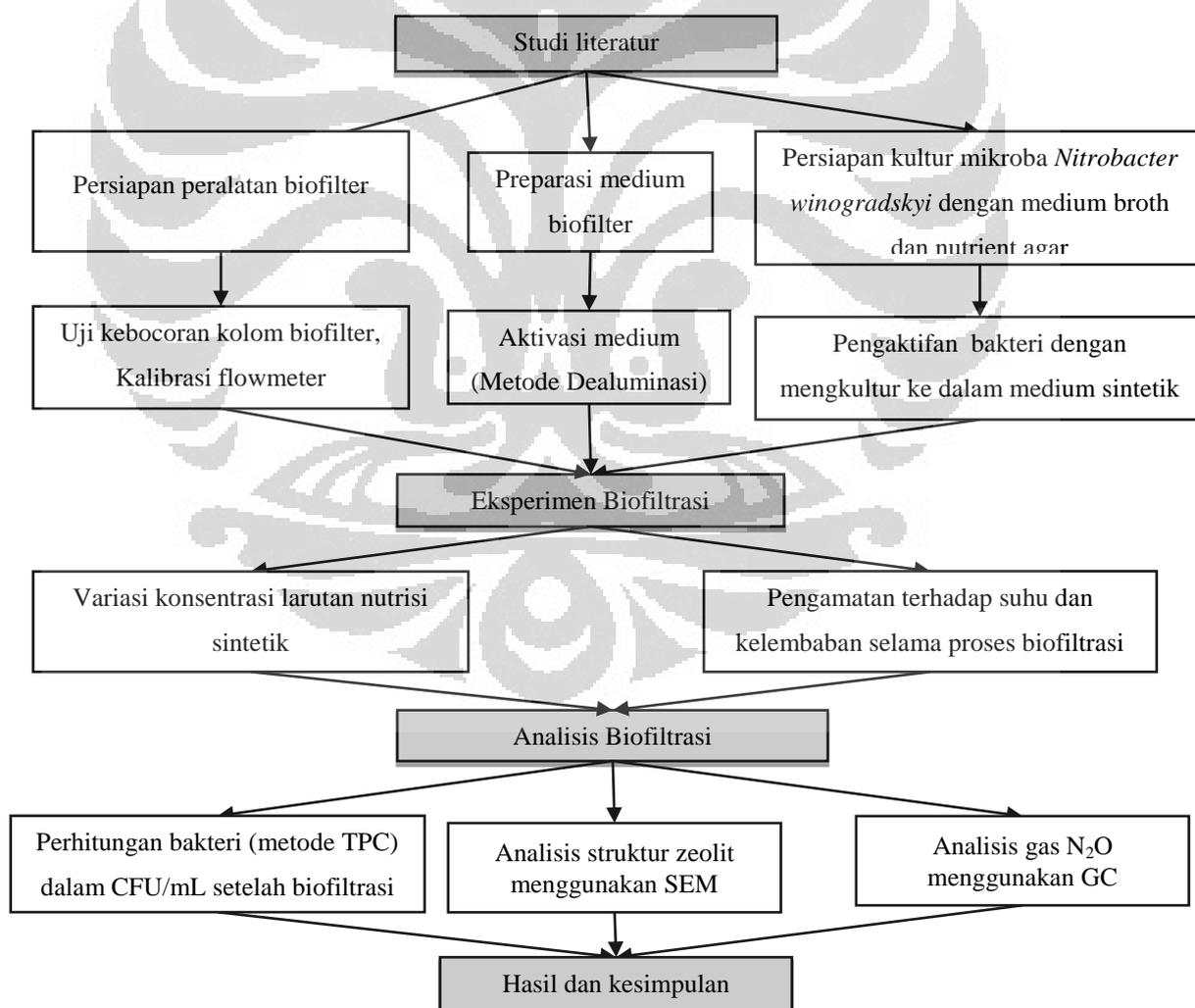
Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji mengenai pengaruh konsentrasi medium sintetik terhadap jumlah kadar N_2O yang mampu didegradasi dengan menggunakan media zeolit alam Lampung yang diinokulasi oleh bakteri *Nitrobacter winogradskyi* dalam kolom biofilter. Pada bab ini akan dibahas mengenai diagram alir proses penelitian, peralatan dan bahan yang digunakan, prosedur penelitian, variabel serta data yang diambil dari penelitian yang dilakukan.

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Rekayasa Bioproses Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, Depok. Penelitian ini diawali dengan studi literatur yang dilakukan dengan cara mempelajari jurnal publikasi nasional dan internasional mengenai proses biofiltrasi. Selanjutnya dilakukan persiapan peralatan biofilter, persiapan medium filter, dan persiapan kultur mikroba. Peralatan biofilter yang digunakan terbuat dari bahan *acrylic* dengan dimensi tinggi kolom 120 cm dan diameter 20 cm. Sistem perpipaan dan persambungan terbuat dari bahan stainless steel dengan sambungan seminimal mungkin. Penggunaan bahan ini untuk mencegah terjadinya korosi (Yang et al., 2007). Pada persiapan medium filter, medium yang digunakan berupa zeolit alam Lampung. Pada persiapan medium filter dilakukan aktivasi melalui metode dealuminasi.

Sebelum melakukan tahap eksperimen, dilakukan uji kebocoran pada peralatan biofilter. Uji kebocoran ini dilakukan untuk memastikan proses adsorpsi berjalan dengan baik dengan terjadinya proses degradasi N_2O yang menyebabkan berkurangnya konsentrasi gas N_2O keluaran, dan bukan akibat terjadinya kebocoran. Selain itu juga dilakukan pengaktifan bakteri *Nitrobacter winogradskyi* dengan mengkulturnya kedalam nutrient broth, nutrient agar dan medium sintetik. Sekanjutnya pada tahapan eksperimen dilakukan variasi terhadap konsentrasi larutan nutrisi sintetik.

Setelah tahap eksperimen, dilakukan tahap analisis dimana pada tahap ini dilakukan perhitungan bakteri dengan menggunakan metode TPC dalam CFU/mL, *Scanning Electron Microscope* (SEM), dan analisis gas N₂O menggunakan *gas chromatography* (GC). Medium sebelum dan sesudah biofiltrasi diteliti perkembangan populasi mikroorganismenya dengan menggunakan metode Total Plate Count (TPC). Gas keluaran kolom biofilter dianalisa konsentrasinya dengan *gas chromatography* (GC) untuk mengetahui efisiensi penghilangan gas N₂O. Selain itu juga dilakukan pengamatan terhadap suhu dan kelembapan kolom biofilter selama proses biofiltrasi berlangsung. Setelah itu dilakukan analisa hasil melalui pembahasan untuk mencapai suatu kesimpulan. Gambar di bawah ini menunjukkan diagram alir penelitian proses biofiltrasi.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian proses biofiltrasi

3.2 Alat dan Bahan

Pada penelitian biofiltrasi ini digunakan medium filter berupa campuran zeolit alam Lampung. Digunakan pula sejumlah alat dan bahan dengan rincian sebagai berikut:

3.2.1 Alat

Berikut ini merupakan tabel yang menunjukkan rincian peralatan yang digunakan pada penelitian ini :

Tabel 3. 1 Peralatan yang digunakan dalam penelitian

No	Alat	Fungsi
1	Sistem biofilter	Tempat dilakukan pengujian biofiltrasi gas N ₂ O
2	Gelas ukur	alat untuk mengambil larutan dalam jumlah tertentu
3	Erlenmeyer	wadah pencampuran nutrient agar dan air
4	Spatula kaca/pengaduk	mengaduk nutrient agar dan aquadest
5	Ayakan	alat untuk mengayak zeolit agar memiliki ukuran partikel yang seragam
6	Kaca arloji	wadah untuk menimbang nutrient agar
7	<i>Bubble soap</i>	mengkalibrasi laju alir
8	<i>Gas Chromatography (GC)</i>	alat untuk menganalisa konsentrasi gas N ₂ O dalam sampel
9	Timbangan digital	alat pengukur berat bahan dan sampel
10	Tabung reaksi	tempat pengenceran larutan
11	Gas trap	alat penampung gas N ₂ O untuk dikalibrasi
12	<i>Transfer box</i>	tempat untuk melakukan metode TPC
13	Autoklaf	tempat sterilisasi sampel
14	Bunsen	memanaskan peralatan yang akan digunakan agar tetap steril
15	Cawan petri	tempat pembiakan bakteri dalam nutrient agar
16	<i>Syringe</i>	mengambil sampel untuk analisa GC
17	Inkubator	tempat menginkubasi bakteri
18	<i>Hot plate stirrer</i>	memanaskan dan menghomogenkan medium agar untuk TPC
19	Oven	mensterilisasi alat-alat yang akan digunakan pada metode TPC
20	<i>Micropipet</i>	alat untuk mengambil sejumlah larutan dalam volume yang kecil (1000μ)
21	Batang strik	alat untuk pengambilan sampel bakteri

3.2.2 Bahan

Berikut ini merupakan rincian bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini:

1. **Gas sampel N₂O**, gas yang digunakan merupakan gas N₂O dengan konsentrasi sebesar 15000 ppm dalam udara.
2. **Zeolit alam**, medium filter yang berasal dari alam Lampung dengan ukuran 2 mm.
3. **Bakteri nitrifikasi (*N. winogradskyi*)**, sebagai mikroorganisme yang akan terimobilisasi dan berfungsi untuk mendegradasi N₂O dalam gas sampel.
4. **Nutrien agar dan nutrient broth** sebagai media agar untuk perhitungan bakteri dan pengkulturan bakteri.
5. **Medium sintetik (nutrient)** bakteri yang dilarutkan dalam 4 L aquadest (g/L):
 - NaNO₂ 4 g
 - NaCl 1.2 g
 - K₂HPO₄ 2 g
 - MgSO₄ · 7H₂O 2 g
 - MnSO₄ · n H₂O 0,08 g
 - Fe₂(SO₄)₃ 0,02 g
6. **Aquadest** sebagai pelarut zeolit, serta sebagai pelarut nutrisi agar, pelarut nutrient broth, dan pelarut dalam nutrisi sintetis.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini terdiri dari persiapan peralatan biofilter, medium biofilter, kalibrasi gas N₂O, dan uji kebocoran alat.

3.3.1 Persiapan peralatan Biofilter

Peralatan biofilter yang digunakan dalam penelitian ini beroperasi secara batch. Peralatan biofilter tersebut merupakan peralatan biofiltrasi yang sama yang digunakan oleh Utami et al., 2009. Peralatan biofilter ini terbuat dari bahan kaca *acrylic* dengan dimensi tinggi kolom 120 cm, tebal bahan 0,325 cm dan diameter kolom 8 cm. Penggunaan bahan *acrylic* dimaksudkan untuk

mencegah terjadinya kebocoran seminimal mungkin. Pada sistem biofilter ini terdapat tabung gas N₂O sebagai sumber gas polutan dengan konsentrasi 15000 ppm dalam udara yang akan dibiofiltrasi. Selain itu juga terdapat *mass flowmeter* sebagai alat untuk mengatur laju alir gas kontaminan N₂O, perpipaan, serta sampling port sebagai tempat pengambilan sampel dimana ketiga peralatan tersebut terhubung langsung pada kolom biofilter tempat proses biofiltrasi berlangsung.

Pada penelitian ini dilakukan modifikasi yaitu mengurangi jumlah sambungan pada perpipaan sehingga pipa yang terhubung pada gas N₂O langsung terhubung dengan sampel port bagian atas. Hal ini dilakukan untuk meminimalisir terjadinya kebocoran pada sistem biofiltrasi. Pada eksperimen biofiltrasi, gas N₂O dialirkan melalui bagian atas kolom biofilter menuju bagian bawah kolom (*down-flow mode*). Cara ini dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan kontrol terhadap kelembapan (Pagans et al., 2005) agar medium filter dapat menahan air lebih lama.

Sistem perpipaan yang digunakan pada sistem biofilter berupa selang dengan bahan silikon, karena bahan ini tahan terhadap tekanan yang tinggi, tidak mengandung racun dan logam berat. Silikon merupakan bahan yang dapat bertahan lima kali lebih lama dibandingkan dengan bahan lainnya. Sedangkan untuk sampling port in dan out serta sambungan lainnya menggunakan bahan *stainless steel* karena bahan ini tahan terhadap korosi (Yang et al., 2007).

Pada penelitian ini tidak digunakan *perforated plate* seperti pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Hal ini dikarenakan penggunaan *perforated plate* tidak efisien, di mana posisi *perforated plate* sangat sulit dipertahankan untuk tetap horizontal di dalam kolom biofilter. Miringnya *perforated plate* tersebut malah mengakibatkan kompaksi medium filter yang berada di bawah *perforated plate*, dan mengakibatkan lubang-lubang *perforated plate* tersebut tersumbat oleh medium filter itu sendiri, sehingga mengakibatkan rendahnya efisiensi reduksi. Berikut ini merupakan gambar yang menunjukkan sistem biofilter yang digunakan pada penelitian ini.

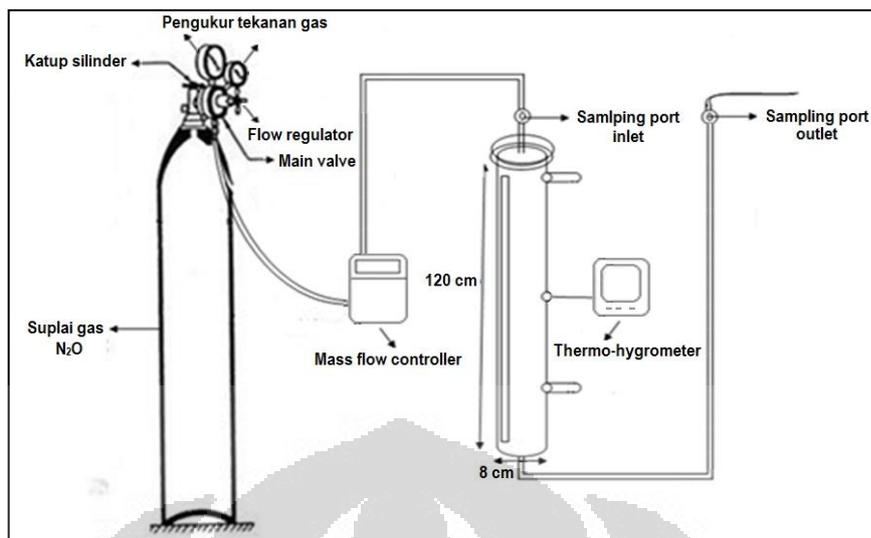


Gambar 3. 2 Peralatan biofilter yang digunakan dalam penelitian ini

Dari gambar 3.2, dapat dilihat bahwa komponen-komponen biofilter terdiri atas:

- 1 dan 3 yaitu *Sampling port* (inlet dan outlet) sebagai tempat mengambil sampel dengan *syringe*.
- 2 yaitu Kolom biofiltrasi yang berbentuk tabung dengan dimensi panjang 120 cm diameter luar 8 cm, diameter dalam 7,35 cm dengan bahan dari *acrylic*.
- 4 yaitu *Termo-hygrometer* sebagai alat penunjuk suhu medium dan kelembapan kolom biofilter.
- 5 yaitu *Mass flowmeter* dengan laju alir 88 cc/menit.
- 6 dan 7 yaitu *Gas chromatography* (GC) sebagai alat penganalisis gas N_2O pada proses biofiltrasi.

Sedangkan berikut ini merupakan gambar tiga dimensi dari sistem biofiltrasi yang digunakan pada penelitian ini.

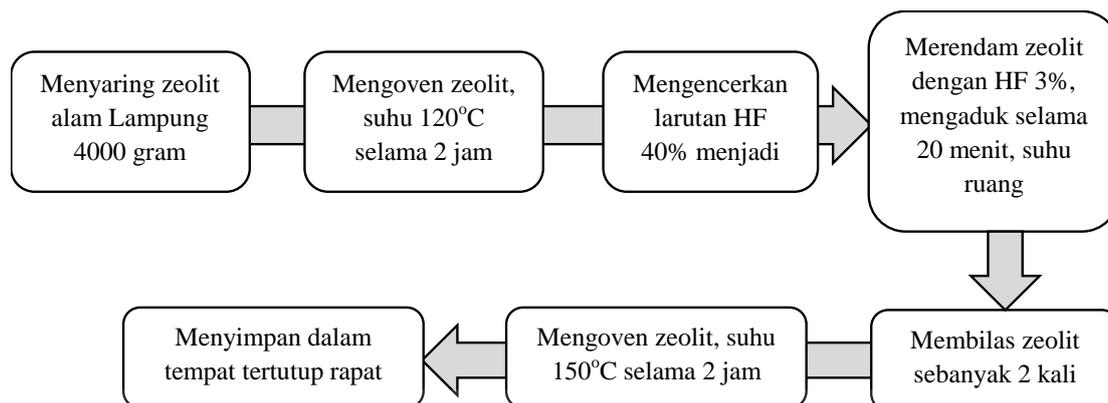


Gambar 3. 3 Skema peralatan biofiltrasi dalam 3 dimensi

3.3.2 Persiapan Medium Biofilter (Zeolit Alam Lampung)

Medium filter yang digunakan berupa campuran zeolit alam Lampung. Metode yang digunakan untuk mengaktivasi zeolit alam yaitu metode dealuminasi. Umumnya zeolit alam perlu diberi perlakuan tertentu bila akan digunakan sebagai adsorben, karena rasio Si/Al cukup tinggi dan mengandung unsur - unsur pengotor yang harus diminimalkan pengaruhnya. Oleh karena itu pada tahapan persiapan medium filter ini, zeolit alam diaktivasi menggunakan metode dealuminasi. Metode dealuminasi merupakan metode yang bertujuan untuk memodifikasi bentuk, struktur, pori, dan luas permukaan agar selanjutnya lebih mudah digunakan terutama untuk proses dengan menggunakan katalis.

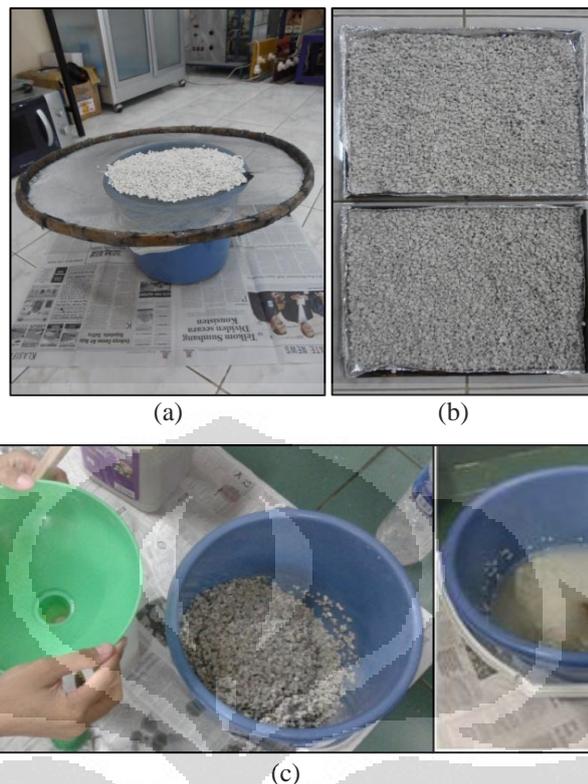
Proses ini menyebabkan pergeseran tetrahedral aluminium dari posisi rangka ke posisi non rangka, tetapi tidak menghilangkan aluminium dari zeolit (Yuliusman et al., 2010). Pada proses ini dilakukan pencucian zeolit dengan asam kuat dimana pada penelitian ini digunakan HF 3%. Tahap aktivasi zeolit ini telah digunakan sebelumnya di Departemen Teknik Kimia oleh Yuliusman et al., 2010. Adapun rincian tahap yang dilakukan pada persiapan zeolit alam melalui metode dealuminasi yaitu pada gambar 3.4 berikut ini:



Gambar 3. 4 Tahap persiapan zeolit alam Lampung melalui metode dealuminasi

Persiapan medium filter diawali dengan menyaring (pengayakan) zeolit alam dengan saringan sebesar 2 mash dengan tujuan untuk memperoleh ukuran partikel zeolit yang homogen dan untuk mencegah hambatan dari medium filter (Yang et al., 2007). Untuk mengisi kolom biofilter dengan tinggi 100 cm maka dibutuhkan zeolit sebanyak 4000 gram. Oleh karena, itu sebanyak 20 kg zeolit dibutuhkan pada penelitian ini untuk 5 variasi yang dilakukan. Setelah proses penyaringan, dilakukan proses pengeringan zeolit dengan menggunakan oven pada suhu 120°C selama 2 jam.

Selanjutnya dilakukan proses aktivasi zeolit dengan metode dealuminasi, dimana pada proses ini sebanyak 4000 gram zeolit direndam dengan menggunakan larutan HF 3%. Untuk merendam zeolit sebanyak 4000 gram dibutuhkan larutan HF 3% sebanyak 4 liter. Oleh karena itu, sebelumnya dilakukan pengenceran larutan HF 44%, dimana 262 mL HF 44% diencerkan menggunakan aquadest sebanyak 3638 mL (dari hasil perhitungan pengenceran). Ketika zeolit direndam dengan larutan HF 3%, dilakukan pengadukan selama 20 menit agar zeolit terendam sempurna. Zeolit dibilas dengan menggunakan aquadest sebanyak 2 kali untuk menghilangkan larutan HF yang terdapat pada zeolit dan disimpan dalam ruang tertutup untuk menghindari adanya uap air yang masuk ke dalam pori-pori sampel. Berikut ini merupakan gambar tahap perendaman zeolit dengan larutan HF 3%.



Gambar 3. 5 Tahap persiapan medium filter: (a) homogenasi zeolit, (b)zeolit yang telah diaktivasi, (c) proses perendaman (dealuminasi) zeolit dengan larutan HF 3%

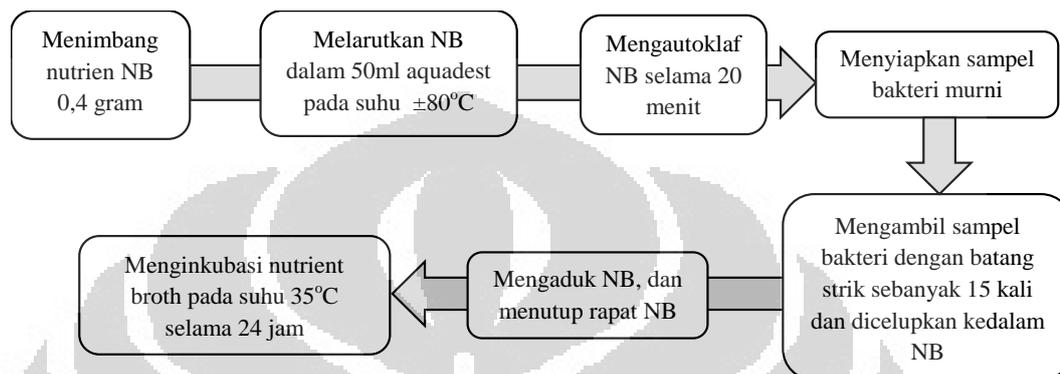
3.3.3 Persiapan Kultur Bakteri

Tahap ini bertujuan untuk memperoleh kultur bakteri terbaru setiap melakukan uji degradasi, sehingga diperoleh kondisi bakteri yang optimal. Bakteri yang digunakan pada proses biofiltrasi gas N_2O dengan medium filter zeolit alam merupakan salah satu bakteri penitrifikasi yaitu *N. winogradskyi*. Untuk itu dilakukan 3 jenis tahapan pengkulturan yaitu kultur bakteri dalam medium nutrisi broth, medium nutrisi agar, dan medium nutrisi sintetik.

3.3.3.1. Pengkulturan bakteri pada *Nutrient Broth*

Pengkulturan bakteri dengan menggunakan nutrisi broth (NB) merupakan kultur bakteri awal dimana strain bakteri *N. winogradskyi* dipindahkan ke dalam larutan nutrisi broth. Nutrisi broth banyak digunakan pada kultivasi dari berbagai jenis mikroorganisme. Nutrisi broth terdapat pada banyak metode standar untuk menguji makanan, produk dairy, dan material lainnya (Accumedia, 2010). Pada larutan nutrisi broth ini bakteri dapat

bertahan selama 2 minggu untuk kemudian dipindahkan kembali ke dalam larutan nutrisi broth lainnya. Bakteri penitrifikasi dapat hidup tanpa nutrisi untuk lebih dari satu tahun. Bakteri tersebut hanya perlu untuk dipindahkan ke dalam media baru setiap satu bulan (Eva Spieck & Eberhard Bock, 2005). Gambar 3.5 berikut ini merupakan diagram alir tahapan pengkulturan bakteri dalam nutrient broth.

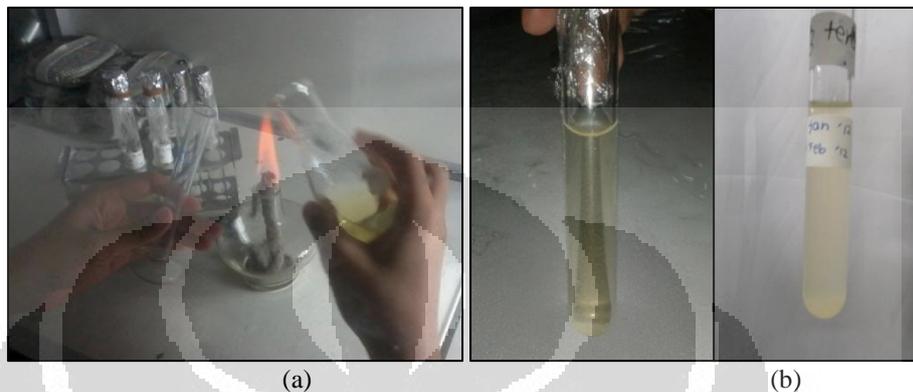


Gambar 3. 6 Tahapan pengkulturan bakteri dalam nutrient broth

Kultur bakteri ini diawali dengan menimbang nutrisi broth sebanyak 0,4 gram dan melarutkannya dalam 50 mL aquadest sambil dipanaskan dan diaduk dengan menggunakan *hotplate stirrer* pada suhu $\pm 80^{\circ}\text{C}$. Pemanasan dan pengadukan dilakukan agar nutrisi broth terlarut sempurna. Setelah pemanasan dilakukan sterilisasi alat dan larutan nutrisi broth dengan menggunakan panci presto pada suhu 110°C selama 20 menit. Selanjutnya strain bakteri dipecahkan dari vialnya dan dimasukkan ke dalam larutan nutrisi broth. Tahap ini hanya dilakukan di awal (yang disebut bakteri awal), untuk pengkulturan bakteri dengan nutrisi broth selanjutnya dilakukan dengan memindahkan bakteri dari kultur bakteri awal ke kultur broth lainnya dengan menggunakan batang strik sebanyak 15 kali, dimana batang strik disterilisasi di atas api bunsen sebelum dicelupkan ke dalam nutrisi broth.

Larutan nutrisi broth diaduk dengan menggunakan batang strik agar bakteri homogen kemudian ditutup rapat dengan menggunakan aluminium foil dan *plastic wrap*. Penutupan dengan menggunakan kedua bahan tersebut ditujukan untuk menghindari masuknya kontaminan lain yang tidak diinginkan ke dalam tabung yang dapat mempengaruhi kualitas bakteri yang terdapat pada

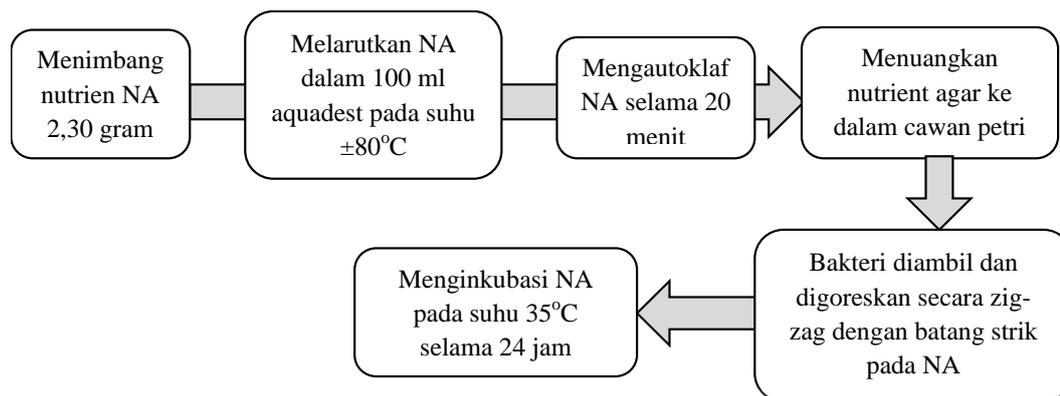
larutan nutrisi broth tersebut. Selanjutnya bakteri diinkubasi dalam inkubator pada suhu 32°C selama 24 jam, untuk kemudian dilakukan tahap pengkulturan berikutnya. Di bawah ini merupakan gambar kultur bakteri dalam nutrisi broth yang telah diinkubasi selama 24 jam.



Gambar 3. 7 Dokumentasi kultur bakteri dengan nutrisi broth: (a) proses pengkulturan bakteri dalam nutrisi broth, (b) hasil kultur bakteri yang telah diinkubasi dalam nutrisi broth selama 24 jam

3.3.3.2. Penanaman bakteri pada nutrient agar

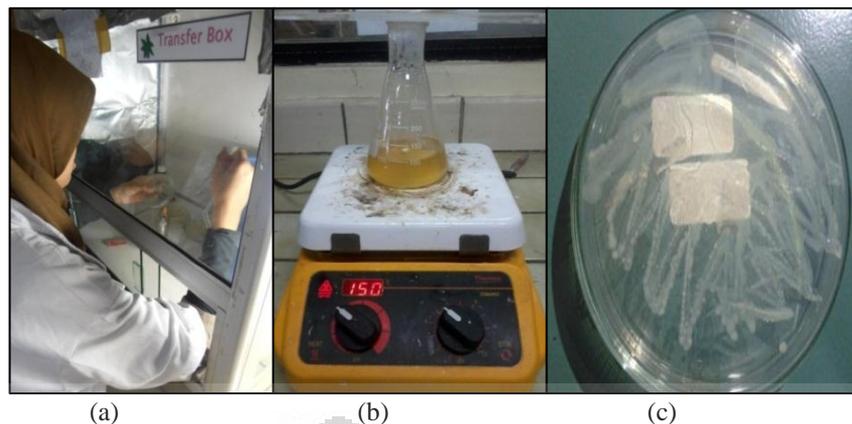
Kultur bakteri yang dilakukan selanjutnya yaitu kultur bakteri menggunakan nutrisi agar. Nutrisi agar merupakan suatu polimer yang banyak digunakan untuk menumbuhkan berbagai macam bakteri dan jamur. Nutrisi agar terdiri dari 0,5% *peptone*. *Peptone* merupakan sumber inti dari nitrogen organik untuk pertumbuhan bakteri. Nutrisi agar juga mengandung 0,3% *beef extract* yang mengandung zat yang larut dalam air yang dapat membantu dalam pertumbuhan bakteri, seperti vitamin, karbohidrat, nitrogen organik campuran, dan garam. Komponen terakhir yang terkandung dalam nutrisi agar yaitu 1,5% agar yang merupakan agen pembeku (Notla, Brandon, 2011). Tahapan ini dilakukan untuk mengadaptasikan bakteri terhadap lingkungan. Berikut ini merupakan gambar tahapan pengkulturan bakteri dalam media agar.



Gambar 3. 8 Tahap pengkulturan bakteri dalam media agar

Kultur bakteri dengan nutrien agar diawali dengan pembuatan agar. Nutrien agar sebanyak 2,30 gram dilarutkan dalam 100 mL aquadest sambil diaduk dan dipanaskan dengan menggunakan *hot plate stirrer* pada suhu 100°C hingga larutan agar terlarut sempurna (parameter terlarut sempurna yaitu larutan agar menjadi bening). Pemanasan ini dilakukan untuk menghindari pembekuan nutrien agar. Larutan agar kemudian disterilisasi dengan menggunakan panci presto pada suhu 110°C selama 20 menit.

Setelah dilakukan sterilisasi, larutan agar didinginkan untuk selanjutnya dituangkan ke dalam cawan petri sebanyak ±10mL. Larutan agar yang dituangkan tidak boleh terlalu tebal, agar bakteri dapat tumbuh dengan baik dan mempercepat pengkulturan. Sebelumnya cawan petri telah disterilisasi dengan menggunakan oven pada suhu 150°C selama 2 jam. Cawan petri yang digunakan yaitu sebanyak 6 buah cawan. Hal ini dilakukan untuk mengantisipasi terjadinya kegagalan dalam proses pengkulturan. Setelah larutan agar dituangkan dan membeku, bakteri yang terdapat pada nutrien broth dipindahkan dengan menggunakan batang strik dan digoreskan pada nutrien agar secara zig-zag. Penggoresan secara zig-zag biasa dilakukan untuk menghindari penumpukan bakteri dan agar bakteri dapat tumbuh dengan baik. Sampel bakteri pada nutrien agar diinkubasi selama 24 jam pada suhu 32°C dalam inkubator. Gambar berikut merupakan kultur bakteri dalam medium agar yang telah diinkubasi selama 24 jam.



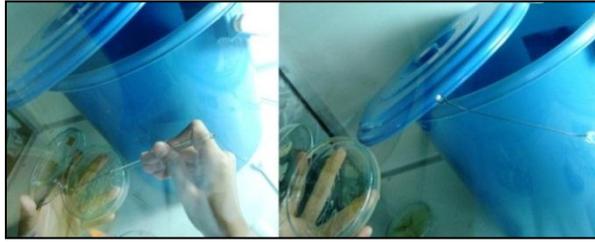
Gambar 3. 9 Proses kultur bakteri dengan medium agar : (a) proses pengkulturan bakteri dalam medium agar, (b) proses pembuatan medium agar dengan *hot plate stirrer*, (c) hasil kultur bakteri dalam medium agar setelah inkubasi 24 jam

3.3.3.3. Penanaman bakteri pada medium sintetik

Pada kultur bakteri dengan menggunakan nutrisi sintetik akan dilakukan variasi konsentrasi dengan penambahan dan pengurangan jumlah aquadest yang digunakan. Bahan medium sintetik yang digunakan merupakan nutrisi untuk bakteri *N. winogradskyi* yang diketahui dari tempat pembelian bakteri yaitu Program Pasca Sarjana Fakultas MIPA UGM, Yogyakarta. Medium sintetik yang digunakan yaitu terdiri dari 4 gram NaNO_2 , 1,2 gram NaCl , 2 gram K_2HPO_4 , 2 gram $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0,08 gram, $\text{MnSO}_4 \cdot n \text{H}_2\text{O}$, 0,02 gram $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ yang dilarutkan dalam 4 L aquadest. Berikut merupakan tahapan penanaman bakteri dalam medium sintetik.

1. Menimbang bahan medium sintetik
2. Mengautoklaf aquadest sebanyak 4L selama 20 menit.
3. Melarutkan medium sintetik kedalam 4 L aquadest.
4. Menyiapkan bakteri yang telah ditanam pada *nutrient* agar, kemudian menambahkan dan mengaduk sejumlah bakteri *N. winogradskyi* dari *nutrient* agar dengan menggunakan batang strik.
5. Mengambil sampel medium sintetik 0 jam (sebelum inkubasi) untuk dianalisis menggunakan metode TPC.
6. Menginkubasi medium sintetik selama 48 jam dalam suhu ruang.
7. Mengambil sampel medium sintetik setelah inkubasi 48 jam untuk dianalisis dengan metode TPC.

Berikut ini merupakan gambar yang menunjukkan proses pengkulturan bakteri dalam nutrisi sintetik.



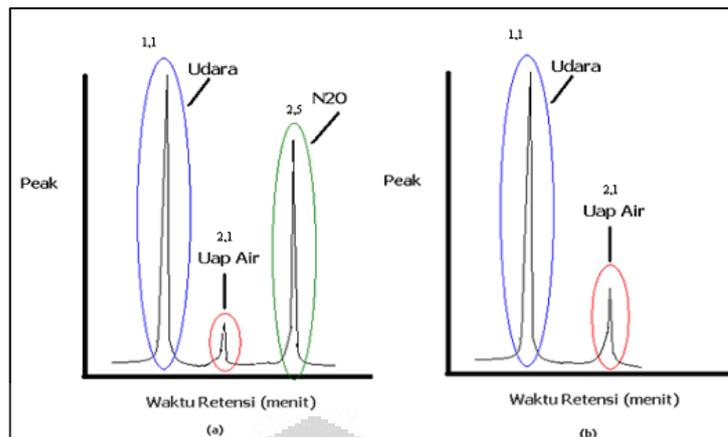
Gambar 3. 10. Pengkulturan bakteri dalam medium sintetik

3.3.4 Kalibrasi Gas N_2O

Kalibrasi gas N_2O dilakukan sebelum tahap eksperimen untuk mengetahui waktu retensi, luas peak, dan juga konsentrasi gas N_2O . Prosedur untuk uji kalibrasi gas N_2O yaitu sebagai berikut:

- Mengalirkan gas N_2O ke dalam gas trap selama 10 detik.
- Sampel diambil dari *sampling port inlet* dengan menggunakan *syringe* dengan berbagai variasi volume (0,1; 0,4; 0,7; 1 mL).
- Menginjeksikan sampel ke dalam *Gas Chromatography* (GC) yang akan mendeteksi keberadaan serta konsentrasi gas yang diinginkan.
- Menganalisis hasil yang tertera pada *Gas Chromatography* (GC) dengan membuat plot antara volum gas N_2O terhadap luas peak N_2O sampai diperoleh garis linier.
- Melakukan kalibrasi sebanyak dua kali agar memperoleh hasil kalibrasi yang akurat.

Untuk mengetahui letak *peak* N_2O , berikut ini merupakan grafik hasil pembacaan GC pada sampel gas N_2O dengan volume 1,0 mL dibandingkan dengan sampel udara bebas.

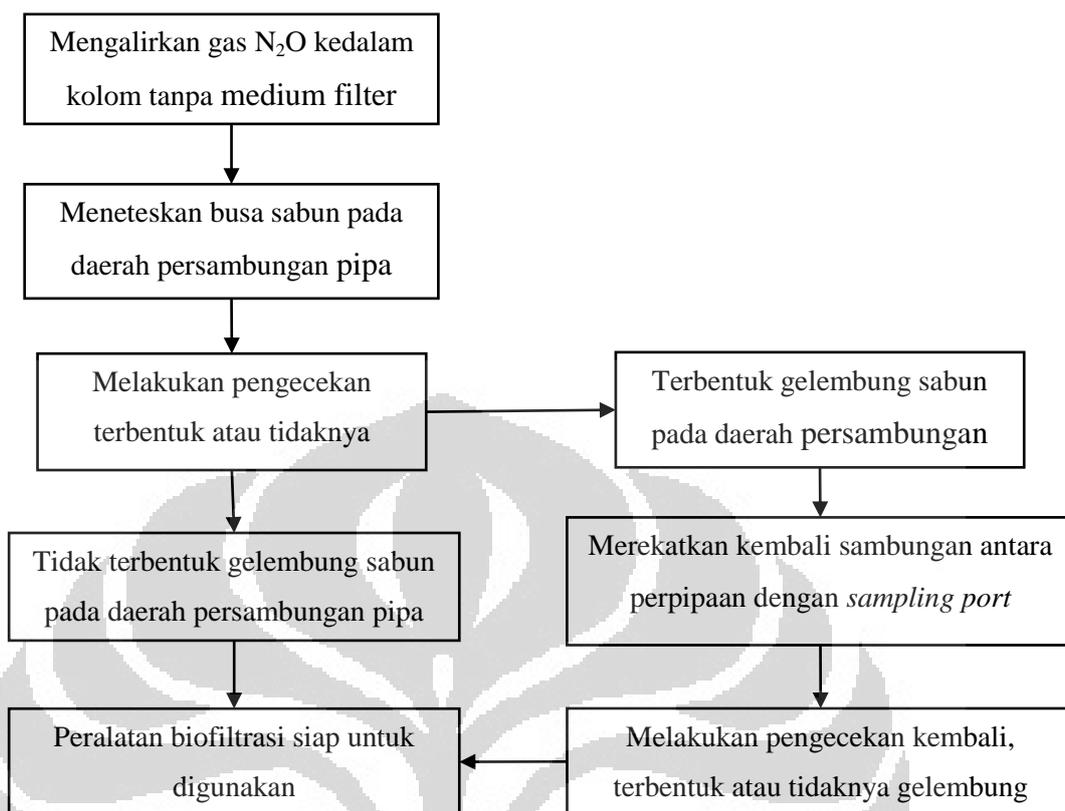


Gambar 3. 11 Kurva yang terdeteksi pada: (a) Gas N_2O dan (b) Udara bebas oleh GC

Berdasarkan grafik di atas, dapat diketahui letak *peak* gas N_2O yaitu antara *peak* udara dan uap air (pada penelitian ini gas N_2O yang digunakan yaitu gas N_2O dengan konsentrasi 15000 ppm dalam udara), dibandingkan dengan grafik yang menunjukkan kalibrasi udara yang hanya membentuk dua *peak* (gambar 3.11 b).

3.3.5 Uji Kebocoran Alat

Uji kebocoran pada proses biofiltrasi bertujuan untuk menghindari dan memperkecil ketidakakuratan data percobaan sehingga dapat diperoleh hasil yang baik. Dengan adanya uji kebocoran, penurunan luas di bawah *peak* saat uji kinerja biofilter pada proses biofiltrasi terjadi akibat adanya biosorpsi dan biodegradasi oleh bakteri pada *biofilm*, bukan karena kebocoran pada sistem biofiltrasi. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan busa sabun yang ditetaskan pada daerah persambungan. Berikut ini merupakan prosedur yang dilakukan pada tahap uji kebocoran.



Gambar 3. 12 Prosedur tahap uji kebocoran

3.4 Eksperimen Biofiltrasi

Eksperimen biofiltrasi dilakukan tanpa dan dengan penambahan bakteri. Pengujian kinerja sistem biofilter dalam penelitian ini dilakukan menggunakan sistem aliran *batch* terhadap tahap dan variasi yang dilakukan. Pada tahap eksperimen dengan penambahan bakteri dilakukan variasi terhadap konsentrasi medium sintetik. Variasi dilakukan untuk mengetahui kemampuan optimum medium yang diinokulasi oleh bakteri *N. winogradskyi* dalam proses biofiltrasi.

3.4.1 Eksperimen Biofiltrasi Tanpa Penambahan Bakteri

Eksperimen biofiltrasi tanpa penambahan bakteri dilakukan dengan mengalirkan gas N_2O ke dalam kolom yang berisi medium zeolit alam yang telah diaktivasi tanpa pengkulturan bakteri. Eksperimen ini dilakukan selama 24 jam dengan tujuan untuk membandingkan efisiensi reduksi yang dihasilkan dengan efisiensi reduksi biofiltrasi dengan menggunakan bakteri *N. winogradskyi*.

3.4.2 Eksperimen Biofiltrasi dengan Variasi Konsentrasi Medium Sintetik

Dalam eksperimen ini dilakukan variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik terhadap %berat wt/wt. Berikut ini merupakan prosedur variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik.

1. Menimbang bahan medium sintetik, yaitu sebagai berikut:
 - NNO_2 4 g
 - NaCl 1,2 g
 - K_2HPO_4 2 g
 - $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2 g
 - $\text{MnSO}_4 \cdot n \text{H}_2\text{O}$ 0,08 g
 - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0,02 g
2. Mengautoklaf aquadest sebanyak 4L selama 20 menit.
3. Melarutkan medium sintetik kedalam 4 L aquadest. Dan memvariasikan konsentrasi medium sintetik dengan menambahkan air dengan variasi 2,5L, 3L, 3,5L, 4L, dan 4,5L.
4. Menyiapkan bakteri yang telah ditanam pada *nutrient* agar, kemudian menambahkan dan mengaduk sejumlah bakteri *N. winogradskyi* dari nutrient agar dengan menggunakan batang strik.
5. Menginkubasi medium sintetik selama 48 jam dalam suhu ruang.
6. Mengambil sampel medium sintetik setelah inkubasi 48 jam untuk dianalisis dengan metode TPC.
7. Memasukkan medium zeolit alam Lampung yang telah diaktivasi ke dalam medium sintetik yang telah diinkubasi.
8. Menginkubasi medium sintetik yang telah dicampur dengan zeolit alam Lampung selama 3 hari dalam suhu ruang.
9. Mengambil sampel medium sintetik setelah inkubasi 72 jam (sebelum biofiltrasi) untuk dianalisis dengan metode TPC.
10. Menyaring dan memasukkan medium zeolit yang telah disisipkan bakteri kedalam kolom biofilter berukuran 100 cm.

11. Mengalirkan gas sampel N₂O dengan kandungan sebesar 15000 ppm dalam udara.
12. Mengambil gas sampel yang telah dibiofiltrasi dengan menggunakan *syringe* untuk dianalisis pada kromatografi gas.
13. Mengukur kelembapan dan suhu medium dengan menggunakan alat *relative humidity* dan termometer untuk mengetahui kelembapan medium dan suhu input dan output selama proses biofiltrasi berlangsung.
14. Mengambil sampel medium yang telah digunakan pada biofiltrasi (setelah biofiltrasi) untuk dianalisis dengan metode TPC.

3.5 Analisis Biofiltrasi

Analisa biofiltrasi yang dilakukan yaitu analisa gas dengan menggunakan *Gas Chromatography* (GC) dan analisa populasi bakteri dan perkembangan bakteri dengan metode *Total Plate Count* (TPC) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

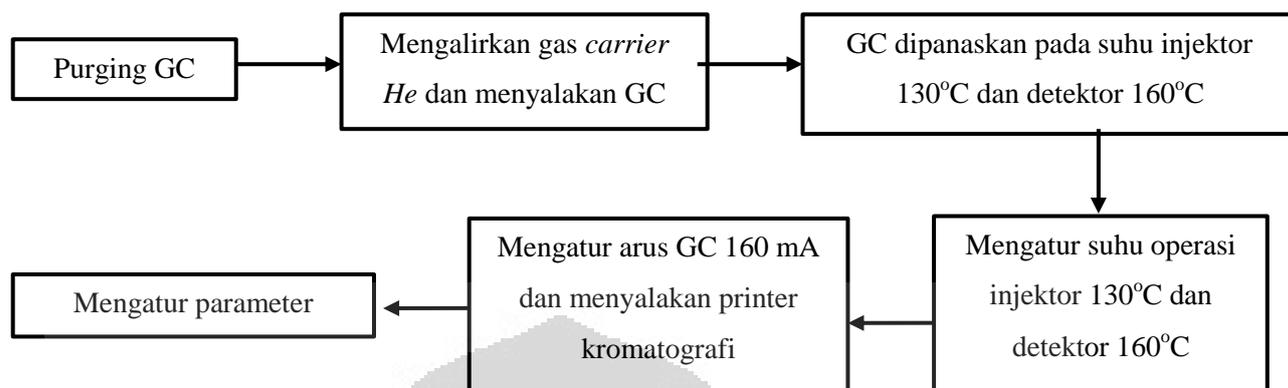
3.5.1 Analisis Gas N₂O Menggunakan *Gas Chromatography* (GC)

Dalam menganalisis gas N₂O, digunakan metode GC (*Gas Chromatography*) jenis TCD, merek Shimadzu, tipe 8A no c 10493112184 SA, AC 220 V, 1500VA, dan 50-60Hz. Gas sampel yang telah melalui proses biofiltrasi diambil dengan menggunakan *syringe* dan kemudian diinjeksikan kedalam GC untuk dianalisis.

Tabel 3. 2 Spesifikasi GC dalam penelitian

Merek dan Tipe	Shimadzu
Kolom	Porapak Q
Suhu Kolom:	
- Injektor	60°C
- Detektor	100°C
<i>Gas Carrier</i>	He
Jenis Detektor	TCD

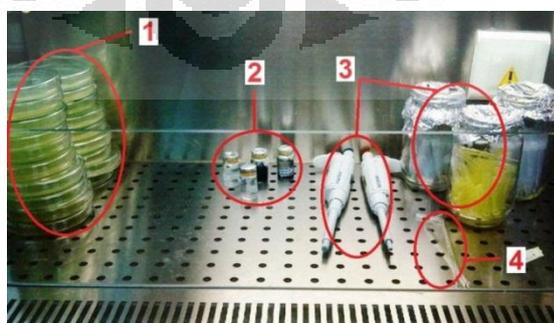
Di bawah ini merupakan prosedur atau tahapan analisis GC :



Gambar 3. 13 Diagram alir analisis GC

3.5.2 Analisis Bakteri dengan Metode TPC

Metode Total Plate Count (TPC) ini dilakukan pada saat sebelum dan sesudah proses biofiltrasi. Metode ini dilakukan untuk mengetahui jumlah koloni bakteri awal (sebelum biofiltrasi) dan akhir (setelah biofiltrasi). Sebagai medium perkembangbiakan mikroorganisme dalam perhitungan jumlah koloni bakteri pada metode TPC ini digunakan medium agar. Analisis TPC dilakukan oleh Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Pada metode ini dilakukan pengenceran (dilusi) dengan rasio 10^5 - 10^{11} . Pengenceran ini dilakukan untuk memperoleh keakuratan perhitungan jumlah koloni bakteri, karena jumlah koloni yang terdapat pada sampel sangat banyak. Berikut ini merupakan gambar peralatan yang digunakan pada analisis TPC.



Gambar 3. 14 Peralatan yang digunakan dalam analisis TPC: (1) cawan petri yang telah berisi nutrisi agar, (2) botol sampel yang akan dianalisis, (3) pipet, (4) mikro pipet

3.5.3 Analisis Perkembangan Bakteri Menggunakan SEM

Uji ini dilakukan untuk melihat morfologi dari sampel yang akan diuji dengan cara *menscanningnya*. Sampel akan di-*scan* dengan tumbukan energi tinggi dari elektron-elektron yang bergerak secara acak. Elektron-elektron akan berinteraksi dengan atom dan membuat sampel mengeluarkan sinyal yang mengandung informasi mengenai topografi permukaan sampel, komposisi, dan properti lainnya seperti konduktivitas elektrik. Analisis SEM dilakukan untuk memperkuat pengamatan terhadap pertumbuhan bakteri dalam proses biofiltrasi. Uji SEM ini dilaksanakan oleh Laboratorium Uji, Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok. Adapun sampel yang diuji yaitu sampel zeolit kering (tanpa bakteri), zeolit sebelum biofiltrasi, dan setelah biofiltrasi. Perbesaran yang digunakan dalam analisis SEM ini yaitu 3 μm hingga 30 μm .

3.6 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini terdapat tiga jenis variabel, yaitu variabel bebas, terikat, dan kontrol. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah efisiensi reduksi gas N_2O yang diperoleh setelah melalui proses biofiltrasi, kelembapan dan suhu medium filter, dan jumlah populasi mikroorganisme yang terdapat dalam medium filter setelah proses biofiltrasi. Variabel kontrolnya yaitu laju alir masukan sampel (inlet) dan waktu pengambilan data, sedangkan variabel bebasnya adalah variasi konsentrasi medium sintetik dengan %berat wt/wt yaitu 0,37%, 0,31%, 0,27%, 0,23%, dan 0,21% dan juga suhu dan kelembapan kolom biofilter selama proses biofiltrasi berlangsung.

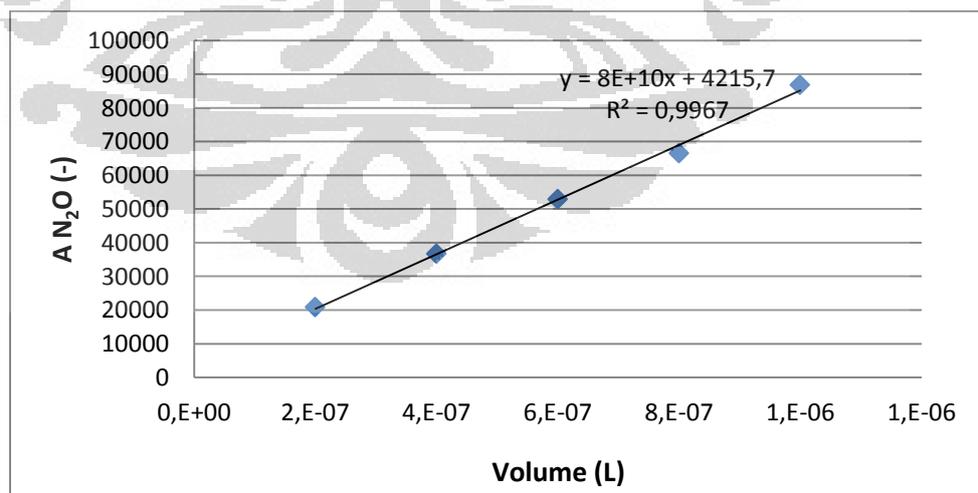
BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab hasil dan pembahasan ini akan dibahas mengenai analisa kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O dalam mengkaji pengaruh variasi konsentrasi medium sintetik terhadap kinerja biofiltrasi, serta jumlah koloni bakteri sebelum dan sesudah proses biofiltrasi dengan metode *Total Plate Count*. Kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O ditunjukkan oleh berkurangnya luas area N_2O pada GC akibat proses adsorpsi oleh zeolit alam Lampung. Selain itu juga akan dibahas mengenai permodelan biofiltrasi dengan menggunakan permodelan adsorpsi Langmuir dan Freundlich. Pada penelitian ini, pengamatan biofiltrasi dilakukan setiap jam untuk jam ke-1 hingga 6 dan pada jam ke-23 dan 24 selama 24 jam dengan menggunakan GC.

4.1 Kalibrasi gas N_2O

Kalibrasi gas N_2O bertujuan untuk mengetahui luas *peak*, waktu retensi dan konsentrasi dari gas N_2O dan udara. Hasil kalibrasi diplot antara volum gas N_2O terhadap luas *peak* area N_2O hingga diperoleh garis linear.



Gambar 4. 1 Grafik hasil kalibrasi gas N_2O

Grafik di atas menunjukkan kurva yang linear dengan persamaan garis $y = 8E+10x + 4215,7$ dengan koefisien regresi linear sebesar 0,99 (mendekati 1) yang menunjukkan bahwa data ini memiliki tingkat keakuratan yang tinggi. Nilai 4215,7 digunakan untuk perhitungan efisiensi reduksi proses biofiltrasi N_2O . R^2 digunakan untuk menunjukkan hubungan antara data-data eksperimen dengan data-data kinetik literatur. Dari grafik di atas, dapat diketahui volum dan konsentrasi N_2O aktual.

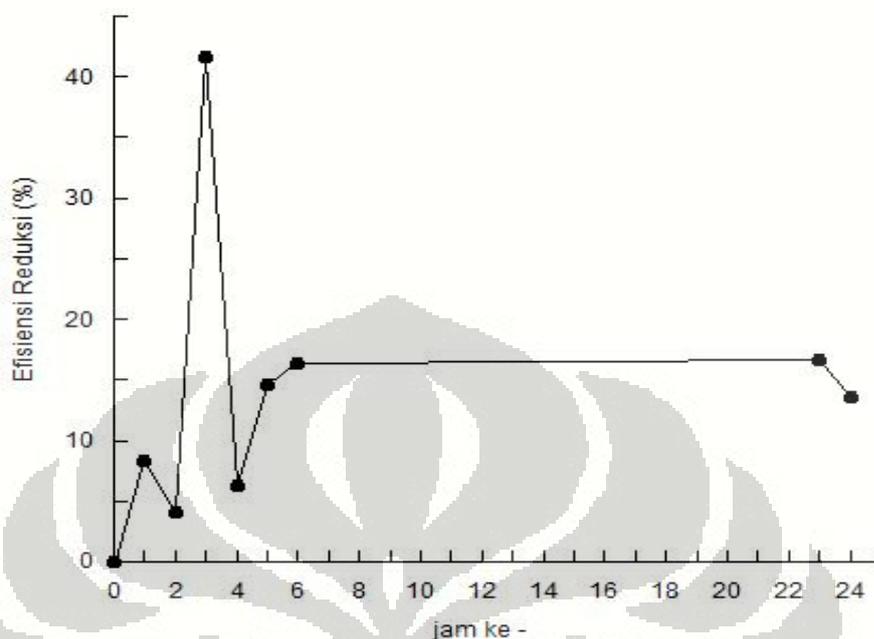
4.2 Eksperimen Biofiltrasi

Eksperimen biofiltrasi dilakukan menggunakan sistem aliran *batch* selama 12 jam pada kolom biofilter dengan ketinggian 100 cm yang berisikan medium zeolit alam Lampung yang diinokulasi oleh bakteri *Nitrobacter winogradskyi*. Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai uji kinerja biofilter dalam mereduksi gas N_2O , pengaruh variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik dalam %berat wt/wt terhadap kinerja biofiltrasi, suhu dan kelembapan medium dalam proses biofiltrasi, dan hasil uji perkembangan mikroba selama proses biofiltrasi.

4.2.1 Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N_2O dengan Medium Zeolit Alam Tanpa Penambahan Bakteri

Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai kinerja sistem biofilter dalam mereduksi gas N_2O dengan menggunakan medium berupa zeolit alam yang telah diaktivasi dan tanpa penambahan bakteri. Pada penelitian ini, dilakukan pengamatan terhadap proses biofiltrasi selama 24 jam dimana data diperoleh setiap jam selama 6 jam pertama dan pada jam ke-23 dan 24 dengan menggunakan *Gas Chromatography* (GC). Kemampuan sistem biofilter dalam mereduksi gas N_2O ditunjukkan oleh adanya penurunan luas area di bawah peak dalam waktu tertentu. Penurunan luas area ini akan sebanding dengan penurunan konsentrasi (Harris, 1995). Untuk mengamati kemampuan sistem biofilter dalam mereduksi gas N_2O proses biofiltrasi dilakukan dengan laju alir optimum pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yaitu 88 cc/menit dengan ke dalaman medium filter 100 cm (Utami et al., 2009). Dengan ke dalaman kolom filter 100 cm, medium zeolit alam yang digunakan sebesar 4000 gram. Di bawah ini merupakan grafik hasil perhitungan untuk uji

biofiltrasi N_2O dengan menggunakan medium zeolit alam yang telah diaktivasi dan tanpa penambahan bakteri dengan laju alir gas N_2O 88 cc/menit.



Gambar 4. 2 Grafik uji kinerja biofilter dalam mereduksi gas N_2O dengan medium zeolit alam tanpa penambahan bakteri

Berdasarkan perhitungan yang dilakukan yang terdapat pada Lampiran, grafik pada gambar 4.5 menunjukkan bahwa terjadi penurunan dan kenaikan yang fluktuatif terhadap besarnya efisiensi reduksi seiring dengan waktu proses biofiltrasi. Pada grafik terlihat bahwa terjadi kenaikan efisiensi reduksi pada awal proses biofiltrasi yaitu pada jam ke-0 hingga jam ke-3, walaupun efisiensi reduksi mengalami penurunan yang tidak terlalu signifikan pada jam ke-2. Dalam hal ini terjadi kenaikan efisiensi reduksi yang sangat signifikan pada jam ke-3 yaitu sebesar 41,68% ,dimana efisiensi ini merupakan efisiensi reduksi maksimal yang dapat diperoleh dari proses biofiltrasi dengan medium zeolit alam tanpa penambahan bakteri. Selanjutnya untuk efisiensi reduksi biofilter pada jam ke-4 mengalami penurunan yang sangat rendah jika dibandingkan dengan jam ke-3 dan mulai relatif stabil pada jam ke-5 hingga jam ke-24 yang ditunjukkan oleh kenaikan dan penurunan yang tidak terlalu signifikan dibandingkan oleh efisiensi reduksi pada jam sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja biofilter sudah mencapai kemampuan maksimal pada jam ke-3 (diperkirakan terjadi kejenuhan akibat telah melewati

kesetimbangan adsorpsi) sehingga untuk jam selanjutnya efisiensi reduksi cenderung berkurang, relatif stabil dan tidak mengalami kenaikan yang signifikan.

Kenaikan ataupun penurunan konsentrasi N_2O dipengaruhi oleh aktivitas adsorpsi pada permukaan medium filter. Pada penelitian ini kenaikan dan penurunan efisiensi reduksi dipengaruhi oleh proses adsorpsi yang dilakukan oleh medium zeolit alam. Dalam hal ini efisiensi meningkat seiring dengan menurunnya konsentrasi gas N_2O akibat teradsorpsi oleh medium zeolit alam pada interval waktu tertentu. Pada penelitian ini efisiensi reduksi tertinggi yang diperoleh dari uji kinerja biofiltrasi N_2O dengan medium zeolit alam tanpa penambahan bakteri yaitu sebesar 41,6%.

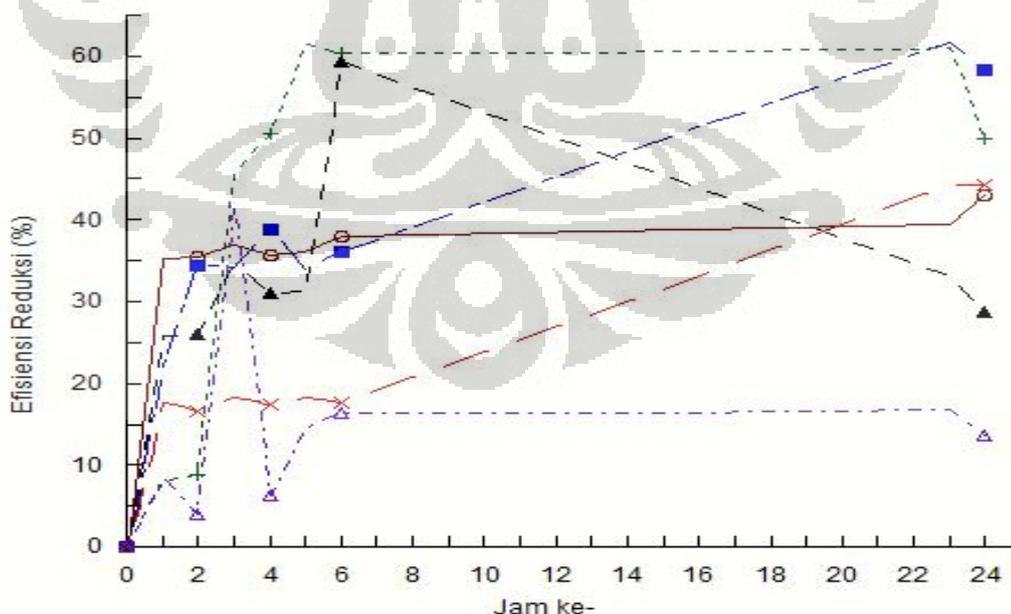
4.2.2 Pengaruh Variasi Konsentrasi Larutan Nutrisi Sintetik terhadap Kinerja Biofiltrasi

Eksperimen biofiltrasi yang dilakukan dengan variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik sebagai nutrisi bakteri pada medium dalam proses biofiltrasi bertujuan untuk mengetahui pengaruh dan optimasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik terhadap kinerja biofilter dalam mereduksi gas N_2O . Penelitian ini dilakukan menggunakan medium zeolit alam Lampung dengan ketinggian medium 100 cm pada laju alir gas N_2O 88 cc/menit selama 24 jam. Pada penelitian ini variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik dilakukan dengan memvariasikan jumlah pelarut (aquadest) yang dilarutkan dalam campuran nutrisi sintetik. Variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik yang digunakan yaitu 0,37%, 0,31%, 0,27%, 0,23%, 0,21% berat wt/wt.

Salah satu faktor yang berpengaruh dalam proses biofiltrasi yaitu kandungan nutrisi. Bakteri memerlukan makanan dengan nutrisi seimbang untuk dapat bertahan hidup dan memperbanyak diri. Karbon dan energi yang dibutuhkan oleh mikroorganisme dapat berasal dari gas kontaminan, sementara kontaminan lainnya seperti nitrogen, fosfor, mineral, dan trace element harus disediakan untuk mikroorganisme dalam biofilter agar didapatkan kinerja yang baik (Auria et.al, 1996). Nutrisi sintetik yang digunakan berupa campuran yang terdiri dari 4 gram $NaNO_2$, 1,2 gram $NaCl$, 2 gram K_2HPO_4 , 2 gram

MgSO₄·7H₂O, 0,08 gram, MnSO₄·n H₂O, 0,02 gram Fe₂(SO₄)₃. Senyawa-senyawa tersebut merupakan senyawa yang telah digunakan sebelumnya untuk menumbuhkan bakteri nitrifikasi aerobik (IFO, 2000).

Medium filter berupa zeolit alam Lampung dengan konsentrasi larutan nutrisi sintetis yang optimal diharapkan dapat meningkatkan kinerja bakteri *N. winogradskyi* dalam mereduksi kontaminan N₂O. Pengaruh variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetis dapat dilihat pada efisiensi reduksi yang diperoleh. Dalam hal ini bakteri memerlukan nutrisi seimbang untuk metabolisme dirinya dan juga mendukung dalam bereproduksi. Konsentrasi larutan nutrisi sintetis yang cukup diperlukan agar proses biofiltrasi berjalan dengan baik. Pengaturan konsentrasi nutrisi dipertimbangkan sebagai metode efektif yang dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja biofilter dengan cara menyediakan nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan mikroba yang mampu mendegradasi polutan (Kiared et al., 1996; Mallakin & Ward 1996; Smith et al., 1996; Wu et al., 1999). Berikut ini merupakan grafik hasil uji kemampuan biofilter dalam mereduksi N₂O terhadap variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetis dalam medium filter zeolit alam yang diinokulasi bakteri *N. winogradskyi*.



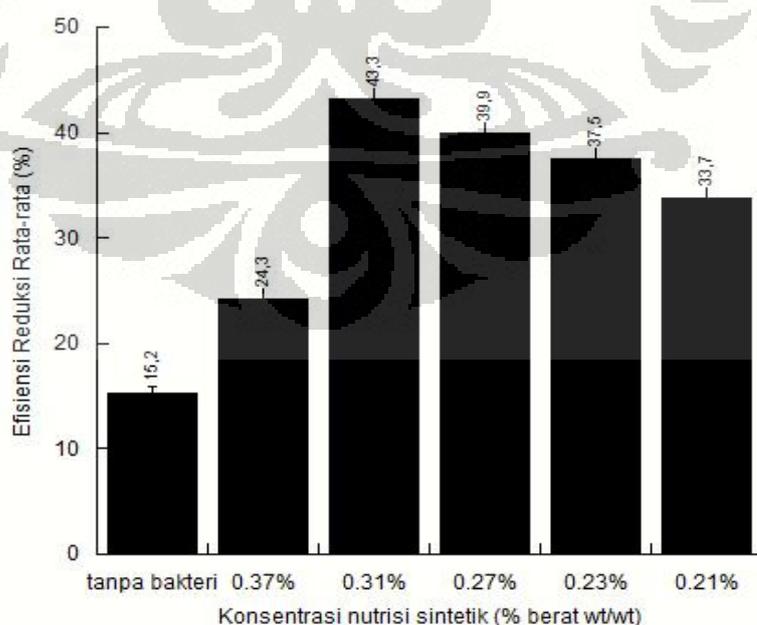
Gambar 4. 3 Grafik pengaruh variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetis terhadap kinerja biofiltrasi (% berat wt/wt nutrisi/jumlah nutrisi dan pelarut): (O) Var 1 = 0,23%; (■) Var 2 = 0,27%; (▲) Var 3 = 0,21%; (+) Var 4 = 0,31%; (x) Var 5 = 0,37%; (Δ) tanpa penambahan bakteri

Gambar 4.3 di atas menunjukkan profil variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik terhadap efisiensi reduksi N_2O dalam proses biofiltrasi. Berdasarkan grafik di atas, terjadi peningkatan efisiensi reduksi pada $t = 1 - 3$, walaupun terjadi penyimpangan pada konsentrasi larutan 0,37%, efisiensi reduksi gas N_2O menurun tetapi tidak signifikan. Masih rendahnya efisiensi reduksi polutan pada jam-jam awal ini karena mikroba membutuhkan waktu untuk beradaptasi apabila dihadapkan kepada lingkungan baru sebelum akhirnya mikroba tersebut dapat memulai biodegradasi (He et al., 2007). Secara umum, konsentrasi larutan nutrisi sangat berpengaruh terhadap kinerja biofiltrasi, karena kandungan air serta nutrisi dapat meningkatkan kinerja proses biofiltrasi yang menyebabkan meningkatnya pula aktivitas bakteri dalam mendegradasi gas N_2O . Secara keseluruhan berdasarkan grafik tersebut, efisiensi reduksi tertinggi dicapai pada efisiensi reduksi sebesar 61,5% yaitu oleh variasi konsentrasi 0,31% dan 0,27% dengan jumlah pelarut 3,5 L dan 3 L. Tetapi jika dilihat pada grafik, efisiensi reduksi pada konsentrasi larutan nutrisi 0,31% cenderung terus meningkat seiring waktu, maka efisiensi reduksi optimal diperoleh pada konsentrasi larutan nutrisi 0,31%.

Pada jam ke-1 hingga 6 untuk variasi konsentrasi larutan nutrisi 0,23% dan 0,37%, efisiensi reduksi yang diperoleh naik dan turun secara gradual tetapi kenaikan dan penurunan yang dihasilkan tidak terlalu signifikan, sehingga grafik yang dihasilkan mendekati stabil. Sedangkan untuk variasi konsentrasi larutan lainnya, pada jam ke-1 hingga 6, efisiensi reduksi yang dihasilkan mengalami peningkatan secara terus menerus yang menunjukkan proses reduksi gas N_2O berjalan dengan baik. Hal ini menunjukkan besarnya konsentrasi larutan nutrisi yang terkandung dalam nutrisi dapat mempengaruhi kinerja bakteri dalam mereduksi gas N_2O . Proses biofiltrasi dengan konsentrasi larutan yang besar, akan menghasilkan efisiensi reduksi yang besar. Hal ini terjadi akibat adanya dorongan reaksi biologis karena pengaruh nutrisi juga mendorong ke arah formasi, dan akumulasi biomassa (bioproduk) pada permukaan medium, dan kelembapan yang lebih tinggi (Morgan-Sagastume et al., 2001).

Pengecualian terjadi pada variasi konsentrasi larutan nutrisi 0,37%, walaupun konsentrasi larutan yang digunakan paling besar dibandingkan dengan variasi konsentrasi larutan lainnya, tetapi efisiensi reduksi yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan dengan efisiensi reduksi variasi lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi yang berlebihan sangat mempengaruhi bakteri dalam mendegradasi gas N_2O . Jika suplai nutrisi yang diberikan berlebih, pertumbuhan biomassa yang dihasilkan akan berlebih juga (over growth) sehingga dapat menyebabkan clogging pada biofilter yang menghasilkan penurunan efisiensi reduksi polutan (Abum aizar et al. 1998; Gribbins & Loehr 1998).

Dan efisiensi reduksi pada jam ke-23 dan 24 cenderung menurun pada konsentrasi larutan nutrisi yang tinggi. Hal ini disebabkan oleh jumlah nutrisi yang tersisa pada konsentrasi yang tinggi lebih sedikit dibandingkan dengan konsentrasi larutan nutrisi rendah sehingga untuk proses biofiltrasi selama 24 jam, jumlah nutrisi dan kadar air yang tersisa pada jam ke-23 dan 24 semakin sedikit dan mempengaruhi kinerja bakteri dalam mereduksi N_2O . Berbeda pada variasi konsentrasi larutan nutrisi 0,23%, pada jam ke-23 dan 24 efisiensi reduksi meningkat. Gambar berikut ini merupakan grafik efisiensi reduksi rata-rata dibandingkan dengan variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik.



Gambar 4. 4 Grafik efisiensi reduksi rata-rata variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik

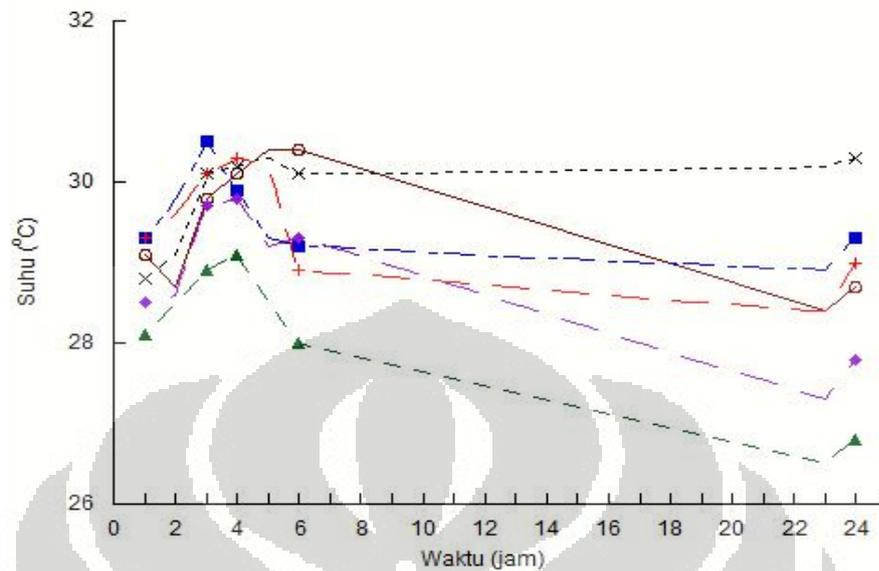
Gambar 4.4 di atas menunjukkan bahwa efisiensi reduksi rata-rata meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi larutan nutrisi sintetik. Efisiensi reduksi rata - rata terbesar dihasilkan pada variasi konsentrasi larutan nutrisi 0,31% di mana efisiensi reduksi N₂O yang dihasilkan sebesar 43,26%. Proses biofiltrasi dengan medium filter yang diinokulasi bakteri menghasilkan efisiensi reduksi yang lebih tinggi dibandingkan dengan medium filter tanpa bakteri yang hanya menghasilkan efisiensi reduksi rata - rata yang kecil, yaitu 15,2%. Peningkatan efisiensi reduksi N₂O karena penambahan nutrisi yang memiliki mineral-mineral yang dibutuhkan mikroba khususnya mikroba yang berkaitan langsung dengan degradasi N₂O. Populasi bakteri akan tumbuh dari energi (ATP) yang berasal dari transformasi polutan udara yang mengalir pada biofilter dengan didukung oleh ketersediaan nutrisi yang cukup (Shuler & Kragi, 1992).

4.2.3 Perubahan Kelembapan dan Suhu Medium Selama Proses Biofiltrasi

Suhu merupakan salah satu variabel yang paling penting dalam menentukan laju pertumbuhan mikrobial dan jenis spesies dalam komunitas mikrobial (Wani et al., 1997). Pengaturan suhu sangat penting dalam biofiltrasi, yaitu untuk mencegah terjadinya *thermal shocks*. Kandungan kelembapan atau *moisture* merupakan salah satu parameter yang sangat penting terhadap kinerja biofiltrasi, karena mikroorganisme yang terdapat di dalam medium filter sangat membutuhkan keberadaan air sebagai penunjang proses metaboliknya. Kekeringan pada medium filter dapat menimbulkan celah pada medium filter yang dapat mengakibatkan terjadinya channeling. Selain itu, rendahnya tingkat kelembapan juga dapat menyebabkan penurunan laju biodegradasi polutan.

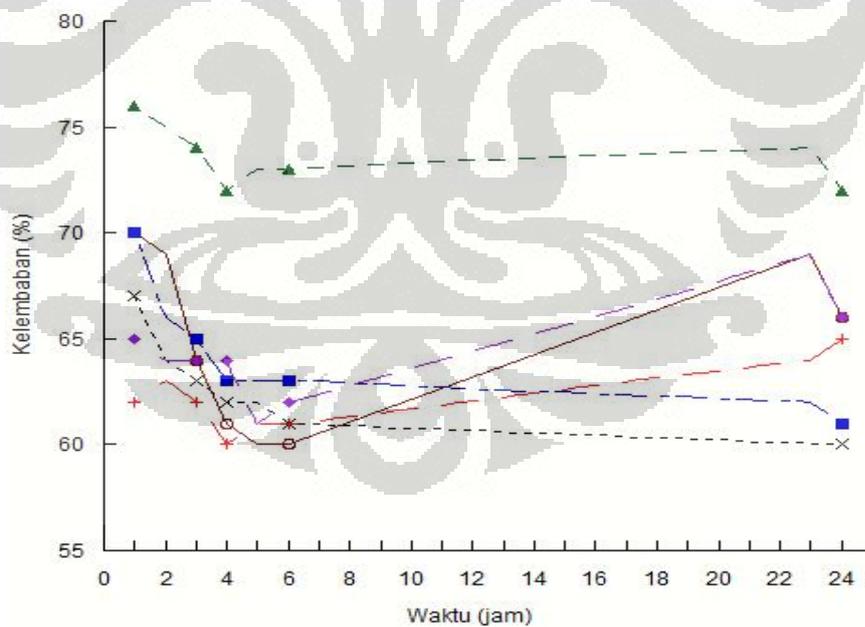
Pada penelitian ini kelembapan dan suhu medium diukur dengan menggunakan alat *thermohygrometer* yang diletakkan pada tengah kolom biofilter. Kelembapan dan suhu diukur pada setiap jam selama 24 jam yaitu pada jam ke-1 hingga 6 dan jam ke-23 dan 24 untuk setiap variasi yang

dilakukan. Berikut ini merupakan grafik yang menunjukkan perbandingan suhu dan kelembapan medium terhadap waktu.



Gambar 4. 5 Grafik suhu medium filter terhadap waktu biofiltrasi

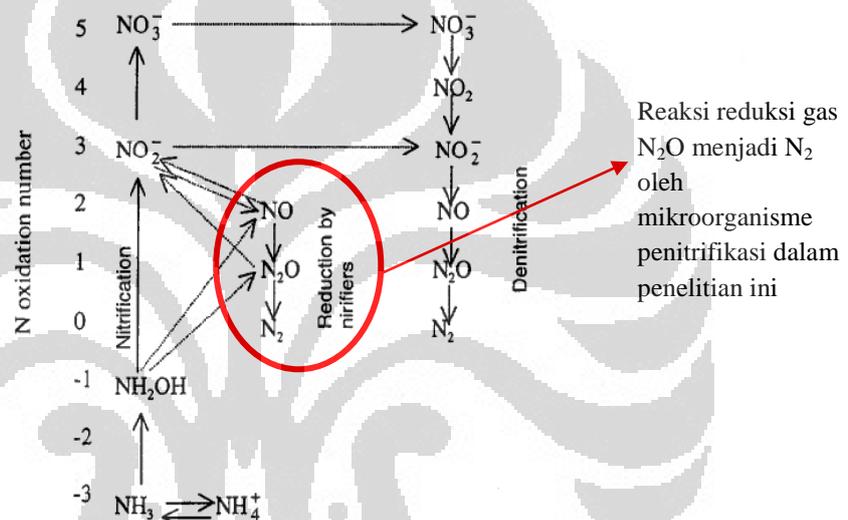
Ket : (+) 0,37%; (x) 0,31%; (■) 0,27%; (O) 0,23%; (▲) 0,21%; (◆) tanpa penambahan bakteri (dalam % berat wt/wt)



Gambar 4. 6 Grafik perbandingan kelembapan medium terhadap waktu biofiltrasi

Ket : (+) 0,37%; (x) 0,31%; (■) 0,27%; (O) 0,23%; (▲) 0,21%; (◆) tanpa penambahan bakteri (dalam % berat wt/wt)

Berdasarkan gambar 4.5, suhu medium meningkat secara terus menerus pada jam ke-1 hingga 6 dan menurun pada jam ke-23 dan 24. Peningkatan suhu menandakan terjadinya oksidasi biologis yang merupakan reaksi eksotermis sehingga mampu menyebabkan variasi suhu selama biofiltrasi. Seiring meningkatnya suhu, metabolisme dan laju pertumbuhan sel juga meningkat, akan tetapi kemampuan biosorpsi menurun (McNevin & Barford, 2000). Adapun reaksi hasil metabolisme mikroorganisme penitrifikasi yaitu seperti dituliskan oleh reaksi dan gambar 4.7 berikut.



Gambar 4. 7 Reaksi reduksi gas N₂O pada penelitian ini. (Hudepohl, 1999)

Sedangkan gambar 4.6 menunjukkan bahwa terjadi penurunan kelembapan seiring dengan waktu biofiltrasi yang dilakukan. Banyak atau sedikitnya kandungan air yang terkandung dalam medium filter akan mengurangi efisiensi reduksi gas (Govind, Rakesh & Wang, Zhao., 1998). Penurunan terjadi secara gradual akibat proses biofiltrasi yang dilakukan oleh bakteri yang terdapat dalam medium. Penurunan kelembapan ini dapat dilihat secara visual pada medium bagian atas kolom yang mengering. Pada sistem biofilter, medium cenderung mengalami pengeringan pada bagian masukan gas, yang menyebabkan berkurangnya reduksi polutan dari waktu ke waktu (Sakuma et al., 2006).

Kandungan kelembapan yang efisien pada biofiltrasi berkisar antara 50%-70% dengan suhu berkisar antara 15-35°C (Janni and Nicolai *et al.*,

2000). Pada penelitian ini suhu medium berkisar antara 28°-31°C dan kelembapan berkisar antara 60-76%. Suhu dan medium yang efisien menyebabkan efisiensi reduksi yang diperoleh optimal. Hal ini dapat dilihat pada hasil efisiensi reduksi optimum yang dihasilkan mencapai 61,5%.

4.2.4 Hasil Uji Perkembangan Mikroba Selama Proses Biofiltrasi

Total Plate Count (TPC) merupakan suatu metode analisis yang bertujuan untuk mengetahui jumlah koloni bakteri pada suatu sampel. Hasil dari perhitungan TPC akan direpresentasikan dalam satuan *Colony Forming Units* (CFU) per sampel yang diuji. Analisis TPC dilakukan oleh Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Pada penelitian ini, dalam metode TPC digunakan nutrisi agar sebagai medium perkembangan bakteri yang akan dihitung. Metode TPC dilakukan pada ruangan *transfer box* yang steril.

Sampel yang diuji dengan menggunakan metode TPC yaitu berupa medium sintetik sebelum inkubasi (medium sintetik jam ke-0), medium sintetik setelah inkubasi 48 jam, medium filter sebelum proses biofiltrasi dan medium filter setelah proses biofiltrasi. Pada metode TPC ini, dilakukan pengenceran 10^5 - 10^{11} , karena pengenceran ini merupakan pengenceran dimana jumlah bakteri dapat dihitung dengan jelas. Berikut ini merupakan tabel hasil analisis sampel dengan metode TPC.

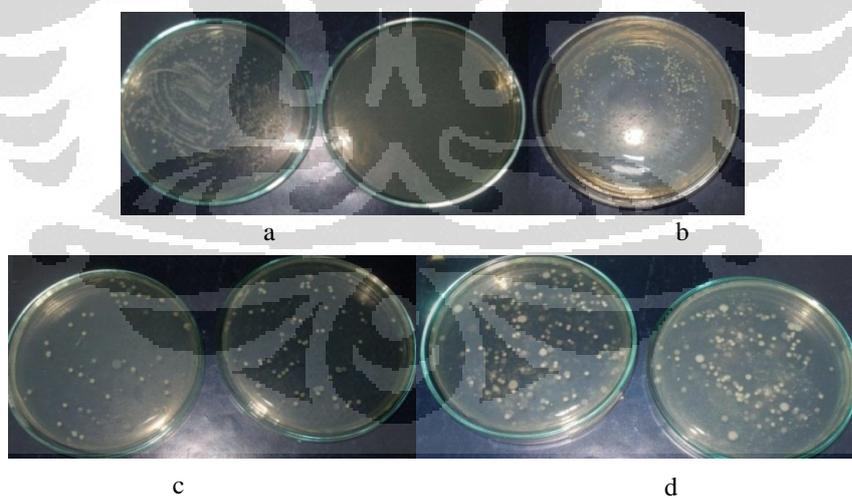
Tabel 4. 1 Hasil analisis TPC pada variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik (CFU/mL)

Sampel	Variasi Konsentrasi larutan Nutrisi Sintetik (% berat wt/wt)				
	0,23%	0,27%	0,21%	0,31%	0,37%
Medium sintetik jam ke-0	$7,05 \times 10^{11}$	3×10^6	$1,9 \times 10^8$	$2,5 \times 10^7$	$1,1 \times 10^9$
Medium sintetik jam ke-48	$1,5 \times 10^7$	$2,65 \times 10^8$	$3,9 \times 10^8$	$1,64 \times 10^9$	$1,4 \times 10^{12}$
Sebelum biofiltrasi	$2,3 \times 10^{10}$	$2,94 \times 10^9$	$2,28 \times 10^{12}$	$1,85 \times 10^{12}$	$2,7 \times 10^{10}$
Setelah biofiltrasi	$1,2 \times 10^9$	$1,95 \times 10^8$	$3,08 \times 10^8$	$5,25 \times 10^{10}$	$1,1 \times 10^8$

Berdasarkan hasil analisis TPC pada tabel 4.1 di atas menunjukkan bahwa populasi bakteri dari masa pengkulturan hingga sebelum proses biofiltrasi mengalami peningkatan walaupun tidak terlalu signifikan. Semakin

bertambahnya populasi bakteri ini disebabkan oleh dilakukannya pengkulturan bakteri secara bertahap yaitu dari proses pengkulturan dalam nutrisi broth, nutrisi agar, dan medium sintetik yang merupakan nutrisi yang diperlukan oleh bakteri *N. winogradskyi*. Selain itu, peningkatan jumlah mikroorganisme tersebut menunjukkan bahwa mikroba dapat bertahan hidup dan memperbanyak diri selama proses biofiltrasi berlangsung.

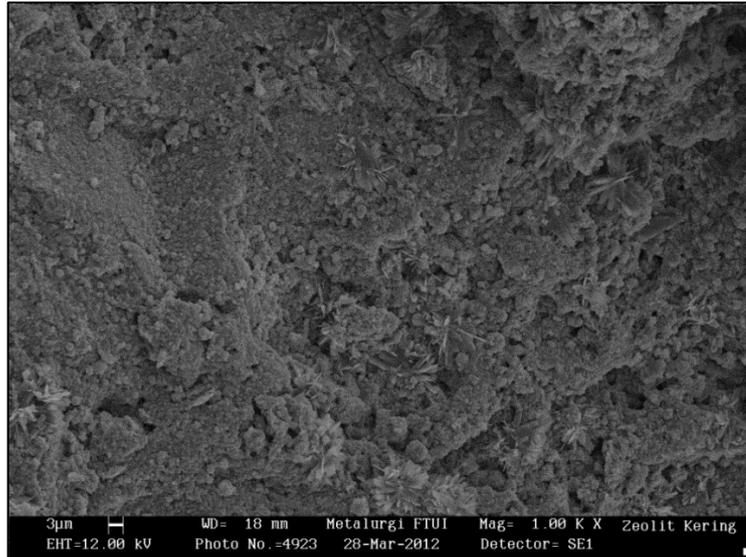
Jumlah populasi bakteri setelah proses biofiltrasi selama 24 jam hanya mengalami sedikit penurunan yang terjadi hampir pada semua variasi. Efektivitas biofilter sangat tergantung pada aktivitas populasi mikroba dan jenis pengayaan (*enrichment*) yang dilakukan selama tahap inokulasi. Jumlah nutrisi yang cukup dapat mempertahankan kinerja biofilter dalam mendegradasi gas N_2O . Populasi mikroorganisme akan tumbuh dari energi (ATP) yang berasal dari transformasi polutan udara yang mengalir pada biofilter. Dengan kata lain, pertumbuhan mikroorganisme dalam sistem biofiltrasi merupakan hasil dari metabolisme menggunakan zat yang merupakan polutan dalam gas umpan. Gambar dibawah ini merupakan gambar yang menunjukkan hasil analisa TPC pada variasi optimal setiap sampel.



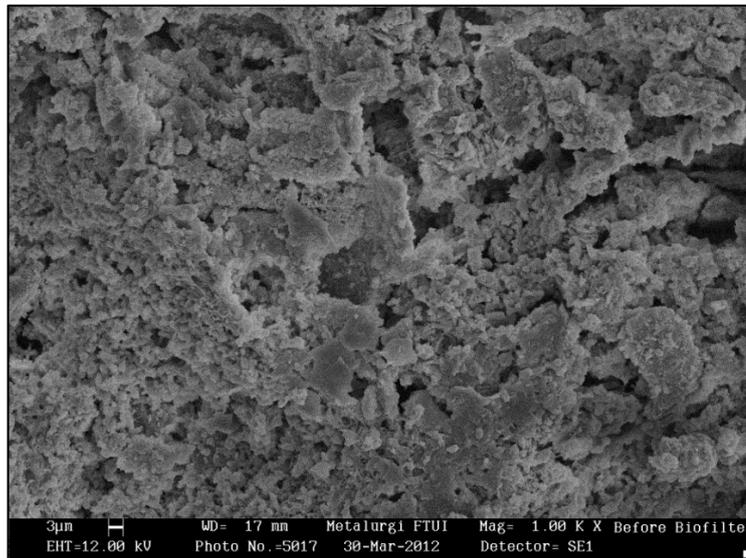
Gambar 4. 8 Hasil analisa TPC pada variasi konsentrasi larutan 0,31% setiap sampel: (a) sampel nutrisi sintetik 0 jam, (b) sampel nutrisi sintetik 48 jam, (c) sampel setelah biofiltrasi, (d) sampel sebelum biofiltrasi.

Selain dengan menggunakan metode TPC, jumlah populasi pertumbuhan bakteri diamati secara visual melalui uji *Scanning Electron Microscope* (SEM). Uji SEM dilakukan di Laboratorium Uji, Departemen Teknik Metalurgi dan

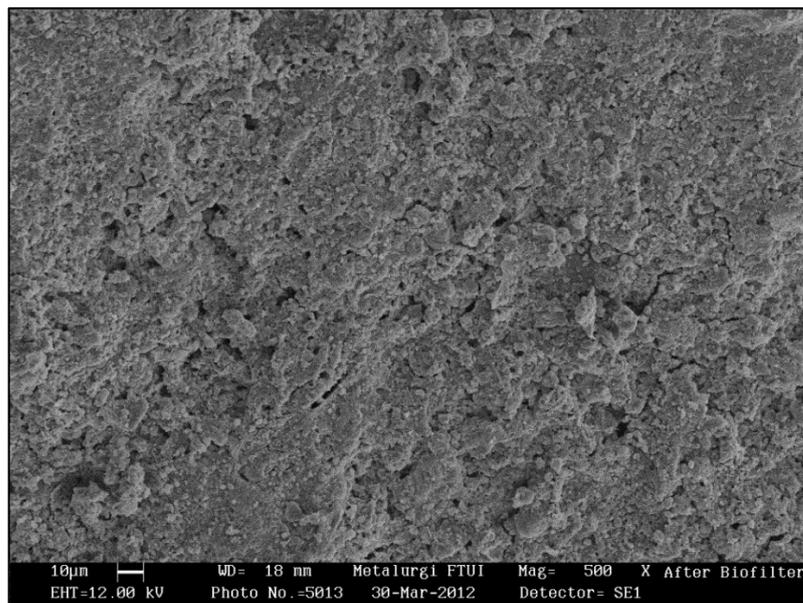
Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Pengujian SEM dilakukan pada sampel zeolit kering (zeolit yang telah diaktivasi), zeolit sebelum proses biofiltrasi (zeolit yang telah direndam nutrisi sintetik 72 jam), dan zeolit setelah proses biofiltrasi. Gambar 4.8 hingga gambar 4.10 menunjukkan hasil analisis SEM pada perbesaran 1000 kali sehingga mikroorganisme yang terdapat di dalam medium filter dapat terlihat dengan jelas.



Gambar 4. 9 Hasil Uji SEM pada medium zeolit alam Lampung kering



Gambar 4. 10 Hasil Uji SEM pada medium zeolit alam Lampung sebelum biofiltrasi



Gambar 4. 11 Hasil Uji SEM pada medium zeolit alam Lampung setelah biofiltrasi

Hasil analisis SEM menunjukkan bahwa terdapat perbedaan antara sampel zeolit kering (gambar 4.9) dengan sampel zeolit sebelum proses biofiltrasi. Sampel zeolit sebelum proses biofiltrasi yang ditunjukkan oleh gambar 4.10 mengandung lebih banyak bakteri, yang ditunjukkan oleh terbentuknya lapisan *biofilm*. *Biofilm* menyediakan nutrisi penting untuk aktivitas biologis, menjaga kelembapan untuk pertumbuhan bakteri, bertindak sebagai inter-fasa untuk transport massa, dan menerima berbagai macam produk samping reaksi (Kumar, T.P, 2011). Lapisan *biofilm* semakin menebal pada sampel zeolit setelah proses biofiltrasi yang ditunjukkan oleh gambar 4.11. Ketebalan dari lapisan biofilm bervariasi antara 10 mikrometer hingga 10000 mikrometer (Kumar, Thakur Prabhat et al, 2011). Akan tetapi jika dibandingkan dengan hasil analisis TPC, jumlah populasi bakteri sedikit berkurang. Hal ini menunjukkan bahwa menebalnya lapisan *biofilm* yang ditunjukkan gambar 4.11 bukan hanya disebabkan oleh meningkatnya jumlah populasi bakteri setelah proses biofiltrasi, tetapi juga dapat disebabkan oleh akumulasi biomassa, seperti sisa sel-sel mati, padatan tersuspensi, dan endapan inorganik (Dike et al., 1994). Sehingga diperkirakan bahwa semakin menebalnya lapisan *biofilm* menunjukkan bukan hanya meningkatnya populasi bakteri tetapi juga terdapatnya sel mati dari bakteri tersebut.

4.3 Permodelan Biofiltrasi

Pada penelitian ini dilakukan permodelan adsorpsi Langmuir dan Freundlich. Permodelan adsorpsi ini bertujuan untuk mengetahui permodelan mana yang cocok digunakan pada proses adsorpsi gas N₂O dengan medium zeolit alam Lampung yang diinokulasi oleh bakteri *N. winogradskyi*.

4.3.1 Permodelan Adsorpsi Langmuir

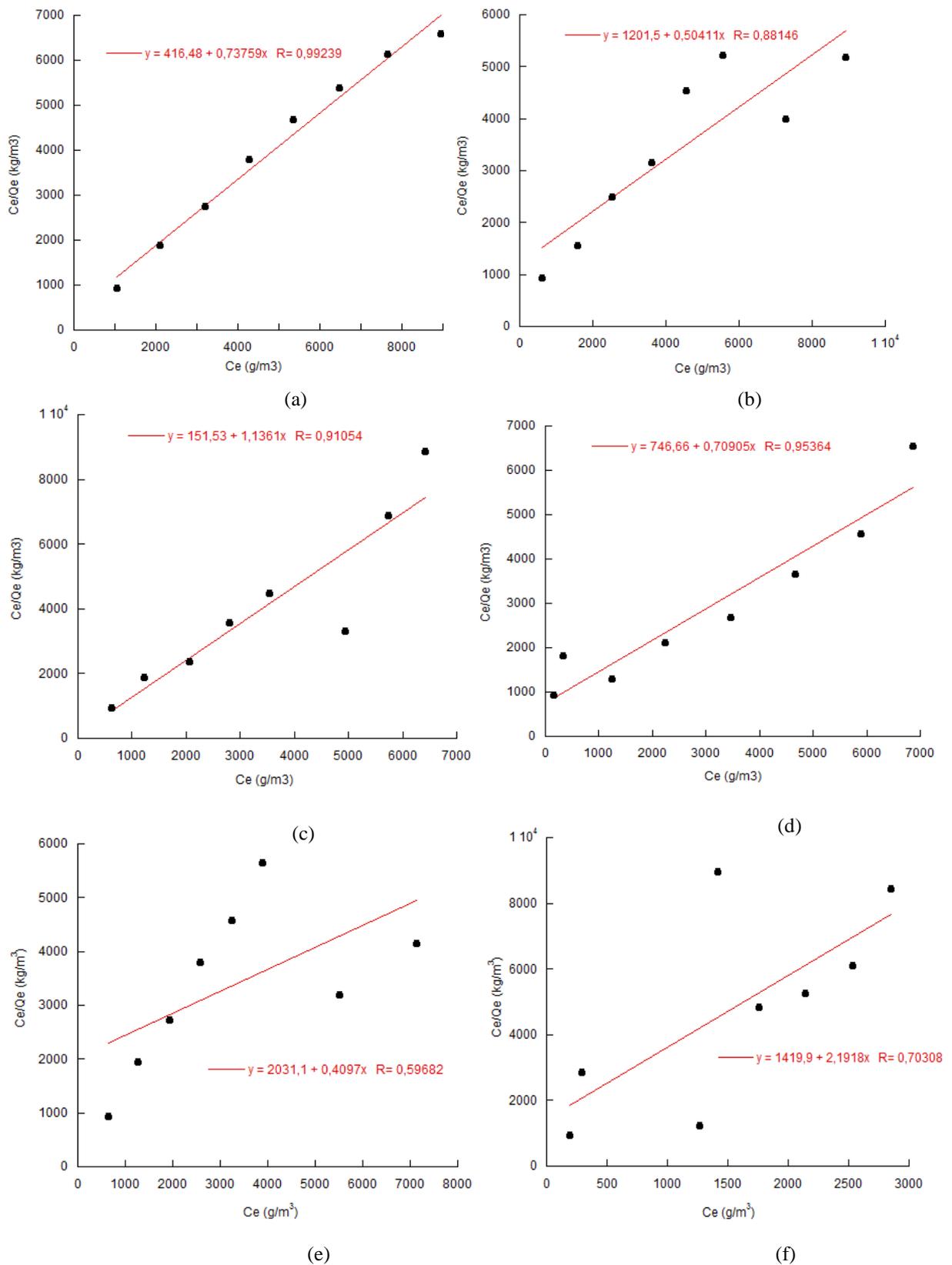
Isoterm Langmuir merupakan persamaan adsorpsi yang digunakan untuk lapisan *monolayer* dengan kondisi luas area aktif teridentifikasi dengan persebaran yang sama. Reaksi adsorpsi yang terjadi di dalam zeolit seperti telah dijelaskan sebelumnya pada persamaan 2.3 yaitu sebagai berikut:



Operasi linierisasi Langmuir dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.7 yang telah diturunkan, yaitu sebagai berikut:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (4.2)$$

Untuk pengolahan data permodelan adsorpsi Langmuir, terdapat pada lampiran 8 hingga lampiran 12. Gambar 4.11 merupakan grafik yang menunjukkan hasil linierisasi dengan menggunakan permodelan adsorpsi Langmuir. Semua grafik hasil linierisasi menunjukkan kurva yang terus naik. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar nilai konsentrasi gas N₂O *outlet* (C_e), maka akan semakin besar nilai konsentrasi gas N₂O *outlet* / konsentrasi gas N₂O ekuilibrium pada adsorben (C_e/q_e).



Gambar 4. 12 Grafik hasil permodelan Langmuir tiap variasi (% berat wt/wt): (a) 0,23%, (b) 0,27%, (c) 113%, (d) 0,31%, (e) 0,37%, (f) tanpa bakteri

Selanjutnya dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan 4.12 untuk mencari nilai konstanta Langmuir (K_L) dan q_m dari persamaan regresi yang diperoleh dari grafik. Dimana nilai $q_m = \frac{1}{m(\text{gradien})}$ dan nilai K_L diperoleh dari intersep (C) = $\frac{1}{q_m K_L}$. Berdasarkan perhitungan, maka nilai K_L dan q_m dapat dilihat pada tabel 4.2 berikut ini.

Tabel 4. 2 Nilai konstanta Langmuir pada berbagai variasi

Variasi (%berat wt/wt)	$M = 1/q_m$	$C = 1/(q_m \cdot K_L)$	q_m (g N_2O /kg zeolit)	K_L
0,23%	0,7276	416,48	1,3744	0,0017
0,27%	0,5041	1201,5	1,9837	0,0004
0,21%	1,1361	151,53	0,8802	0,0075
0,31%	0,7091	746,66	1,4102	0,0009
0,37%	0,4097	2031,1	2,4408	0,0002
Tanpa bakteri	2,1918	1419,9	0,4562	0,0015

Nilai q_m merupakan nilai yang menunjukkan keterbatasan kapasitas adsorpsi pada permukaan yang tertutup penuh dengan adsorbat. Sedangkan nilai K_L menunjukkan kemampuan adsorben dalam mengikat adsorbat. Berdasarkan tabel 4.2, nilai semua konstanta Langmuir pada berbagai variasi bernilai positif. Semakin tinggi nilai konstanta Langmuir (K_L) suatu material adsorben, maka kemampuan mengadsorpsi adsorben tersebut akan lebih banyak, dan sebaliknya. Nilai konstanta Langmuir lebih banyak dipengaruhi oleh sifat karakteristik suatu material adsorben dalam mengadsorpsi suatu bahan, khususnya kapasitas penyerapan dari material tersebut. (Utami, T.S et al., 2011).

Jika dilihat pada tabel 4.2, nilai K_L terbesar dihasilkan oleh variasi konsentrasi larutan nutrisi dengan %berat 0,21%, yang menunjukkan bahwa pada variasi ini, kemampuan adsorben dalam mengikat adsorbat (gas N_2O) lebih baik bila dibandingkan dengan variasi lainnya. Sedangkan nilai q_m terbesar dihasilkan oleh variasi dengan %berat 0,37%, yang menunjukkan bahwa jumlah gas N_2O teradsorpsi paling banyak dihasilkan pada variasi ini. Hal ini kurang sesuai dengan analisa GC yang menunjukkan bahwa variasi

konsentrasi larutan nutrisi dengan efisiensi terbesar dihasilkan pada variasi konsentrasi larutan nutrisi dengan %berat 0,31%. Tetapi nilai K_L dan q_m pada variasi ini cukup besar. Ini berarti kemampuan adsorben untuk mengikat adsorbat dan jumlah gas N_2O yang dapat diadsorp pada adsorben cukup besar dalam variasi ini.

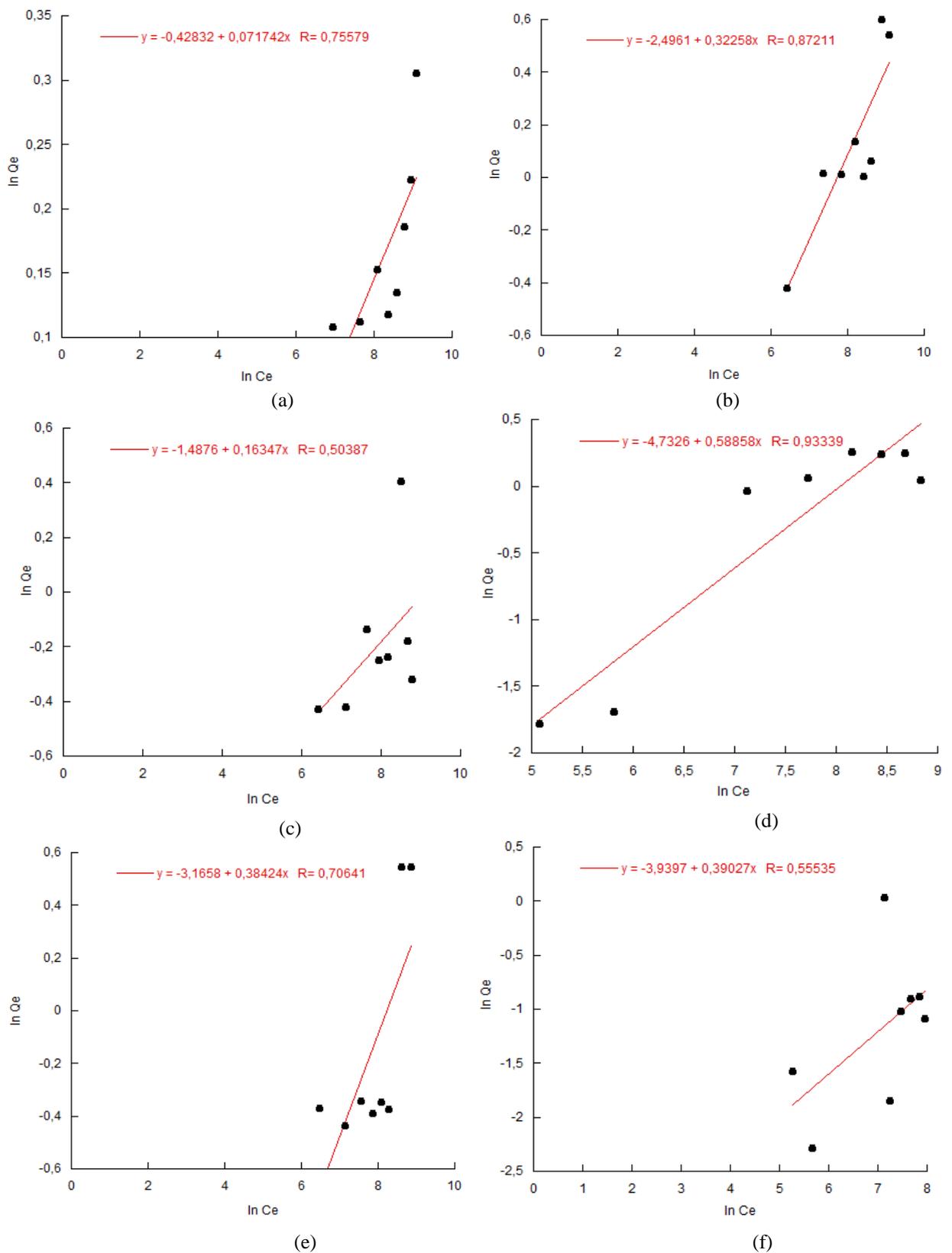
Berdasarkan tabel 4.2, konstanta Langmuir pada proses biofiltrasi dengan medium tanpa bakteri cukup besar yaitu 0,0015 yang menunjukkan bahwa kemampuan medium zeolit saja tanpa bakteri dalam mengikat adsorbat (gas N_2O) cukup baik. Sementara itu nilai q_m yang dihasilkan oleh medium tanpa bakteri sangat kecil. Hal ini menunjukkan bahwa walaupun kemampuan medium cukup baik dalam mengikat adsorbat, tetapi tidak menyebabkan jumlah gas N_2O yang teradsorp optimum. Sesuai dengan hasil analisa GC yaitu efisiensi rata-rata yang dihasilkan pada medium tanpa bakteri sangat kecil jika dibandingkan dengan medium yang diinokulasi oleh bakteri.

4.3.2 Permodelan Adsorpsi Freundlich

Isoterm Freundlich merupakan persamaan empirik yang dikembangkan berdasarkan adsorpsi monolayer yang digunakan untuk permukaan yang heterogen. Sama seperti pada permodelan adsorpsi Langmuir, operasi permodelan adsorpsi Freundlich dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.12 yang telah diturunkan pada bab Tinjauan Pustaka, yaitu sebagai berikut:

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (4.3)$$

Untuk pengolahan data permodelan adsorpsi Langmuir, terdapat pada lampiran 13 hingga lampiran 17. Berdasarkan hasil perhitungan pada permodelan Freundlich, data di plot dengan $\ln C_e$ sebagai sumbu x dan $\ln Q_e$ sebagai sumbu y. Grafik hasil plot $\ln C_e$ dan $\ln Q_e$ terdapat pada gambar 4.12. Grafik tersebut membentuk kurva yang terus naik. Hal ini menunjukkan bahwa nilai Q_e (konsentrasi gas N_2O ekuilibrium pada adsorben) akan semakin besar seiring besarnya nilai C_e (konsentrasi gas N_2O outlet).



Gambar 4. 13 Grafik hasil permodelan Freundlich tiap variasi (% berat wt/wt): (a) 0,23%, (b) 0,27%, (c) 113%, (d) 0,31%, (e) 0,37%, (f) tanpa bakteri

Selanjutnya dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan 4.3 untuk mencari nilai n dan K_f dari persamaan regresi yang diperoleh dari grafik. Nilai n diperoleh dari m (gradien) = $1/n$, dan nilai K_f diperoleh dari C (intersep) = $\ln K_f$. Nilai n menunjukkan kemampuan intensitas adsorpsi, sedangkan nilai K_f menunjukkan kapasitas adsorpsi. Nilai K_f pada persamaan Freundlich setara dengan nilai K_L pada persamaan Langmuir dan nilai n pada persamaan Freundlich setara dengan nilai q_m pada persamaan Langmuir (Pontificia, 2010).

Tabel 4. 3 Nilai konstanta Freundlich pada berbagai variasi

Variasi (% berat wt/wt)	$m = 1/n$	$C = \ln K_f$	K_f (m ³ /g)	n
0,23%	0.0717	-0.4283	0.6516	13.9470
0,27%	0.3226	-2.4961	0.0824	3.0998
0,21%	0.1634	-1.4876	0.2259	6.1200
0,31%	0.5886	-4.7236	0.0089	1.6989
0,37%	0.3842	-3.1658	0.0422	2.6028
Tanpa bakteri	0.39027	-3.9397	0.019454	2.5623

Berdasarkan tabel 4.3 yang menunjukkan hasil perhitungan nilai konstanta Freundlich, nilai n dan K_f terbesar diperoleh pada variasi konsentrasi larutan nutrisi dengan %berat 0,23%. Hal ini menunjukkan bahwa variasi tersebut lebih baik dalam mengikat adsorbat, karena semakin tinggi nilai K_f , semakin tinggi pula kemampuan adsorben untuk mengikat adsorbat (N₂O) (Kai Lin, 2008). Selain itu juga variasi ini memiliki jumlah gas N₂O yang diadsorpsi yang lebih besar dibandingkan variasi lainnya. Karena nilai n yang diperoleh pada semua variasi lebih besar dari satu, maka proses adsorpsi yang terjadi adalah adsorpsi fisika. Sedangkan jika nilai n kurang dari satu, maka proses adsorpsi yang terjadi adalah adsorpsi kimia (J.Q.Jiang, 2002).

Nilai K_f yang dihasilkan pada proses biofiltrasi tanpa bakteri cukup kecil jika dibandingkan dengan proses biofiltrasi dengan penambahan bakteri. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan adsorben itu sendiri dalam mengikat adsorbat kurang baik. Dengan demikian, kedua permodelan yang dilakukan

yaitu Langmuir dan Freundlich dapat digunakan pada proses biofiltrasi N_2O dengan medium zeolit alam selama 24 jam.

4.4 Perbandingan Hasil Biofiltrasi N_2O dengan Menggunakan Medium Zeolit Alam Lampung dan Karbon Aktif

Penelitian biofiltrasi gas N_2O dengan variasi yang sama dilakukan oleh Laili, 2012 tetapi menggunakan medium berbeda yaitu karbon aktif. Efisiensi reduksi optimum pada proses biofiltrasi dengan medium zeolit alam sebesar 61,5% pada konsentrasi larutan nutrisi 0,31%, sedangkan efisiensi reduksi optimum pada proses biofiltrasi dengan medium karbon aktif mencapai 85,7%. Kedua medium mencapai efisiensi reduksi optimum pada konsentrasi larutan yang sama yaitu 0,31%. Hal ini menunjukkan konsentrasi tersebut merupakan konsentrasi yang cukup yang diperlukan bakteri dalam mereduksi gas N_2O sehingga kinerja proses biofiltrasi optimum. Selain itu, hal tersebut juga diperkuat oleh meningkatnya jumlah koloni bakteri selama proses pengkulturan hingga proses biofiltrasi yang terus meningkat yang dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Perbandingan efisiensi reduksi dan hasil analisis TPC zeolit alam dan karbon aktif pada variasi pH awal media 7 (CFU/mL)

Sampel		Variasi Konsentrasi Nutrisi 0,31%	
		Zeolit Alam	Karbon Aktif
Efisiensi reduksi optimal		61,5 %	85,7%
Efisiensi reduksi rata-rata		61,1%	43,6 %
Jumlah Koloni Bakteri (cFu/mL)	Medium sintetis 0 jam	$2,5 \times 10^7$	12×10^8
	Medium sintetis 48 jam	$1,64 \times 10^9$	5×10^{11}
	Sebelum biofiltrasi	$1,85 \times 10^{12}$	121×10^{12}
	Setelah biofiltrasi	$5,25 \times 10^{10}$	24×10^{11}

Tabel 4.4 menunjukkan bahwa jumlah koloni bakteri selama proses pengkulturan hingga sebelum proses biofiltrasi dengan medium karbon aktif tidak terlalu jauh berbeda dibandingkan dengan medium zeolit alam, tetapi efisiensi reduksi optimum yang dicapai pada proses biofiltrasi dengan medium karbon aktif jauh lebih besar dibandingkan dengan medium zeolit alam. Begitu pula efisiensi reduksi rata-rata yang diperoleh oleh proses biofiltrasi dengan medium karbon

aktif 18% lebih besar dibandingkan dengan medium zeolit alam. Walaupun efisiensi reduksi yang dihasilkan oleh medium karbon aktif lebih besar, tetapi kedua media tersebut baik digunakan untuk proses biofiltrasi dan cocok untuk media pertumbuhan bakteri. Jika dilihat dari segi ekonomi, zeolit alam lebih murah dan mudah diperoleh. Efisiensi reduksi yang dihasilkan oleh medium zeolit alam Lampung yang diinokulasi oleh *N. winogradskyi* relatif lebih stabil dibandingkan dengan medium karbon aktif untuk proses biofiltrasi selama 24 jam.

BAB 5

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan sebelumnya, diperoleh beberapa kesimpulan, yaitu:

- Efisiensi reduksi proses biofiltrasi tanpa bakteri tertinggi yaitu sebesar 41,67%. Tetapi efisiensi ini merupakan efisiensi reduksi terkecil bila dibandingkan dengan medium yang diinokulasi oleh *Nitrobacter winogradskyi*.
- Konsentrasi larutan nutrisi 0,31% berat wt/wt pada medium zeolit merupakan konsentrasi larutan nutrisi optimum dalam mereduksi N₂O dengan efisiensi reduksi sebesar 61,5 %.
- Efisiensi reduksi rata-rata proses biofiltrasi dengan variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,31% menghasilkan efisiensi 28% lebih besar bila dibandingkan dengan efisiensi reduksi rata-rata proses biofiltrasi tanpa bakteri.
- Pertumbuhan bakteri selama proses pengkulturan terus meningkat dan sedikit mengalami penurunan setelah proses biofiltrasi sehingga kinerja biofiltrasi yang dihasilkan optimal.
- Kelembapan dan suhu medium filter menurun dan meningkat secara berkala yang berkisar antara 60%-76% dan 28^o-31^oC selama proses biofiltrasi yang menunjukkan terjadi degradasi gas oleh medium filter.
- Kemampuan medium cukup baik dalam mengikat adsorbat, tetapi tidak menyebabkan jumlah gas N₂O yang teradsorp optimum.
 - Kedua permodelan Langmuir dan Freundlich cocok untuk digunakan pada proses biofiltrasi N₂O dengan medium zeolit alam yang diinokulasi oleh *Nitrobacter winogradskyi*.
- Efisiensi reduksi yang dihasilkan oleh medium zeolit alam Lampung yang diinokulasi oleh *N. Winogradskyi* relatif lebih stabil dibandingkan dengan medium karbon aktif untuk proses biofiltrasi selama 24 jam.

DAFTAR ISTILAH

<i>Adsorben</i>	tempat terjadinya adsorpsi
<i>Adsorbat</i>	zat yang diserap oleh adsorben
<i>Biosorpsi</i>	proses adsorpsi oleh makhluk hidup
<i>Biofilm</i>	lapisan pada <i>bed</i> dimana mikroorganisme berkoloni
<i>Bubble soap</i>	gelembung sabun
<i>Buffer</i>	penyangga pH
<i>Bulking agent</i>	ruah yang ditambahkan ke dalam kompos
<i>Channeling</i>	pembentukan saluran aliran
<i>Clogging</i>	penyumbatan
<i>Downflow</i>	sistem aliran dari atas ke bawah
<i>Half</i>	setengah
<i>Inlet</i>	aliran masuk
<i>Kontaminan</i>	Polutan
<i>Liquid</i>	cairan
<i>Mash</i>	ukuran panjang
<i>Monolayer</i>	satu lapisan
<i>Moisture</i>	kelembapan
<i>Outlet</i>	aliran keluar
<i>Peak</i>	puncak
<i>Pelet</i>	butiran bentuk siinder kecil
<i>Porositas</i>	pori
<i>Pressure drop</i>	penurunan tekanan
<i>Residence Time</i>	waktu tinggal dalam kolom filter
<i>Thermal shock</i>	Perubahan temperatur secara tiba-tiba
<i>Water content</i>	kandungan air

DAFTAR REFERENSI

- Accumedia. 2010. *Nutrient Broth (7146)*. Neogen Cooperation : PI7146, Rev 02, Nov. 2010.
- Anit,S.B. dan Robert J.Artuz.Biofiltration Of Air. (<http://www.rensselaer.org/>). Diakses pada 15 April 2011 pukul 13.54 WIB.
- Anonim. Indonesia.mongabay.com, 2010. Diakses pada 10 Februari 2012 pukul 15.00 WIB.
- Auria R, Morales M, Acuna M.E, Perez F, Revah S.. 1996. *Biofiltration of Toluene Vapors: Start Up and Gaseous Ammonia Addition*. In: Proc Conf Biofiltration: an Air Pollution Control Technology, pp 134–141.
- B.A. Sheridan, T.P. Curran, & V.A. Dodd. 2002. *Assessment of The Influence of Media Particle Size on The Biofiltration of Odorous Exhaust Ventilation Air From a Piggery Facility*. Bioresour. Technol, Vol.84, pp 129–143.
- Cadena, Erasmo, Joan Colón, Adriana Artola, Antonio Sánchez, & Xavier Font. 2009. Environmental Impact of Two Aerobic Composting Technologies Using Life Cycle Assessment. *Int. J Life Cycle Assess* (2009) 14:401 – 410.
- Chen, Jianmeng, Chengqiang Wu, Jiade Wang, & Jianfeng Ma. 2006. *Performance Evaluation of Biofilters Packed Withcarbon Foam and Lava for Nitric Oxide Removal*. *Journal of Hazardous Materials B137* (2006) 172–177.
- Chung,Y.C., Huang C., & Tseng C.P. 1998. *Advanced Study of H₂S Removal by Thiobacillus novellus CH₃ Biofilter in Autotrophic and Mixotrophic Environments*. *J. Environ. Eng., ASCE* 124, 362–367
- Corsi, R. L., & Seed, L. 1995. *Biofiltration of BTEX: Media, Substrate, and Loadings Effects*. *Environmental Progress*, 14, 151–158.
- Del Nero Maia, G., Day V, G.B., Gates, R.S., Taraba, J.L., Sales, G.T., & Lovanh, N., 2009. *Ammonia Removal and Nitrous Oxide Production in Gas-Phase Compost Biofilters*. Brazil.
- Deputi Bidang Klimatologi Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. *Pemantauan Gas Rumah Kaca*. (http://www.bmkg.go.id/bmkg_pusat/)

- Klimatologi/Informasi GRK.bmkg). Diakses pada 27 April 2012 pukul 17.40 WIB.
- Devanny, J.S., Deshusses, M.A., & Webster, T.S. 1999. *Biofiltration of Air Pollution Control*. Lewis Publishers, NY.
- Cahyani, Gede H. *Bioproses Pencemar Udara*. (<http://Gedeonwww>). Diakses pada 5 April 2012 pukul 09.00 WIB.
- Filayuri, Shilfa. 2009. *Evaluasi Kinerja Medium Berbasis Kompos Kotoran Sapi Sebagai Filter pada Biofiltrasi Dinitrogen Monoksida*. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok. Desember 2009.
- Gribbins, M. J., & Loehr, R. C. 1998. *Effect of Media Nitrogen Concentration on Biofilter Performance*. The Journal of the Air & Waste Management Association, 48, 216–226.
- Gomez, Miguel Angel et al. 2005. *Denitrifying Activity of Xanthobacter Autotrophicus Strains Isolated From A Submerged Fixed-Film Reactor*. Appl Microbiol Biotechnol (2005) 68: 680 –68.
- Govind,R. 1998. *Review of Biofiltration and Its Implications for Climate Change*. Paper No. 2009-A-956-AWMA Detroit, MI.
- Govind, R.. 1999. *Biotrickling filter*. In: *Resources*. ASAE, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659, USA.
- He, S. B., Xue, G. & Kong, H. N. 2007. *The Performance of BAF Using Natural Zeolite as Filter Media Under Conditions of Low Temperature and Ammonium Shock Load*. Hazardous Material, 143, 291-295.
- Hudepohl, Nate J., Yulya Davidova, Chris A. du Plessis, & Daniel P.Y. Chang. 1999. *Biofilter Technology for NOx Control*. Final Report for Air Resources Board Research Division of California Environmental Protection Agency. Department of Civil & Environmental Engineering University of California, Davis.
- IFO. 2000. *List of Cultures Microorganisms*. In: OSAKA, I. F. F. (ed.) 11th ed. Osaka: IFO.
- Irwan. W. A.. 2010. *Biofiltrasi Gas Dinitrogen Monoksida Menggunakan Pelet Kompos Berbasis Kotoran Kambing Sebagai Medium Filter*. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok. Juli 2010.

- Islam, G. M. R. & M. J. B. Alam. 2006. *NO_x Removal From Air By Nitrosomonas Europaea*. Department of Tea Technology, Shahjalal University of Science and Technology, Sylhet, Bangladesh, and Department of Civil and Environmental Engineering, Shahjalal University of Science and Technology, Sylhet, Bangladesh.
- Janni, K. A., Maier, W. J., Kuehn, T. H., Yang, C.-H., Bridges, B. B., Velsey, D., & Nellis, M. A. 2001. *Evaluation of Bioltration of Air : An Innovative Air Pollution Control Technology*. ASHRAE Transactions, 107, 198–214.
- Jiang, R., S. Huang, & J. Yang. 2008. *Biological Removal of Nox From Simulated Flue Gas in Aerobic Biofilter*. Global NEST Journal, Vol 10, No 2, pp 241-248, 2008.
- Jiang, J.Q., C.Cooper, & S.Ouki. 2002. *Comparison of Modified Montmorillonite Adsorbents*. Part I. Preparation, characterization and phenol adsorption. *Chemosphere*, Vol. 47 ,pp 711–716.
- Kail Lin, et al. 2009. *Study The Adsorption of Phenol From Aqueous Solution on Hydroxyapatite Nanopowders*. J. Hazard. Materials, Vol. 161, pp 231–240
- Kennes, C., & Veiga, M.C. (2001). *Conventional biofilters*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 47-98.
- Kumar, T. P., Rahul, Kumar, M. A. & Chandrajit, B. 2011. *Biofiltration of Volatile Organic Compounds (VOCs)*. An Overview. Research Journal of Chemical Sciences, 1, 83-92.
- Lee SK, Shoda M. 1989. *Biological Deodorization Using Activated Carbon Fabric as A Carrier of Microorganisms*. J Ferment Bioeng 68:437–442
- Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional. 2011. (<http://www.lapan.go.id>). Diakses pada 27 April 2012 pukul 17.50 WIB.
- Leson, G., & Winer, A. M. 1991. *Biofiltration: an Innovative Air Pollution Control Technology For VOC Emissions*. The Journal of the Air & Waste Management Association, 41, 1045–1054.
- Liu, Yonghui, et al. 2005. *Removal of Ternary Vocs In Air Streams at High Loads Using A Compost-Based Biofilter*. Biochemical Engineering Journal, Vol. 23, pp 85–95.

- Nicolai, R.E. & Janni, K.A. 2000. *Designing biofilters for livestock facilities*. In: Livestock and Poultry Odor Workshop 2. Department of Biosystems and Agricultural Engineering, University of Minnesota, St. Paul, MN, USA.
- Noviani, Cynthia. 2009. Reduksi Gas Dinitrogen Monoksida Melalui Biofiltrasi Dengan Menggunakan Material Kompos Termodifikasi. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok.
- M. Barnes, Joni, William A. Apel, & Karen B. Barrett. 1994. *Removal of Nitrogen Oxides From Gas Streams Using Biofiltration*. Journal of Hazardous Materials 41 (1995) 315-326.
- Mei Linda. 2010. *Pengaruh Kedalaman dan Waktu Inkubasi Medium Kompos Berbasis Kotoran Kambing dalam Biofiltrasi Gas N₂O*. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok. Juli 2010
- Morgan-Sagastume, F., Sleep, B. E., & Allen, D. G. 2001. *Effects of Biomass Growth on Gas Pressure Drop in Bioreactors*. Journal of Environmental Engineering—ASCE, 127, 388–396.
- Ottengraf, S. P. P., Meesters, J. J. P., Van den Oever, A. H. C., & Rezema, H. R.. 1986. *Biological Elimination of Volatile Xenobiotic Compounds in Biofilters*. Bioprocess Engineering, 1, 61–69.
- Oyarzun, P., et al. 2003. *Biofiltration of High Concentration of Hydrogen Sulfide Using Thiobacillus thiooxidans*. Process Biochemistry, 00, 1.
- Pagans, La Estel, Xavier Font, & Antoni S´Anchez. 2005. *Biofiltration for Ammonia Removal from Composting Exhaust Gases*. Chemical Engineering Journal, Vol.113, pp 105–110.
- Pandey, Ashok. 2004. *Concise Encyclopedia of Bioresource Technology*. The Haworth Press, Inc :New York.
- Sanjaya, Erica. 2010. *Studi Fenomena Adsorpsi Pada Kompos Kambing Sebagai Medium Biofilter*. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok. Desember 2010.
- Schlegelmilch, M., Streese, J., Biedermann, W., Herold, T. and Stegmann, R.. 2005. *Odour Control at Biowaste Composting Facilities*. Waste Management, 25 (9), pp.917-927.

- Setiadi, Tjandra et al., 2007. *Biofiltrasi dalam Penyisihan Limbah Gas H₂S dan NH₃ dalam Aplikasi Teknik*. Jurnal Teknik Kimia FTI-ITS. ISSN 1410-56677.
- Smart, Lesley, Moore & Elaine. 2001. *Solid State Chemistry*, Cheltenham, Nelson Thornes Ltd.
- Shuler MI, Kargi F. 1992. *Bioprocess engineering—basic concepts*. Prentice Hall, Englewood Cliffs
- Thomas Klasson, K. & Brian H. Davison. 2001. *Effect of Temperature on Biofiltration of Nitric Oxide*. Bioprocessing Research & Development Center, Oak Ridge National Laboratory.
- Utami, T. S., Adriaty, L., Hermansyah, H. & Nasikin, M. 2011. *Reducing Nitrous Oxide Emission Using Goat Manure-Compost Based Biofilter*. World Applied Sciences Journal, 13, 226-232.
- Utami, T. S., Simanjuntak, J., Hermansyah, H. & Nasikin, M. 2011. *Model Adsorpsi Langmuir Gas Dinitrogen Monoksida dalam Sistem Biofilter dengan Medium Pupuk Kompos*. Reaktor, Vol. 13 No. 3, hal. 172-177.
- Utami, T. S et al., 2009. *Pengaruh Parameter Operasi dalam Proses Biofiltrasi N₂O Dengan Medium Filter Berbasis Kompos*. Makalah dipresentasikan pada Proceeding Seminar Tjipto Utomo 2009, Kampus ITENAS Bandung.
- Utami dkk. 2009, Juni. *Biosorption study for the removal of nitrous oxide gas using compost biofilter*. Makalah dipresentasikan pada International Simposium On Environmental Science and Technology, Shanghai.
- Vedova, L. D. 2008. *Biofiltration of Industrial Waste Gases in Trickle-Bed Bioreactors*. Case study: Trichloroethylene Removal. Universit`a degli Studi di Padova.
- Wahyuni, A., Purwoko & Yani, M. 2004. *Penghilangan Gas H₂S dengan Teknik Biofilter Menggunakan Bahan Pengisi Kompos dan Arang Aktif*. Tek. Ind. Pert. , 19(3), 138-144.
- Yang, Y, Allen ER.1994. *Biofiltration Control of Hydrogen Sulphide : Design and Operational Parameters*. J AirWaste Manage Assoc, Vol. 44, pp 863–868.

- Yang, Wan-Fa, et al., 2007. *The Effects of Selected Parameters on The Nitric Oxide Removal Using Biofilter*. Taiwan : National Taiwan University. *Journal of Hazardous Materials* 148 (2007) 653–659.
- Yuliusman, W.P., W., S.N., Y. & P, Y. 2010. *Preparasi Zeolit Alam Lampung dengan Larutan HF, HCl, dan Kalsinasi untuk Adsorpsi Gas CO*. Seminar Rekayasa Kimia dan Proses. Universitas Diponegoro.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Kalibrasi Gas N₂O

Persamaan kalibrasi yang diperoleh yaitu $y = 8E+10x + 4215.7$

Volume	Waktu Retensi	Luas Area	Konsentrasi
1.00E+00	0	0	0
2.E-07	2.55	20850	1.4582
4.E-07	2.547	36683	1.329
6.E-07	2.525	52928	1.266
8.E-07	2.538	66598	1.2351
1.E-06	2.527	86829	1.2851

Lampiran 2. Data Eksperimen Biofiltrasi Tanpa Penambahan Bakteri

Langkah perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O:

- Menghitung volume N₂O hasil biofiltrasi dari persamaan kalibrasi.
- Menghitung massa N₂O dengan massa jenis N₂O = 1812 g/mL
- Menghitung konsentrasi N₂O

Jam Ke-	T kolom (°C)	Kelembapan (%)	Waktu retensi N ₂ O	Luas Area N ₂ O	Konsentrasi N ₂ O	Vol N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	%RE
0	28.3	67	2.552	107744	1.4842	1.2941E-06	0.002345	2344.916	0
1	28.5	65	2.557	99128	1.398	1.1864E-06	0.00215	2149.764	8.322362
2	28.6	64	2.577	103520	1.432	1.2413E-06	0.002249	2249.242	4.080044
3	29.7	64	2.585	64592	0.9152	7.54704E-07	0.001368	1367.523	41.68136
4	29.8	64	2.59	101167	1.3796	1.21189E-06	0.002196	2195.947	6.352852
5	29.2	61	2.597	92643	1.2672	1.10534E-06	0.002003	2002.878	14.58635
6	29.3	62	2.59	90825	1.237	1.08262E-06	0.001962	1961.701	16.34239
23	27.3	69	2.555	90455	1.2674	1.07799E-06	0.001953	1953.32	16.69978
24	27.8	66	2.573	93656	1.2849	1.118E-06	0.002026	2025.823	13.60787
								Rata-rata	15.20913

Lampiran 3. Data Eksperimen Biofiltrasi Variasi 1

Langkah perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O:

- Menghitung volume N₂O hasil biofiltrasi dari persamaan kalibrasi.
- Menghitung massa N₂O dengan massa jenis N₂O = 1812 g/mL
- Menghitung konsentrasi N₂O

Jam ke-	Kelembapan (%)	T medium (°C)	Waktu retensi N ₂ O	Luas Area N ₂ O	Konsentrasi N ₂ O	Vol N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	%RE
0			2.6777	135965	1.5377	1.64688E-06	0.002984138	2984.1375	0
1	70	29.1	2.638	89564	1.1851	1.06686E-06	0.001933155	1933.15485	35.21898
2	69	28.7	2.648	89360	1.162	1.06431E-06	0.001928534	1928.53425	35.37381
3	64	29.8	2.673	87447	1.2048	1.0404E-06	0.001885205	1885.2048	36.82581
4	61	30.1	2.69	89101	1.2177	1.06108E-06	0.001922668	1922.6679	35.57040
5	60	30.4	2.7	88322	1.1825	1.05134E-06	0.001905024	1905.02355	36.16167
6	60	30.4	2.705	85825	1.18	1.02013E-06	0.001848467	1848.4665	38.05693
23	69	28.4	2.607	83934	1.2036	9.96488E-07	0.001805635	1805.63535	39.49222
24	66	28.7	2.573	79429	0.9202	9.40175E-07	0.001703597	1703.5971	42.91157
Rata-rata									37.45142

Lampiran 4. Data Eksperimen Biofiltrasi Variasi 2

Langkah perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O:

- Menghitung volume N₂O hasil biofiltrasi dari persamaan kalibrasi.
- Menghitung massa N₂O dengan massa jenis N₂O = 1812 g/mL
- Menghitung konsentrasi N₂O

Jam ke-	Kelembapan (%)	T medium (°C)	Waktu retensi N ₂ O	Luas Area N ₂ O	Konsentrasi N ₂ O	Vol N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	Efisiensi Reduksi (%)
0			2.618	127296	1.5487	1.5385E-06	0.002787769	2787.768795	0.00000
1	70	29.3	2.7	99986	1.4746	1.19713E-06	0.002169197	2169.197295	22.18877
2	66	29.8	2.627	85005	1.2103	1.00987E-06	0.001829878	1829.877645	34.36049
3	65	30.5	2.633	85139	1.221	1.01154E-06	0.001832913	1832.912745	34.25162
4	63	29.9	2.628	79630	1.1317	9.42679E-07	0.001708134	1708.133895	38.72756
5	63	29.3	2.627	85402	1.1759	1.01483E-06	0.00183887	1838.869695	34.03794
6	63	29.2	2.662	82912	1.0016	9.83704E-07	0.001782471	1782.471195	36.06101
23	62	28.9	2.598	51564	0.7205	5.91854E-07	0.001072439	1072.438995	61.53056
24	61	29.3	2.582	55635	0.7261	6.42741E-07	0.001164647	1164.647145	58.22297
Rata-rata									39.92262

Lampiran 5. Data Eksperimen Biofiltrasi Variasi 3

Langkah perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O:

- Menghitung volume N₂O hasil biofiltrasi dari persamaan kalibrasi.
- Menghitung massa N₂O dengan massa jenis N₂O = 1812 g/mL
- Menghitung konsentrasi N₂O

Jam ke-	Kelembapan (%)	T medium (°C)	Waktu retensi N ₂ O	Luas Area N ₂ O	Konsentrasi N ₂ O	Vol N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	%RE
0			2.542	1.3793	109290	1.31343E-06	0.002379933	2379.932895	0.00000
1	76	28.1	2.532	1.1951	82182	9.74579E-07	0.001765937	1765.936695	25.79889
2	75	28.5	2.547	1.0337	81937	9.71516E-07	0.001760387	1760.387445	26.03206
3	74	28.9	2.522	0.9481	72965	8.59366E-07	0.001557172	1557.171645	34.57078
4	72	29.1	2.547	0.9929	76771	9.06941E-07	0.001643378	1643.377545	30.94858
5	73	28.5	2.548	0.862	76465	9.03116E-07	0.001636447	1636.446645	31.23980
6	73	28	2.552	0.4686	46924	5.33854E-07	0.000967343	967.342995	59.35419
23	74	26.5	2.46	0.8095	74530	8.78929E-07	0.001592619	1592.618895	33.08135
24	72	26.8	2.463	0.8879	79088	9.35904E-07	0.001695858	1695.857595	28.74347
								Rata-rata	33.72114

Lampiran 6. Data Eksperimen Biofiltrasi Variasi 4

Langkah perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O:

- Menghitung volume N₂O hasil biofiltrasi dari persamaan kalibrasi.
- Menghitung massa N₂O dengan massa jenis N₂O = 1812 g/mL
- Menghitung konsentrasi N₂O

Jam ke-	Kelembapan (%)	T medium (°C)	Waktu retensi N ₂ O	Luas Area N ₂ O	Konsentrasi N ₂ O	Vol N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	%RE
0			2.583	1.266	91908	1.09615E-06	0.001986231	1986.230595	0.00000
1	67	28.8	2.582	1.1874	84861	1.00807E-06	0.001826616	1826.616045	8.03605
2	64	29.1	2.598	1.1496	84234	1.00023E-06	0.001812414	1812.414495	8.75105
3	63	30.1	2.602	0.7116	51715	5.93741E-07	0.001075859	1075.859145	45.83413
4	62	30.2	2.73	0.6677	47630	5.42679E-07	0.000983334	983.333895	50.49246
5	62	30.3	2.62	0.5524	37960	4.21804E-07	0.000764308	764.308395	61.51965
6	61	30.1	2.62	0.5504	38894	4.33479E-07	0.000785463	785.463495	60.45457
23	60	30.2	2.73	0.5269	38320	4.26304E-07	0.000772462	772.462395	61.10913
24	60	30.3	2.71	0.6919	48150	5.49179E-07	0.000995112	995.111895	49.89948
								Rata-rata	43.26207

Lampiran 7. Data Eksperimen Biofiltrasi Variasi 5

Langkah perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O:

- Menghitung volume N₂O hasil biofiltrasi dari persamaan kalibrasi.
- Menghitung massa N₂O dengan massa jenis N₂O = 1812 g/mL
- Menghitung konsentrasi N₂O

Jam ke-	Kelembapan (%)	T medium (°C)	Waktu retensi N ₂ O	Luas Area N ₂ O	Konsentrasi N ₂ O	Vol N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	%RE
0	63	29.6	2.57	2.1859	166546	2.02913E-06	0.003676781	3676.781295	0.00000
1	62	29.3	2.588	1.9152	137763	1.66934E-06	0.003024846	3024.846345	17.73113
2	63	29.6	2.585	1.8739	139589	1.69217E-06	0.003066205	3066.205245	16.60627
3	62	30.1	2.595	1.8547	136941	1.65907E-06	0.003006228	3006.228045	18.23751
4	60	30.3	2.602	1.8533	138383	1.67709E-06	0.003038889	3038.889345	17.34919
5	61	30.2	2.595	1.833	137049	1.66042E-06	0.003008674	3008.674245	18.17098
6	61	28.9	2.582	1.864	137923	1.67134E-06	0.00302847	3028.470345	17.63257
23	64	28.4	2.507	1.8858	94699	1.13104E-06	0.002049447	2049.446745	44.25976
24	65	29	2.517	1.8471	94783	1.13209E-06	0.002051349	2051.349345	44.20801
								Rata-rata	24.27443

Lampiran 8 Data Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi 1

Volume zeolit = 0,004240766 m³

Massa zeolit = 4000 g

Jam ke-	Luas Area N ₂ O	Vol N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	Langmuir Model			Freundlich Model	
					Q _e (g/kg)	C _{ads} =C _e (g/m ³)	C _e /Q _e (kg/m ³)	ln Q _e	ln C _e
0	135965	1.64688E-06	0.002984138	2984.1375					
1	89564	1.06686E-06	0.001933155	1933.15485	1.114242938	1050.98265	943.2258	0.108175195	6.957480863
2	89360	1.06431E-06	0.001928534	1928.53425	1.119141659	2106.5859	1882.323	0.112562016	7.652823859
3	87447	1.0404E-06	0.001885205	1885.2048	1.165079176	3205.5186	2751.331	0.152789047	8.072629166
4	89101	1.06108E-06	0.001922668	1922.6679	1.125361114	4266.9882	3791.661	0.118103974	8.358663518
5	88322	1.05134E-06	0.001905024	1905.02355	1.144067505	5346.10215	4672.89	0.134589899	8.584123004
6	85825	1.02013E-06	0.001848467	1848.4665	1.204028812	6481.77315	5383.404	0.185673277	8.776749386
23	83934	9.96488E-07	0.001805635	1805.63535	1.249438036	7660.2753	6130.977	0.222693879	8.943803202
24	79429	9.40175E-07	0.001703597	1703.5971	1.357618128	8940.8157	6585.663	0.305731787	9.098382106

Lampiran 9. Data Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi 2

Volume zeolit = 0,004240766 m³

Massa zeolit = 4000 gram

Jam ke-	Luas Area N ₂ O	Vol N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	Langmuir Model			Freundlich Model	
					Qe (g/kg)	C ads=Ce (g/m ³)	Ce/Qe (kg/m ³)	ln Qe	ln Ce
0	125560	1.5168E-06	0.002748	2748.4484					
1	73063	8.6059E-07	0.001559	1559.3913	1.260628	1189.057	943.226	0.23161	7.08092
2	51464	5.9060E-07	0.001070	1070.1740	1.779292	2867.331	1611.501	0.57622	7.96114
3	71896	8.4600E-07	0.001533	1532.9588	1.288652	4082.821	3168.289	0.25360	8.31454
4	79630	9.4268E-07	0.001708	1708.1339	1.102933	5123.136	4645.012	0.09797	8.54152
5	85139	1.0115E-06	0.001833	1832.9127	0.970643	6038.671	6221.309	-0.02980	8.70594
6	55635	6.4274E-07	0.001165	1164.6471	1.679133	7622.472	4539.529	0.51828	8.93886
23	31195	3.3724E-07	0.000611	611.0811	2.266019	9759.840	4307.043	0.81802	9.18603
24	24877	2.5827E-07	0.000468	467.9784	2.417735	12040.310	4979.996	0.88283	9.39602

Lampiran 10. Data Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi 3

Volume Zeolit = 0,004240766 m³

Massa Zeolit = 4000 g

Jam ke-	Luas Area N ₂ O	Vol N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	Langmuir Model			Freundlich Model	
					Q _e (g/kg)	C ads=C _e (g/m ³)	C _e /Q _e (kg/m ³)	ln Q _e	ln C _e
0	109290	1.31343E-06	0.002379933	2379.932895					
1	82182	9.74579E-07	0.001765937	1765.936695	0.650953591	613.9962	943.2258	-0.42931693	6.419988739
2	81937	9.71516E-07	0.001760387	1760.387445	0.656836859	1233.54165	1878.003	-0.4203196	7.117644701
3	72965	8.59366E-07	0.001557172	1557.171645	0.872284535	2056.3029	2357.376	-0.13663961	7.628664941
4	76771	9.06941E-07	0.001643378	1643.377545	0.780889767	2792.85825	3576.508	-0.24732128	7.934820813
5	76465	9.03116E-07	0.001636447	1636.446645	0.788237849	3536.3445	4486.393	-0.2379554	8.170848845
6	46924	5.33854E-07	0.000967343	967.342995	1.497615893	4948.9344	3304.542	0.403874439	8.50692756
7	74530	8.78929E-07	0.001592619	1592.618895	0.83470366	5736.2484	6872.197	-0.18067852	8.654560687
8	79088	9.35904E-07	0.001695858	1695.857595	0.725250861	6420.3237	8852.556	-0.32123767	8.767223816

Lampiran 11 Data Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi 4

Volume zeolit = 0,004240766 m³

Massa zeolit = 4000 g

Jam ke-	Luas Area N ₂ O	Vol N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	Langmuir Model			Freundlich Model	
					Q _e (g/kg)	C _{ads} =C _e (g/m ³)	C _e /Q _e (kg/m ³)	ln Q _e	ln C _e
0	91908	1.09615E-06	0.001986231	1986.230595					
1	84861	1.00807E-06	0.001826616	1826.616045	0.16922200	159.61455	943.2258	-1.77654382	5.072761846
2	84234	1.00023E-06	0.001812414	1812.414495	0.18427836	333.43065	1809.386	-1.69130782	5.809434898
3	51715	5.93741E-07	0.001075859	1075.859145	0.96516813	1243.8021	1288.69	-0.03545296	7.125928177
4	47630	5.42679E-07	0.000983334	983.333895	1.06326262	2246.6988	2113.023	0.061342124	7.717217218
5	37960	4.21804E-07	0.000764308	764.308395	1.29547161	3468.621	2677.497	0.258874804	8.151512388
6	38894	4.33479E-07	0.000785463	785.463495	1.27304315	4669.3881	3667.895	0.241410214	8.448783314
23	38320	4.26304E-07	0.000772462	772.462395	1.28682680	5883.1563	4571.832	0.252179346	8.679848683
24	48150	5.49179E-07	0.000995112	995.111895	1.05077568	6874.275	6542.096	0.049528637	8.835541462

Lampiran 12 Data Pemodelan Adsorpsi Isotermis Var 5

Volume zeolit = 0,004240766 m³

Massa zeolit = 4000 g

Jam ke-	Luas Area N ₂ O	Vol N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	Langmuir Model			Freundlich Model	
					Q _e (g/kg)	C _{ads} =C _e (g/m ³)	C _e /Q _e (kg/m ³)	ln Q _e	ln C _e
0	166546	2.02913E-06	0.003676781	3676.781295					
1	137763	1.66934E-06	0.003024846	3024.846345	0.691175933	651.93495	943.2258	-0.36936088	6.479944787
2	139589	1.69217E-06	0.003066205	3066.205245	0.647327576	1262.511	1950.343	-0.43490281	7.140857874
3	136941	1.65907E-06	0.003006228	3006.228045	0.710914898	1933.06425	2719.122	-0.34120255	7.566861717
4	138383	1.67709E-06	0.003038889	3038.889345	0.676287663	2570.9562	3801.572	-0.39113676	7.852033171
5	137049	1.66042E-06	0.003008674	3008.674245	0.708321457	3239.06325	4572.872	-0.34485725	8.083039447
6	137923	1.67134E-06	0.00302847	3028.470345	0.687333799	3887.3742	5655.73	-0.37493523	8.265489196
23	94699	1.13104E-06	0.002049447	2049.446745	1.725286359	5514.70875	3196.402	0.545393042	8.61517412
24	94783	1.13209E-06	0.002051349	2051.349345	1.723269239	7140.1407	4143.369	0.544223207	8.873487761

Lampiran 12 Data Pemodelan Adsorpsi Isotermis Tanpa Penambahan Bakteri

Volume zeolit = 0,004240766 m³

Massa zeolit = 4000 g

Jam ke-	Luas Area N ₂ O	Vol N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	Langmuir Model			Freundlich Model	
					Q _e (g/kg)	C _{ads} =C _e (g/m ³)	C _e /Q _e (kg/m ³)	ln Q _e	ln C _e
0	107744	1.2941E-06	0.002345	2344.916					
1	99128	1.1864E-06	0.00215	2149.764	0.206899	195.1524	943.2258	-1.57552	5.273781
2	103520	1.2413E-06	0.002249	2249.242	0.101432	290.826	2867.192	-2.28836	5.672725
3	64592	7.54704E-07	0.001368	1367.523	1.036224	1268.219	1223.885	0.035583	7.145369
4	101167	1.21189E-06	0.002196	2195.947	0.157936	1417.188	8973.193	-1.84557	7.25643
5	92643	1.10534E-06	0.002003	2002.878	0.362625	1759.226	4851.357	-1.01438	7.472629
6	90825	1.08262E-06	0.001962	1961.701	0.406282	2142.441	5273.289	-0.90071	7.669701
23	90455	1.07799E-06	0.001953	1953.32	0.415167	2534.037	6103.662	-0.87908	7.837569
24	93656	1.118E-06	0.002026	2025.823	0.3383	2853.13	8433.729	-1.08382	7.956172

