



UNIVERSITAS INDONESIA

**EVALUASI pH AWAL MEDIA DALAM BIOFILTRASI N₂O
OLEH *Nitrobacter winogradskyi* YANG DIINOKULASI PADA
ZEOLIT ALAM LAMPUNG**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh Sarjana Teknik

NINDYA SANI WIDHYASTUTI

0806340164

**FAKULTAS TEKNIK
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 : Nindya Sani Widhyastuti

NPM : 0806340164

Tanda Tangan : 

Tanggal : 25 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Nindya Sani Widhyastuti

NPM : 0806340164

Program Studi : Teknologi Bioproses

Judul Skripsi :

**EVALUASI pH AWAL MEDIA DALAM BIOFILTRASI N_2O
OLEH *Nitrobacter winogradskyi* YANG DIINOKULASI PADA
ZEOLIT ALAM LAMPUNG**

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Tania Surya Utami, S.T., M.T.

()

Penguji 1 : Ir. Rita Arbianti, M.Si.

()

Penguji 2 : Dr. Diamursanti, S.T., M.T.

()

Penguji 3 : Ir. Eva Fathul Karamah, M.T.

()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 25 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT atas berkah dan rahmat-Nya sehingga saya mampu menyelesaikan skripsi ini sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Terima kasih saya ucapkan kepada:

- (1) Keluarga, terutama ibu saya, untuk semangat dan perhatian tanpa batas.
 - (2) Dr. Tania Surya Utami S.T., M.T., atas segenap bimbingan beliau mulai dari seminar, penelitian, PKM-P, skripsi, hingga konferensi ilmiah.
 - (3) Para dosen Departemen Teknik Kimia FTUI, untuk ilmu penuh manfaat yang diajarkan sepanjang perkuliahan.
 - (4) Para laboran Departemen Teknik Kimia FTUI, atas seluruh bantuan yang diberikan selama penelitian.
 - (5) Fiza, untuk kerjasama dan keceriaannya dari awal hingga penghujung perjalanan proyek tingkat akhir ini. Juga Laili dan Ota atas kerjasama yang telah dijalin selama penelitian ini.
 - (6) Teman-teman dalam suka dan duka, Indri, Chiya, Syifa, Ester, Mei, Ira, Kak Muthia, Ade, Tia, Shofa, Nadhila, Khofiful, Hana, Prisil, Hilda, Dita, Putri, dan Wulan, untuk luapan semangat yang ditularkan.
 - (7) Sahabat terbaik, M. Dimas Sanjaya.
 - (8) Semua pihak yang telah membantu kelancaran penelitian dan skripsi ini.
- Akhir kata, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi dunia keilmuan, terutama bagi siapapun yang haus akan ilmu.

Depok, 25 Juni 2012

Nindya Sani Widhyastuti

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

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

Nama : Nindya Sani Widhyastuti
NPM : 0806340164
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 Noneklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**EVALUASI pH AWAL MEDIA DALAM BIOFILTRASI N₂O
OLEH *Nitrobacter winogradskyi* YANG DIINOKULASI PADA
ZEOLIT ALAM LAMPUNG**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksektif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/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: 25 Juni 2012

Yang menyatakan



(Nindya Sani Widhyastuti)

ABSTRAK

Nama : Nindya Sani Widhyastuti
Program Studi : Teknologi Bioproses
Judul : Evaluasi pH Awal Media dalam Biofiltrasi N₂O oleh *Nitrobacter winogradskyi* yang Diinokulasi pada Zeolit Alam Lampung

Dinitrogen monoksida (N₂O) yang diemisi dari berbagai proses industri dan aktivitas pertanian merupakan salah satu gas yang memberikan kontribusi tinggi dalam pemanasan global dan tergolong ke dalam kategori gas yang berbahaya. Reduksi gas N₂O dilakukan menggunakan teknologi biofilter yang efektif dan efisien dalam mengontrol emisi udara. Zeolit Alam Lampung teraktivasi digunakan sebagai media filter karena memiliki porositas yang tinggi. *Nitrobacter winogradskyi* digunakan untuk mengoksidasi N₂O menjadi gas yang tidak berbahaya. Tujuan penelitian ini ialah untuk mengkaji pengaruh dari penambahan kultur bakteri terhadap reduksi gas dan untuk mendapatkan kondisi operasi yang optimum dalam biofiltrasi dengan cara memvariasikan pH awal media, yaitu pH 4, 5, 6, 7, dan 8. Biofilter dioperasikan selama 24 jam dengan konsentrasi gas yang digunakan ialah 15000 ppm N₂O dalam udara dan laju alir sebesar 88 cc/menit. Efisiensi reduksi tertinggi yang diperoleh sebesar 94,73%, yang dicapai pada variasi pH awal 7. Inokulasi bakteri ke dalam media filter menghasilkan 32,03% rata-rata efisiensi reduksi lebih tinggi daripada sistem tanpa inokulasi. TPC menunjukkan terjadi penurunan jumlah bakteri setelah biofiltrasi. SEM menunjukkan terjadi penebalan *biofilm* selama operasi. Isotermis *Langmuir* menghasilkan q_m maksimum sebesar $2,873 \times 10^{-3}$ g N₂O/g zeolit pada pH awal 7 dan K_L maksimum sebesar $1,709 \times 10^{-3}$ m³/g pada variasi tanpa inokulasi mikroba. Isotermis *Freundlich* menghasilkan n dan K_f maksimum sebesar 5,625 dan $8,86 \times 10^{-5}$ m³/g secara berurutan pada variasi tanpa inokulasi mikroba.

Kata kunci: Biofilter, pH Awal, Zeolit Alam, Dinitrogen monoksida, *Nitrobacter winogradskyi*

ABSTRACT

Name : Nindya Sani Widhyastuti
Study Program : Bioprocess Engineering
Title : Evaluation of Initial pH of Media in N₂O Biofiltration by
Nitrobacter winogradskyi Inoculated on Lampung Natural
Zeolite

Nitrous oxide (N₂O) which is emitted from various industrial process and agricultural activities is one of several gases that gives highest contribution in global warming and also categorized as a dangerous gas. Removal of N₂O could be achieved by biofilter technology that is effective and efficient in controlling air emission. Activated Lampung Natural Zeolite was utilized as filter media because of its high porosity. *Nitrobacter winogradskyi* used to oxidize N₂O into harmless gas. This research aims to study the effect of bacteria culture addition in biofiltration and determine the optimum operation condition by adjusting initial pH of media to pH 4, 5, 6, 7, and 8. Biofilter was operated for 24 hours with gas concentration was 15,000 ppm N₂O in air and gas flow rate was maintained at 88 cc/minute. The maximum removal efficiency obtained was 94.73%, achieved at initial pH 7. Furthermore, inoculation bacteria into filter media yield 32.03% higher average of removal efficiency than system without inoculation. TPC showed decreasing amount of bacteria after biofiltration. SEM showed biofilms grow thicker during operation. Langmuir isotherm obtained maximum q_m at initial pH 7 was 2.873×10^{-3} g N₂O/g zeolit and maximum K_L at system without bacteria inoculation was 1.709×10^{-3} m³/g. Freundlich isotherm obtained maximum n and K_f were 5.625 and 8.86×10^{-5} m³/g respectively at system without bacteria inoculation.

Keywords: Biofilter, Initial pH, Natural Zeolite, Nitrous oxide, *Nitrobacter winogradskyi*

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Sistematika Penulisan.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Gas Dinitrogen Monoksida (N ₂ O).....	6
2.1.1. Karakteristik N ₂ O.....	6
2.1.2. Sumber N ₂ O.....	7
2.2. Teknologi Biofilter.....	7
2.2.1. Prinsip Kerja.....	8
2.2.2. Performansi Biofilter.....	9
2.2.3. Keuntungan dan Kelemahan Biofilter.....	9
2.2.4. Parameter-Parameter dalam Biofilter.....	10
2.3. Adsorpsi.....	13
2.3.1. <i>Breakthrough Curve</i>	15
2.3.2. Adsorpsi Isotermis.....	16
2.3.2.1. Isotermis <i>Langmuir</i>	16

2.3.2.2.	Isotermis <i>Freundlich</i>	18
2.4.	Metabolisme Nitrogen	19
2.5.	<i>Nitrobacter winogradskyi</i>	20
2.6.	Zeolit.....	21
2.7.	<i>State of The Art</i>	23
2.7.1.	Biofiltrasi N ₂ O.....	24
2.7.2.	Biofiltrasi NO _x	25
2.7.3.	Biofiltrasi NH ₃	25
2.7.4.	Biofiltrasi H ₂ S	26
BAB III	METODE PENELITIAN	28
3.1.	Diagram Alir Penelitian.....	28
3.2.	Sistem Biofilter.....	29
3.3.	Alat dan Bahan	31
3.3.1.	Alat.....	32
3.3.2.	Bahan.....	33
3.4.	Persiapan Penelitian.....	34
3.4.1.	Persiapan Peralatan Biofiltrasi	34
3.4.2.	Persiapan Media Filter	36
3.4.3.	Persiapan kultur <i>Nitrobacter winogradskyi</i>	38
3.5.	Eksperimen	42
3.5.1.	Eksperimen Biofiltrasi.....	42
3.4.2.	Eksperimen Tanpa Mikroba.....	42
3.4.3.	Pengamatan Suhu dan Kelembapan	42
3.6.	Data Penelitian.....	42
3.6.	Analisis Eksperimen Biofiltrasi.....	43
3.6.1.	Analisis Gas H ₂ S	43
3.6.2.	Analisis Perkembangan Bakteri	44
3.6.3.	Analisis Morfologi Media Filter	44
3.7.	Variabel Penelitian	45
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	46
4.1.	Hasil Kalibrasi Gas N ₂ O	46
4.2.	Uji Kinerja Biofilter.....	47

4.2.1.	Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N ₂ O	47
4.2.2.	Perubahan Suhu dan Kelembapan Media Filter	51
4.2.3.	Hasil Uji Perkembangan Bakteri	53
4.3.	Pemodelan Hasil Eksperimen	58
4.3.1.	Pemodelan Adsorpsi <i>Langmuir</i>	58
4.3.2.	Pemodelan Adsorpsi <i>Freundlich</i>	61
4.4.	Perbandingan Zeolit Alam dengan Karbon Aktif Sebagai Media Filter	63
BAB V KESIMPULAN.....		66
DAFTAR PUSTAKA		68
LAMPIRAN.....		76
Lampiran 1.	Data Kalibrasi N ₂ O	76
Lampiran 2.	Data Hasil Uji Variasi pH Awal Media 8	77
Lampiran 3.	Data Hasil Uji Variasi pH Awal Media 7	79
Lampiran 4.	Data Hasil Uji Variasi pH Awal Media 6	82
Lampiran 5.	Data Hasil Uji Variasi pH Awal Media 5	85
Lampiran 6.	Data Hasil Uji Variasi pH Awal Media 4	88
Lampiran 7.	Data Hasil Uji Variasi Tanpa Inokulasi Mikroba	91
Lampiran 8.	Data Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi pH Awal Media 8 ..	93
Lampiran 9.	Data Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi pH Awal Media 7 ..	94
Lampiran 10.	Data Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi pH Awal Media 6	95
Lampiran 11.	Data Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi pH Awal Media 5	96
Lampiran 12.	Data Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi pH Awal Media 4	97
Lampiran 13.	Data Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi Tanpa Inokulasi Mikroba	98

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Komposisi gas rumah kaca setiap tahun (Edgar, 2008)	1
Gambar 2.1. Emisi N ₂ O di Eropa tahun 1994 (IPCC, 1996)	7
Gambar 2.2. Prinsip kerja biofilter (Devinny et al., 1999).....	8
Gambar 2.3. Mekanisme proses adsorpsi.....	14
Gambar 2.4. Breakthrough curve	15
Gambar 2.5. Jalur metabolisme nitrogen (Hudepohl et al., 1999)	20
Gambar 2.6. Kerangka dasar tetrahedral pada struktur zeolit (Las, 2006).....	21
Gambar 2.7. <i>State of the Art</i> Biofiltrasi Berbagai Polutan	23
Gambar 2.8. <i>State of the Art</i> Biofiltrasi N ₂ O Riset Grup Teknologi Bioproses....	24
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.....	28
Gambar 3.2. Skema sistem biofilter.....	30
Gambar 3.3. Perangkat GC dan sistem biofilter.....	31
Gambar 3.4. Kurva yang terdeteksi pada: (a) Gas N ₂ O dan (b) Udara bebas oleh GC	36
Gambar 3.5. Persiapan media filter: (a) Homogenasi zeolit, (b) Zeolit yang telah dikalsinasi, dan (c) Dealuminasi zeolit dengan larutan HF 3%	37
Gambar 3.6. Dokumentasi kultur bakteri dalam media broth: (a) Proses pengkulturan bakteri di dalam media broth dan (b) Hasil kultur di dalam media broth setelah inkubasi 24 jam.....	39
Gambar 3.7. Dokumentasi kultur bakteri dalam media agar: (a) Proses pembuatan media agar menggunakan <i>hot plate stirrer</i> , (b) Proses pengkulturan bakteri di dalam media agar, dan (c) Hasil kultur di dalam media agar setelah inkubasi 24 jam.....	40
Gambar 4.1. Grafik hasil kalibrasi gas N ₂ O.....	46
Gambar 4.2. Efisiensi reduksi gas N ₂ O selama 24 jam pada biofiltrasi tanpa mikroba.....	47
Gambar 4.3. Pengaruh variasi pH awal media terhadap efisiensi reduksi polutan dinitrogen monoksida, dengan variasi percobaan: (●) pH 8, (○) pH 7, (■) pH 6, (□) pH 5, (▲) pH 4, (△) tanpa inokulasi mikroba ke dalam zeolit.....	49

Gambar 4.4. Efisiensi reduksi rata-rata polutan dinitrogen monoksida selama 24 jam pada berbagai variasi percobaan	50
Gambar 4.5. Mekanisme biofiltrasi (Kumar et al., 2011)	51
Gambar 4.6. Perubahan suhu media filter selama biofiltrasi dengan variasi percobaan: (●) pH 8, (○) pH 7, (■) pH 6, (□) pH 5, (▲) pH 4, (△) tanpa inokulasi mikroba ke dalam zeolit	52
Gambar 4.7. Perubahan kelembapan media filter terhadap waktu, dengan variasi percobaan: (●) pH 8, (○) pH 7, (■) pH 6, (□) pH 5, (▲) pH 4, (△) tanpa inokulasi mikroba ke dalam zeolit	53
Gambar 4.8. Dokumentasi hasil analisis TPC variasi pH awal media 5: (a) medium sintetik jam ke-0, (b) medium sintetik jam ke-48, (c) sebelum biofiltrasi, dan (d) setelah biofiltrasi.....	55
Gambar 4.9. Morfologi <i>biofilm</i> pada permukaan zeolit menggunakan SEM: (a) zeolit tanpa inokulasi mikroba, (b) sebelum biofiltrasi, dan (c) setelah biofiltrasi	57
Gambar 4.10. Adsorpsi <i>Langmuir</i> pada berbagai variasi: (a) pH awal media 8, (b) pH awal media 7, (c) pH awal media 6, (d) pH awal media 5, (e) pH awal media 4, (f) tanpa inokulasi mikroba pada media filter	59
Gambar 4.11. Adsorpsi <i>Freundlich</i> pada berbagai variasi: (a) pH awal media 8, (b) pH awal media 7, (c) pH awal media 6, (d) pH awal media 5, (e) pH awal media 4, (f) tanpa inokulasi mikroba pada media filter	62

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Sifat gas N ₂ O (AIR-LIQUIDE, 2009).....	6
Tabel 2.2. Kemampuan penyerapan sulfur pada ketiga bahan pengisi (Wahyuni et al., 2004).....	26
Tabel 2.3. Laju oksidasi sulfur oleh <i>Thiobacillus</i> ASWW-2 pada berbagai variasi pH awal media (Lee et al., 2000)	27
Tabel 3.1. Daftar alat penelitian.....	32
Tabel 3.2. Daftar alat penelitian (lanjutan)	33
Tabel 3.3. Komposisi nutrisi sintetik <i>Nitrobacter winogradskyi</i> Winslow et al. (IFO, 2000).....	41
Tabel 3.4. Spesifikasi kromatografi gas (GC).....	43
Tabel 4.1. Hasil analisis TPC pada seluruh variasi pH awal media (CFU/mL)....	54
Tabel 4.2. Nilai konstanta <i>Langmuir</i> pada berbagai variasi.....	60
Tabel 4.3. Nilai konstanta <i>Freundlich</i> pada berbagai variasi.....	63
Tabel 4.4. Perbandingan efisiensi reduksi N ₂ O dan hasil analisis TPC zeolit alam dan karbon aktif.....	64

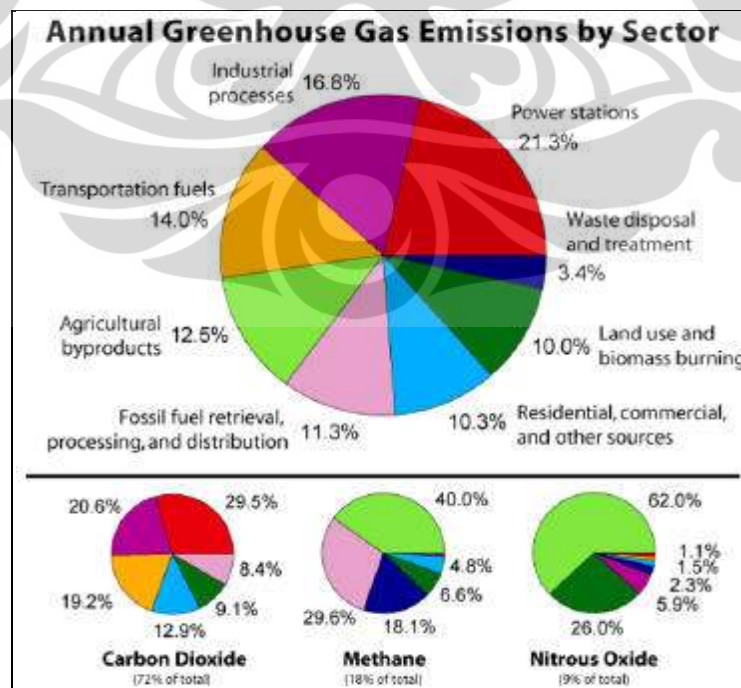
BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Berbagai fakta ilmiah yang kuat dan terpercaya menunjukkan bahwa perubahan iklim sedang terjadi di bumi, di mana sebagian besar perubahan iklim ini disebabkan oleh aktivitas manusia. Pemanasan global memiliki hubungan yang erat dengan berbagai perubahan iklim dan pengaruhnya, antara lain naiknya permukaan air laut, meningkatnya intensitas peristiwa hujan, menurunnya tumpukan salju dan es air laut, meningkatnya gelombang panas, pergantian musim yang lebih lama, dan menjadi asamnya air laut. Perubahan-perubahan iklim ini mengakibatkan resiko bagi manusia dan sistem lingkungan (Matson, 2010).

Pemanasan global (*global warming*) pada dasarnya merupakan fenomena peningkatan suhu global dari tahun ke tahun karena terjadinya efek rumah kaca (*greenhouse effect*) yang disebabkan oleh meningkatnya emisi gas-gas seperti karbondioksida (CO_2), metana (CH_4), dinitrogen monoksida (N_2O). Berikut ini adalah gambar komposisi gas rumah kaca setiap tahunnya.



Gambar 1.1. Komposisi gas rumah kaca setiap tahun (Edgar, 2008)

Dari gambar tersebut terlihat bahwa N₂O berperan penting dalam proses terjadinya pemanasan global, di mana kontribusi terbesar diberikan oleh produk samping industri pertanian, serta pembakaran biomassa dan penggunaan lahan. Di samping itu, pembakaran bahan bakar fosil besar-besaran seperti batu bara dan minyak bumi juga melepaskan kadar N₂O yang tinggi. Jika gas N₂O mencapai stratosfer, maka gas ini akan merusak lapisan ozon, sehingga menghasilkan tingkat radiasi UV yang lebih tinggi serta meningkatkan resiko kanker kulit dan katarak (Noviani, 2009).

Meskipun emisi gas N₂O jauh lebih rendah daripada emisi gas CO₂, namun gas N₂O dapat menyerap panas mencapai 320 kali lebih kuat dibandingkan gas CO₂ di atmosfer (ALGAS, 1997). Selain itu, gas N₂O di atmosfer bisa tinggal lebih lama (166+16 tahun) dan lebih stabil daripada gas CO₂ ataupun gas CH₄. Konsentrasi N₂O di atmosfer kini mencapai 310 ppbv dengan laju peningkatan konsentrasi berkisar 0,6-0,9 ppbv/tahun (Wihardjaka, 2004).

Sudah banyak metode yang dilakukan untuk meminimalisasi gas polutan, antara lain metode SCR (*Selective Catalytic Reduction*) dan SNCR (*Selective Non Catalytic Reduction*) yang digunakan untuk meminimalisasi atau mereduksi gas polutan pada kegiatan-kegiatan industri. Akan tetapi, kedua metode tersebut memerlukan biaya operasi dan instalasi yang tinggi karena diperlukan adanya suatu katalis. Selain itu, diperlukan juga suhu yang tinggi dan dihasilkan produk-produk buangan yang besar sehingga dibutuhkan biaya tambahan untuk membersihkannya (Jin et al., 2005). Dengan kata lain, tingginya biaya instalasi dan operasi menjadikan kedua metode ini kurang efektif.

Namun demikian, terdapat suatu teknologi yang terbukti mampu mengatasi kekurangan pada kedua metode tersebut, yaitu teknologi biofilter. Prinsip dari teknologi ini ialah memanfaatkan kemampuan mikroba untuk mendegradasi pencemar organik yang digunakan sebagai sumber nutrisi dan pertumbuhan sel. Pada kondisi ini, semua pencemar diubah menjadi produk akhir yang tidak berbahaya seperti CO₂, H₂O, dan biomassa baru dan efektif untuk pencemar organik yang konsentrasinya relatif rendah, antara 1-5 g/m³ (Cahyana, 2006). Kelebihan penggunaan biofilter dibandingkan metode lainnya adalah biaya investasi dan operasional yang rendah, stabil pada waktu yang relatif lama,

memiliki daya degradasi gas polutan yang tinggi, dan dapat mengkonversi campuran organik dan inorganik menjadi menjadi produk oksidasi yang tidak berbahaya (Sheridan et al., 2002).

Sistem biofilter pada penelitian ini menggunakan media filter berupa Zeolit Alam Lampung teraktivasi. Zeolit alam dipilih karena memiliki banyak kelebihan, antara lain struktur yang stabil dan porositas yang tinggi sehingga diharapkan zeolit alam mampu membuat molekul-molekul gas tertahan di dalam pori-pori sehingga keefektifan interaksi antara molekul-molekul gas dan mikroba meningkat (Maulidyasti, 2008).

Mikroba yang digunakan pada sistem biofilter ini adalah *Nitrobacter winogradskyi* yang merupakan bakteri pengoksidasi nitrit menjadi nitrat. *Nitrobacter winogradskyi* merupakan bakteri yang toleran terhadap perubahan kondisi lingkungan dan mampu tumbuh dalam lingkungan aerob dan anaerob. Bakteri pengoksidasi nitrit tumbuh sangat baik pada konsentrasi nitrit sebesar 2-30 mM pada pH 7,5-8,0 dan pada suhu 25-30⁰C (Spieck and Bock, 2005).

Penelitian ini akan mengkaji kemampuan biofiltrasi polutan dinitrogen monoksida oleh bakteri *Nitrobacter winogradskyi* yang diinokulasikan pada media filter berupa Zeolit Alam Lampung teraktivasi melalui variasi kondisi operasi berupa pH awal media.

1.2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh pH awal media terhadap biofiltrasi dinitrogen monoksida oleh *Nitrobacter winogradskyi* dengan media filter Zeolit Alam Lampung teraktivasi?
2. Bagaimana pengaruh inokulasi *Nitrobacter winogradskyi* pada Zeolit Alam Lampung teraktivasi terhadap kemampuan degradasi polutan dinitrogen monoksida?
3. Bagaimana pengaruh perubahan suhu dan kelembapan media filter terhadap efisiensi reduksi dinitrogen monoksida?
4. Bagaimana pertumbuhan *Nitrobacter winogradskyi* selama preparasi dan biofiltrasi dinitrogen monoksida?

5. Bagaimana model adsorpsi *Langmuir* dan *Freundlich* pada sistem biofilter dinitrogen monoksida?

1.3. Tujuan Penelitian

Terdapat lima tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini, antara lain:

1. Menentukan pH awal media yang optimum dalam biofiltrasi dinitrogen monoksida oleh *Nitrobacter winogradskyi* dengan media filter Zeolit Alam Lampung teraktivasi.
2. Mengkaji pengaruh inokulasi *Nitrobacter winogradskyi* pada Zeolit Alam Lampung teraktivasi terhadap kemampuan degradasi polutan dinitrogen monoksida.
3. Mengkaji pengaruh perubahan suhu dan kelembapan media filter terhadap efisiensi reduksi dinitrogen monoksida.
4. Mengkaji pertumbuhan *Nitrobacter winogradskyi* selama preparasi dan biofiltrasi dinitrogen monoksida.
5. Mengkaji model adsorpsi *Langmuir* dan *Freundlich* pada sistem biofilter dinitrogen monoksida.

1.4. Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa batasan terhadap masalah yang akan dibahas, antara lain:

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Rekayasa Bioproses, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok.
2. Peralatan biofilter yang digunakan ialah peralatan berskala laboratorium dengan ukuran tinggi 120 cm, jari-jari luar 4 cm, jari-jari dalam 3,675 cm, dan tebal kolom 0,325 cm.
3. Gas yang digunakan adalah N_2O (dinitrogen monoksida) dalam gas model dengan konsentrasi sebesar 15000 ppm dalam udara ppm dan laju alir sebesar 88 cc/menit.
4. Media filter yang digunakan adalah Zeolit Alam Lampung teraktivasi dengan massa sebesar 4 kg untuk ketinggian media filter di dalam kolom mencapai 100 cm.

5. Bakteri pendegradasi yang diinokulasi pada media filter adalah *Nitrobacter winogradskyi* Winslow et al.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari makalah ini adalah sebagai berikut:

BAB 1. PENDAHULUAN

Bab ini memaparkan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian ini.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi hasil studi literatur secara umum akan hal-hal yang terkait dengan penelitian seperti biofiltrasi, gas dinitrogen monoksida, zeolit alam, dan *Nitrobacter* sp. Bab ini juga membahas tentang *State of The Art* dari penelitian.

BAB 3. METODE PENELITIAN

Bab ini menguraikan tentang diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan, prosedur kerja, cara pengambilan data dan pengolahan data yang diperoleh, serta variabel-variabel yang terlibat dalam penelitian.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang hasil pengolahan data dari eksperimen berikut analisisnya. Bagaimana pH awal media yang optimum dalam biofiltrasi dinitrogen monoksida, pengaruh inokulasi *Nitrobacter winogradskyi* terhadap degradasi dinitrogen monoksida, pertumbuhan bakteri dan perubahan morfologi media filter selama operasi, serta pemodelan isoteremis *Langmuir* dan *Freundlich*.

BAB 5. KESIMPULAN

Bab ini berisi kesimpulan tentang hasil yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Gas Dinitrogen Monoksida (N₂O)

N₂O 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. Selain itu, N₂O juga merupakan salah satu gas yang memberi kontribusi terbesar pada pemanasan global. Dampak gas rumah kaca terhadap pemanasan global sangat bervariasi. Untuk jumlah yang sama, gas rumah kaca yang berbeda mempunyai dampak pemanasan global yang berbeda. Untuk membandingkan dampak yang bervariasi ini, digunakanlah indeks potensi pemanasan global (*Global Warming Potential* = *GWP*). Indeks *GWP* menggunakan CO₂ sebagai tolak ukur. Dari indeks *GWP* ini diketahui bahwa 1 ton emisi gas N₂O dampaknya sama dengan 320 ton emisi gas CO₂ (ALGAS, 1997).

2.1.1. Karakteristik N₂O

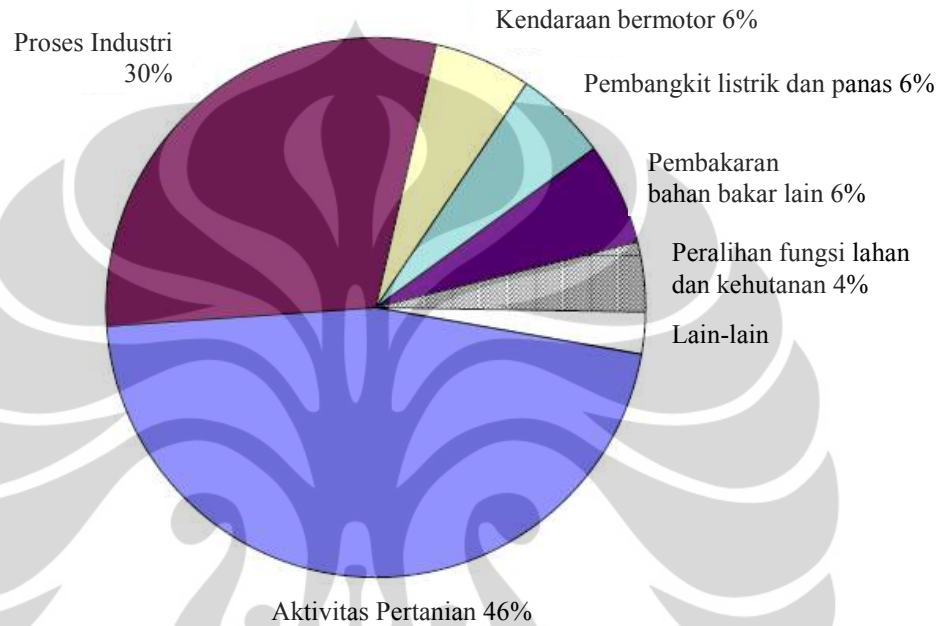
Dinitrogen Monoksida (N₂O) umumnya digunakan sebagai senyawa anestetik di dalam dunia kedokteran. Gas ini seringkali disebut sebagai *laughing gas* karena efek euforia yang ditimbulkan ketika menghirupnya. Batas standar paparan gas N₂O sebesar 50-100 ppm.

Tabel 2.1. Sifat gas N₂O (AIR-LIQUIDE, 2009)

Berat molekul	44,013 g/mol
Titik kritis	T = 36,4 °C; P = 72,45 bar
Densitas	3,16 kg/m ³ (pada P = 1,013 bar dan titik didih)
Viskositas	0,0136 cP (pada P = 1,013 bar dan T = 0 °C)
Kapasitas panas	C _p = 0,038 kJ/(mol.K) C _v = 0,029 kJ/(mol.K) (pada P = 1,013 bar dan T = 15 °C)

2.1.2. Sumber N₂O

Gas dinitrogen monoksida (N₂O) dihasilkan oleh aktivitas pertanian, proses industri, asap buangan kendaraan bermotor, pembangkit listrik dan panas, pembakaran bahan bakar lain, serta peralihan fungsi lahan dan kehutanan (IPCC, 1996). Berikut ini merupakan persentase emisi polutan N₂O di Eropa.



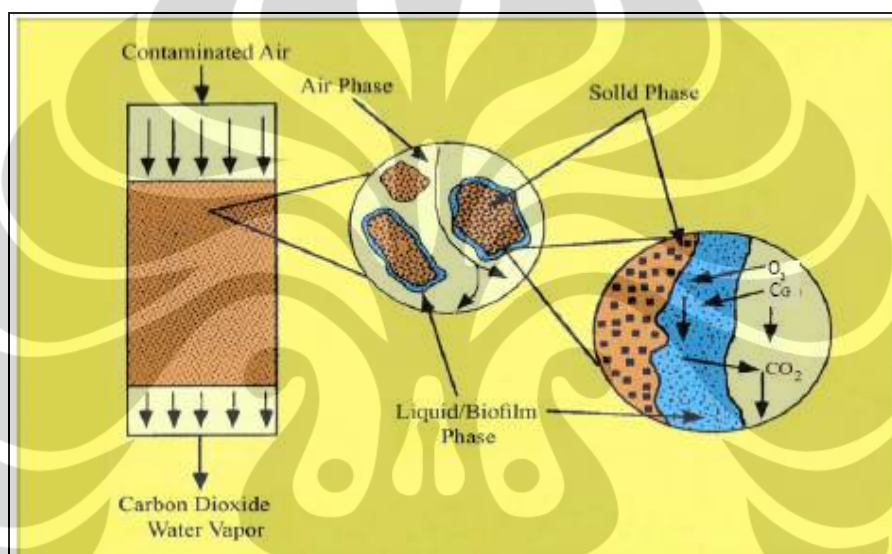
Gambar 2.1. Emisi N₂O di Eropa tahun 1994 (IPCC, 1996)

2.2. Teknologi Biofilter

Biofilter merupakan reaktor yang di dalamnya dilewati aliran polutan udara melalui media filter berpori, di mana pada permukaan media tersebut terdapat *biofilm* tempat kultur mikroba pendegradasi kontaminan tumbuh (Kumar et al., 2011). Teknologi biofilter memiliki beberapa keutamaan, antara lain memberikan porositas tinggi, ketersediaan nutrisi tinggi, kapasitas retensi kelembaban tinggi, dan kapasitas penyangga tinggi untuk menjaga pertumbuhan mikroba pada material pendukung yang sesuai (Devinny et al., 1999; Kennes and Veiga, 2001; Dastous, 2005). Efektivitas biofilter sangat tergantung pada aktivitas populasi mikroba dan jenis pengayaan (*enrichment*) yang dilakukan selama tahap inokulasi. Selain itu, jenis matriks support juga mempengaruhi stabilitas jangka panjang dan kinerja dari biofilter (Arisantoro, 2010).

2.2.1. Prinsip Kerja

Prinsip dari biofiltrasi adalah menyaring gas-gas yang dialirkan ke dalamnya, di mana di dalam kolom biofilter terdapat bahan pengisi yang berfungsi sebagai penyaring dan tempat hidup bagi kultur mikroba yang digunakan. Mikroba akan terimobilisasi pada bahan pengisi dan akan membentuk lapisan tipis (*biofilm* atau *biolayer*). Dengan adanya *biofilm*, gas polutan yang masuk diserap sehingga dapat dioksidasi dan diuraikan oleh mikroba (Simangunsong, 2004). Proses biofiltrasi dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.2. Prinsip kerja biofilter (Devinny et al., 1999)

Dari Gambar 2.1. terlihat bahwa ketika polutan udara dilewatkan di dalam media filter, maka terjadi proses adsorpsi di dalam lapisan *biofilm*. Di dalam media filter terdapat fasa padat, cair, dan udara. Lapisan *biofilm* terdapat dalam fasa cair, di mana akan terjadi proses adsorpsi polutan tersebut oleh bakteri pendenitrifikasi. Organisme pendenitrifikasi memiliki kemampuan untuk mengurangi kadar NO_x pada kondisi jumlah oksigen tertentu. Proses reduksi yang terjadi pada lapisan *biofilm* (Barnes et al., 1994) adalah $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$. Pada proses denitrifikasi, karbon organik bertindak sebagai donor elektron seperti asam asetat, metanol, dan sampah domestik. Jadi, mikroba pendenitrifikasi menghasilkan gas nitrogen yang ramah lingkungan dari nitrogen

oksida yang bersifat *toxic*. Hasil keluaran setelah melalui media filter berupa karbon dioksida dan uap air.

2.2.2. Performansi Biofilter

Kinerja dari suatu biofilter dapat ditentukan melalui suatu penentuan karakteristik performansi biofilter. Salah satu parameter yang berpengaruh ialah Efisiensi Reduksi / *Removal Efficiency* (RE) (Devinny et al., 1999).

Efisiensi reduksi pada biofiltrasi digunakan untuk mendeskripsikan hasil kerja suatu biofilter. RE (*Removal Efficiency*) adalah fraksi kontaminan yang dapat direduksi oleh biofilter dan dapat ditinjau sebagai suatu persentase.

$$RE = \left(\frac{C_i - C_o}{C_i} \right) \times 100\% \quad (2.1)$$

Di mana: C_i = konsentrasi kontaminan yang masuk (ppmv, g m^{-3})
 C_o = konsentrasi kontaminan yang keluar (ppmv, g m^{-3})

2.2.3. Keuntungan dan Kelemahan Biofilter

Biofiltrasi adalah teknologi yang menawarkan beberapa keuntungan dibandingkan metode-metode tradisional pengendalian polusi udara untuk perlakuan aliran polusi udara dengan konsentrasi kecil. Keuntungan-keuntungan yang dimiliki biofilter, antara lain mempunyai efisiensi yang tinggi dalam penghilangan polutan, biaya instalasi dan operasi yang rendah, kondisi operasi yang aman dan konsumsi energi yang rendah, tidak menghasilkan produk samping, mengkonversi banyak campuran organik dan inorganik menjadi produk oksidasi yang tidak berbahaya (Sheridan et al., 2002), dapat mereduksi kontaminan di atas 90% untuk kontaminan yang berkonsentrasi rendah (<100 ppm), serta dapat digunakan untuk berbagai media dan kondisi operasi yang beragam. Desainnya yang sederhana juga menjadi alasan kepopuleran biofilter (Zilli, 2001). Biofilter banyak diaplikasikan dalam industri pertanian, proses makanan, dan proses pembuangan air.

Meskipun metode ini sangat baik digunakan untuk mengolah bermacam-macam pencemar, tetapi ada beberapa pencemar yang sulit untuk dihilangkan, antara lain (Sanjaya, 2010):

- a. Pencemar yang sulit larut di dalam air sehingga degradasinya menjadi terbatas karena *driving force*-nya kecil agar terjadi transfer massa. Dengan demikian, ketebalan lapisan air antara fasa gas dengan mikroba menjadi kecil.
- b. Pencemar yang sulit dibiodegradasi. Beberapa polutan organik terklorinasi tidak dapat didegradasi dalam kondisi aerob sehingga sulit disisihkan. Sedangkan sebagian hidrokarbon terklorinasi dapat didegradasi secara aerob tetapi perlu substrat tambahan untuk pertumbuhan mikroba (*cometabolisme*).
- c. Toksisitas polutan akibat konsentrasi yang terlalu tinggi. Sebagai contoh adalah konsentrasi tinggi senyawa antara (*intermediate*) hasil biodegradasi. Tidak hanya yang berkonsentrasi tinggi, senyawa antara yang rendah konsentrasinya pun dapat menjadi toksik bagi mikroba. Senyawa *intermediate* biodegradasi trichlorethene (TCE) yang karsinogenik dapat menghasilkan dampak buruk pada mikroba pendegradasi TCE. Senyawa TCE ini terdistribusi luas pada air tanah dan tanah sehingga berbahaya bagi manusia.

2.2.4. Parameter-Parameter dalam Biofilter

Terdapat beberapa parameter dalam biofilter yang menentukan performansi dari biofilter itu sendiri. Parameter-parameter tersebut seperti media filter, kelembapan media filter (*moisture content*), suhu, pH, nutrisi, dan *pressure drop*.

- **Media Filter**

Penentuan bahan pengisi biofilter mutlak dilakukan karena bahan yang dipilih akan mendukung kehidupan bakteri, yaitu sebagai media tempat tumbuhnya mikroba (Arisantoro, 2010). Untuk mendapatkan media filter yang baik, perlu dipertimbangkan karakteristik fisika, kimia, dan biologi dari media filter tersebut (Kennes and Thalasso, 1998). Terdapat beberapa ciri media filter yang baik (Sanjaya, 2010), antara lain:

- 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 media filter yang akan digunakan.

- **Kelembapan media filter (*moisture content*)**

Kandungan optimal air dalam suatu media filter berbeda-beda tergantung dari luas permukaan media, porositas, dan lain-lain (Hodge et al., 1991). Kandungan kelembapan yang efisien pada biofiltrasi berkisar antara 50%-70% (Nicolai and Janni, 2000). Sedangkan untuk mendukung kelangsungan hidup dari mikroba, kandungan kelembapan yang optimal memiliki jangkauan 30-60% berat (Ottengraf, 1986).

Kelembapan pada media filter yang terlalu kecil akan menyebabkan kekeringan pada kolom filter, yang selanjutnya akan menyebabkan *channeling*. Di samping itu, kelembapan yang terlalu kecil akan menyebabkan penurunan laju biodegradasi dari polutan akibat berkurangnya kadar air bagi mikroba. Sedangkan kelembapan yang terlalu besar akan menghalangi transfer oksigen dan polutan hidrofobik ke dalam lapisan *biofilm*, yang akan menghasilkan zona anaerobik dalam media filter sehingga akan membatasi laju reaksi yang terjadi (Datta and Allen, 2005). Kandungan *moisture* di dalam biofilter dapat dipertahankan oleh proses prehumidifikasi dari aliran gas *inlet*.

- **Suhu**

Pengaturan suhu sangat penting dalam biofiltrasi, yaitu untuk mencegah terjadinya *thermal shocks*. Pada umumnya terdapat tiga kelas suhu untuk mikroba aerobik, antara lain:

- Mikroba *Psychrophilic* → <20⁰C
- Mikroba *Mesophilic* → 20-40⁰C
- Mikroba *Thermophilic* → >45⁰C

Suhu yang disarankan dalam proses biofiltrasi yaitu dalam jangkauan 15-40⁰C (Leson and Winer, 1991; Bohn, 1992). Apabila suhu gas polutan >40⁰C, maka gas tersebut harus didinginkan terlebih dahulu sebelum memasuki kolom biofilter. Sedangkan apabila suhu gas polutan <10⁰C, maka gas tersebut harus dipanaskan terlebih dahulu karena mikroba menjadi tidak aktif (*inactive*) pada suhu yang rendah. Seiring meningkatnya suhu, metabolisme dan laju pertumbuhan sel juga meningkat, akan tetapi kemampuan biosorpsi menurun (Sanjaya, 2010).

- **Kandungan Oksigen**

Oksigen merupakan suatu parameter operasi yang penting bagi biofiltrasi karena banyak mikroba yang digunakan bersifat aerobik. Konsentrasi oksigen terlarut memberikan pengaruh pada laju pertumbuhan bakteri aerobik. Kehadiran oksigen terlarut dalam jumlah yang cukup sangat diperlukan untuk proses oksidasi dan sintesa sel. Bakteri heterotrofik aerobik dalam media biofilter membutuhkan paling sedikit 5-15% oksigen pada aliran gas masukan. Oksigen juga sangat diperlukan oleh bakteri nitrifikasi untuk oksidasi nitrogen organik dan ammonia. Nitrifikasi akan berjalan dengan baik jika oksigen terlarut lebih besar dari 1 mg/L. Secara umum kadar oksigen terlarut untuk proses aerobik harus dijaga minimum 2 mg O₂/L (Sanjaya, 2010).

- **pH**

pH dalam media 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 6,5-7,5 sedangkan pada pH >8,5 dan pH <5 kecepatan pertumbuhan mikroba akan menurun, sehingga efisiensi kurang optimal (Ottengraf et al., 1986).

- **Nutrisi**

Mikroba memerlukan makanan dengan nutrisi seimbang untuk dapat bertahan hidup dan berkembang biak. Kandungan nutrisi yang baik harus tersedia, agar diperoleh performa yang baik dari biofilter. Oleh karena itu, selain karbon dan energi dari degradasi kontaminan, mikroba juga memerlukan nutrisi utama untuk memperpanjang hidup. Karbon dan energi yang dibutuhkan oleh mikroba dapat berasal dari gas kontaminan, sementara kontaminan lainnya seperti nitrogen, fosfor, mineral, dan *trace element* harus disediakan untuk mikroba dalam biofilter agar didapatkan kinerja yang baik (Auria et al., 1996).

- **Pressure drop**

Pressure drop tergantung pada kondisi, jenis media filter, dan kandungan *moisture*. Partikel yang lebih kecil akan mempunyai *pressure drop* yang tinggi dan sebaliknya. Jika *pressure drop* semakin kecil maka waktu tinggal akan semakin berkurang, sehingga akan mempengaruhi pertumbuhan mikroba menjadi lebih lambat dan akhirnya mempengaruhi efisiensi penurunan polutan organik, disamping itu kandungan *moisture* juga sangat mempengaruhi *pressure drop* sampai 100% (Arisantoro, 2010).

Pada umumnya, terdapat hubungan yang linear antara *pressure drop* dengan peningkatan laju aliran gas (Yang and Allen, 1994). Pada laju aliran gas tertentu, akan terjadinya peningkatan *pressure drop* seiring dengan peningkatan biomassa (Morgan-Sagastume et al., 2001) dan penurunan ukuran partikel, khususnya untuk partikel <1 mm.

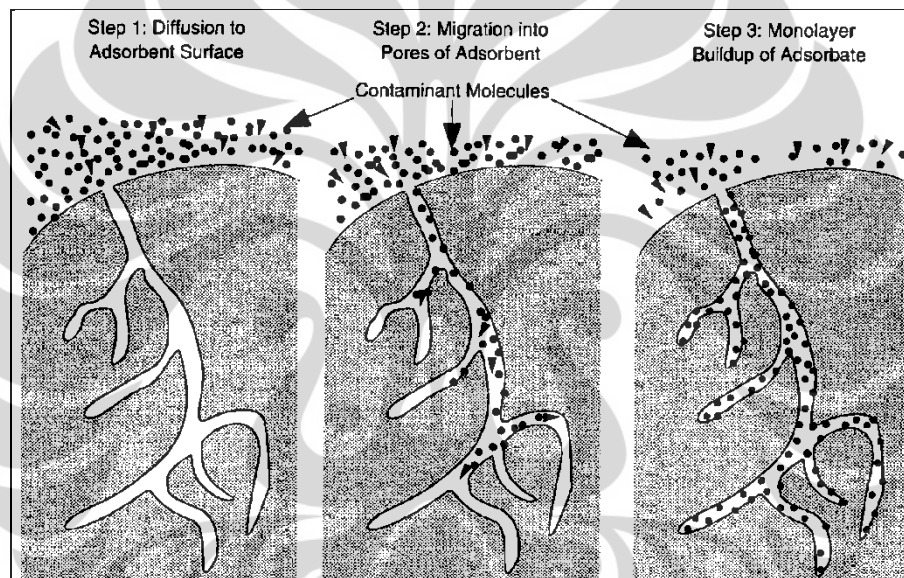
2.3. Adsorpsi

Adsorpsi ialah 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 (Sanjaya, 2010).

Mekanisme terjadinya adsorpsi dapat dibagi menjadi tiga langkah (Cahyana, 2006), yaitu:

1. *Makrotransport*, yaitu perpindahan zat pencemar, disebut juga adsorbat (zat yang diadsorpsi), di dalam air menuju permukaan adsorban.
2. *Mikrotransport*, yaitu perpindahan adsorbat menuju pori-pori di dalam adsorban.
3. *Sorpsi*, yaitu pelekatan zat adsorbat ke dinding pori-pori atau jaringan pembuluh kapiler mikroskopis.

Mekanisme adsorpsi dapat dilihat pada Gambar 2.2 di bawah ini.



Gambar 2.3. Mekanisme proses adsorpsi

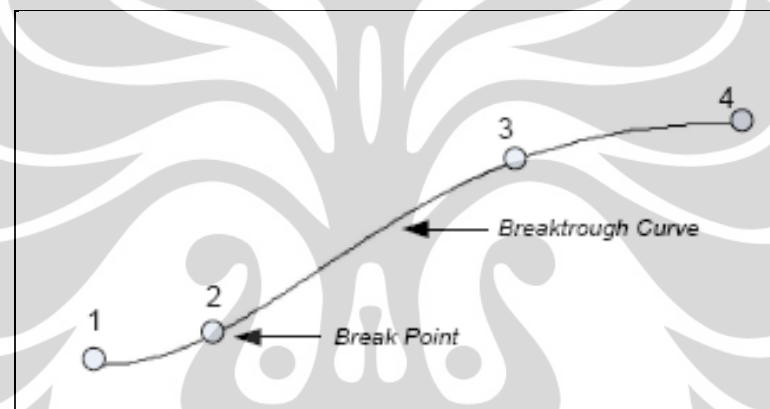
Hal-hal yang mempengaruhi efektivitas adsorpsi (Cahyana, 2006), yaitu:

1. Jenis adsorban, apakah berupa arang batok, batubara (antrasit), sekam, dan lain-lain.
2. Suhu lingkungan (udara, air, cairan): proses adsorpsi makin baik jika suhunya 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 (*media*), terjadi pada zat organik alifatik, dan adsorpsi kuat (*strong*) terjadi pada senyawa aromatik (zat organik yang berbau (aroma) dengan struktur benzena, C_6H_6).

2.3.1. Breakthrough Curve

Kurva terobosan (*breakthrough curve*) merupakan kurva yang menggambarkan suatu rentang kondisi di mana terjadinya penurunan drastis jumlah adsorbat yang dapat diserap oleh adsorben. Kondisi penurunan jumlah adsorbat yang teradsorpsi ini terjadi sebelum mengalami kesetimbangan adsorpsi (Sontheimer, 1988).



Gambar 2.4. Breakthrough curve

Penjelasan mengenai *breakthrough curve* di atas adalah sebagai berikut:

- Proses adsorpsi dimulai pada titik (1), pada kondisi ini adsorpsi berjalan dalam laju yang relatif sama (konstan) sampai dengan titik (2).
- Titik (2) pada kurva ini merupakan titik balik (*breakpoint*), dimana terjadi penurunan secara drastis jumlah adsorbat yang dapat diserap oleh adsorben sampai dengan titik (3). Daerah yang berada pada rentang antara titik (2) dan (3) ini disebut dengan kurva terobosan (*breakthrough curve*).
- Penurunan jumlah adsorbat terus terjadi dari titik (3) sampai dengan titik (4), tetapi tidak secara drastis sebagaimana sebelumnya. Titik (4) ini disebut dengan titik kesetimbangan, dimana proses adsorpsi sudah tidak terjadi lagi. Pada kondisi ini adsorben telah melakukan adsorpsi secara optimal dan berada dalam kondisi jenuh karena seluruh permukaannya

telah tertutup oleh adsorbat sehingga tidak mungkin melakukan proses adsorpsi lagi.

2.3.2. Adsorpsi Isotermis

Adsorpsi isotermis menunjukkan bagaimana molekul yang teradsorb menyebar diantara fase cair dan padat ketika proses adsorpsi mencapai kesetimbangan (Nwabanne and Igbokwe, 2008).

2.3.2.1. Isotermis *Langmuir*

Isotermis *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):

$$q_e = (C_0 - C_t) \frac{V}{m} \quad (2.3)$$

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 isotermis dan isovolum, perubahan tekanan \sim perubahan mol dan perubahan mol \sim perubahan massa per volum sampel. Konsentrasi gas N_2O dalam satuan massa, jadi dilakukan konversi tekanan parsial menjadi massa seperti ditunjukkan pada persamaan di bawah ini.

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

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

$$m = n \times Mr$$

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

$$C_e = \frac{n_{N_2O} \times Mr_{N_2O}}{V} \quad (2.4)$$

Persamaan 2.4. digunakan apabila N_2O yang teradsorp dalam satuan mol. Dengan menggabungkan persamaan 2.3. dan 2.4., didapat 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 media zeolit:

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

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

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

$$r_{AD} = k_1 \left(C_v C_e - \frac{q_e}{K_L} \right) \quad (2.5)$$

Dengan:

K_L = Konstanta *Langmuir* (m^3/g)

Pada kondisi kesetimbangan adsorpsi dan desorpsi N_2O , laju kesetimbangannya adalah sama, maka persamaan 2.5. menjadi:

$$r_{AD} = 0$$

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

Asumsi: Gas N_2O 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:

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
 q_e(1 + C_e K_L) &= q_m C_e K_L \\
 \frac{q_e}{C_e} &= \frac{q_m K_L}{1 + C_e K_L} \\
 \frac{C_e}{q_e} &= \frac{1 + C_e K_L}{q_m K_L} \\
 \frac{C_e}{q_e} &= \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m}
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

Kemudian diplot data dengan C_e sebagai sumbu-x dan C_e/q_e sebagai sumbu-y.

2.3.2.2. Isotermis *Freundlich*

Isotermis *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 (Lin, 2009). Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$y = K_f P^{\frac{1}{n}} \tag{2.7}$$

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:

$$PV = nRT$$

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

$$P = C_e RT \tag{2.8}$$

Dengan C_e ialah konsentrasi gas N_2O pada *outlet* (mg/L).

Dari persamaan di atas terlihat bahwa nilai $P \sim C$, jadi persamaan 2.7. dapat ditulis menjadi:

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.9)$$

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

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

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

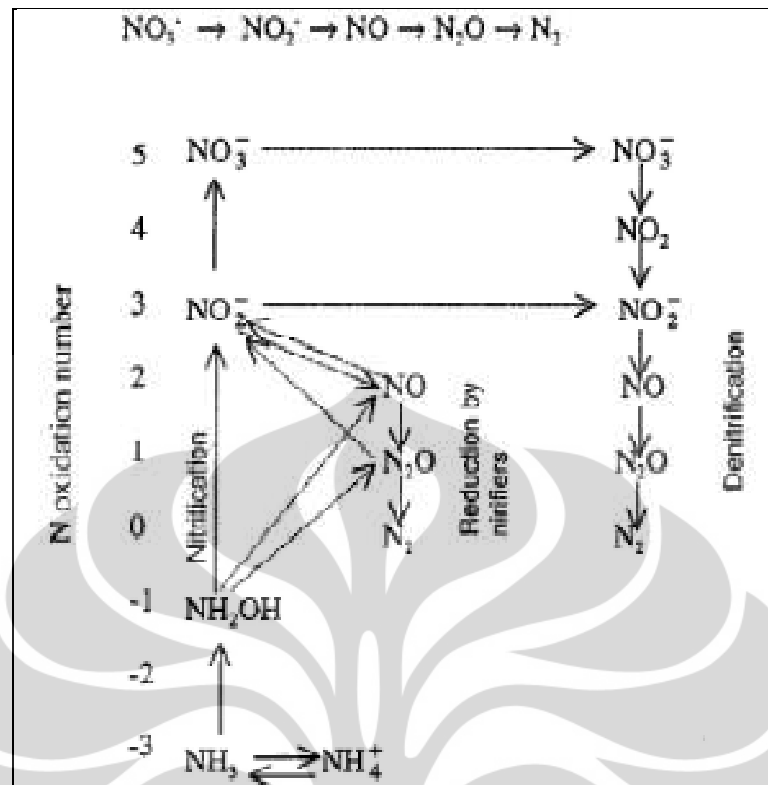
Kemudian diplot data dengan $\ln C_e$ sebagai sumbu-x dan $\ln q_e$ sebagai sumbu-y.

2.4. Metabolisme Nitrogen

Nitrogen merupakan zat nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan dalam jumlah besar, dan pada basis kering merupakan elemen ketiga yang paling banyak terdapat dalam jaringan. Sel hidup umumnya terdiri dari 14% nitrogen. Sebagian besar dari spesies bakteri mampu mengasimilasi nitrogen pada berbagai jangkauan bilangan oksidasi. Biasanya antara -3 (NH_3 , NH_4^+) dan +5 (NO_3^-). Nitrogen yang bergabung 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 tereduksi melalui reaksi enzim katalitik. Sebagian besar nitrogen yang ditemukan di alam ditemukan dalam bilangan oksidasi -3 atau +5. Terdapat 5 macam transformasi mikroba dari nitrogen (Simanjuntak, 2008), antara lain:

1. Respirasi atau denitrifikasi, penggunaan senyawa nitrogen atau 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 ke dalam jaringan sel baru
4. Fiksasi, konversi molekular nitrogen menjadi amonia
5. Produksi amonia melalui deaminasi amina

Berikut ini merupakan gambar metabolisme nitrogen yang menunjukkan hubungan nitrifikasi dan denitrifikasi.



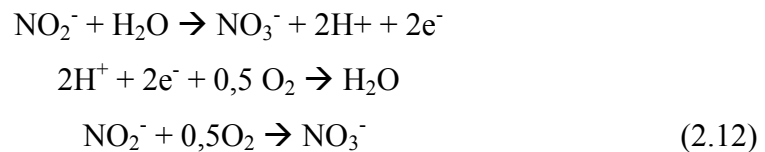
Gambar 2.5. Jalur metabolisme nitrogen (Hudepohl et al., 1999)

2.5. *Nitrobacter winogradskyi*

Nitrobacter winogradskyi merupakan bakteri pengoksidasi nitrit yang berperan dalam nitrifikasi, yaitu mengubah nitrit yang merupakan produk akhir dari oksidasi ammonia menjadi nitrat (Freitag and Bock, 1990). *Nitrobacter winogradskyi* merupakan bakteri yang cakap dalam berbagai hal secara metabolisme. *Nitrobacter winogradskyi* dapat tumbuh sebagai kemolitotrof dengan memperoleh energi dari oksidasi nitrit dan memperbaiki karbon dioksida sebagai sumber karbonnya. Jika tidak ada nitrit, *Nitrobacter winogradskyi* dapat tumbuh sebagai kemoorganoheterotrof dan memanfaatkan zat organik sebagai sumber karbon dan energi (Bock et al., 1986; Bock et al., 1991). Ketika diberikan nutrisi berupa kombinasi nitrit dan komponen organik, *Nitrobacter winogradskyi* dapat memanfaatkan kedua zat tersebut secara simultan dalam pertumbuhan mixotrof (Bock et al., 1986; Bock et al., 1991).

Nitrobacter winogradskyi dapat mengoksidasi nitrit menjadi nitrat secara aerob, dan mereduksi nitrat secara anaerob (Spieck and Bock, 2005). Berikut ini

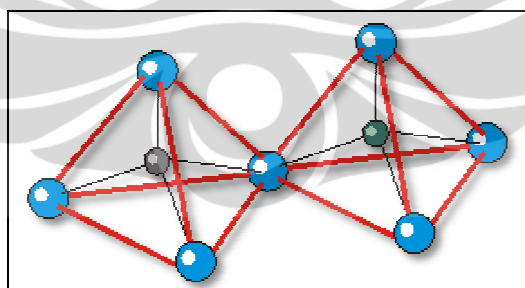
merupakan siklus biokimia dari *Nitrobacter* dalam mengoksidasi nitrit menjadi nitrat (Spieck and Bock, 2005):



Nitrobacter winogradskyi merupakan bakteri gram negatif yang berbentuk batang atau bulat dengan ukuran 0,5-0,9 x 1,0-2,0 μm . Bakteri ini bergerak menggunakan flagel. Pertumbuhan litoautotrof 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. Kebanyakan bakteri pengoksidasi nitrit tumbuh sangat baik pada konsentrasi nitrit sebesar 2-30 mM pada kisaran pH 7,5-8,0 dan suhu 25-30 $^{\circ}\text{C}$ (Spieck and Bock, 2005).

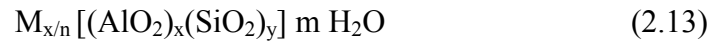
2.6. Zeolit

Zeolit merupakan kelompok mineral aluminosilikat yang mempunyai struktur yang khas, permukaan yang luas, dan muatan negatif yang tinggi. Sehubungan dengan sifat-sifat tersebut, bahan ini dapat digunakan sebagai penyerap unsur atau senyawa yang tidak diinginkan seperti logam-logam berat, diantaranya Pb, Hg, dan Cu (Mulyanto and Suwardi, 2006).



Gambar 2.6. Kerangka dasar tetrahedral pada struktur zeolit (Las, 2006)

Gambar diatas merupakan kerangka dasar struktur zeolit yang terdiri dari unit-unit tetrahedral $[\text{AlO}_4]$ dan $[\text{SiO}_4]$ yang saling berhubungan melalui atom O (Barrer, 1987). Dalam struktur zeolit, Si^{4+} dapat diganti Al^{3+} , sehingga rumus umum komposisi zeolit (Smart et al., 2001) dapat dinyatakan 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

Zeolit memiliki struktur berongga dan biasanya rongga ini berisi air dan kation-kation yang dapat dipertukarkan dan memiliki ukuran pori tertentu. Jika kristal zeolit dipanaskan pada suhu 300-400⁰C, maka molekul-molekul air tersebut akan keluar sehingga zeolit dapat berfungsi sebagai penyerap gas sebanyak 30% dari berat keringnya (Maulidyasti, 2008). Daya adsorpsi zeolit yang tinggi inilah yang dimanfaatkan dalam sistem biofiltrasi untuk menyerap kontaminan yang tidak diinginkan.

Proses aktivasi zeolit alam dapat dilakukan dengan 2 cara, yaitu secara fisika dan kimia. Proses aktivasi secara fisika dilakukan melalui pemanasan dengan tujuan untuk menguapkan air yang terperangkap di dalam pori-pori kristal zeolit, sehingga luas permukaannya bertambah (Khairinal, 2000). Sedangkan proses aktivasi secara kimia dilakukan dengan memberikan perlakuan asam HCl sehingga menyebabkan zeolit mengalami dealuminasi dan dekationisasi yaitu keluarnya Al dan kation-kation dalam kerangka zeolit. Aktivasi secara kimia ini bertujuan untuk membersihkan permukaan pori, membuang senyawa pengotor dan mengatur kembali letak atom yang dapat dipertukarkan. Proses aktivasi zeolit dengan aktivasi asam menyebabkan terjadinya dekationisasi yang menyebabkan bertambahnya luas permukaan zeolit karena berkurangnya pengotor yang menutupi pori-pori zeolit. Luas permukaan yang bertambah diharapkan meningkatkan kemampuan zeolit dalam proses penyerapan (Weitkamp and Puppe, 1999).

2.7. State of The Art

Di bawah ini adalah pemetaan penelitian biofiltrasi emisi gas polutan yang sudah pernah dilakukan, baik oleh instansi dalam negeri maupun luar negeri. Pemetaan diklasifikasi berdasarkan media alam yang dipakai, serta melalui jenis gas polutan yang didegradasi.

		Media Filter		
		Kompos	Karbon Aktif	Zeolit
Gas Polutan	N_2O	Utami et al., 2009, 2010, 2011	Purnamasari and Ayyun, 2012	Penelitian ini
	NO_x	Yang et al., 2007		
	NH_3	Pagans et al., 2005	McConnel et al., 2008	Stoekinger, 2004
	H_2S	Wahyuni et al., 2004	Wahyuni et al., 2004	Maulidyasti, 2008
Morgan- Sagastume et al., 2003		Lee et al., 2000		

Gambar 2.7. State of the Art Biofiltrasi Berbagai Polutan

Pemetaan penelitian mengenai biofiltrasi N_2O yang telah dilakukan Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia dimuat dalam Gambar 2.8.

		Biofiltrasi	Adsorpsi
Media Filter	Zeolit Alam Lampung teraktivasi	Penelitian ini	
	Karbon aktif	Purnamasari 2012; Ayyun, 2012	
	Kompos kambing	Adriaty, 2009; Linda, 2010; Arisantoro, 2010; Sagala, 2010	Sanjaya, 2010
	Kompos sapi	Filayuri, 2009; Noviani, 2009	
	Pupuk kandang	Simanjuntak, 2008	

Gambar 2.8. *State of the Art* Biofiltrasi N_2O Riset Grup Teknologi Bioproses

2.7.1. Biofiltrasi N_2O

Penelitian mengenai biofiltrasi gas N_2O 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 menggunakan berbagai jenis media, diantaranya pupuk kandang, kompos sapi, dan kompos kambing. Variasi media filter ini dilakukan untuk membandingkan efisiensi reduksi N_2O . Meskipun kaya akan kandungan nutrisi, pupuk kompos mengandung berbagai jenis bakteri, termasuk bakteri nitrifikasi dan denitrifikasi sehingga belum dapat diketahui dengan pasti jenis mikroba yang lebih berperan dalam mereduksi N_2O . Oleh karena itu pada tahun 2012, dilakukan penelitian menggunakan media filter murni berupa Zeolit Alam Lampung teraktivasi (Widhyastuti, 2012; Putri, 2012) serta karbon aktif (Purnamasari, 2012; Ayyun, 2012) dengan tambahan inokulasi bakteri penitrifikasi *Nitrobacter winogradskyi*. Pada penelitian ini juga diperoleh model adsorpsi pada lapisan

biofilm di permukaan media berdasarkan persamaan adsorpsi isoteremis *Langmuir* dan *Freundlich*.

2.7.2. Biofiltrasi NO_x

Yang et al. (2007) melakukan penelitian untuk mereduksi kontaminan NO dari udara. Dalam penelitian ini ditinjau pengaruh konsentrasi NO dan O₂ ketinggian kolom, laju alir, dan sumber karbon eksternal terhadap efisiensi reduksi NO. Hasil yang diperoleh, antara lain efisiensi reduksi NO terbaik dihasilkan pada keadaan anaerob, dimana efisiensinya dapat mencapai 99% dan daya reduksi NO akan semakin meningkat seiring semakin panjang kolom biofilter yang digunakan karena waktu kontak yang lebih lama (Yang et al., 2007).

2.7.3. Biofiltrasi NH₃

Pagans et al. (2005) melakukan studi mengenai pemanfaatan kompos sebagai media filter untuk menghilangkan ammonia dari gas proses pengomposan. Efisiensi penghilangan amonia mencapai 95,9% (Pagans et al., 2005).

McConnel et al. (2008) mengevaluasi kemampuan *polyvinyl alcohol* (PVA) yang melapisi partikel karbon aktif sebagai media biofiltrasi. Biofilter PVA mampu menghilangkan 80% ammonia dalam udara. Namun demikian, biofilter ini menghasilkan N₂O yang merupakan gas rumah kaca (McConnell et al., 2008).

Stoekinger (2004) mengevaluasi penghilangan bau pada gudang babi yang diwakili oleh gas model amonia menggunakan teknologi biofilter dengan media filter zeolit. Sampel menunjukkan bahwa sistem biofilter ini mampu menghilangkan kandungan NH₃ mencapai 90%. *Nitrite assay* dan analisis *Polymer Chain Reaction* (PCR) membuktikan bahwa populasi bakteri penitrifikasi *Nitrosomonas* mampu melekat dan tumbuh pada permukaan zeolit. Metode adsorpsi *cotton swatch* dan panel bau menunjukkan bahwa biofilter dengan media zeolit ini mampu menghilangkan bau dari gudang babi hingga 70% (Stoekinger, 2004).

2.7.4. Biofiltrasi H₂S

Wahyuni et al. (2004) meneliti mengenai karakterisasi penghilangan hidrogen sulfida menggunakan media filter berupa kompos dan karbon aktif. Wahyuni membandingkan laju penghilangan H₂S oleh kompos, karbon aktif, dan campuran keduanya (1:1) tanpa perlakuan biologis dan dengan perlakuan biologis. Hasilnya laju penghilangan H₂S dari seluruh material pengisi setelah diinokulasi oleh kultur campuran *Thiobacillus* sp. mengalami peningkatan disebabkan oksidasi biologi oleh *Thiobacillus* sp. Media campuran kompos dan karbon aktif menunjukkan hasil terbaik untuk menghilangkan H₂S dari udara yang terkontaminasi (Wahyuni et al., 2004).

Tabel 2.2. Kemampuan penyerapan sulfur pada ketiga bahan pengisi (Wahyuni et al., 2004)

Jenis bahan pengisi	Penyerapan sulfur (g-S/kg bahan kering)	Rentang konsentrasi (ppm)	Lama operasi (Jam)
Kompos	0,22	0-22	2,6
Arang aktif	0,37	0-26	11
Campuran (1:1)	0,87	0-25	22

Lee et al. (2000) memeriksa pengaruh dari imobilisasi bakteri dalam karbon aktif dalam penghilangan H₂S. Mikroba yang digunakan pada sistem biofiltrasi ini adalah *Thiobacillus* ASWW-2. Hasil penelitian menunjukkan kapasitas penghilangan H₂S lebih besar pada karbon aktif yang terimobilisasi mikroba dibandingkan karbon aktif yang dikontrol dalam kolom biofilter jenis batch. Selain itu, pH awal media mampu mempengaruhi laju oksidasi sulfur oleh *Thiobacillus* ASWW-2 (Lee et al., 2000).

Tabel 2.3. Laju oksidasi sulfur oleh *Thiobacillus* ASWW-2 pada berbagai variasi pH awal media
(Lee et al., 2000)

pH awal	Laju oksidasi sulfur (g-S/L.d)
2	0,50
3	0,58
4	0,61
5	0,49
6	0,46
7	0,46
8	0,39

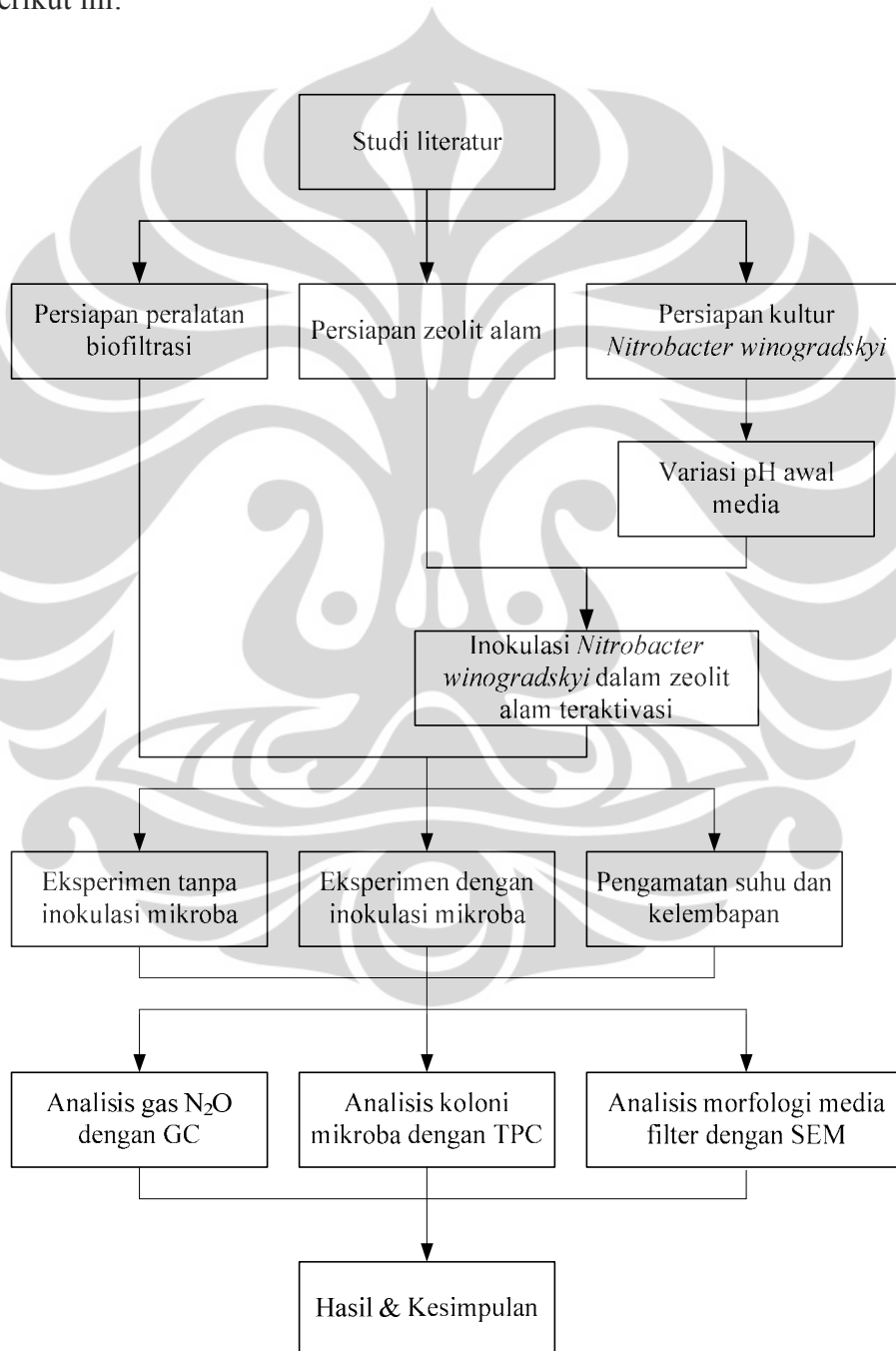
Morgan-Sagastume et al. (2003) menunjukkan bahwa efisiensi reduksi H₂S pada biofilter dengan media dipengaruhi oleh pengeringan, *channeling*, dan reduksi area permukaan yang spesifik. Dengan menggunakan media campuran, efisiensi penghilangan dapat mencapai hingga mendekati 100%. Untuk menghindari *channeling*, juga untuk memperoleh kelembapan yang tetap pada media, ukuran partikel dan distribusi gas, kekosongan fraksi, dan homogenitas yang umum, Morgan-Sagastume menyarankan untuk melakukan pencampuran media secara berkala dengan penambahan air yang terkontrol (Morgan-Sagastume et al., 2001).

Maulidyasti (2008) melakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui efektivitas biofiltrasi H₂S menggunakan media zeolit alam yang diinokulasi oleh bakteri *Thiobacillus thioparus*. Hasil penelitian menunjukkan terjadi peningkatan degradasi H₂S dengan penggunaan zeolit yang diinokulasikan oleh bakteri *Thiobacillus thioparus* sebesar 33,54% dibandingkan sistem biofiltrasi tanpa penambahan *Thiobacillus thioparus* (Maulidyasti, 2008).

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian mengenai biofiltrasi N_2O akan dilakukan berdasarkan diagram alir berikut ini:



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

Penelitian berlokasi di Laboratorium Rekayasa Bioproses, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Peralatan penelitian yang digunakan merupakan peralatan berskala laboratorium dan telah digunakan pada penelitian sebelumnya. Tahap awal penelitian dimulai dengan melakukan studi literatur dari berbagai jurnal nasional dan internasional, terkait biofiltrasi gas dinitrogen monoksida.

Persiapan penelitian terdiri dari persiapan kultur bakteri *Nitrobacter winogradskyi* di dalam tiga jenis media yaitu media broth, agar, dan sintetik; persiapan Zeolit Alam Lampung sebagai media filter dengan cara diaktivasi setelah diayak terlebih dahulu; dan persiapan peralatan biofiltrasi, yaitu pengecekan kebocoran biofilter untuk memastikan reduksi konsentrasi N_2O benar diakibatkan oleh adsorpsi dan degradasi, serta kalibrasi N_2O untuk mengetahui konsentrasi aktual dan waktu retensi N_2O . Selanjutnya dilakukan proses inokulasi kultur bakteri yang telah siap ke dalam media filter teraktivasi.

Eksperimen biofiltrasi bertujuan untuk menentukan pH awal media yang optimum dalam biofiltrasi dinitrogen monoksida dan mengkaji pengaruh inokulasi *Nitrobacter winogradskyi* pada Zeolit Alam Lampung terhadap kemampuan degradasi polutan dinitrogen monoksida. Konsentrasi gas masukan dan keluaran dari kolom biofilter dianalisis menggunakan *Gas Chromatography* (GC) untuk menentukan *removal efficiency* (efisiensi penghilangan) N_2O . Kelembapan media filter, serta suhu media filter diamati menggunakan *thermo-hygro meter*. Jumlah mikroba dihitung dengan metode *Total Plate Count* (TPC) untuk mengetahui perkembangan populasi bakteri. Morfologi media filter dianalisis menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Pada tahap akhir dilakukan analisis hasil dan penarikan kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan.

3.2. Sistem Biofilter

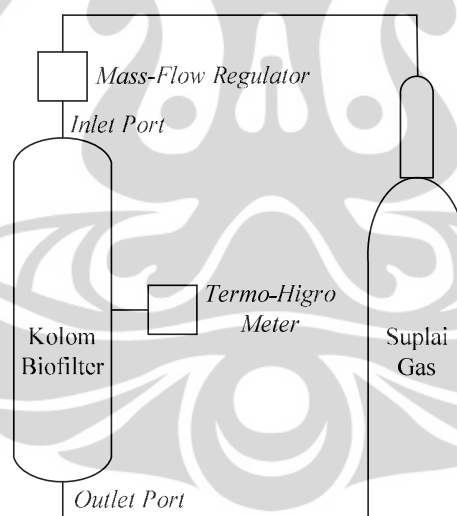
Sistem biofilter yang digunakan pada percobaan ini adalah sistem peralatan biofilter yang telah digunakan oleh Utami et al. (2009) dengan adanya penambahan instalasi *mass-flow regulator* dan *thermo-hygro meter* pada kolom biofilter. Sistem biofilter terdiri dari tabung gas N_2O dengan konsentrasi 15000 ppm dalam udara sebagai gas masukan, kolom biofilter sebagai tempat

Universitas Indonesia

terjadinya biofiltrasi, *mass-flow regulator* untuk mengatur laju alir dari gas N_2O yang masuk, *thermo-hygro meter* untuk mengetahui suhu dan kelembapan di dalam kolom biofilter, perpipaan yang menghubungkan seluruh sistem biofilter, dan *sampling port* sebagai tempat pengambilan sampel percobaan. Kolom biofilter terbuat dari kaca *acrylic* dengan tinggi 120 cm, diameter luar 8 cm, dan tebal bahan 0,325 cm.

Aliran yang digunakan dalam percobaan ini adalah aliran *down-flow mode* yang mengalir dari bagian atas menuju bagian bawah kolom biofilter dengan tujuan untuk meningkatkan kontrol terhadap kelembapan (Pagans et al., 2005) agar media filter dapat menahan air lebih lama. Sistem perpipaan dalam biofilter menggunakan *stainless steel* karena jenis bahan ini tahan terhadap korosi (Yang et al., 2007).

Skema biofilter dapat dilihat pada Gambar 3.2. Perangkat GC dan sistem biofilter yang digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.2. Skema sistem biofilter



Gambar 3.3. Perangkat GC dan sistem biofilter

Keterangan:

1. *Gas Chromatography* Merk Shimadzu Seri 8A
2. *Printer GC* Merk Shimadzu seri 6
3. Kolom biofilter
4. *Thermo-hygro meter*
5. *Mass-flow regulator*
6. Sampling port atas (*inlet*)
7. Sampling port bawah (*outlet*)
8. Tabung gas N₂O

3.3. Alat dan Bahan

Dalam penelitian biofiltrasi N₂O dengan media filter berupa Zeolit Alam Lampung yang diinokulasi oleh *Nitrobacter winogradskyi*, digunakan sejumlah alat dan bahan penelitian. Penjelasan berikut ini memuat daftar alat dan bahan yang digunakan.

Universitas Indonesia

3.3.1. Alat

Rincian peralatan yang digunakan dalam penelitian biofiltrasi terdapat pada tabel di bawah ini, yaitu:

Tabel 3.1. Daftar alat penelitian

No.	Alat	Fungsi
1.	Sistem biofilter	Tempat pengujian biofiltrasi gas N ₂ O
2.	Saringan	Alat untuk homogenasi ukuran zeolit alam
3.	Ember	Wadah untuk menyimpan zeolit alam, tempat kultur bakteri dalam media sintetik dan perendaman zeolit selama inokulasi
4.	Pengaduk kayu	Alat untuk mengaduk zeolit alam saat di-treatment dengan HF
5.	Oven	Penghilangan uap air dan HF dari zeolit, sterilisasi cawan petri
6.	Loyang	Wadah untuk zeolit di dalam oven
7.	pH <i>meter</i> dan pH <i>indicator</i>	Alat untuk mengukur pH media sintetik
8.	Corong	Alat untuk membantu media filter dimasukkan ke dalam kolom biofilter
9.	Spatula	Alat untuk mengambil bahan yang akan ditimbang, mengaduk media sintetik
10.	Kaca arloji	Wadah untuk menimbang bahan
11.	Timbangan	Alat untuk menimbang bahan
12.	Gelas <i>beaker</i>	Wadah untuk air distilasi dan peralatan yang akan dipresto, wadah untuk membuat media broth dan agar ketika dimasak dengan <i>hot plate stirrer</i> , wadah untuk membuat larutan HF
13.	Erlenmeyer	Wadah untuk media broth dan agar ketika disterilisasi dengan <i>pressure cooker</i>
14.	Gelas ukur	Alat untuk mengukur larutan sesuai jumlah yang dibutuhkan

Tabel 3.2. Daftar alat penelitian (lanjutan)

No.	Alat	Fungsi
15.	<i>Hot plate</i>	Alat untuk memasak media broth dan agar
16.	Cawan petri	Wadah untuk mengkultur bakteri dalam media agar
17.	Tabung reaksi	Wadah untuk mengkultur bakteri dalam media broth
18.	<i>Magnet stirrer</i>	Alat untuk membantu pengadukan selama proses pemasakan dengan hot plate
19.	<i>Pressure cooker</i>	Alat untuk sterilisasi sampel yang difungsikan seperti autoklaf
20.	Bunsen	Memanaskan peralatan (sterilisasi) yang digunakan di dalam transfer box
21.	Jarum ose	Alat untuk mengambil sampel bakteri yang akan dikultur
22.	Gas trap	Alat untuk kalibrasi konsentrasi N ₂ O
23.	<i>Bubble soap</i>	Kalibrasi laju alir He
24.	GC (<i>Gas Chromatography</i>)	Alat untuk menganalisis konsentrasi N ₂ O
25.	<i>Syringe</i>	Alat untuk mengambil sampel N ₂ O
26.	<i>Transfer box</i>	Tempat untuk membuat kultur bakteri
27.	Inkubator	Tempat untuk menginkubasi bakteri
28.	Lemari asam	Tempat untuk membuat larutan HF
29.	Botol vial	Wadah untuk menyimpan sampel

3.3.2. Bahan

Rincian bahan yang digunakan dalam penelitian biofiltrasi dinitrogen monoksida ini adalah sebagai berikut:

1. Zeolit Alam Lampung sebagai media filter.
2. *Nitrobacter winogradskyi* sebagai bakteri pendegradasi N₂O.
3. Gas sampel N₂O dengan konsentrasi sebesar 15000 ppm dalam udara.
4. Gas Helium sebagai gas pembawa dalam kolom kromatografi.

5. Aquades sebagai pelarut dalam media agar, broth, dan sintetik, serta sebagai pelarut HF.
6. Nutrien broth sebagai media kultur pertama untuk *Nitrobacter winogradskyi*.
7. Nutrien agar sebagai media kultur kedua untuk *Nitrobacter winogradskyi*.
8. Media sintetik sebagai media kultur ketiga untuk *Nitrobacter winogradskyi* dengan komposisi (IFO, 2000), yaitu NaNO₂ (1 gram), NaCl (0,3 gram), K₂HPO₄ (0,5 gram), MgSO₄.7H₂O (0,5 gram), MnCl₂ (0,02 gram), FeSO₄ (0,005 gram) dan Aquades (1 liter).

3.4. Persiapan Penelitian

Persiapan penelitian terdiri dari tiga tahap, yaitu tahap persiapan peralatan biofiltrasi, tahap persiapan media filter, serta tahap persiapan kultur bakteri dan inokulasi dalam media filter.

3.4.1. Persiapan Peralatan Biofiltrasi

A. Uji Kebocoran Biofilter

Uji kebocoran dilakukan untuk menghindari ketidakakuratan data percobaan sehingga dapat dipastikan bahwa konsentrasi gas N₂O berkurang karena biofiltrasi di dalam kolom, bukan karena kebocoran. Indikasi terjadinya kebocoran, yaitu timbulnya gelembung-gelembung atau buih sabun ketika ditetesi dengan busa sabun. Uji kebocoran dapat dilakukan menggunakan busa sabun dengan prosedur sebagai berikut:

1. Meletakkan busa sabun pada *port* atas, *port* bawah, serta daerah persambungan pipa.
2. Mengalirkan gas N₂O ke dalam kolom biofilter.
3. Mengecek ada tidaknya buih sabun, apabila terbentuk buih berarti terjadi kebocoran.
4. Mengencangkan kembali daerah persambungan pipa jika terdapat kebocoran.
5. Melakukan pengecekan ulang dengan busa sabun. Jika tidak terbentuk buih maka alat siap digunakan.

Selain menggunakan busa sabun, uji kebocoran juga dapat dilakukan menggunakan uji waktu tinggal atau EBRT (*Empty Bed Time Residence*), yang dikenal juga dengan nama uji blangko. Berikut ini prosedur uji blangko:

1. Mengalirkan gas N₂O ke dalam kolom biofilter tanpa diisi media filter.
2. Mengambil sampel gas N₂O pada *sampling port inlet* dan *sampling port outlet*.
3. Melakukan analisis pada kromatografi gas.
4. Mengeplot grafik antara luas *peak* N₂O pada *sampling port inlet* dan *sampling port outlet* sampai konsentrasi pada *sampling port inlet* sama dengan konsentrasi *sampling port outlet*.
5. Jika tidak terjadi kebocoran pada alat biofiltrasi maka waktu aktual ketika luas *peak* N₂O pada *sampling port inlet* sama dengan *sampling port outlet* akan hampir sama dengan waktu teoritis.

Berikut ini persamaan yang digunakan dalam uji EBRT:

$$EBRT = \frac{\pi \times R^2 \times t}{Q} \quad (3.1)$$

Dengan:

R : Jari-jari dinding dalam kolom biofilter (cm) = 3,675 cm

t : Tinggi kolom biofilter (cm) = 120 cm

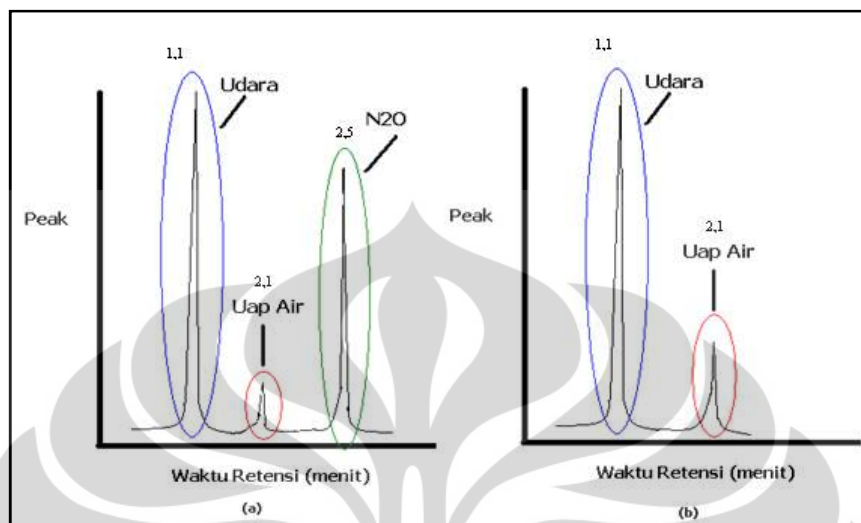
Q : Laju alir gas N₂O (cc/menit) = 88 cc/menit

B. Kalibrasi Konsentrasi Gas N₂O

Kalibrasi gas N₂O bertujuan untuk mengetahui waktu retensi, luas *peak*, dan konsentrasi dari gas N₂O, udara, dan uap air sebelum eksperimen dilakukan. Berikut ini prosedur uji kalibrasi gas N₂O:

1. Mengalirkan gas N₂O ke dalam *gas trap* yang kemudian ditutup dengan rapat.
2. Sampel diambil dari *gas trap* dengan menggunakan *syringe*, di mana volume gas yang diambil divariasikan dari 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; dan 1,0 ml.
3. *Syringe* diinjeksikan ke dalam *Gas Chromatography* (GC).
4. Membuat plot antara volume gas N₂O terhadap luas *peak* N₂O sehingga didapat garis linear.

5. Kalibrasi gas N_2O dilakukan dengan pengambilan data sebanyak dua kali (metode duplikasi) untuk memastikan keakuratan hasil kalibrasi gas N_2O .



Gambar 3.4. Kurva yang terdeteksi pada: (a) Gas N_2O dan (b) Udara bebas oleh GC

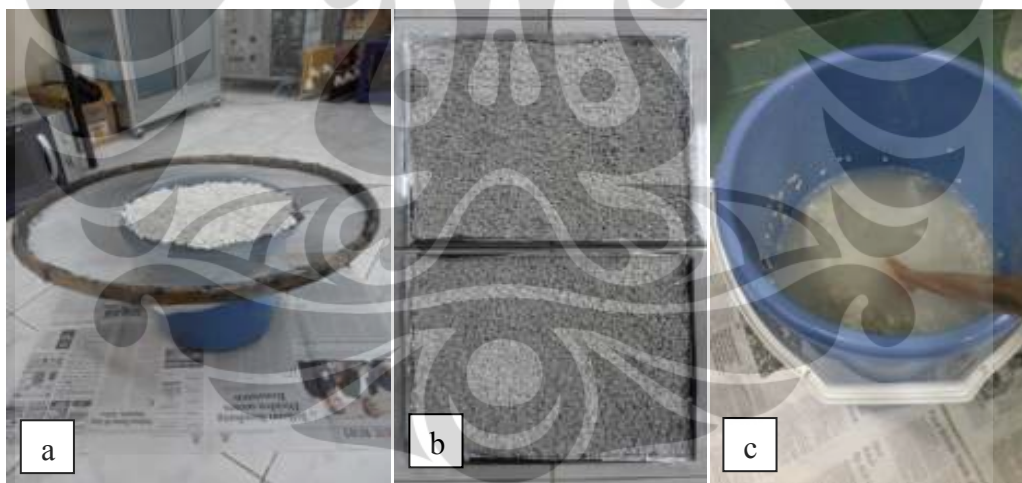
Gambar di atas merupakan contoh pembacaan hasil GC pada sampel gas N_2O dengan volume 1,0 ml. Waktu retensi dari gas N_2O diketahui dengan cara membandingkan kurva yang terdeteksi pada gas N_2O dengan kurva pada udara bebas karena gas N_2O yang digunakan memiliki konsentrasi 15000 ppm dalam udara sehingga digunakan udara bebas sebagai pembanding. Gambar 3.4. menunjukkan bahwa pada udara bebas hanya terdeteksi dua buah *peak*, yaitu udara dan uap air dengan waktu retensi berturut-turut sebesar 1,1 dan 2,1. Sedangkan pada gas N_2O terdeteksi tiga buah *peak* di mana dua buah *peak* yang terbentuk sama dengan hasil *peak* pada udara bebas, sehingga dapat dipastikan bahwa sebuah *peak* lainnya dengan waktu retensi sebesar 2,5 merupakan *peak* dari gas N_2O .

3.4.2. Persiapan Media Filter

Media filter yang digunakan pada penelitian ini adalah zeolit alam klinoptilolit yang dibeli dari CV Mina Tama, Bandar Lampung, Indonesia yang memiliki nama dagang ZKK (Zeo Kap Kan) dengan ukuran partikel P-4 yaitu 5 mm hingga 7,5 mm. Persiapan awal zeolit alam dilakukan dengan cara pengayakan menggunakan saringan untuk mendapatkan ukuran media filter yang

seragam. Setelah itu, zeolit diaktivasi melalui penghilangan uap air dan dealuminasi dengan tujuan untuk memperluas permukaan adsorpsi. Berikut ini prosedur untuk mengaktivasi zeolit:

1. Memanaskan zeolit alam dalam oven bersuhu 110°C selama 2 jam untuk menghilangkan kandungan airnya.
2. Merendam zeolit alam yang sudah kering dalam larutan HF 3% dengan volume 3,5 L untuk setiap 4 kg zeolit alam (massa zeolit yang dibutuhkan untuk sekali pengujian) untuk ketinggian media filter di dalam kolom mencapai 100 cm.
3. Mengaduk zeolit alam yang direndam dalam larutan HF 3% menggunakan pengaduk kayu selama 20 menit.
4. Menyaring dan membilas zeolit alam sebanyak dua kali dengan aquades, lalu mengeringkannya dalam oven selama 3 jam pada suhu 150°C .
5. Menyimpan zeolit alam dalam wadah yang tertutup rapat untuk menghindari adanya uap air yang masuk ke dalam pori-porinya.



Gambar 3.5. Persiapan media filter: (a) Homogenasi zeolit, (b) Zeolit yang telah dikalsinasi, dan (c) Dealuminasi zeolit dengan larutan HF 3%

Gambar 3.5. merupakan dokumentasi kegiatan selama persiapan media filter. Dealuminasi dilakukan melalui pencucian zeolit dengan asam kuat. Proses ini menyebabkan pergeseran tetrahedral aluminium dari posisi rangka ke posisi non rangka tetapi tidak menghilangkan aluminium dari zeolit (Yuliusman et al., 2010). Aktivasi asam juga menyebabkan terjadinya dekationisasi sehingga

Universitas Indonesia

mengurangi jumlah pengotor yang menutupi pori-pori zeolit (Weitkamp and Puppe, 1999). Dealuminasi dan dealkalinisasi dapat meningkatkan porositas dan kapasitas adsorpsi, serta memperpanjang hidup adsorber (Ackley et al., 2003). Porositas media filter yang tinggi berguna untuk memperlancar distribusi homogen dari gas (Kumar et al., 2011).

3.4.3. Persiapan kultur *Nitrobacter winogradskyi*

Persiapan kultur bakteri terdiri dari kultur bakteri pada media agar, media broth, dan media sintetik berikut inokulasi bakteri ke dalam zeolit alam. Kultur bakteri dilakukan untuk mendapatkan bakteri terbaru setiap melakukan uji degradasi sehingga diperoleh kondisi optimal bakteri dalam mereduksi gas. Di bawah ini terdapat penjelasan tiap tahap kultur bakteri.

A. Penanaman pada Media Broth

1. Membuat Nutrien Broth (NB) cair dengan prosedur sebagai berikut:
 - a. Menyiapkan bubuk NB sebanyak 0,4 gram.
 - b. Menyiapkan aquades sebanyak 50 ml.
 - c. Mencampur bubuk NB dan aquades sambil dipanaskan dan diaduk menggunakan *hot plate stirrer* pada suhu 100°C selama 15 menit dengan kecepatan 5 rpm.
 - d. Mensterilkan larutan menggunakan *pressure cooker* selama 20 menit.
2. Melarutkan isolat bakteri ke dalam NB cair (untuk tahap awal). Atau mengambil sampel bakteri dari NB cair lama menggunakan jarum ose yang telah disterilkan, lalu dicelup ke dalam NB cair baru (untuk perbanyak).
3. Mengaduk NB cair dengan batang strik lalu menutupnya dengan rapat dan menyimpannya dalam inkubator pada suhu 37°C selama 24 jam.

Tujuan dari kultur bakteri di dalam media broth ialah untuk peremajaan kultur. Nutrien broth mengandung semua senyawa penting untuk pertumbuhan bakteri. Pertumbuhan di dalam media broth bertujuan agar mikroba dapat tumbuh menyebar ke seluruh media dan mengalami pencampuran sempurna (Petunjuk Praktikum Mikrobiologi Dasar, 2008).

Hasil yang didapat dari kultur pertumbuhan di dalam media broth setelah diinkubasi ialah kultur berubah menjadi keruh secara merata dan terbentuknya semacam gumpalan putih kekuningan yang mengendap di dasar permukaan tabung reaksi dan mengambang di bagian atas dari media cair seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.6.b. Gumpalan ini merupakan indikator bahwa bakteri berhasil tumbuh, di mana gumpalan yang mengendap menandakan bahwa bakteri yang dikultur adalah jenis anaerob, sedangkan gumpalan yang mengambang menandakan bahwa bakteri yang dikultur adalah jenis aerob. Dengan demikian, *Nitrobacter winogradskyi* merupakan jenis bakteri dapat yang dapat hidup secara aerob dan anaerob (Spieck and Bock, 2005). Semakin lama waktu inkubasi akan menghasilkan kultur bakteri yang semakin keruh.



Gambar 3.6. Dokumentasi kultur bakteri dalam media broth: (a) Proses pengkulturan bakteri di dalam media broth dan (b) Hasil kultur di dalam media broth setelah inkubasi 24 jam

B. Penanaman pada Media Agar

1. Membuat Nutrien Agar (NA) cair dengan prosedur sebagai berikut:
 - a. Menyiapkan bubuk NA sebanyak 2,3 gram.
 - b. Menyiapkan aquades sebanyak 100 ml.
 - c. Mencampur bubuk NA dan aquades sambil dipanaskan dan diaduk menggunakan *hot plate stirrer* pada suhu 150°C selama 30 menit dengan kecepatan 5 rpm.
 - d. Mensterilkan larutan menggunakan *pressure cooker* selama 20 menit.

2. Mengambil sampel bakteri dari NB menggunakan jarum ose yang telah disterilkan kemudian mengoleskannya pada NA padat secara zig-zag.
3. Menutup rapat cawan petri lalu menyimpannya dalam inkubator pada suhu 37°C selama 24 jam.

Bakteri di kultur dalam media agar melalui teknik penanaman dengan goresan secara berliku-liku (zig-zag), di mana goresan dibuat secara sinambung seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.7.c. Tujuan dari goresan yang sinambung ini bukan untuk mendapatkan koloni tunggal melainkan untuk peremajaan kultur ke dalam media baru atau ke cawan (Petunjuk Praktikum Mikrobiologi Dasar, 2008).



Gambar 3.7. Dokumentasi kultur bakteri dalam media agar: (a) Proses pembuatan media agar menggunakan *hot plate stirrer*, (b) Proses pengkulturan bakteri di dalam media agar, dan (c) Hasil kultur di dalam media agar setelah inkubasi 24 jam

C. Penanaman pada Media Sintetik

Pada tahap ini, sebelum dilakukan penanaman bakteri, terlebih dahulu dilakukan variasi pH pada media sintetik yang bertujuan untuk mendapatkan nilai pH awal media filter yang optimum terhadap performansi biofilter. Selain itu, pada tahap ini juga dilakukan proses inokulasi bakteri ke dalam media filter. Berikut ini prosedur yang dilakukan untuk penanaman bakteri ke dalam media sintetik.

1. Membuat 3 L larutan nutrisi sintetik (volume aquades optimum dari penelitian yang telah dilakukan Nurhafizah Putri) dengan komposisi sebagai berikut untuk tiap liter pelarut:

Tabel 3.3. Komposisi nutrisi sintetik *Nitrobacter winogradskyi* Winslow et al. (IFO, 2000)

Bahan	Jumlah
NaNO ₂	1 gram
NaCl	0,3 gram
K ₂ HPO ₄	0,5 gram
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,5 gram
MnCl ₂	0,02 gram
FeSO ₄	0,005 gram
Aquades	1 liter

2. Memvariasikan pH awal media sintetik sebesar 4, 5, 6, 7, dan 8 dengan cara menambahkan larutan 1M HCl atau 1M NaOH.
3. Mengambil sampel bakteri dari NA menggunakan jarum ose yang telah disterilkan, lalu ditutup rapat dan diinkubasi selama 48 jam.
4. Merendam media filter sebanyak 4 kg ke dalam 3L larutan media sintetik yang telah dikultur oleh bakteri (inokulasi), lalu diinkubasi selama 72 jam.
5. Memisahkan media filter yang siap dipakai untuk biofiltrasi dari media sintetik.

Nutrisi sintetik berguna sebagai sumber karbon dan nutrisi anorganik bagi bakteri selama biofiltrasi dan sebagai sumber kelembapan media filter (Utami et al., 2011). Proses inokulasi bertujuan untuk menempelkan atau menanamkan bakteri pada media filter. Selain itu, inokulasi juga bertujuan untuk mengurangi waktu adaptasi yang dibutuhkan oleh bakteri saat dihadapkan pada lingkungan baru di dalam kolom biofilter, yaitu sebelum bakteri mampu memulai proses biodegradasi polutan (Arnold et al., 1997).

3.5. Eksperimen

3.5.1. Eksperimen Biofiltrasi

Setelah melalui seluruh tahapan persiapan, kemudian dilakukan eksperimen biofiltrasi. Berikut ini langkah-langkah eksperimen biofiltrasi:

1. Memasukkan media filter yang telah diinokulasi bakteri ke dalam kolom biofilter dengan kedalaman mencapai 100 cm.
2. Mengalirkan gas sampel dengan kandungan N_2O sebesar 15000 ppm dalam udara dengan laju alir yaitu 88 cc/menit selama 24 jam.
3. Mengambil gas sampel yang telah dibiofiltrasi dengan *syringe* untuk dianalisis pada kromatografi gas pada jam ke-1 hingga ke-6, serta jam ke-23 dan ke-24.

3.4.2. Eksperimen Tanpa Mikroba

Eksperimen tanpa mikroba dilakukan untuk melihat perbedaan efisiensi reduksi N_2O pada sistem tanpa inokulasi dibandingkan sistem dengan inokulasi *Nitrobacter winogradskyi* pada Zeolit Alam Lampung teraktivasi terhadap kemampuan degradasi polutan dinitrogen monoksida. Langkah eksperimen ini hampir sama dengan eksperimen biofiltrasi, namun pada eksperimen ini media filter yang digunakan tidak diinokulasi oleh bakteri.

3.4.3. Pengamatan Suhu dan Kelembapan

Pengamatan suhu dan kelembapan media filter diamati selama eksperimen biofiltrasi dengan inokulasi mikroba dan tanpa mikroba. Tujuan dari pengamatan ini ialah untuk melihat pengaruh perubahan suhu dan kelembapan media filter terhadap biofiltrasi. Pengamatan ini dilakukan dengan melihat nilai yang tertera pada *thermo-hygro meter* yang dipasang pada sistem biofilter.

3.6. Data Penelitian

Analisis data pengamatan bertujuan untuk mengetahui kemampuan adsorpsi N_2O oleh Zeolit Alam Lampung teraktivasi dan kemampuan degradasi N_2O oleh *Nitrobacter winogradskyi*. Berikut ini adalah data pengamatan yang akan dianalisis:

1. Konsentrasi gas N₂O sebelum dan setelah biofiltrasi pada jam ke-1 hingga ke-6, serta jam ke-23 dan ke-24.
2. Kelembapan media filter pada jam ke-1 hingga ke-6, serta jam ke-23 dan ke-24.
3. Suhu media filter pada jam ke-1 hingga ke-6, serta jam ke-23 dan ke-24.
4. Jumlah mikroba pada media sintetik saat ditanam bakteri (jam ke-0) dan setelah diinkubasi selama 48 jam, serta jumlah mikroba sebelum dan setelah biofiltrasi.
5. Morfologi media filter sesudah diaktivasi/sebelum diinokulasi oleh bakteri, serta sebelum dan setelah biofiltrasi.

3.6. Analisis Eksperimen Biofiltrasi

3.6.1. Analisis Gas H₂S

Kromatografi gas (GC) jenis TCD digunakan untuk mengukur konsentrasi gas N₂O masukan dan keluaran kolom biofilter. Data yang diambil dari kromatografi gas adalah, waktu retensi, luas area, dan konsentrasi N₂O. Berikut ini spesifikasi GC yang digunakan.

Tabel 3.4. Spesifikasi kromatografi gas (GC)

Merk dan Tipe	Shimadzu
Kolom	Porapak Q
Suhu Kolom Injektor	60 ⁰ C
Suhu Kolom Detektor	100 ⁰ C
Gas Carrier	He
Jenis Detektor	TCD

Prosedur pengoperasian kromatografi gas yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengalirkan gas *carrier* helium.
2. Menyalakan GC.
3. Mengatur suhu operasi detektor sebesar 130⁰C dan injektor sebesar 100⁰C.
4. Mengatur arus GC ke 160 mA.

5. Menyalakan printer kromatografi.
6. Mengatur parameter operasi (attenuasi 7).
7. GC siap pakai.

3.6.2. Analisis Perkembangan Bakteri

Metode yang digunakan pada analisis perkembangan bakteri adalah metode *Total Plate Count* (TPC). Metode ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar aktivitas degradasi dengan menghitung jumlah koloni bakteri yang terbentuk. Teknik TPC mempunyai keterbatasan, yakni koloni yang dihasilkan tidak lebih dari 30 hingga 300 koloni, dengan asumsi awal satu bakteri akan menghasilkan satu koloni. Dilusi atau pengenceran perlu dilakukan agar keakuratan penghitungan jumlah koloni bakteri dapat terjaga karena jumlah bakteri dalam sampel sangat banyak. Media yang digunakan dalam perhitungan jumlah koloni bakteri adalah nutrisi agar. Pada penelitian ini, analisis TPC dilakukan oleh Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Rasio pengenceran yang digunakan dalam analisis TPC ini ialah 10^9 hingga 10^{14} .

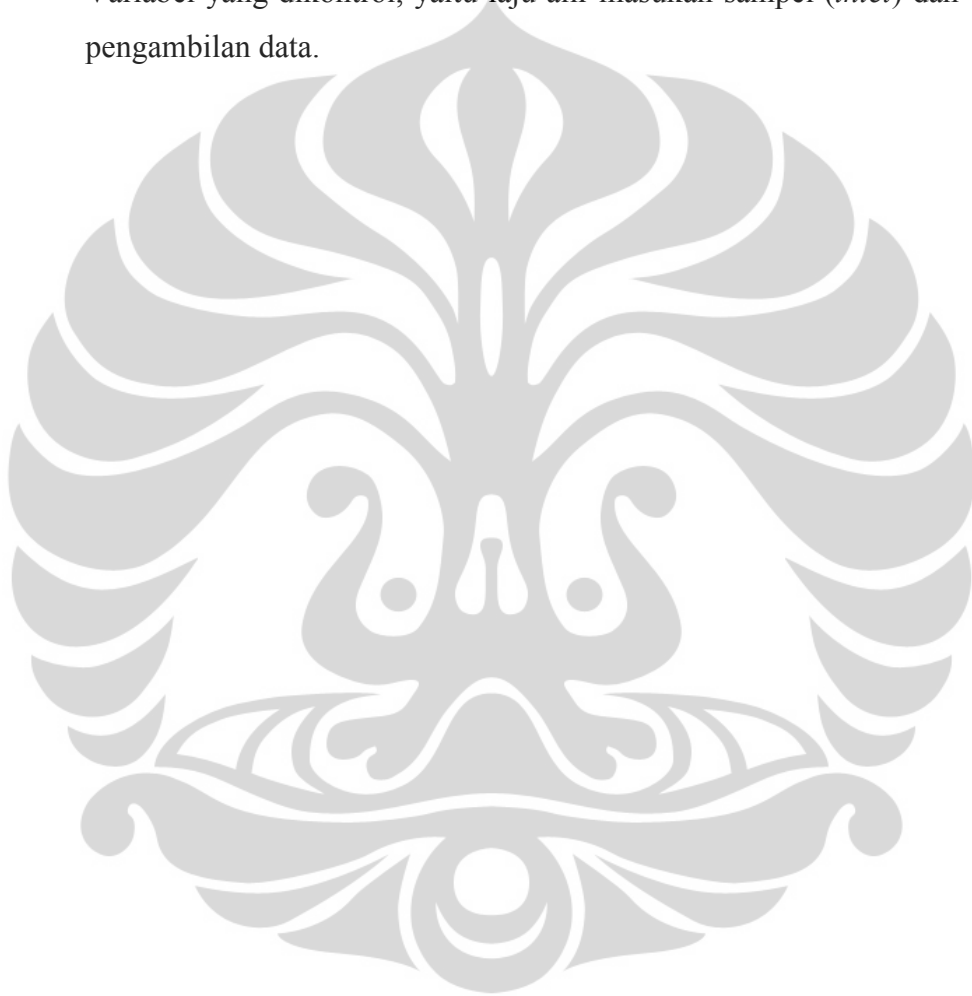
3.6.3. Analisis Morfologi Media Filter

Scanning Electron Microscopy (SEM) dilakukan untuk menganalisis morfologi dari media filter sesudah diaktivasi namun sebelum diinokulasi oleh bakteri, serta sebelum dan setelah biofiltrasi. Sampel akan di-*scan* dengan tumbukan energi tinggi dari elektron-elektron yang bergerak secara acak. Kemudian, elektron-elektron berinteraksi dengan atom dan membuat sampel mengeluarkan sinyal yang mengandung informasi mengenai topografi permukaan sampel, komposisi, dan properti lainnya seperti konduktivitas elektrik. Hasil SEM juga berguna untuk mendukung hasil TPC dalam mengetahui perkembangan populasi bakteri. Pada penelitian ini, analisis SEM dilakukan oleh Laboratorium Uji, Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Perbesaran yang digunakan pada analisis SEM ini ialah 1000 kali.

3.7. Variabel Penelitian

Berikut ini ialah variabel-variabel yang terlibat di dalam penelitian biofiltrasi dinitrogen monoksida:

- Variabel bebas, yaitu variasi pH awal media sintetik.
- Variabel terikat, yaitu efisiensi reduksi gas N_2O , kelembapan media filter, suhu media filter, jumlah populasi mikroba, serta morfologi media filter.
- Variabel yang dikontrol, yaitu laju alir masukan sampel (*inlet*) dan waktu pengambilan data.



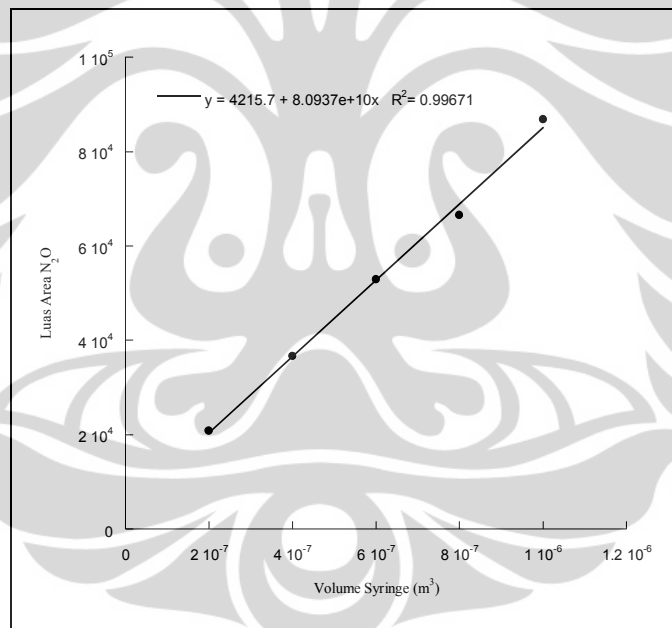
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas tentang hasil dan analisis penelitian dari seluruh data yang didapatkan sehingga diperoleh suatu kesimpulan yang sesuai dengan tujuan penelitian.

4.1. Hasil Kalibrasi Gas N₂O

Grafik pada Gambar 4.7. merupakan hasil kalibrasi gas N₂O yang menunjukkan hubungan antara luas area N₂O terhadap volume N₂O di dalam *syringe*.



Gambar 4.1. Grafik hasil kalibrasi gas N₂O

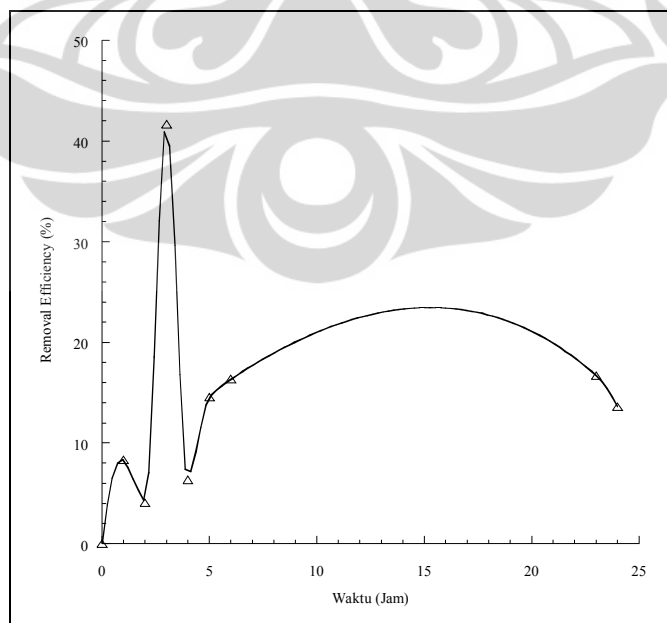
Dari gambar di atas dihasilkan persamaan linear $y = 8 \times 10^{10} x + 4215,7$. Kemudian persamaan kalibrasi gas N₂O tersebut digunakan untuk mengetahui volume dan konsentrasi gas N₂O aktual dalam perhitungan.

4.2. Uji Kinerja Biofilter

Pada bagian ini akan dianalisis mengenai kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O yang ditunjukkan oleh penurunan luas area di bawah *peak* untuk setiap waktu tertentu, di mana penurunan luas area sebanding dengan penurunan konsentrasi (Harris, 1995). Biofiltrasi pada penelitian ini dilakukan selama 24 jam dan reduksi N_2O dianalisis menggunakan GC. Laju alir yang digunakan sebesar 88 cc/menit di mana nilai ini didasarkan pada laju alir optimum biofiltrasi (Utami et al., 2009). Kedalaman media yang digunakan sebesar 100 cm yang juga didasarkan pada penelitian Utami et al. (2009).

4.2.1. Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N_2O

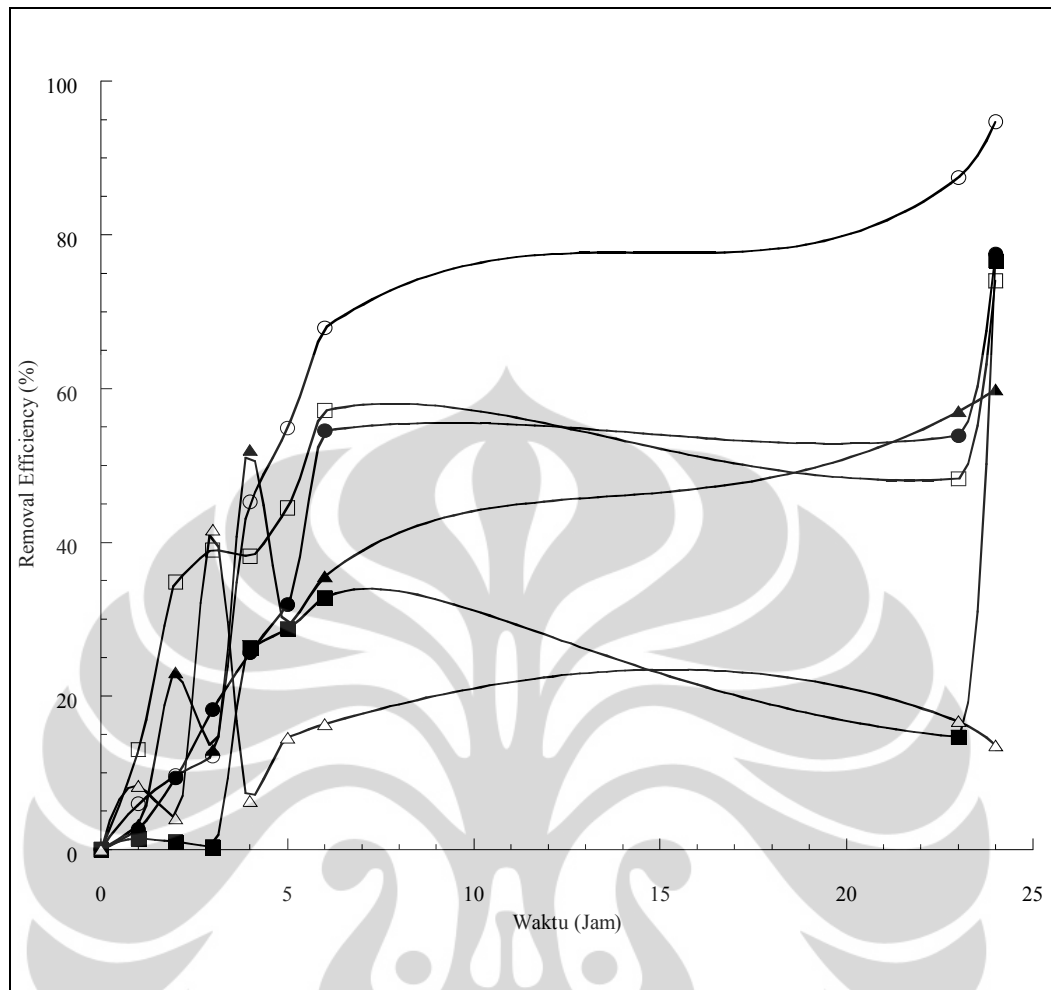
Pada uji kinerja biofilter ini, dilakukan dua jenis percobaan biofiltrasi, yaitu biofiltrasi tanpa inokulasi mikroba dan biofiltrasi dengan inokulasi mikroba yang pH awal medianya divariasikan. Biofiltrasi tanpa inokulasi mikroba dikaji untuk mengetahui tingkat adsorpsi dari Zeolit Alam Lampung teraktivasi dalam mereduksi gas N_2O . Grafik pada Gambar 4.2. menunjukkan efisiensi reduksi N_2O yang dihasilkan dari biofiltrasi tanpa inokulasi mikroba. Kajian lebih jauh mengenai pengaruh inokulasi *Nitrobacter winogradskyi* terhadap kemampuan degradasi polutan dinitrogen monoksida dapat dilihat pada Gambar 4.3. dan 4.4.



Gambar 4.2. Efisiensi reduksi gas N_2O selama 24 jam pada biofiltrasi tanpa mikroba

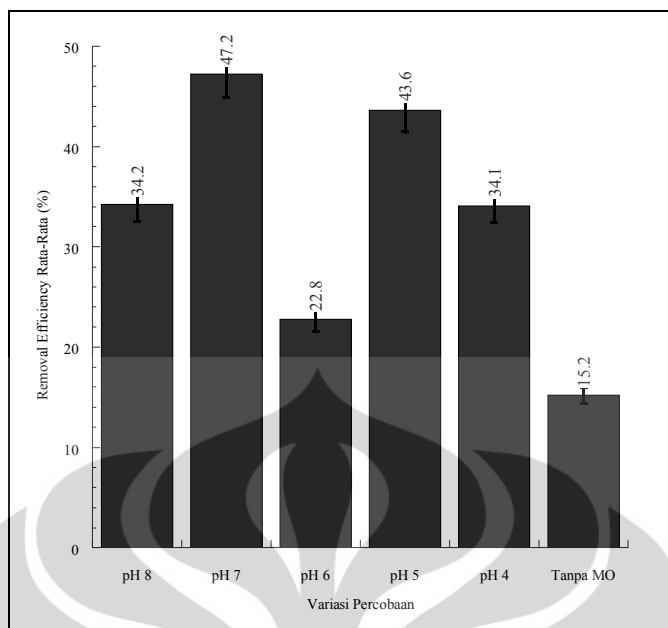
Pada biofiltrasi dengan inokulasi mikroba, dikaji pengaruh dari pH awal media media terhadap efisiensi reduksi polutan dinitrogen monoksida. Parameter ini penting untuk dikaji karena pH media merupakan salah satu parameter yang menentukan dalam operasi biofilter (Lim and Park, 2006). pH optimum mempengaruhi kecepatan pertumbuhan mikroba sehingga mempengaruhi efisiensi reduksi polutan (Ottengraf, 1986). pH dari media filter dapat secara langsung memiliki efek terhadap enzim mikroba dan secara tidak langsung mempengaruhi ketersediaan akan kebutuhan nutrisi (Atlas and Bartha, 1993). Demikian halnya pada bakteri penitrifikasi, pH merupakan salah satu parameter lingkungan terpenting yang dapat mempengaruhi aktivitas bakteri penitrifikasi (Antonioni et al., 1990). Di samping itu, nilai pH ideal media filter bergantung dari polutan yang direduksi dan karakteristik ekosistem mikroba (Devinny et al., 1999). Dengan demikian, perlu dikaji nilai pH optimum untuk biofiltrasi polutan N_2O bagi kultur bakteri penitrifikasi *Nitrobacter winogradskyi* yang diinokulasi pada media filter berupa Zeolit Alam Lampung teraktivasi.

Grafik pada Gambar 4.3. menunjukkan perubahan efisiensi reduksi gas N_2O terhadap waktu akibat pengaruh variasi pH awal media di dalam kolom biofilter selama 24 jam. Pada jam pertama hingga jam ke-3, efisiensi reduksi tertinggi dicapai oleh variasi pH 4 dan 5, yang memperoleh nilai 23,12% dan 34,85% secara berurutan pada jam ke-2. Sedangkan variasi pH 6, 7, dan 8 belum berhasil mencapai nilai 10% pada jam ke-2. 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). Variasi pH 7 dan 8 mulai mengalami peningkatan efisiensi reduksi pada jam ke-4 hingga ke-6, di mana pH 7 mencapai nilai tertinggi pada jam ke-5 dan 6 sebesar 54,85% dan 67,89%. Pada jam ke-23 dan 24, efisiensi reduksi tertinggi masih dihasilkan oleh variasi pH 7 mencapai 94,73% pada jam ke-24. Efisiensi reduksi polutan dihasilkan melalui aktivitas adsorpsi dan biodegradasi pada *biofilm* media filter. Tingkat biodegradasi berhubungan dengan aktivitas mikroba yang sangat bergantung pada permukaan yang tersedia untuk pertukaran gas pada *biofilm* (Ravi et al., 2009).



Gambar 4.3. Pengaruh variasi pH awal media terhadap efisiensi reduksi polutan dinitrogen monoksida, dengan variasi percobaan: (●) pH 8, (○) pH 7, (■) pH 6, (□) pH 5, (▲) pH 4, (△) tanpa inokulasi mikroba ke dalam zeolit

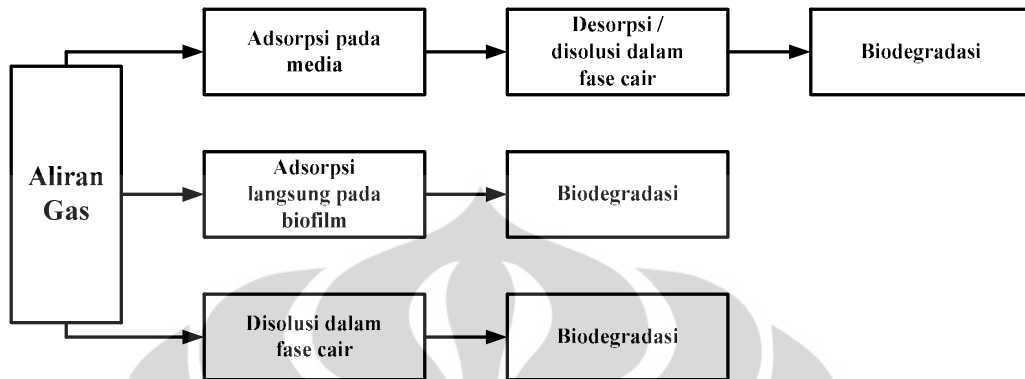
Untuk lebih jelas mengkaji kemampuan reduksi polutan tertinggi, rata-rata efisiensi reduksi selama 24 jam dari seluruh variasi pH awal media dibandingkan seperti yang terlihat pada Gambar 4.4. Hasilnya ialah rata-rata efisiensi reduksi tertinggi dicapai oleh variasi pH 7, yaitu sebesar 47,24%, di mana error bar yang digunakan pada setiap variasi sebesar 5%. Dengan demikian, pH 7 merupakan variasi pH awal optimum bagi sistem biofilter dalam penelitian ini. Hal ini sesuai dengan pH optimum bagi aktivitas biologi, yaitu pada pH sekitar 7 (Vedova, 2008), di mana pH mendekati netral juga menyediakan jangkauan terluas bagi aktivitas bakteri (Leson and Winer, 1991).



Gambar 4.4. Efisiensi reduksi rata-rata polutan dinitrogen monoksida selama 24 jam pada berbagai variasi percobaan

Di samping itu, Gambar 4.3. dan 4.4. juga menunjukkan pengaruh inokulasi bakteri pada media filter terhadap kemampuan degradasi polutan. Proses adsorpsi pada media filter yang tidak diinokulasi bakteri pada jam-jam awal belum stabil karena masih merupakan fase *start-up* (Duan et al., 2004). Pada jam ke-5, mulai terjadi peningkatan efisiensi reduksi dari 6,35% menjadi 14,59%, kemudian sedikit meningkat pada jam ke-6 dan cenderung stabil hingga jam ke-23 yaitu pada kisaran nilai 16%. Namun efisiensi reduksi menurun pada jam ke-24 menjadi 13,81% yang diduga karena media filter mengalami penjenruhan. Efisiensi reduksi yang sangat rendah pada sistem ini disebabkan kemampuan reduksi polutan hanya dihasilkan melalui aktivitas adsorpsi oleh media filter. Adanya penambahan bakteri berhasil meningkatkan rata-rata efisiensi reduksi pada variasi pH 7 mencapai 32,03% lebih tinggi jika dibandingkan dengan sistem tanpa inokulasi. Dengan demikian, inokulasi mikroba merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan performansi biofiltrasi. Dalam sistem biofiltrasi, penghilangan polutan lebih disebabkan akibat degradasi biologis daripada mekanisme fisika seperti yang terdapat pada filter biasa. Ketika polutan terdifusi ke dalam *biofilm* atau terlarut di dalam fase cair yang melingkupi *biofilm*, polutan diadsorpsi dan dibiodegradasi oleh mikroba di dalam *biofilm*. Selain itu,

polutan juga diadsorpsi oleh permukaan media filter (Kumar et al., 2011). Berikut ini skema mekanisme biofiltrasi yang dinyatakan oleh Kumar et al. (2011):



Gambar 4.5. Mekanisme biofiltrasi (Kumar et al., 2011)

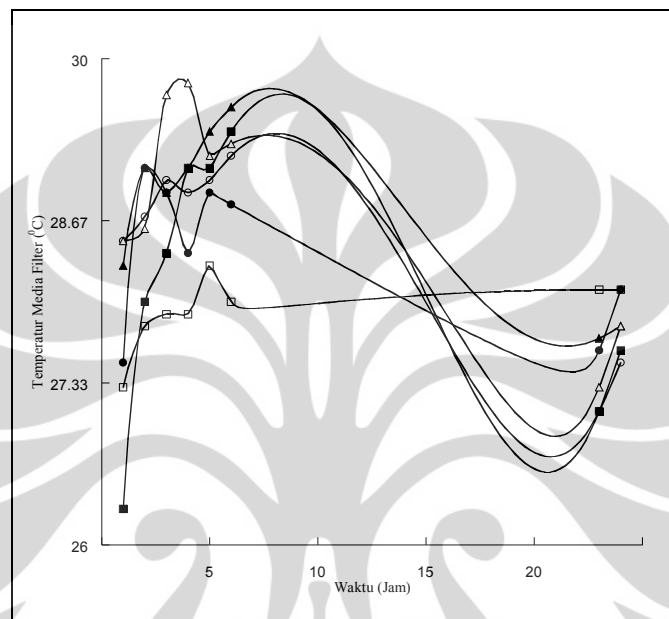
Hasil biofiltrasi polutan dinitrogen monoksida adalah gas N_2 yang tidak berbahaya sehingga dapat dibuang langsung ke lingkungan. Mekanisme oksidasi yang terjadi di dalam kolom biofilter oleh bakteri penitrifikasi diperkirakan sesuai dengan Gambar 2.5.

4.2.2. Perubahan Suhu dan Kelembapan Media Filter

Salah satu parameter kinerja biofilter yang penting adalah suhu. Pada sistem biofilter ini, suhu media berkisar antara $26-30^{\circ}C$, di mana nilai tersebut termasuk ke dalam rentang kebanyakan bakteri pengoksidasi nitrit tumbuh sangat baik (Spieck and Bock, 2005). Hasil pengamatan perubahan suhu media selama proses biofiltrasi berlangsung dapat dilihat pada gambar 4.6. Gambar tersebut menunjukkan terjadinya fluktuasi perubahan suhu selama biofilter dioperasikan. Hal ini diakibatkan oleh oksidasi biologis yang merupakan reaksi eksotermis sehingga mampu menyebabkan variasi suhu selama biofiltrasi (Vedova, 2008).

Berdasarkan hasil pengamatan, suhu pada jam-jam awal bernilai rendah dan semakin lama meningkat dan cenderung stabil hingga jam ke 24. Rendahnya suhu di jam-jam awal menunjukkan bahwa oksidasi biologis yang masih rendah karena mikroba masih membutuhkan masa adaptasi pada lingkungan baru (He et al., 2007) sebelum mikroba mampu mereduksi polutan dengan optimum. Pada jam ke-23 dan ke-24, suhu media filter mengalami penurunan akibat

berkurangnya oksidasi biologis oleh bakteri. Hal ini diperkirakan karena menurunnya jumlah populasi bakteri akibat kurangnya asupan nutrisi, sebagaimana pembahasan lebih lanjut mengenai perkembangan bakteri yang dimuat pada sub bab berikutnya. Dengan demikian, panas yang dihasilkan oleh bakteri pun menjadi berkurang.

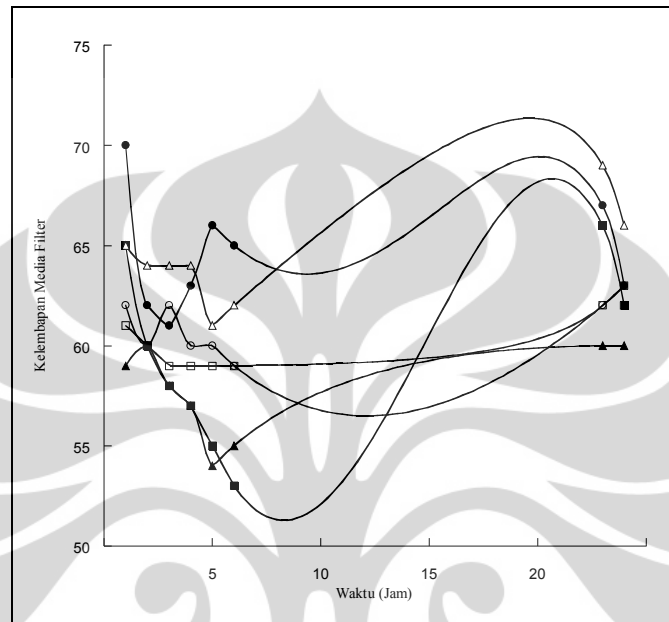


Gambar 4.6. Perubahan suhu media filter selama biofiltrasi dengan variasi percobaan: (●) pH 8, (○) pH 7, (■) pH 6, (□) pH 5, (▲) pH 4, (△) tanpa inokulasi mikroba ke dalam zeolit

Tingkat kelembapan juga berperan penting dalam performansi biofilter karena mikroba membutuhkan air untuk aktivitas metabolisme. Kekurangan air pada mikroba dapat mengakibatkan reduksi laju biodegradasi yang besar (Kumar et al., 2011). Beberapa studi menunjukkan bahwa dihasilkan kapasitas reduksi polutan yang lebih tinggi pada kandungan kelembapan yang juga lebih tinggi. Akan tetapi kandungan air yang berlebih harus dihindari karena dapat meningkatkan *pressure drop* dan menurunkan perpindahan massa (Ranasinghe and Gostomski, 2003).

Pada penelitian ini, kelembapan media filter diperoleh melalui perendaman selama proses inokulasi bakteri di dalam nutrisi sintetik. Gambar 4.7. menunjukkan bahwa kandungan kelembapan pada sistem biofilter ini berkisar antara 50% hingga 70%, di mana nilai tersebut merupakan kandungan

kelembapan yang efisien pada biofiltrasi (Nicolai and Janni, 2000). Tingkat kelembapan yang fluktuatif dipengaruhi oleh suhu yang fluktuatif di dalam kolom biofilter (Vedova, 2008). Dengan kata lain, kelembapan media filter juga dipengaruhi oleh aktivitas eksotermis bakteri.



Gambar 4.7. Perubahan kelembapan media filter terhadap waktu, dengan variasi percobaan: (●) pH 8, (○) pH 7, (■) pH 6, (□) pH 5, (▲) pH 4, (△) tanpa inokulasi mikroba ke dalam zeolit

Berdasarkan pengamatan yang dilakukan secara visual, terjadi pengeringan pada media filter di bagian atas kolom. Sakuma et al. (2009) menyatakan bahwa biofilter cenderung mengalami pengeringan pada bagian masukan gas, yang menyebabkan berkurangnya reduksi polutan dari waktu ke waktu (Sakuma et al., 2009). Pengeringan media filter menyebabkan terbentuknya area kering, distribusi gas yang tidak merata, serta berkurangnya aktivitas mikroorganisme (Shareefdeen and Singh, 2005).

4.2.3. Hasil Uji Perkembangan Bakteri

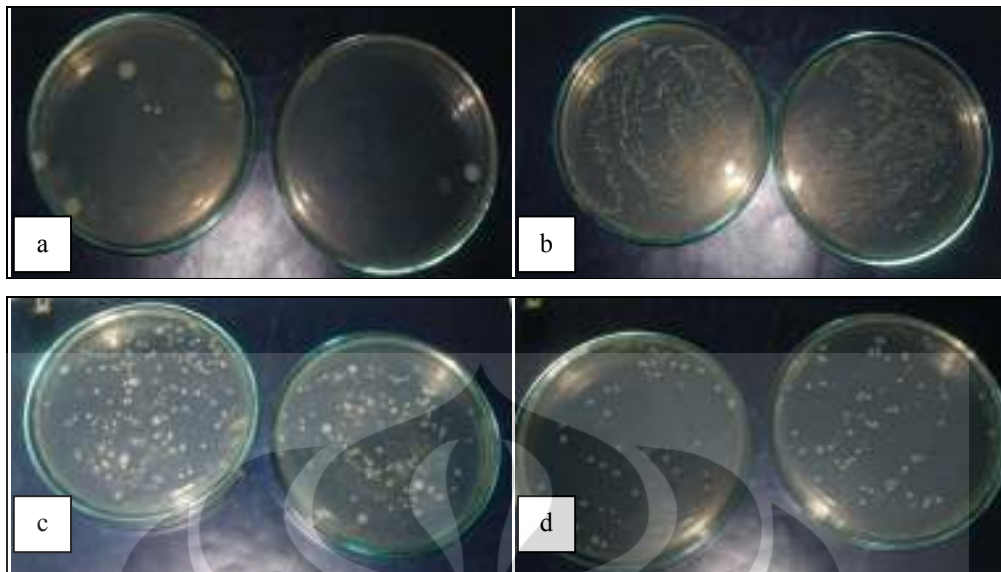
Analisis *Total Plate Count* (TPC) dilakukan untuk melihat perkembangan populasi bakteri. Sampel yang diuji dengan metode TPC ialah sampel dari media sintetik sebelum diinkubasi (pada jam ke-0) dan setelah diinkubasi selama 48 jam. Selain itu, analisis TPC juga dilakukan pada media filter sebelum biofiltrasi yaitu

ketika zeolit telah direndam di dalam media sintetik, dan setelah biofiltrasi. Analisis TPC dilakukan oleh Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Berdasarkan hasil analisis TPC yang dimuat pada Tabel 4.1., hanya sedikit pertumbuhan yang terjadi pada tiap fase inkubasi, namun jumlah ini sudah cukup banyak mengingat pengenceran yang dilakukan pada analisis TPC sebelum biofiltrasi ini mencapai 10^{13} dan 10^{14} . Banyaknya jumlah bakteri yang terkandung pada sampel diakibatkan proses kultur yang berkesinambungan, yaitu mulai dari kultur pada media broth, dilanjutkan pada media agar, kemudian pada media sintetik yang mengandung nutrisi spesifik bagi pertumbuhan *Nitrobacter winogradskyi*. Dokumentasi beberapa hasil analisis TPC dapat dilihat pada Gambar 4.8.

Namun demikian, terjadi penurunan populasi bakteri yang cukup signifikan pada semua variasi pH awal media setelah dilakukan biofiltrasi selama 24 jam. Penyebabnya ialah kurangnya asupan nutrisi sintetik yang dibutuhkan bakteri untuk dapat terus tumbuh dan mengoksidasi polutan. Nutrisi dalam sistem biofilter ini hanya diberikan pada tahap ketika media filter diinokulasi bakteri di dalam nutrisi sintetik. Menurut Fu et al. (2011), dibutuhkan suatu desain sistem biofilter yang dilengkapi dengan alat pemercik (*nozzle*) di atas kolom biofilter yang berguna untuk memberikan nutrisi bagi bakteri sehingga populasi mikroba dapat terjaga selama proses biofiltrasi (Fu et al., 2011).

Tabel 4.1. Hasil analisis TPC pada seluruh variasi pH awal media (CFU/mL)

	Variasi pH Awal Media				
	pH 8	pH 7	pH 6	pH 5	pH 4
M. Sintetik Jam Ke-0	15×10^9	3×10^{13}	$1,8 \times 10^{10}$	6×10^{13}	4×10^{12}
M. Sintetik Jam Ke-48	8×10^{12}	$2,2 \times 10^{12}$	$3,3 \times 10^{13}$	$2,5 \times 10^{13}$	10×10^{12}
Sebelum Biofiltrasi	$3,06 \times 10^{13}$	$2,5 \times 10^{14}$	$3,1 \times 10^{13}$	7×10^{14}	11×10^{14}
Setelah Biofiltrasi	2×10^9	20×10^{11}	15×10^{11}	2×10^9	$1,4 \times 10^{10}$



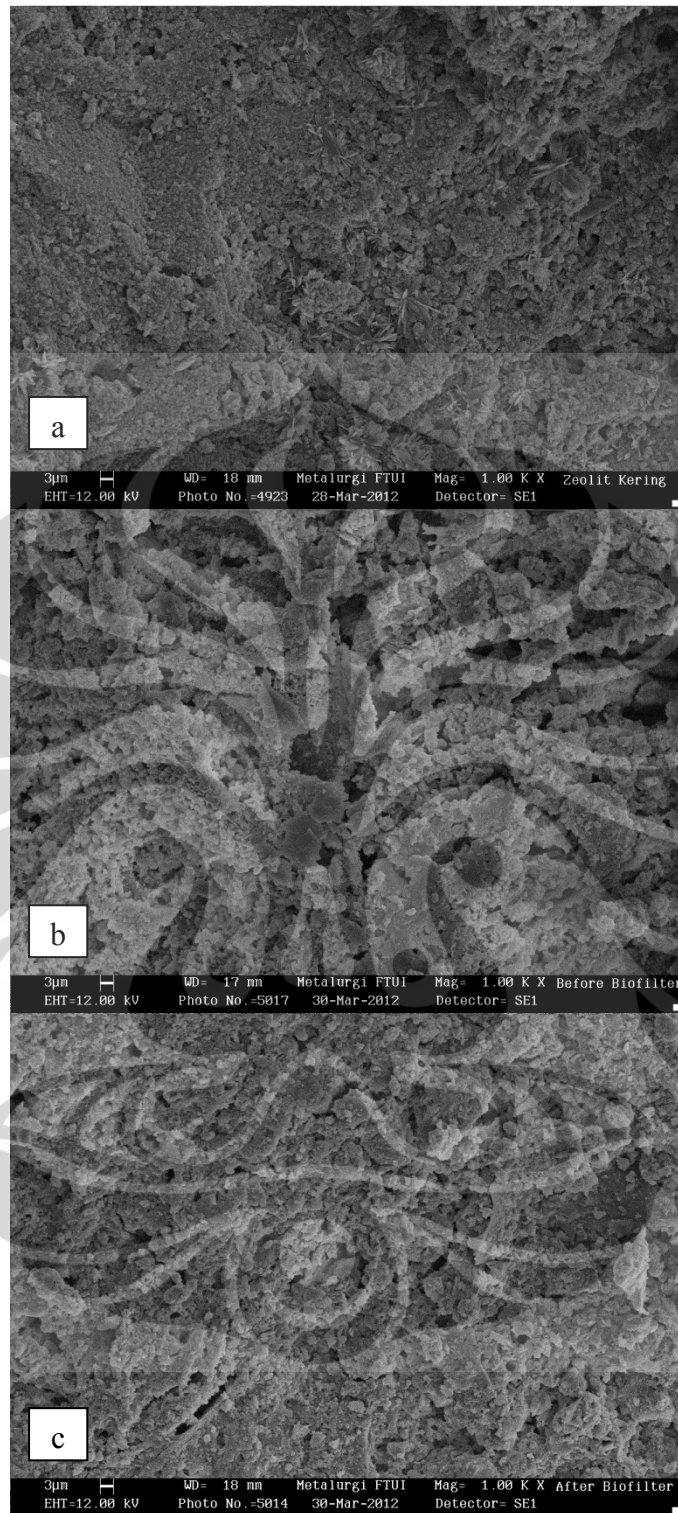
Gambar 4.8. Dokumentasi hasil analisis TPC variasi pH awal media 5: (a) medium sintetik jam ke-0, (b) medium sintetik jam ke-48, (c) sebelum biofiltrasi, dan (d) setelah biofiltrasi.

Untuk mendukung data TPC, dilakukan uji *Scanning Electron Microscope* (SEM) yang berfungsi untuk melihat perubahan morfologi pada media filter akibat adanya pertumbuhan bakteri. Sampel yang dianalisis dengan uji SEM ialah sampel zeolit kering, yaitu zeolit setelah diaktivasi namun sebelum diinokulasi bakteri; serta pada sampel zeolit sebelum dan setelah biofiltrasi. Analisis SEM dilakukan oleh Laboratorium Uji, Departemen Teknik Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Hasil SEM ditunjukkan oleh Gambar 4.9. dengan perbesaran 1000 kali.

Hasil SEM menunjukkan bahwa terdapat perbedaan morfologi pada sampel zeolit kering apabila dibandingkan dengan sampel zeolit sebelum biofiltrasi, yaitu terbentuknya suatu *biofilm* pada sampel zeolit sebelum biofiltrasi. Pada Gambar 4.9.b., *biofilm* ditunjukkan dengan terjadinya penebalan permukaan zeolit yang terlihat jelas apabila dibandingkan Gambar 4.9.a. Penebalan *biofilm* semakin terlihat jelas pada Gambar 4.9.c., di mana hampir seluruh permukaan zeolit dilapisi oleh *biofilm*, tidak seperti Gambar 4.9.b. yang pada permukaannya masih terdapat area-area yang tidak menebal karena *biofilm*. Ini artinya semakin lama waktu operasi akan membuat lapisan *biofilm* semakin tebal. Akan tetapi, tebalnya lapisan *biofilm* ternyata tidak diikuti dengan meningkatnya jumlah populasi mikroba setelah biofiltrasi. Menurut Bayles (2007), DNA yang

dikeluarkan dari dekomposisi mikroba yang mati memainkan peranan penting dalam perkembangan dan stabilitas *biofilm*. *Extracellular polymeric substance* (EPS) diproduksi oleh mikroba dewasa sebagai salah satu komponen dalam *biofilm* dan memberikan kontribusi signifikan terhadap akumulasi *biofilm* (Bayles, 2007). Selain dihasilkan dari pecahnya sel dan sekresi alami mikroba, EPS juga dihasilkan produk hidrolisis (Christensen, 1989). Di samping itu, ketebalan *biofilm* juga disebabkan oleh keberadaan konsentrasi substrat dan produk hasil metabolisme (Stewart and Franklin, 2008). Akumulasi *biofilm* juga dipengaruhi oleh akumulasi biomassa, seperti sisa sel-sel mati, padatan tersuspensi, dan endapan inorganik (Diks et al., 1994). Demikian penyebab menebalnya *biofilm* pada permukaan zeolit dari waktu ke waktu selama operasi berdasarkan analisis SEM meskipun hasil TPC menunjukkan bahwa populasi mikroba setelah biofiltrasi justru berkurang.

Song dan Kinney (2000) melaporkan bahwa konsentrasi biomassa yang tidak aktif di dalam *biofilm* meningkat secara bertahap selama biofiltrasi (Song and Kinney, 2000). Song dan Kinney (2002) mengembangkan sebuah model numerik bagi biomassa yang tidak aktif di dalam *biofilm* untuk menentukan performansi jangka panjang dari bioreaktor gas, dan dilakukan sebuah pendekatan untuk mensimulasikan perubahan pertumbuhan biomassa dan ketebalan *biofilm*. Biomassa yang tidak aktif ini meliputi sel-sel mati dan EPS. Hasil menunjukkan terjadinya penurunan efisiensi reduksi biofilter setelah waktu operasi yang lama dikarenakan berkurangnya fraksi aktif dan area permukaan spesifik pada *biofilm* (Song and Kinney, 2002). Area permukaan spesifik berguna dalam perkembangan *biofilm* mikroba dan perpindahan massa antara gas ke dalam *biofilm* (Kumar et al., 2011). Pada penelitian ini, telah terdapat *biofilm* yang tidak aktif akibat berkurangnya populasi mikroba selama biofiltrasi. Akan tetapi berdasarkan hasil GC, justru terjadi peningkatan efisiensi penghilangan polutan N₂O selama 24 jam operasi. Hal ini diperkirakan akibat masih terdapat banyak fraksi aktif dan area permukaan spesifik pada *biofilm* sehingga meskipun populasi mikroba menurun, *biofilm* masih mampu mereduksi gas dinitrogen monoksida.



Gambar 4.9. Morfologi *biofilm* pada permukaan zeolit menggunakan SEM: (a) zeolit tanpa inokulasi mikroba, (b) sebelum biofiltrasi, dan (c) setelah biofiltrasi

4.3. Pemodelan Hasil Eksperimen

Pemodelan dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem biofilter dalam mengadsorpsi polutan N₂O. Model yang digunakan ialah model adsorpsi isotermis *Langmuir* dan *Freundlich*. Meskipun banyak teori adsorpsi yang menjelaskan mengenai fenomena adsorpsi, namun *Langmuir* dan *Freundlich* telah banyak digunakan oleh beberapa peneliti (Okeola and Odebunmi, 2010). Di samping itu, *Langmuir* dan *Freundlich* juga digunakan untuk memahami tingkat adsorpsi yang baik (Ding et al., 2008).

4.3.1. Pemodelan Adsorpsi *Langmuir*

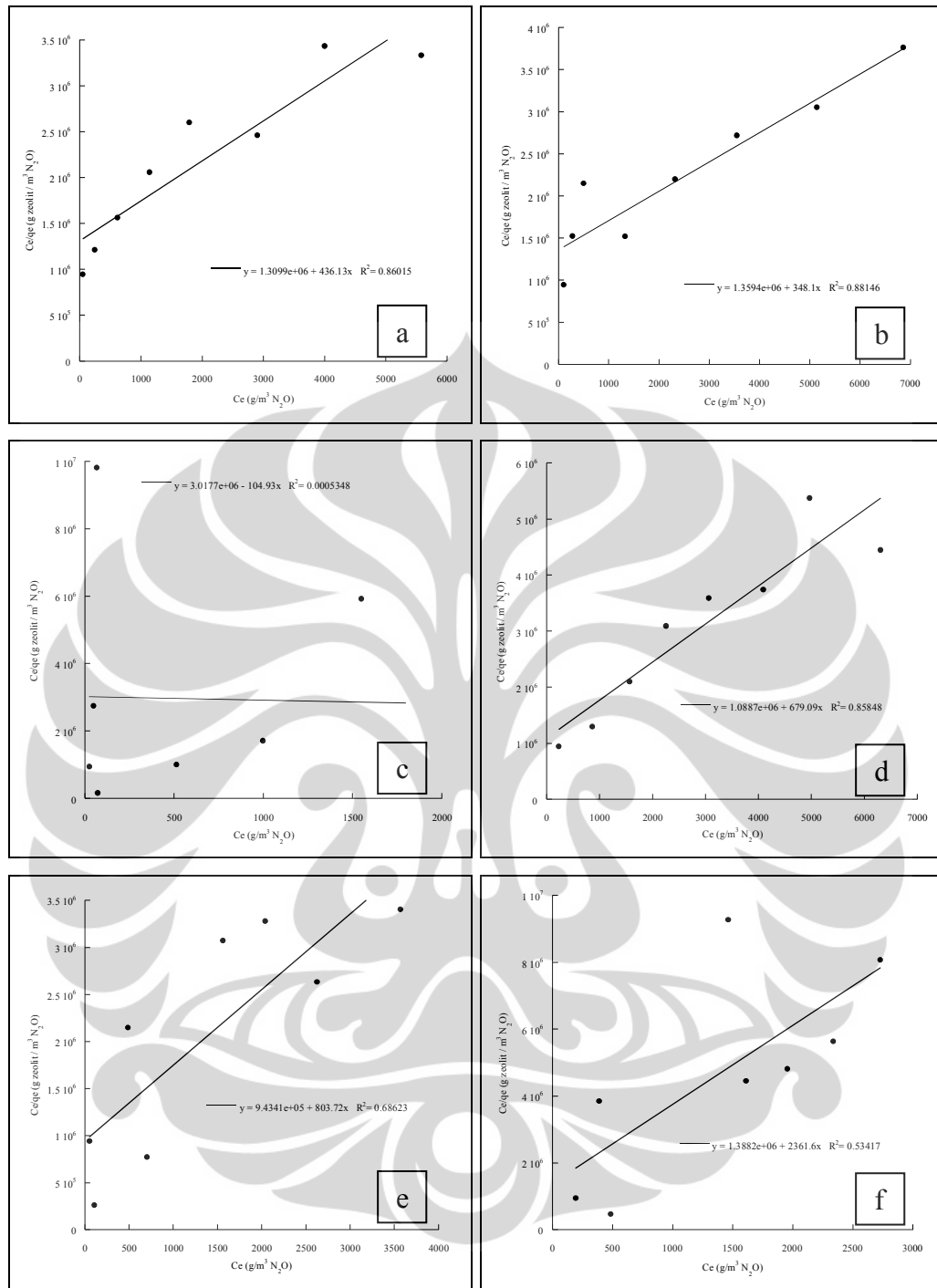
Operasi pemodelan adsorpsi *Langmuir* dikerjakan menggunakan software Microsoft Excel. Persamaan linearisasi *Langmuir* yang digunakan ialah persamaan 2.6.:

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

Hasil linearisasi *Langmuir* pada tiap variasi dapat dilihat pada Gambar 4.10. Kurva yang dihasilkan pada semua grafik *Langmuir* adalah kurva yang naik. Jadi semakin besar nilai C_e (konsentrasi gas N₂O di *outlet*), maka semakin besar pula nilai dari C_e/q_e (Konsentrasi gas N₂O di *outlet*/konsentrasi gas N₂O setimbang di adsorben).

Selanjutnya menentukan nilai konstanta *Langmuir* (K_L) dengan menggunakan perhitungan matematis dari persamaan 2.6. Nilai q_m diperoleh melalui $m = \text{gradien} = 1/q_m$, dan dengan mendapatkan nilai q_m maka nilai K_L dapat dicari melalui intersep $= \frac{1}{q_m K_L}$.

Nilai q_m menunjukkan keterbatasan kapasitas adsorpsi bila permukaan tertutup penuh dengan adsorbat dan dari nilai K_L menunjukkan kemampuan adsorben untuk mengikat adsorbat. Semakin besar nilai q_m maka semakin banyak adsorbat yang dapat diadsorp. Semakin besar nilai K_L maka semakin baik adsorben tersebut karena semakin tinggi kemampuan adsorben untuk mengikat adsorbat (Sanjaya, 2010). Tabel 4.2. memuat nilai konstanta *Langmuir* pada berbagai variasi percobaan.



Gambar 4.10. Adsorpsi *Langmuir* pada berbagai variasi: (a) pH awal media 8, (b) pH awal media 7, (c) pH awal media 6, (d) pH awal media 5, (e) pH awal media 4, (f) tanpa inokulasi mikroba pada media filter

Tabel 4.2. Nilai konstanta *Langmuir* pada berbagai variasi

Variasi	Persamaan	q_m (g N ₂ O/g zeolit)	K_L (m ³ /g)	R ²
8	$y = 436,13x + 1309900$	$2,293 \times 10^{-3}$	$3,33 \times 10^{-4}$	0,86
7	$y = 348,1x + 1359400$	$2,873 \times 10^{-3}$	$2,56 \times 10^{-4}$	0,88
6	$y = -104,93x + 3017700$	$-9,53 \times 10^{-3}$	$-3,50 \times 10^{-5}$	5×10^{-4}
5	$y = 679,09x + 1088700$	$1,473 \times 10^{-3}$	$6,24 \times 10^{-4}$	0,86
4	$y = 803,72x + 943410$	$1,244 \times 10^{-3}$	$8,52 \times 10^{-4}$	0,69
Tanpa MO	$y = 2361,6x + 1382200$	$4,234 \times 10^{-4}$	$1,709 \times 10^{-3}$	0,53

Nilai q_m terbesar dihasilkan oleh variasi pH awal media 7. Hal ini menandakan bahwa semakin banyak gas N₂O yang teradsorp pada variasi tersebut. Nilai K_L terbesar dihasilkan oleh variasi tanpa inokulasi mikroba. Akan tetapi, nilai q_m pada variasi ini terbilang kecil. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun variasi tanpa mikroba memiliki kapasitas adsorpsi yang kecil karena tidak didukung oleh keberadaan *biofilm*, namun kemampuan adsorben dalam mengikat polutan N₂O pada variasi ini bernilai lebih besar daripada kemampuan adsorben yang di permukaannya terdapat lapisan *biofilm*.

Koefisien regresi (R²) menunjukkan tingkat keakuratan antara data adsorpsi dan isotermis adsorpsi. Semakin tinggi tingkat keakuratan maka nilai R² akan semakin mendekati 1. Koefisien regresi pada pH awal media 6 bernilai sangat kecil karena konsentrasi keluaran yang dihasilkan pada jam-jam awal (t = 1 jam hingga t = 3 jam) belum stabil disebabkan waktu tersebut merupakan waktu *start-up* dan fasa aklimatisasi, yaitu fasa penyesuaian diri mikroba dengan lingkungannya (Duan et al., 2004).

4.3.2. Pemodelan Adsorpsi *Freundlich*

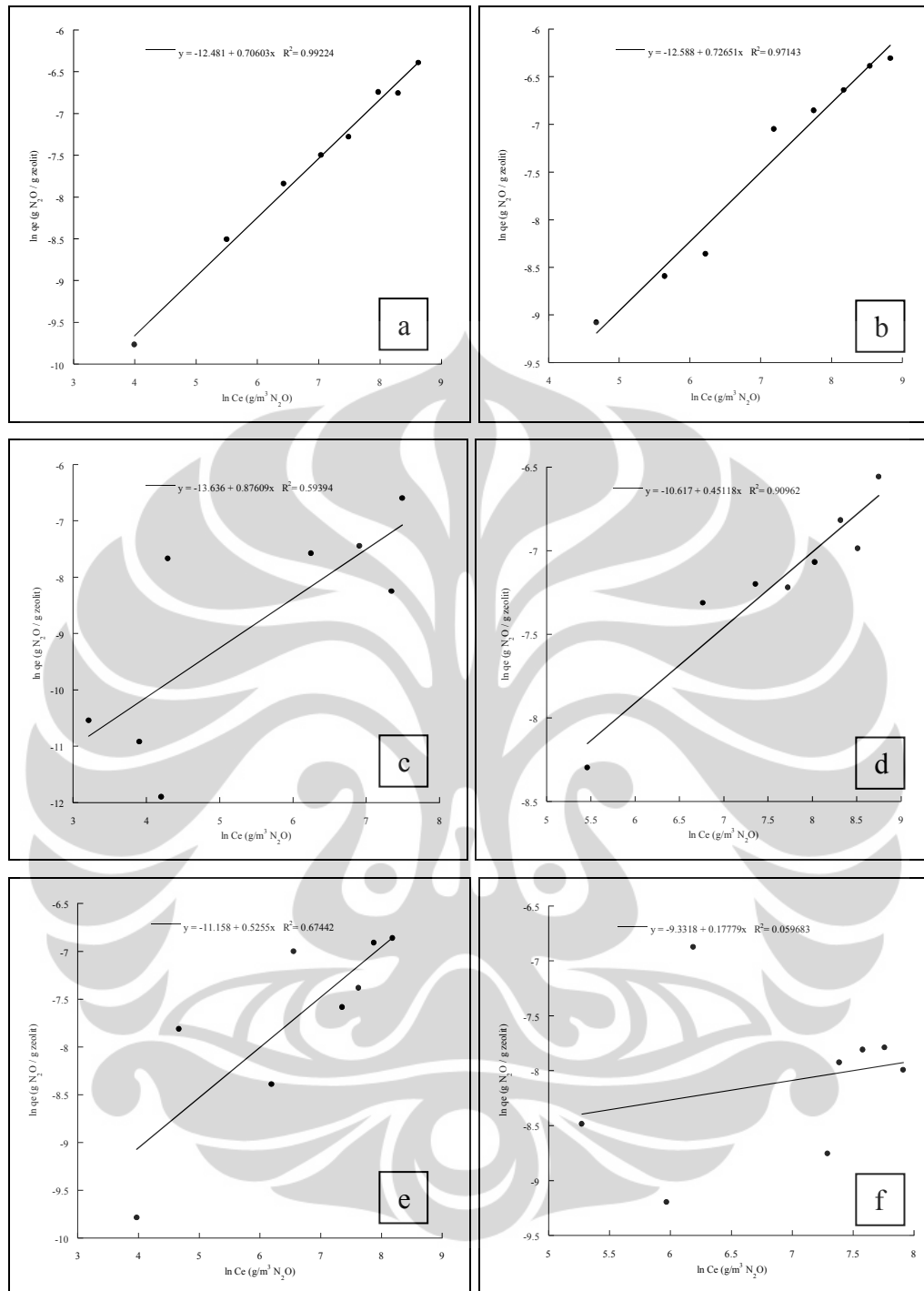
Sama seperti *Langmuir*, operasi pemodelan adsorpsi *Freundlich* juga dikerjakan menggunakan software Microsoft Excel. Persamaan linearisasi *Freundlich* yang digunakan ialah persamaan 2.11.:

$$\ln q_e = \ln K_f + 1/n \ln C_e$$

Hasil linearisasi *Freundlich* pada tiap variasi dapat dilihat pada Gambar 4.11. Sama seperti pada *Langmuir*, kurva yang dihasilkan pada semua grafik *Freundlich* adalah kurva yang naik. Jadi semakin besar nilai C_e (konsentrasi gas N_2O di *outlet*), maka semakin besar pula nilai dari q_e (konsentrasi gas N_2O setimbang di adsorben).

Langkah selanjutnya ialah menentukan nilai n dan konstanta *Freundlich* (K_F) dengan menggunakan perhitungan matematis dari persamaan 2.11. di atas. Nilai n diperoleh melalui $m = \text{gradien} = 1/n$, dan nilai K_f dapat dicari melalui $\text{intersep} = \ln K_f$.

Nilai n menunjukkan kemampuan adsorpsi dan K_f menunjukkan kapasitas adsorpsi (Okeola and Odebunmi, 2010). Tabel 4.3. memuat nilai konstanta *Freundlich* pada berbagai variasi percobaan.



Gambar 4.11. Adsorpsi *Freundlich* pada berbagai variasi: (a) pH awal media 8, (b) pH awal media 7, (c) pH awal media 6, (d) pH awal media 5, (e) pH awal media 4, (f) tanpa inokulasi mikroba pada media filter

Tabel 4.3. Nilai konstanta *Freundlich* pada berbagai variasi

Variasi	Persamaan	n	K_f (m^3/g)	R^2
8	$y = 0,706x - 12,481$	1,416	$3,80 \times 10^{-6}$	0,99
7	$y = 0,727x - 12,588$	1,376	$3,41 \times 10^{-6}$	0,97
6	$y = 0,876x - 13,636$	1,141	$1,20 \times 10^{-6}$	0,59
5	$y = 0,451x - 10,617$	2,216	$2,45 \times 10^{-5}$	0,91
4	$y = 0,526x - 11,158$	1,903	$1,43 \times 10^{-5}$	0,67
Tanpa MO	$y = 0,178x - 9,332$	5,625	$8,86 \times 10^{-5}$	0,06

Dari tabel di atas, diketahui bahwa nilai n dan K_f terbesar dihasilkan oleh variasi tanpa mikroba. Hal ini menandakan bahwa biofiltrasi pada sistem tanpa penambahan mikroba memiliki kemampuan yang paling baik dalam mengikat adsorbat karena nilai n menunjukkan sebuah ikatan yang kuat antara adsorben dan adsorbat (Okeola and Odebunmi, 2010). Nilai n diantara 1 dan 10 menunjukkan adsorpsi yang menguntungkan (Kadirvelu and Namasivayam, 2000).

Dengan demikian, pada penelitian ini kedua persamaan isoteremis *Langmuir* dan *Freundlich* dapat digunakan untuk memodelkan fenomena adsorpsi pada biofiltrasi N_2O selama 24 jam. Jika waktu operasi lebih dari 24 jam, kedua persamaan isoteremis tersebut belum tentu dapat memodelkan fenomena adsorpsi yang terjadi.

4.4. Perbandingan Zeolit Alam dengan Karbon Aktif Sebagai Media Filter

Ayyun (2012) melakukan penelitian mengenai pengaruh pH awal media pada biofiltrasi N_2O oleh *Nitrobacter winogradskyi* yang diinokulasi pada media filter yang berbeda, yaitu karbon aktif. Perbandingan efisiensi reduksi polutan dan pertumbuhan mikroba pada penggunaan zeolit alam dan karbon aktif dimuat pada Tabel 4.4. Ketika tidak diinokulasi mikroba, zeolit alam memiliki efisiensi reduksi yang lebih kecil daripada karbon aktif karena luas permukaan per unit volume zeolit alam lebih kecil daripada karbon aktif meskipun setelah zeolit alam diaktivasi melalui kalsinasi dan dealuminasi, di mana luas permukaannya hanya meningkat sebesar 35% dari luas permukaan total (Harvey et al., 1995).

Tabel 4.4. Perbandingan efisiensi reduksi N₂O dan hasil analisis TPC zeolit alam dan karbon aktif

	Zeolit Alam	Karbon Aktif
Nilai pH awal media optimum	7	7
<i>Removal efficiency (%)</i> rata-rata tanpa MO	15,21	35,59
<i>Removal efficiency (%)</i> pada pH awal 7	94,73	93,8
<i>Removal efficiency (%)</i> rata-rata pada pH awal 7	47,29	71,89
M. Sintetik jam ke-0 (CFU/mL)	3×10^{13}	26×10^9
M. Sintetik jam ke-48 (CFU/mL)	$2,2 \times 10^{12}$	49×10^{10}
Sebelum biofiltrasi (CFU/mL)	$2,5 \times 10^{14}$	22×10^{12}
Setelah biofiltrasi (CFU/mL)	20×10^{11}	$45,5 \times 10^{10}$
Luas permukaan/unit volume (m²/g)	49,18	500-1200

Untuk variasi dengan penambahan mikroba, efisiensi reduksi rata-rata tertinggi masih dihasilkan oleh karbon aktif. Namun demikian, pada jam ke-24 efisiensi reduksi maksimum zeolit alam berhasil meningkat dan mencapai nilai yang terbilang sama dengan karbon aktif. Ini artinya dihasilkan efisiensi reduksi yang lebih tinggi oleh karbon aktif daripada zeolit pada jam-jam awal operasi, di mana hal tersebut disebabkan oleh luas permukaan per volume karbon aktif yang jauh lebih besar daripada zeolit alam. Menurut Zilli et al. (2003) dan Kim et al. (2002), tingginya penghilangan polutan di jam-jam awal dikarenakan adsorpsi pada media filter dan perpindahan massa ke dalam fase cair, bukan karena aktivitas biodegradasi oleh mikroba (Zilli et al., 2003; Kim et al., 2002). Hal ini terjadi karena pada jam-jam awal bakteri membutuhkan fasa aklimatisasi (penyesuaian diri) pada lingkungan baru sebelum bakteri dapat melakukan biofiltrasi dengan baik (He et al., 2007).

Di samping itu, hampir samanya besar efisiensi reduksi di jam ke-24 pada zeolit alam dan karbon aktif menunjukkan bahwa terjadi peningkatan nilai efisiensi reduksi yang lebih besar pada zeolit alam selama biofiltrasi dibandingkan pada karbon aktif. Terdapat dua hal yang diduga menjadi penyebab fenomena ini. Pertama, lebih banyaknya jumlah mikroba pada zeolit alam sebelum biofiltrasi dilakukan. Hal ini disebabkan jumlah populasi bakteri yang sudah lebih banyak sejak bakteri dikultur dalam media sintetik (sebelum diinokulasi pada zeolit alam), sebagaimana yang ditunjukkan pada Tabel 4.4. meskipun dilakukan tahapan kultur yang sama pada kedua variasi. Kedua, zeolit alam menyediakan lingkungan hidup yang lebih baik bagi bakteri *Nitrobacter winogradskyi*. Zeolit alam bersifat hidrofilik, sedangkan karbon aktif bersifat hidrofobik (Ono and Yashima, 2000; Okolo et al., 2000). Mikroba tumbuh sangat baik pada permukaan yang basah (Park et al., 2009). Dengan demikian mikroba akan lebih menyukai zeolit alam yang permukaannya mampu mengikat air dengan baik.

Dengan demikian, zeolit alam dan karbon aktif adalah media filter yang baik dalam biofiltrasi N_2O karena karbon aktif memiliki luas permukaan per volum yang tinggi dan zeolit alam merupakan media inokulasi yang cocok bagi *Nitrobacter winogradskyi* karena bersifat hidrofilik.

BAB V

KESIMPULAN

Terdapat beberapa kesimpulan yang diperoleh dari penelitian biofiltrasi N₂O oleh *Nitrobacter winogradskyi* yang diinokulasi pada Zeolit Alam Lampung teraktivasi dengan variasi pH awal media, antara lain:

1. pH awal media optimum biofiltrasi N₂O ialah 7 dengan efisiensi reduksi 94,73% dan rata-rata efisiensi reduksi 47,29% selama 24 jam operasi.
2. Inokulasi bakteri meningkatkan efisiensi reduksi N₂O sebesar 32,03% pada pH awal media 7.
3. Suhu dan kelembapan media berfluktuasi antara 26-30⁰C dan 50-70% secara berurutan akibat adanya oksidasi biologi yang bersifat eksotermis.
4. Terjadi penurunan jumlah populasi mikroba setelah biofiltrasi dari $2,5 \times 10^{14}$ CFU/mL menjadi 20×10^{11} CFU/mL pada pH 7 akibat kurangnya asupan nutrisi.
5. Isotermis *Langmuir* menghasilkan nilai q_m maksimum pada pH awal 7 sebesar $2,873 \times 10^{-3}$ g N₂O/g zeolit dan K_L maksimum pada variasi tanpa mikroba sebesar $1,709 \times 10^{-3}$ m³/g. Isotermis *Freundlich* menghasilkan n dan K_f maksimum sebesar 5,625 dan $8,86 \times 10^{-5}$ m³/g secara berurutan pada variasi tanpa mikroba.

DAFTAR ISTILAH

<i>Adsorben</i>	tempat terjadinya adsorpsi
<i>Adsorbat</i>	zat yang diserap oleh adsorben
<i>Biodegradasi</i>	degradasi secara biologis
<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>Channeling</i>	pembentukan saluran aliran
<i>Downflow</i>	sistem aliran dari atas ke bawah
<i>Inlet</i>	aliran masuk
<i>Inokulasi</i>	penanaman mikroba ke dalam media
<i>Kontaminan</i>	Polutan
<i>Monolayer</i>	satu lapisan
<i>Moisture</i>	kelembapan
<i>Outlet</i>	aliran keluar
<i>Peak</i>	puncak
<i>Porositas</i>	pori
<i>Pressure drop</i>	penurunan tekanan
<i>Thermal shock</i>	Perubahan temperatur secara tiba-tiba
<i>Void</i>	celah kosong

DAFTAR PUSTAKA

- Petunjuk Praktikum Mikrobiologi Dasar. 2008, Purwekerto, Laboratorium Mikrobiologi Fakultas Biologi Universitas Jenderal Soedirman.
- ACKLEY, M. W., REGE, S. U. & SAXENA, H. 2003. Application of Natural Zeolites in The Purification and Separation of Gases. *Microporous and Mesoporous Materials*, 61, 25-42.
- AIR-LIQUIDE 2009. Gas Encyclopaedia: Nitrous oxide. Paris: AIR-LIQUIDE.
- ALGAS. 1997. Asian Least Cost Greenhouse Gas Abatement Strategy: Mengurangi emisi gas rumah kaca. Available: <http://www.pelangi.or.id/publikasi/megrk-bab1.htm> [Accessed 8 Desember 2008].
- ANTONIOU, P., HAMILTON, J., KOOPMAN, B., JAIN, R., HOLLOWAY, B., LYBERATOS, G. & SVORONOS, S. A. 1990. Effect of Temperature and pH on The Effective Maximum Specific Growth Rate of Nitrifying Bacteria. *Water Research*, 24, 97-101.
- ARISANTORO, I. W. 2010. *Biofiltrasi Gas Dinitrogen Monoksida Menggunakan Pelet Kompos Berbasis Kotoran Kambing Sebagai Medium Filter*. Sarjana, Universitas Indonesia.
- ARNOLD, M., REITTU, A., WRIGHT, A. V., MARTIKAINEN, P. J. & SUIHKO, M. L. 1997. Bacterial Degradation of Styrene in Waste Gases Using a Peat Filter. *Applied Microbiology Biotechnology*, 48, 738-744.
- ATLAS, R. M. & BARTHA, R. 1993. *Microbial Ecology: Fundamentals and Applications*, San Francisco, CA: Benjamin Cummings.
- AURIA, R., MORALES, M., ACUNA, M. E., PEREZ, F. & REVAH, S. Year. Biofiltration of Toluene Vapors: Start Up and Gaseous Ammonia Addition. *In: Biofiltration: an Air Pollution Control Technology*, 1996. 134-141.
- BABU, B. V. & RAMAKRISHNAN, V. Year. Ranking of Adsorbents Based on Method of Preparation and Isotherm Freundlich. *In: International*

- Symposium 56th. Annual Session of IChE (Chemcon-2003), 2003 Bhubaneswar. 19-22.
- BARNES, J. M., APEL, W. A. & BARRETT, K. B. 1994. Removal of Nitrogen Oxides from Gas Streams Using Biofiltration. *Journal of Hazardous Materials*, 41, 315-326.
- BARRER, R. M. 1987. *Zeolites and Clay Minerals as Sorbents and Molecular Sieves*, London, Academic Press.
- BAYLES, K. W. 2007. The Biological Role of Death and Lysis in Biofilm Development. *Nature Rev Microbiology*, 5, 721-6.
- BOCK, E., KOOPS, H. P. & HARMS, H. 1986. Cell Biology of Nitrifiers. *J. I. Prosser*, 20, 17-38.
- BOCK, E., KOOPS, H. P., HARMS, H. & AHLERS, B. 1991. The Biochemistry of Nitrifying Organisms. *J. M. Shively and L. L. Barton*, 171-200.
- BOHN, H. L. 1992. Considering Biofiltration for Decontaminating Gases. *Chem Eng Prog*, 88, 34-40.
- CAHYANA, G. H. 2006. Bioproses Pencemar Udara. Available: <http://Gedeonwww> [Accessed 5 April 2010].
- CHRISTENSEN, B. E. 1989. The Role of Extracellular Polysaccharides in Biofilms. *Journal of Biotechnology*, 10, 181-202.
- DASTOUS, P. A. Year. Biofiltration of the alcohols on a mature bed compost. In: Annual Air & Waste Management Association, 2005 Pittsburgh.
- DATTA, I. & ALLEN, D. G. 2005. Biotechnology for Odor and Air Pollution Control. *Verlag Berlin Heidelberg Springer*.
- DEVINNY, J. S., DESHUSSES, M. A. & WEBSTER, T. S. 1999. *Biofiltration for Air Pollution Control*, Boca Raton, FL: Lewis.
- DIKS, R. M. M., OTTENGRAF, S. P. P. & BIOENG, S. V. B. 1994. Existence of a Biological Equilibrium in a Trickling Filter for Waste Gas Purification. 44, 1279-87.
- DING, C., LI, Z., YAN, J. & JIN, J. 2008. Adsorption Behavior of p-chlorophenol on the Reed Wetland Soils. *Journal of Environmental Science and Technology*, 1, 169-174.

- DUAN, H., KOE, L. C. C. & YAN, R. 2004. Treatment of H₂S using a horizontal biotrickling filter based on biological activated carbon: reactor setup and performance evaluation. *Environmental Biotechnology Applied Microbiology Biotechnology*, 67, 143-149
- EDGAR. 2008. Komposisi Gas Rumah Kaca per Tahun. Available: <http://www.mnp.nl/edgar/model/v32ft2000edgar/4/8/08> [Accessed 8 April 2010].
- FREITAG, A. & BOCK, E. 1990. Energy Conservation in Nitrobacter. *FEMS Microbiol. Lett.*, 66, 157-162.
- FU, Y., SHAO, L., TONG, L. & LIU, H. 2011. Ethylene Removal Efficiency and Bacterial Community Diversity of A Natural Zeolite Biofilter. *Bioresource Technology*, 102, 576-584.
- HARVEY, G., BINDER, G. & PRINS, R. 1995. Catalysis by Microporous Materials. In: BEYER, H. K., KARGE, H. G., KIRICSI, L. & NAGY, J. B. (eds.) *Studies in Surface Science and Catalysis*. Amsterdam: Elsevier.
- 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.
- HODGE, D. S., MEDINA, V. F., ISLANDER, R. L. & DEVINNY, J. S. 1991. Treatment of Hydrocarbon Fuel Vapors in Biofilters. *Environmental Technology*, 12, 655-662.
- HUDEPOHL, NATE, J., DAVIDOVA, Y., PLESSIS, C. A. D. & CHANG, D. P. Y. 1999. Biofilter Technology for NO_x Control: Final Report for Air Resources In: AGENCY, D. O. C. E. P. & CALIFORNIA, D. O. C. E. E. U. O. (eds.).
- IFO 2000. List of Cultures Microorganisms. In: OSAKA, I. F. F. (ed.) 11th ed. Osaka: IFO.
- IPCC 1996. Climate Change 1995 - The Science of Climate Change: Contribution of Working Group 1 to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

- JIANG, J. Q., COOPER, C. & OUKI, S. 2002. Comparison of Modified Montmorillonite Adsorbents Part I: Preparation, Characterization and Phenol Adsorption. *Chemosphere*, 47, 711-716.
- JIN, Y., VEIGA, M. & KENNES, C. 2005. Bioprocesses for the removal of nitrogen oxides from polluted air. *Chemical Technology, Biotechnology*, 80, 483-494.
- KADIRVELU, K. & NAMASIVAYAM, C. 2000. Agricultural By-Products as Metal Adsorbent: Sorption of Lead (II) from Aqueous Solutions onto Coir-Pith Carbon. *Environmental Technology*, 21, 1091-1097.
- KENNES, C. & THALASSO, F. 1998. Waste Gas Biotreatment Technology. *Journal of Chemical Technology Biotechnology*, 72, 303-319.
- KENNES, C. & VEIGA, M. C. 2001. *Conventional Biofilters: Bioreactors for Waste Gas Treatment*, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- KHAIRINAL, T. Year. Dealuminasi Zeolit Alam Wonosari dengan Perlakuan asam dan Proses Hidrotermal. In: Seminar Nasional Kimia VIII, 2000 Yogyakarta.
- KIM, H. S., KIM, Y. J., CHUNG, J. S. & XIE, Q. 2002. *Journal of Air Waste Management Association*, 52.
- 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.
- LAS, T. 2006. *Potensi Zeolit untuk Mengolah Limbah Industri dan Radioaktif* [Online]. Bandung, Jawa Barat, Indonesia: Batan. Available: <http://www.batan.go.id/ptlr/11id/?q=content/potensi-zeolit-untuk-mengolah-limbah-industri-dan-radioaktif> [Accessed 10 Mei 2011].
- LEE, E. Y., CHO, K.-S. & RYU, H. W. 2000. Characterization of Sulfur Oxidation by an Autotrophic Sulfur Oxidizer, Thiobacillus sp. ASWW-2. *Biotechnol. Bioprocess Eng.*, 5, 48-52.
- LESON, G. & WINER, A. M. 1991. Biofiltration: An innovative air pollution control technology for VOC emissions. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 41, 1045-1054.

- LIM, K.-H. & PARK, S.-W. 2006. Transient Behavior of Biofilter Inoculated with *Thiobacillus* sp. IW to Treat Waste-Air Containing Hydrogen Sulfide. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 23, 965-971.
- LIN, K. 2009. Study the Adsorption of Phenol from Aqueous Solution on Hydroxyapatite Nanopowders. *Journal of Hazardous Materials*, 161, 231-240.
- MATSON, P. A. 2010. *Advancing The Science of Climate Change*. Washington D.C.: National Academy of Sciences.
- MAULIDYASTI, E. 2008. *Peningkatan Proses Degradasi Hidrogen Sulfida dalam Biofilter Menggunakan Zeolit Alam Lampung yang Diinokulasi oleh Thiobacillus thioautotrophicus*. Sarjana, Universitas Indonesia.
- MCCONNELL, L. L., RO, K. S., JOHNSON, M. H., HUNT, P. G. & PARKER, D. 2008. Livestock Air Treatment Using PVA-Coated Powdered Activated Carbon Biofilter. *Applied Engineering in Agriculture*, 24, 791-798.
- MORGAN-SAGASTUME, F., SLEEP, B. E. & ALLEN, D. G. 2001. Effects of Biomass Growth on Gas Pressure Drop in Biofilters. *Journal Environmental Engineering*, 127, 388-396.
- MULYANTO & SUWARDI 2006. Prospek zeolit sebagai bahan penjerap dalam remediasi lahan bekas tambang.
- NICOLAI, R. E. & JANNI, K. A. 2000. *Designing biofilters for livestock facilities*. In: *Livestock and Poultry Odor Workshop 2*, St. Paul, MN, USA, Department of Biosystems and Agricultural Engineering, University of Minnesota.
- NOVIANI, C. 2009. *Biosorpsi Gas Dinitrogen Monoksida dalam Proses Biofiltrasi Menggunakan Medium Kompos Berbasis Kotoran Sapi*. Sarjana, Universitas Indonesia.
- NWABANNE, J. T. & IGBOKWE, P. K. 2008. Kinetics and Equilibrium Modeling of Nickel Adsorption by Cassava Peel. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 3, 829-834.
- OKEOLA, F. O. & ODEBUNMI, E. O. 2010. Freundlich and Langmuir Isotherms Parameters for Adsorption of Methylene Blue by Activated Carbon

- Derived from Agrowastes. *Advances in Natural and Applied Sciences*, 4, 281-288.
- OKOLO, B., PARK, C. & KEANE, M. A. 2000. Interaction of Phenol and Chlorophenols with Activated Carbon and Synthetic Zeolites in Aqueous Media. *Journal of Interface Science*, 226, 308-317.
- ONO, Y. & YASHIMA, T. 2000. *Science and Engineering of Zeolite*, Tokyo, Kodansha Scientific Publishing.
- OTTENGRAF, S. P. P. 1986. Exhaust Gas Purification. *Biotechnology (H. J. Rehm, G. Reed, eds), VCH, Weinheim, Germany*, 8, 427-452.
- PAGANS, E. L., FONT, X. & S'ANCHEZ, A. 2005. Biofiltration for Ammonia Removal from Composting Exhaust Gases. *Chemical Engineering Journal*, 113, 105-110.
- PARK, B.-G., SHIN, W. S. & CHUNG, J.-S. 2009. Simultaneous Biofiltration of H₂S, NH₃ and Toluene Using Cork as a Packing Material. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 26, 79-85.
- RANASINGHE, M. A. & GOSTOMSKI, P. A. 2003. A Novel Reactor for Exploring the Effect of Water Content on Biofilter Degradation Rates. *Environmental Progress*, 22, 103-109.
- RAVI, R., PHILIP, L. & SWAMINATHAN, T. 2009. Performance Evaluation of a Compost Biofilter Treating Dichloromethane Vapors. *Chemical Engineering Research*, 1, 63-76.
- SAKUMA, T., HATTORI, T. & DESHUSSES, M. A. 2009. The Effects of a Lower Irrigation System on Pollutant Removal and on the Microflora of a Biofilter. *Environment Technology*, 30, 621-627.
- SANJAYA, E. 2010. *Studi Fenomena Adsorpsi Pada Kompos Kambing Sebagai Medium Biofilter*. Sarjana, Universitas Indonesia.
- SHAREEFDEEN, Z. & SINGH, A. 2005. *Biotechnology for Odor and Air Pollution Control*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York
- SHERIDAN, B. A., CURRAN, T. P. & DODD, V. A. 2002. Assessment of the influence of media particle size on the biofiltration of odorous exhaust ventilation air from a piggery facility. *Bioresource Technology*, 84, 129-143.

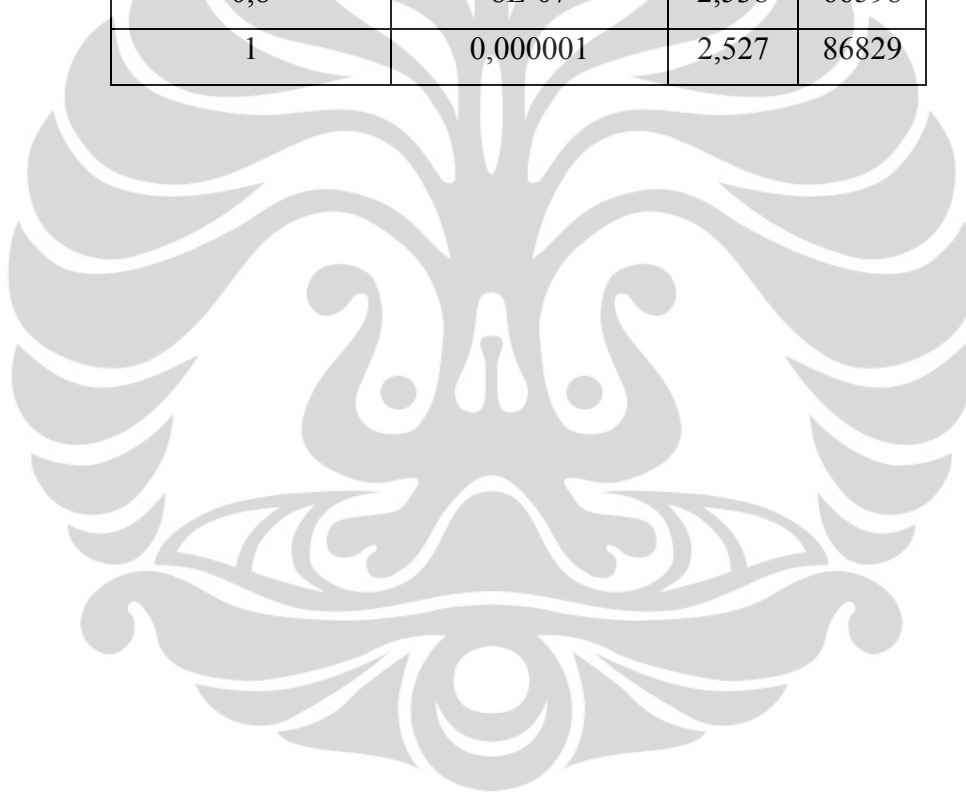
- SIMANGUNSONG, D. 2004. *Penghilangan Emisi Gas H₂S dengan Metode Biofilter Menggunakan Media Organik*. Skripsi, IPB.
- SIMANJUNTAK, J. 2008. *Reduksi gas dinitrogen monoksida dengan menggunakan pupuk kompos sebagai biofilter*. Sarjana, Universitas Indonesia.
- SMART, LESLEY, MOORE & ELAINE 2001. *Solid State Chemistry*, Cheltenham, Nelson Thornes Ltd.
- SONG, J. & KINNEY, K. A. 2000. Effect of Vapor-Phase Bioreactor Operation on Biomass Accumulation, Distribution, and Activity: Linking Biofilm Properties to Bioreactor Performance. *Biotechnology Bioengineering*, 68, 508-16.
- SONG, J. & KINNEY, K. A. 2002. A Model to Predict Long-Term Performance of Vapor-Phase Bioreactors: a Cellular Automaton Approach. *Environmental Science Technology*, 36, 2498-507.
- SPIECK, E. & BOCK, E. 2005. The Lithoautotrophic Nitrite-Oxidizing Bacteria. *In: GARRITY, G. (ed.) Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*.
- STEWART, P. S. & FRANKLIN, M. J. 2008. Physiological Heterogeneity in Biofilms. *Natural Rev Microbiology*, 6, 199-210.
- STOECKINGER, A. J. 2004. *Zeolite Packed Biologically Active Filter (Biofilter) to Reduce Odorous Emissions from a Confined Swine Building*. Master, Oregon State University.
- 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., HERMANSYAH, H. & NASIKIN, M. 2009. Pengaruh Parameter Operasi dalam Proses Biofiltrasi N₂O dengan Medium Filter Berbasis Kompos. *Seminar Tjipto Utomo*. Kampus ITENAS Bandung.
- 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.
- WEITKAMP, L. & PUPPE, L. 1999. *Catalysis and Zeolite*, New York.
- WIHARDJAKA, A. 2004. Loka Penelitian Pencemaran Lingkungan Pertanian: Mewaspadai Emisi Gas Nitro-Oksida dari Lahan Persawahan.
- YANG, W.-F., HSING, H.-J., YANG, Y.-C. & SHYNG, J.-Y. 2007. The Effects of Selected Parameters on The Nitric Oxide Removal by Biofilter. *Journal of Hazardous Materials*, 7.
- YANG, Y. & ALLEN, E. R. 1994. Biofiltration Control of Hydrogen Sulphide: Design and Operational Parameters. *Journal Air Waste Manage Association*, 44, 863-868.
- 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.
- ZILLI, M. 2001. Toluene and Styrene Removal from Air in Biofilter. *Process Biochemical*, 37, 423-429.
- ZILLI, M., PALAZZI, E., SENE, L., CONVERTI, A. & BORGHI, M. D. 2003. *Process Biochemistry*, 37.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Kalibrasi N₂O

Volume Gas dalam <i>Syringe</i> (ml)	Volume Gas dalam <i>Syringe</i> (m ³)	Waktu Retensi	Luas Area
0,2	2E-07	2,55	20850
0,4	4E-07	2,547	36683
0,6	6E-07	2,525	52928
0,8	8E-07	2,538	66598
1	0,000001	2,527	86829



Lampiran 2. Data Hasil Uji Variasi pH Awal Media 8

Langkah perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O :

- Menghitung volume N_2O hasil biofiltrasi dari persamaan kalibrasi.
- Menghitung massa N_2O dengan massa jenis $N_2O = 1812 \text{ g/mL}$
- Menghitung konsentrasi N_2O

t (Jam)	Port	T ($^{\circ}C$)	Kelembapan	Retention Time	Luas Area	Konsentrasi	Volume (m^3)	Massa (g)	Konsentrasi (g/m^3)	RE (%)
1	in 1	27,5	70	2,612	103999	1,4096	1,25E-06	0,002226	2260,108	2,660744
	in 2	27,5	70	2,61	94476	1,2844	1,13E-06	0,002044	2044,412	-
	in 3	27,5	70	2,61	94265	1,3213	1,13E-06	0,00204	2039,633	-
	in 4	27,5	70	2,62	95578	1,3688	1,14E-06	0,002069	2069,372	-
2	out 1	27,5	70	2,61	91247	1,289	1,09E-06	0,001971	1971,275	3,351471
	out 2	27,5	70	2,613	94557	1,2927	1,13E-06	0,002046	2046,246	0,324264
	out 3	27,5	70	2,593	91869	1,2682	1,1E-06	0,001985	1985,363	2,660744
	out 1	28,5	65	2,63	100376	1,391	1,2E-06	0,002178	2178,047	6,78623
3	out 2	28,5	65	2,633	85831	1,1825	1,02E-06	0,001849	1848,602	9,365908
	out 3	29,1	62	2,628	95885	1,0443	1,15E-06	0,002076	2076,326	1,799001
3	out 1	28,9	61	2,63	82498	0,8715	9,79E-07	0,001773	1773,11	13,06718

	out 2	28,9	61	2,627	84667	0,9159	1,01E-06	0,001822	1822,238	10,65852
	out 3	28,9	61	2,635	77832	0,9045	9,2E-07	0,001667	1667,425	18,24875
4	out 1	29	62	2,6	48942	0,576	5,59E-07	0,001013	1013,067	50,33093
	out 2	28,4	63	2,618	71181	0,8247	8,37E-07	0,001517	1516,78	25,63465
	out 3	28,6	66	2,622	98646	1,0712	1,18E-06	0,002139	2138,862	4,865075
	out 4	28,6	66	2,628	107194	1,1312	1,29E-06	0,002332	2332,474	14,35758
5	out 1	28,9	66	2,627	38983	0,4191	4,35E-07	0,000787	787,4952	61,39034
	out 2	28,9	66	2,627	33745	0,3706	3,69E-07	0,000669	668,8545	67,20711
	out 3	28,9	66	2,623	75852	0,8107	8,95E-07	0,001623	1622,578	20,44753
	out 4	28,9	66	2,637	90872	1,0786	1,08E-06	0,001963	1962,781	3,767907
6	out 5	28,9	66	2,618	65559	0,751	7,67E-07	0,001389	1389,442	31,87785
	out 1	28,8	65	2,615	80412	0,6495	9,52E-07	0,001726	1725,862	15,38368
	out 2	28,8	65	2,633	101495	1,0807	1,22E-06	0,002203	2203,392	8,028873
23	out 3	28,8	65	2,627	45184	0,5293	5,12E-07	0,000928	927,9479	54,50416
	out 1	27,6	67	2,782	45748	0,5691	5,19E-07	0,000941	940,7225	53,87785
24	out 1	28,1	63	2,548	24506	0,2574	2,54E-07	0,00046	459,5912	77,46696
	out 2	28,4	63	2,613	102752	1,3015	1,23E-06	0,002232	2231,863	9,424764

Lampiran 3. Data Hasil Uji Variasi pH Awal Media 7

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

t (Jam)	Port	T (°C)	Kelembapan	Retention Time	Luas Area	Konsentrasi	Volume (m ³)	Massa (g)	Konsentrasi (g/m ³)	RE (%)
1	in 1	28,3	64	2,608	132916	1,7887	1,61E-06	0,002915	2915,078	-
	in 2	28,3	64	2,75	84377	1,1473	1E-06	0,001816	1815,669	
	out 1	28,5	62	2,685	79630	1,1062	9,43E-07	0,001708	1708,15	5,921758
2	out 2	28,5	62	2,73	78491	0,8153	9,28E-07	0,001682	1682,351	7,342631
	out 3	28,5	62	2,622	81672	1,132	9,68E-07	0,001754	1754,401	3,374417
	in 1	28,7	60	2,737	80796	1,0167	9,57E-07	0,001735	1734,56	-
3	in 2	28,7	60	2,735	76722	0,9563	9,06E-07	0,001642	1642,284	-
	out 1	28,7	60	2,733	76656	0,897	9,06E-07	0,001641	1640,789	9,631746
	out 2	28,7	60	2,72	45769	0,653	5,19E-07	0,000941	941,1981	48,16247
3	out 3	28,7	60	2,715	77985	1,0692	9,22E-07	0,001671	1670,891	7,973853
	in 1	29	61	2,732	81425	1,0957	9,65E-07	0,001749	1748,807	-

	in 2	29	61	2,733	116142	1,261	1,4E-06	0,002535	2535,147	-
	out 1	29	61	2,723	79451	1,0914	9,4E-07	0,001704	1704,095	6,145056
4	out 2	29	62	2,737	74628	0,785	8,8E-07	0,001595	1594,854	12,16162
	out 3	29	62	2,737	79339	0,9939	9,39E-07	0,001702	1701,559	6,284773
	in 1	28,9	60	2,7	73237	1,0473	8,63E-07	0,001563	1563,348	-
	out 1	28,9	60	2,693	48112	0,6843	5,49E-07	0,000994	994,2671	45,23964
	out 2	28,9	60	2,703	15123	0,2148	1,36E-07	0,000247	247,0662	86,39256
5	out 3	28,9	60	2,697	28680	0,4026	3,06E-07	0,000554	554,1323	69,48055
	out 1	29	60	2,7	77143	1,0811	9,12E-07	0,001652	1651,819	9,024226
	out 2	29	60	2,71	75476	1,0581	8,91E-07	0,001614	1614,062	11,10376
	out 3	29	60	2,688	78232	1,0932	9,25E-07	0,001676	1676,485	7,665727
	out 4	29	60	2,707	78177	1,0695	9,25E-07	0,001675	1675,239	7,734338
6	out 5	29	60	2,67	40408	0,8277	4,52E-07	0,00082	819,7715	54,85018
	out 1	29,2	59	2,705	20883	0,27	2,08E-07	0,000378	377,5302	79,20711
	out 2	29,2	59	2,705	29952	0,4115	3,22E-07	0,000583	582,9431	67,89377
	out 3	29,2	59	2,703	25198	0,3484	2,62E-07	0,000475	475,265	73,82426
23	out 4	29,2	59			0,9429	-5,3E-08	-9,5E-05	-95,4698	105,2581
	out 1	27,1	63	2,822	38308	0,332	4,26E-07	0,000772	772,2065	57,46987

	out 2	27,1	63	2,84	47593	0,5142	5,42E-07	0,000983	982,5117	45,88708
	out 3	27,1	63	2,868	14486	0,1823	1,28E-07	0,000233	232,6382	87,1872
	out 4	27,1	62	2,79	33376	0,2359	3,65E-07	0,00066	660,4967	63,62241
	out 5	27,1	62	2,753	14258	0,158	1,26E-07	0,000227	227,474	87,47162
	out 6	27,1	62	2,753	33388	0,4039	3,65E-07	0,000661	660,7685	63,60744
	out 1	27,5	63	2,78	64713	0,9141	7,56E-07	0,00137	1370,28	24,53033
	out 2	27,5	63	2,862	8439	0,1158	5,28E-08	9,57E-05	95,6736	94,73067
24	out 3	27,5	63	2,823	46236	0,6378	5,25E-07	0,000952	951,7757	47,5799
	out 4	27,5	63	2,79	21317	0,258	2,14E-07	0,000387	387,3603	78,6657
	out 5	27,5	63	2,792	33709	0,467	3,69E-07	0,000668	668,0391	63,20701

Lampiran 4. Data Hasil Uji Variasi pH Awal Media 6

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

t (Jam)	Port	T (°C)	Kelembapan	Retention Time	Luas Area	Konsentrasi	Volume (m ³)	Massa (g)	Konsentrasi (g/m ³)	RE (%)
1	in 1	27,5	65	2,618	78466	1,1061	9,28E-07	0,001682	1681,785	-
	in 2	27,5	65	2,608	76500	1,0677	9,04E-07	0,001637	1637,255	-
	in 3	27,5	65	2,3635	105234	1,5034	1,26E-06	0,002288	2288,08	-
	in 4	27,5	65	2,675	101904	1,3899	1,22E-06	0,002213	2212,656	-
2	out 1	26,3	65	2,642	77727	1,0571	9,19E-07	0,001665	1665,047	1,476074
	out 2	26,3	65	2,638	79574	1,0855	9,42E-07	0,001707	1706,881	1,011434
	out 3	26,3	65	2,65	102201	1,1627	1,22E-06	0,002219	2219,383	31,4851
	in 1	28	60	2,65	79896	1,0946	9,46E-07	0,001714	1714,175	-
2	in 2	28	60	2,647	78823	1,1015	9,33E-07	0,00169	1689,871	-
	out 1	28	60	2,658	79258	1,0903	9,38E-07	0,0017	1699,724	0,585851
2	out 2	28	60	2,66	79128	1,0924	9,36E-07	0,001697	1696,779	0,410769

	out 3	28	60	2,663	78070	1,089	9,23E-07	0,001673	1672,816	1,014128
3	in 1	28,4	58	2,632	78634	1,1035	9,3E-07	0,001686	1685,59	-
	out 1	28,4	58	2,675	79699	1,0878	9,44E-07	0,00171	1709,713	1,179782
	out 2	28,4	58	2,673	79686	1,0947	9,43E-07	0,001709	1709,418	1,162274
	out 3	28,4	58	2,677	78540	1,0835	9,29E-07	0,001683	1683,461	0,38114
4	out 1	29,1	57	2,678	84466	1,133	1E-06	0,001818	1817,685	7,599898
	out 2	29,1	57	2,677	59322	0,8726	6,89E-07	0,001248	1248,174	26,26362
	out 3	29,1	57	2,682	78580	1,0958	9,3E-07	0,001684	1684,367	0,327268
	out 1	29,1	55	2,672	80462	1,057	9,53E-07	0,001727	1726,995	2,207378
5	out 2	29,1	55	2,682	79762	1,0566	9,44E-07	0,001711	1711,14	1,264629
	out 3	29,1	55	2,682	57484	0,8027	6,66E-07	0,001207	1206,543	28,73901
	out 4	29,1	55	2,687	57073	0,7035	6,61E-07	0,001197	1197,234	29,29253
	out 1	29,4	53	2,687	82348	1,073	9,77E-07	0,00177	1769,712	4,747411
6	out 2	29,4	53	2,678	61234	0,8497	7,13E-07	0,001291	1291,48	23,68857
	out 3	29,4	53	2,688	57955	0,7878	6,72E-07	0,001217	1217,211	28,10467
	out 4	29,4	53	2,667	54481	0,731	6,28E-07	0,001139	1138,525	32,7834
	in 1	27,1	66	2,643	88942	1,2237	1,06E-06	0,001919	1919,067	-
23	in 2	27,1	66	2,65	83391	1,0874	9,9E-07	0,001793	1793,336	-

	out 1	27,1	66	2,662	80232	1,0784	9,5E-07	0,001722	1721,785	1,897618
	out 2	27,1	66	2,653	69650	0,9431	8,18E-07	0,001482	1482,103	12,35404
	out 3	27,1	66	2,658	67929	0,9216	7,96E-07	0,001443	1443,122	14,67186
	in 1	27,6	62	2,635	82112	1,0977	9,74E-07	0,001764	1764,367	-
24	out 1	27,6	62	2,672	21876	0,2971	2,21E-07	0,0004	400,0217	76,69526
	out 2	27,6	62	2,667	89261	1,1831	1,06E-06	0,001926	1926,292	14,05772
	out 3	27,6	62	2,665	82480	1,0844	9,78E-07	0,001773	1772,702	4,925186
	out 4	27,6	62	2,672	58277	0,8001	6,76E-07	0,001225	1224,504	27,67101

Lampiran 5. Data Hasil Uji Variasi pH Awal Media 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

t (Jam)	Port	T (°C)	Kelembapan	Retention Time	Luas Area	Konsentrasi	Volume (m ³)	Massa (g)	Konsentrasi (g/m ³)	RE (%)
1	in 1	27,4	63	2,645	98256	1,3075	1,18E-06	0,00213	2130,029	-
	in 2	27,4	63	2,653	82754	1,0933	9,82E-07	0,001779	1778,908	-
	in 3	27,3	62	2,637	84013	1,1104	9,97E-07	0,001807	1807,425	-
	out 1	27,3	62	2,663	81934	1,1272	9,71E-07	0,00176	1760,335	2,605328
	out 2	27,3	62	2,667	20070	0,2065	1,98E-07	0,000359	359,1158	80,13108
2	out 3	27,4	63	2,668	27202	0,3078	2,87E-07	0,000521	520,6556	71,19351
	out 4	27,4	62	2,675	61187	0,6306	7,12E-07	0,00129	1290,416	28,60473
	out 5	27,3	61	2,695	73626	0,6905	8,68E-07	0,001572	1572,159	13,01662
	in 1	27,9	59	2,72	79675	1,0644	9,43E-07	0,001709	1709,169	-
	in 2	27,9	59	2,715	104482	1,1584	1,25E-06	0,002271	2271,048	-
	in 3	28	58	2,71	130546	1,4538	1,58E-06	0,002861	2861,397	-

	in 4	28	58	2,703	96655	1,1463	1,16E-06	0,002094	2093,766	-
	out 1	27,7	61	2,703	80787	1,0812	9,57E-07	0,001734	1734,356	4,042708
	out 2	27,7	60	2,71	34124	0,454	3,74E-07	0,000677	677,4389	62,51911
	out 3	27,8	60	2,688	21031	0,2183	2,1E-07	0,000381	380,8824	78,92679
	out 4	27,8	60	2,712	56204	0,757	6,5E-07	0,001178	1177,551	34,84924
	out 5	27,9	59	2,71	76030	0,7575	8,98E-07	0,001627	1626,61	10,00401
	in 1	28	59			1,0671	-5,3E-08	-9,5E-05	-95,4698	-
	in 2	28	59			1,2971	-5,3E-08	-9,5E-05	-95,4698	-
	in 3	28	59			1,0967	-5,3E-08	-9,5E-05	-95,4698	-
3	out 1	28	59	2,713	26687	0,3093	2,81E-07	0,000509	508,9908	71,83889
	out 2	27,9	59	2,722	52877	0,3045	6,08E-07	0,001102	1102,194	39,01852
	out 3	27,9	59	2,728	39386	0,3699	4,4E-07	0,000797	796,6232	55,92496
	out 1	27,9	59	2,713	58350	0,5899	6,77E-07	0,001226	1226,158	32,15995
	out 2	27,9	59	2,715	53533	0,5268	6,16E-07	0,001117	1117,053	38,19645
4	out 3	27,9	59	2,74	73381	0,7037	8,65E-07	0,001567	1566,61	13,32364
	out 4	28	60	2,737	80842	0,7771	9,58E-07	0,001736	1735,602	3,973784
	out 5	28	60	2,715	28046	0,3183	2,98E-07	0,00054	539,7722	70,13584
5	out 1	28	59	2,742	83547	0,9754	9,92E-07	0,001797	1796,87	0,583975

	out 2	28,1	59	2,732	48502	0,5038	5,54E-07	0,001003	1003,101	44,50112
	out 3	28,1	60	2,737	78307	0,8008	9,26E-07	0,001678	1678,184	7,150555
	out 4	28,3	59	2,75	48721	0,6385	5,56E-07	0,001008	1008,061	44,22667
	out 5	28,3	58	2,748	74824	0,9903	8,83E-07	0,001599	1599,294	11,51533
6	out 1	28,1	59	2,748	38391	0,3362	4,27E-07	0,000774	774,0864	57,17186
	out 2	28	59	2,555	24028	0,3157	2,48E-07	0,000449	448,7645	75,17106
	out 3	28	59	2,752	45469	0,6092	5,16E-07	0,000934	934,4031	48,30196
	out 1	27,7	63	2,663	21120	0,2286	2,11E-07	0,000383	382,8983	78,81526
23	out 2	28,1	62	2,675	39850	0,5601	4,45E-07	0,000807	807,1328	55,34349
	out 3	28,1	62	2,685	45492	0,4585	5,16E-07	0,000935	934,9241	48,27314
	out 1	28,1	63	2,667	24921	0,3114	2,59E-07	0,000469	468,9909	74,05198
24	out 2	28	62	2,682	14672	0,1545	1,31E-07	0,000237	236,8511	86,89566
	out 3	28,1	62	2,692	65307	0,7338	7,64E-07	0,001384	1383,734	23,44169

Lampiran 6. Data Hasil Uji Variasi pH Awal Media 4

Langkah perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O :

- Menghitung volume N_2O hasil biofiltrasi dari persamaan kalibrasi.
- Menghitung massa N_2O dengan massa jenis $N_2O = 1812 \text{ g/mL}$
- Menghitung konsentrasi N_2O

t (Jam)	Port	T ($^{\circ}C$)	Kelembapan	Retention Time	Luas Area	Konsentrasi	Volume (m^3)	Massa (g)	Konsentrasi (g/m^3)	RE (%)
1	in 1	28,3	59	2,657	80264	1,1186	9,51E-07	0,001723	1722,51	-
	in 2	28,3	59	2,665	74497	1,095	8,79E-07	0,001592	1591,887	-
	in 3	28,3	59	2,665	77163	1,10567	9,12E-07	0,001652	1652,272	-
	out 1	28,3	59	2,668	86040	1,0401	1,02E-06	0,001853	1853,336	12,16894
2	out 2	28,3	59	2,673	89355	0,8277	1,06E-06	0,001928	1928,421	16,71328
	out 3	28,3	59	2,677	78093	1,0676	9,23E-07	0,001673	1673,337	1,274881
	out 4	28,3	59	2,662	74823	1,0307	8,83E-07	0,001599	1599,271	3,207764
	in 1	29,1	60	2,725	86337	1,2202	1,03E-06	0,00186	1860,063	-
	in 2	29,1	60	2,675	95551	1,2944	1,14E-06	0,002069	2068,76	-
	out 1	29,1	60	2,683	55335	0,7215	6,39E-07	0,001158	1157,868	29,92268
	out 2	29,1	60	2,69	60297	0,847	7,01E-07	0,00127	1270,257	23,12058

3	out 3	29,1	60	2,678	53755	0,7485	6,19E-07	0,001122	1122,081	32,08861
	out 1	28,9	58	2,697	70439	0,9678	8,28E-07	0,0015	1499,974	9,217525
	out 2	28,9	58	2,692	17761	0,2404	1,69E-07	0,000307	306,8169	81,43061
	out 3	28,9	58	2,683	94296	1,1468	1,13E-06	0,00204	2040,335	23,48659
4	out 4	28,9	58	2,687	67703	0,6589	7,94E-07	0,001438	1438,003	12,96814
	out 1	29,1	57	2,697	39219	0,4615	4,38E-07	0,000793	792,8406	52,01513
	out 2	29,1	57	2,703	14485	0,0375	1,28E-07	0,000233	232,6155	85,92148
	out 3	29,1	57	2,683	36849	0,3096	4,08E-07	0,000739	739,1601	55,26402
5	out 4	29,1	57	2,705	77149	0,7152	9,12E-07	0,001652	1651,955	0,019192
	out 1	29,6	56	2,698	79937	1,0524	9,47E-07	0,001715	1715,103	3,802709
	out 2	29,6	56	2,683	17655	0,2037	1,68E-07	0,000304	304,416	81,57592
	out 3	29,6	56	2,708	55991	0,7575	6,47E-07	0,001173	1172,726	29,02341
6	out 4	29,4	54	2,703	44870	0,6203	5,08E-07	0,000921	920,8358	44,26852
	out 5	29,4	54	2,7	222000	0,2785	2,72E-06	0,004933	4932,83	198,5483
	out 6	29,4	54	2,708	68243	0,9182	8E-07	0,00145	1450,234	12,22789
	out 1	29,6	55	2,707	51237	0,5855	5,88E-07	0,001065	1065,048	35,54038
6	out 2	29,6	55	2,712	60831	0,7284	7,08E-07	0,001282	1282,352	22,38855
	out 3	29,6	55	2,685	31300	0,4057	3,39E-07	0,000613	613,4753	62,87081

	out 4	29,6	55	2,702	20890	0,2512	2,08E-07	0,000378	377,6888	77,14125
23	out 1	27,7	60	2,625	35565	0,5125	3,92E-07	0,00071	710,0775	57,02418
	out 2	27,7	60	2,62	26432	0,3207	2,78E-07	0,000503	503,2151	69,54406
	out 3	27,7	60	2,623	63461	0,761	7,41E-07	0,001342	1341,922	18,78324
	out 4	27,8	60	2,628	75640	0,8596	8,93E-07	0,001618	1617,776	2,087789
24	out 1	27,8	60	2,613	71162	0,5114	8,37E-07	0,001516	1516,35	8,226408
	out 2	27,8	60	2,627	23687	0,1083	2,43E-07	0,000441	441,0408	73,30701
	out 3	27,8	60	2,61	33481	0,4199	3,66E-07	0,000663	662,8749	59,88101
	out 4	27,8	60	2,625	44237	0,5697	5E-07	0,000906	906,4983	45,13626

Lampiran 7. Data Hasil Uji Variasi Tanpa Inokulasi Mikroba

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

t (Jam)	Port	T (°C)	Kelembapan	Retention Time	Luas Area	Konsentrasi	Volume (m ³)	Massa (g)	Konsentrasi (g/m ³)	RE (%)
1	in 1	28,3	67	2,54	100076	1,3792	1,2E-06	0,002171	2171,252	-
	in 2	28,3	67	2,548	108916	1,5322	1,31E-06	0,002371	2371,478	-
	in 3	28,3	67	2,552	107744	1,4842	1,29E-06	0,002345	2344,932	-
	in 4	28,3	67	2,558	105445	1,4206	1,27E-06	0,002293	2292,86	-
2	out 1	28,5	65	2,557	99128	1,398	1,19E-06	0,00215	2149,779	8,322306
	out 2	28,5	65	2,547	125615	1,6877	1,52E-06	0,00275	2749,71	17,26183
	out 3	28,5	65	2,547	96427	1,3695	1,15E-06	0,002089	2088,602	10,93124
3	out 1	28,6	64	2,563	116490	1,5764	1,4E-06	0,002543	2543,029	8,447875
	out 2	28,6	64	2,577	103520	1,432	1,24E-06	0,002249	2249,258	4,080016
	out 3	28,6	64	2,577	149854	2,1017	1,82E-06	0,003299	3298,723	40,67459
3	out 1	29,7	64	2,568	128417	1,7582	1,55E-06	0,002813	2813,175	19,96832
	out 2	29,7	64	2,585	125935	1,7251	1,52E-06	0,002757	2756,958	17,57092

4	out 3	29,7	64	2,585	64592	0,9152	7,55E-07	0,001368	1367,539	41,68107
	out 1	29,8	64	2,59	101167	1,3796	1,21E-06	0,002196	2195,963	6,352809
	out 2	29,8	64	2,592	108157	1,4838	1,3E-06	0,002354	2354,286	0,398922
5	out 3	29,8	64	2,598	149249	2,0644	1,81E-06	0,003285	3285,02	40,09022
	out 1	29,2	61	2,593	79959	1,1346	9,47E-07	0,001716	1715,602	26,83789
	out 2	29,2	61	2,597	92643	1,2672	1,11E-06	0,002003	2002,894	14,58625
	out 3	29,2	61	2,597	98269	1,3469	1,18E-06	0,00213	2130,323	9,152025
	out 4	29,2	61	2,592	98840	1,3631	1,18E-06	0,002143	2143,256	8,600489
6	out 1	29,3	62	2,592	86755	1,2061	1,03E-06	0,00187	1869,531	20,27355
	out 2	29,3	62	2,59	90825	1,237	1,08E-06	0,001962	1961,717	16,34228
	out 3	29,3	62	2,593	101236	1,3904	1,21E-06	0,002198	2197,526	6,286161
23	out 1	27,3	69	2,572	104927	1,4374	1,26E-06	0,002281	2281,127	2,720977
	out 2	27,3	69	2,572	105043	1,4236	1,26E-06	0,002284	2283,754	2,608931
	out 3	27,3	69	2,555	90455	1,2674	1,08E-06	0,001953	1953,336	16,69967
24	out 1	27,8	66	2,572	115760	1,6072	1,39E-06	0,002526	2526,494	7,742758
	out 2	27,8	66	2,583	109309	1,5675	1,31E-06	0,00238	2380,379	1,511654
	out 3	27,8	66	2,573	93656	1,2849	1,12E-06	0,002026	2025,839	13,60778

Lampiran 8. Data Pemodelan Adsorpsi Isoteremis Variasi pH Awal Media 8

Volume Zeolit Alam : 0,004241 m³

Massa Zeolit Alam : 4000 g

t (Jam)	Luas Area N ₂ O pada t	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	RE (%)	Model Langmuir			Model Freundlich	
					qe (g N ₂ O / g zeolit)	C _{ads} = Ce (g N ₂ O / m ³)	Ce/qe (g zeolit / m ³)	ln Ce	ln qe
0	94265	0,00204	2039,633	0					
1	91869	0,001985	1985,363	2,660744	5,75E-05	54,2694	943225,8	3,993961	-9,7631
2	85831	0,001849	1848,602	9,365908	0,000203	245,2995	1211185	5,50248	-8,50463
3	77832	0,001667	1667,425	18,24875	0,000395	617,5069	1564849	6,42569	-7,83761
4	71181	0,001517	1516,78	25,63465	0,000554	1140,36	2057208	7,039099	-7,49776
5	65559	0,001389	1389,442	31,87785	0,000689	1790,55	2597535	7,490278	-7,27979
6	45184	0,000928	927,9479	54,50416	0,001179	2902,235	2462446	7,973236	-6,74343
23	45748	0,000941	940,7225	53,87785	0,001165	4001,145	3434297	8,294336	-6,75499
24	24506	0,00046	459,5912	77,46696	0,001675	5581,187	3331760	8,627157	-6,39185

Lampiran 9. Data Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi pH Awal Media 7

Volume Zeolit Alam : 0,004241 m³

Massa Zeolit Alam : 4000 g

t (Jam)	Luas Area N ₂ O pada t	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	RE (%)	Model Langmuir			Model Freundlich	
					qe (g N ₂ O / g zeolit)	C _{ads} = C _e (g N ₂ O / m ³)	C _e /q _e (g zeolit / m ³)	ln C _e	ln q _e
0	84377	0,001816	1815,669	0					
1	79630	0,001708	1708,15	5,921758	0,000114	107,5196	943225,8	4,677673	-9,07939
2	76656	0,001641	1640,789	9,631746	0,000185	282,4002	1523137	5,643325	-8,59296
3	74628	0,001595	1594,854	12,16162	0,000234	503,2151	2149518	6,221018	-8,35974
4	48112	0,000994	994,2671	45,23964	0,000871	1324,617	1521073	7,188879	-7,04605
5	40408	0,00082	819,7715	54,85018	0,001056	2320,515	2197785	7,749544	-6,85342
6	29952	0,000583	582,9431	67,89377	0,001307	3553,241	2718778	8,175616	-6,64008
23	14258	0,000227	227,474	87,47162	0,001684	5141,437	3053488	8,545088	-6,38671
24	8439	9,57E-05	95,6736	94,73067	0,001824	6861,432	3762730	8,833672	-6,30698

Lampiran 10. Data Pemodelan Adsorpsi Isoteremis Variasi pH Awal Media 6

Volume Zeolit Alam : 0,004241 m³

Massa Zeolit Alam : 4000 g

t (Jam)	Luas Area N ₂ O pada t	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	RE (%)	Model Langmuir			Model Freundlich	
					qe (g N ₂ O / g zeolit)	Cads = Ce (g N ₂ O / m ³)	Ce/qe (g zeolit / m ³)	ln Ce	ln qe
0	78823	0,00169	1689,871	0					
1	77727	0,001665	1665,047	1,476074	2,63E-05	24,8244	943225,8	3,211827	-10,5452
2	78070	0,001673	1672,816	1,014128	1,81E-05	49,6488	2745752	3,904974	-10,9206
3	78540	0,001683	1683,461	0,38114	6,8E-06	66,70425	9815547	4,200269	-11,8992
4	59322	0,001248	1248,174	26,26362	0,000468	73,1142	156132,1	4,292023	-7,66644
5	57484	0,001207	1206,543	28,73901	0,000512	514,8119	1004667	6,243801	-7,57636
6	54481	0,001139	1138,525	32,7834	0,000585	998,1402	1707587	6,905894	-7,4447
23	67929	0,001443	1443,122	14,67186	0,000262	1549,487	5923084	7,345679	-8,24869
24	21876	0,0004	400,0217	76,69526	0,001367	1796,236	1313530	7,493448	-6,59478

Lampiran 11. Data Pemodelan Adsorpsi Isoteremis Variasi pH Awal Media 5

Volume Zeolit Alam : 0,004241 m³

Massa Zeolit Alam : 4000 g

t (Jam)	Luas Area N ₂ O pada t	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	RE (%)	Model Langmuir			Model Freundlich	
					qe (g N ₂ O / g zeolit)	Cads = Ce (g N ₂ O / m ³)	Ce/qe (g zeolit / m ³)	ln Ce	ln qe
0	84013	0,001807	1807,425	0					
1	73626	0,001572	1572,159	13,01662	0,000249	235,2656	943225,8	5,460715	-8,29635
2	56204	0,001178	1177,551	34,84924	0,000668	865,1394	1295532	6,762891	-7,31154
3	52877	0,001102	1102,194	39,01852	0,000748	1570,37	2100325	7,359066	-7,19854
4	53533	0,001117	1117,053	38,19645	0,000732	2260,742	3088755	7,723448	-7,21983
5	48502	0,001003	1003,101	44,50112	0,000853	3065,066	3594383	8,027824	-7,06706
6	38391	0,000774	774,0864	57,17186	0,001096	4098,404	3741002	8,318353	-6,81651
23	45492	0,000935	934,9241	48,27314	0,000925	4970,905	5373848	8,511357	-6,9857
24	24921	0,000469	468,9909	74,05198	0,001419	6309,339	4446339	8,749786	-6,55781

Lampiran 12. Data Pemodelan Adsorpsi Isoterms Variasi pH Awal Media 4

Volume Zeolit Alam : 0,004241 m³

Massa Zeolit Alam : 4000 g

t (Jam)	Luas Area N ₂ O pada t	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	RE (%)	Model Langmuir			Model Freundlich	
					qe (g N ₂ O / g zeolit)	Cads = Ce (g N ₂ O / m ³)	Ce/qe (g zeolit / m ³)	ln Ce	ln qe
0	77163	0,001652	1652,272	0					
1	74823	0,001599	1599,271	3,207764	5,62E-05	53,001	943225,8	3,970311	-9,78675
2	60297	0,00127	1270,257	23,12058	0,000405	106,002	261727,5	4,663458	-7,8116
3	67703	0,001438	1438,003	12,96814	0,000227	488,0169	2148281	6,19035	-8,38983
4	39219	0,000793	792,8406	52,01513	0,000911	702,2859	770758,4	6,554341	-7,00079
5	55991	0,001173	1172,726	29,02341	0,000508	1561,718	3071765	7,353541	-7,58422
6	51237	0,001065	1065,048	35,54038	0,000623	2041,263	3278770	7,621324	-7,38165
23	35565	0,00071	710,0775	57,02418	0,000999	2628,487	2631364	7,874164	-6,90885
24	33481	0,000663	662,8749	59,88101	0,001049	3570,682	3404051	8,180512	-6,85996

Lampiran 13. Data Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi Tanpa Inokulasi Mikroba

Volume Zeolit Alam : 0.004241 m³

Massa Zeolit Alam : 4000 g

t (Jam)	Luas Area N ₂ O pada t	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	RE (%)	Model Langmuir			Model Freundlich	
					q _e (g N ₂ O / g zeolit)	C _{ads} = C _e (g N ₂ O / m ³)	C _e /q _e (g zeolit / m ³)	ln C _e	ln q _e
0	107744	0,002345	2344,932	0					
1	99128	0,00215	2149,779	8,322306	0,000207	195,1524	943225,8	5,273781	-8,48328
2	103520	0,002249	2249,258	4,080016	0,000101	390,3048	3847932	5,966928	-9,19612
3	64592	0,001368	1367,539	41,68107	0,001036	485,9784	468989,9	6,186164	-6,87217
4	101167	0,002196	2195,963	6,352809	0,000158	1463,371	9265612	7,288498	-8,75332
5	92643	0,002003	2002,894	14,58625	0,000363	1612,34	4446297	7,385442	-7,92214
6	90825	0,001962	1961,717	16,34228	0,000406	1954,378	4810401	7,577827	-7,80846
23	90455	0,001953	1953,336	16,69967	0,000415	2337,593	5630494	7,756877	-7,78683
24	93656	0,002026	2025,839	13,60778	0,000338	2729,189	8067366	7,91176	-7,99158