

**REDUKSI GAS DINITROGEN MONOKSIDA
DENGAN MENGGUNAKAN PUPUK KOMPOS
SEBAGAI BIOFILTER**

SKRIPSI

Oleh

JOSIA SIMANJUNTAK
0404060365



**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GENAP 2007/2008**

**REDUKSI GAS DINITROGEN MONOKSIDA
DENGAN MENGGUNAKAN PUPUK KOMPOS
SEBAGAI BIOFILTER**

SKRIPSI

Oleh

JOSIA SIMANJUNTAK
0404060365



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GANJIL 2007/2008**

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul,

REDUKSI GAS DINITROGEN MONOKSIDA DENGAN MENGUNAKAN PUPUK KOMPOS SEBAGAI BIOFILTER

Yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 21 Juni 2008

Josia Simanjuntak
0404060365

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul,

REDUKSI GAS DINITROGEN MONOKSIDA DENGAN MENGUNAKAN PUPUK KOMPOS SEBAGAI BIOFILTER

Dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam sidang ujian skripsi.

Depok, 21 Juni 2008

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. HERI HERMANSYAH S.T., M.Eng.

TANIA SURYA UTAMI, S.T., M.T

NIP. 132 233 211

NIP. 132 206 932

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

Dr. Heri Hermansyah, S.T., M. Eng

dan

Tania Surya Utami, S.T., M. T.

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.

Josia Simanjuntak
NPM 0404060365
Departemen Teknik Kimia

Dosen Pembimbing:
Dr. Heri Hermansyah, S.T., M. Eng.
Tania Surya Utami, S.T., M. T.

REDUKSI GAS DINITROGEN MONOKSIDA DENGAN MENGGUNAKAN PUPUK KOMPOS SEBAGAI BIOFILTER

ABSTRAK

Dinitrogen Monoksida (N_2O) merupakan emisi dari proses industri dan kegiatan pertanian. Gas tersebut merupakan gas polutan berbahaya dan menyebabkan masalah lingkungan yang serius seperti pemanasan global. Sebelumnya, teknologi kontrol tradisional seperti *selective catalytic reduction* (SCR) dan *selective non-catalytic reduction* (SNCR) digunakan untuk mengontrol emisi N_2O pada kegiatan-kegiatan industri. Akan tetapi, kedua proses ini membutuhkan suhu yang tinggi dan penggunaan katalis. Selain itu, proses ini membutuhkan biaya instalasi dan operasi yang tinggi, serta menghasilkan produk buangan dalam jumlah cukup besar sehingga mengharuskan pemilik pabrik untuk membayar biaya pembersihan dan pembuangan. Adanya masalah dari segi ekonomi dan teknis memotivasi peneliti untuk mengembangkan teknologi baru yang lebih murah dan efisien untuk menghilangkan N_2O dari gas buangan. Pengolahan N_2O secara biologis adalah salah satu alternatif yang digunakan dalam penghilangan sampah industri dan ramah lingkungan. Sistem pengolahan biologis bisa beroperasi pada suhu ambien dengan menggunakan inokula mikroba yang murah.

Pada skripsi ini, penulis akan menyelidiki pengaruh parameter operasional seperti panjang kolom, laju alir terhadap efisiensi penghilangan N_2O . Biofilter yang digunakan dalam penelitian ini merupakan peralatan dalam skala kecil. Sumber gas N_2O yang berasal dari tabung gas N_2O dalam udara yang dilewatkan ke dalam kolom biofilter dengan panjang 50 cm dan diresirkulasi dengan pompa peristaltik. Kolom biofilter tersebut berisi media filter berupa pupuk kompos dengan panjang tertentu. Proses resirkulasi gas beroperasi selama 6 jam dalam satu hari yang kemudian akan dianalisa konsentrasinya pada setiap jam. Analisa konsentrasi gas dilakukan dengan menggunakan kromatografi gas jenis TCD. Hasil dari analisa gas tersebut kemudian akan dilaporkan dalam skripsi ini sesuai dengan parameter operasional yang dipilih sebelumnya.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa reduksi gas N_2O yang terbaik didapatkan pada panjang kolom biofilter dan laju alir gas N_2O tertinggi yakni pada 50 cm dan 200 cc/menit dengan hasil pengurangan sebesar 70.22%. Nilai efisiensi reduksi ini telah diteliti dengan memvariasikan panjang biofilter setinggi 10, 15, 25, 45, dan 50 cm. Hasil terbaik pada variasi panjang biofilter kemudian divariasikan pada laju alir 25, 32.14, 50, 100, 200 cc/menit. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa efisiensi reduksi gas N_2O dapat dioptimalkan dengan penambahan nutrisi pada panjang kolom dan laju alir gas N_2O terbaik sehingga efisiensi reduksi gas N_2O mencapai 91.49%. Penelitian dapat dimodelkan dalam adsorpsi isoterms Langmuir. K Langmuir yang didapatkan pada penelitian ini adalah 16.006 liter/mol.

Kata kunci : Biofiltrasi, N_2O , Efisiensi reduksi gas, Pupuk kompos

Josia Simanjuntak
0404060365
Chemical Engineering Department

Project Supervisor:
Dr. Heri Hermansyah, S.T., M. Eng.
Tania Surya Utami, S.T., M. T.

NITROUS OXIDE GAS REMOVAL USING COMPOST AS BIOFILTER

ABSTRACT

Nitrous oxide (N_2O) is mostly emitted from various industrial processes and agricultural activities. This gas causes serious environmental problems such as global warming and is considered as a dangerous pollutant. In the past, traditional control technologies, such as selective catalytic reduction (SCR) and selective non catalytic reduction (SNCR), were applied to control N_2O emissions in some industries. However, these two processes required high temperatures and the use of catalysts, involving high installation and operation costs as well as generating a large quantity of secondary waste. Economic and technical constraints in SCR and SNCR methods motivated researchers to develop new, cost-effective processes to remove N_2O . Biofiltration is an emerging technology that offers a number of advantages over traditional methods of air pollution control. Besides of its highly efficient removal of pollutants and low operating cost, it does not generate undesirable byproducts and it degrades many organic and inorganic compound into harmless oxidation products.

In this paper, effects of operational parameters such as column length, gas flow rate, and usage of nutrition towards N_2O reduction efficiency will be observed. The biofilter used in this research is a laboratory scaled instrument. The N_2O gas is fed from the top of the column under the length of 50 cm and is recirculated using peristaltic pump for 6 hours a day. The packing material used in this research is compost from cow manure and is filled under a certain column height. The N_2O concentration in the off-gas is monitored using GC TCD (Gas Chromatography Thermal Conductivity Detector), which was pre-adjusted and calibrated before the experiments were conducted. The result from the gas analysis detected by GC will be further reported in this paper accordingly with the operational parameters chosen before.

The result of this research shows that the highest N_2O gas reduction efficiency is obtained at the highest biofilter length and N_2O gas flowrate, under biofilter length= 50 cm and gas flow rate = 200 cc/min conditions, 70.22% of removal efficiency was achieved. This is observed by varying biofilter length set at 10, 15, 25, 45, and 50 cm. The highest removal efficiency from this variation will further served as a baseline for gas flow rate variation set at 25, 32.14, 50, 100, 200 cc/min. The result also shows that N_2O gas removal efficiency could be optimized by adding nutritional supplement, hence 91.49% of removal efficiency was achieved under the highest biofilter length and N_2O gas flowrate. This research can be modelled into Langmuir adsorption isotherm formula whereas the K obtained in this research is 16.006 liter/mol.

Key Word Biofiltration, N_2O , Gas removal efficiency, Compost

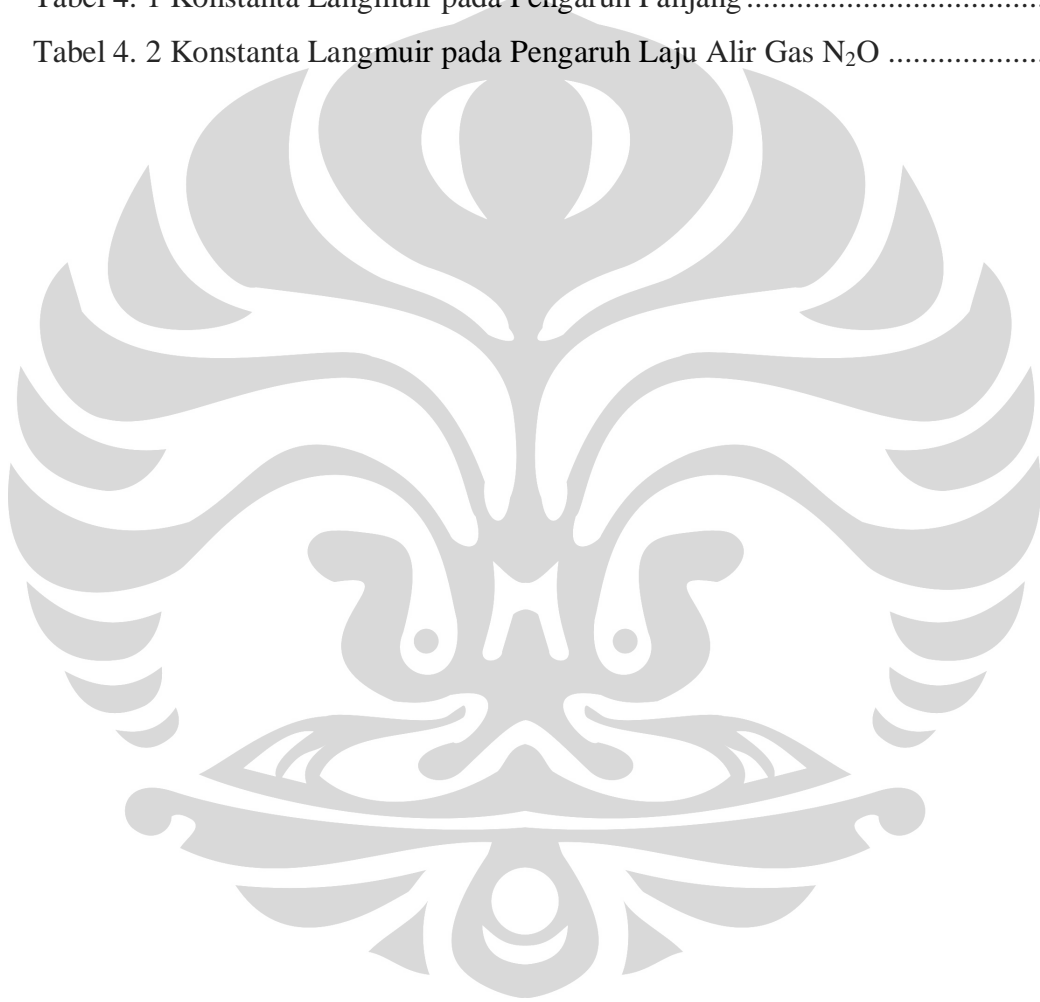
DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	i
PENGESAHAN.....	ii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1. Latar Belakang Masalah.....	1
I.2. Rumusan Permasalahan.....	2
I.3. Tujuan Penelitian.....	3
I.4. Batasan Masalah.....	3
I.5. Sistematika Penulisan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
II.1 Gas Buang.....	5
II.2 Nitrogen Oksida.....	6
II.3 Jenis-Jenis Teknologi Reduksi NO _x	7
II.3.1 Teknologi Pra Pembakaran.....	7
II.3.2 Teknologi Pasca Pembakaran.....	9
II.4 Biofilter.....	12
II.5 Metabolisme Nitrogen.....	15
II.5.1 Denitrifikasi.....	16
II.5.2 Nitrifikasi.....	17
II.5.3 Produksi dan Konsumsi NO _x dalam Biofilter.....	18
II.5.4 Produksi NO _x	18
II.5.5 Konsumsi NO _x	19
II.5.6 Produksi NO _x dalam Tanah.....	20
II.5.7 Konsumsi NO _x dalam Tanah.....	20
II.6 Adsorpsi.....	22

II.6.1	Klasifikasi Adsorpsi.....	22
II.6.2	Breakthrough Curve.....	22
II.6.3	Adsorpsi Isotermis	23
II.7	Kromatografi Gas (<i>Gas Chromatography</i>)	26
BAB III	METODOLOGI PENELITIAN.....	28
III.1	Rancangan Penelitian.....	28
III.2	Material	30
III.3	Desain Biofilter	30
III.4	Kalibrasi Laju Alir dan Volume Gas N ₂ O	31
III.5	Uji Kebocoran	33
III.6	Preparasi Medium Filter	34
III.7	Rancangan Percobaan Eksperimen Biofiltrasi	34
III.8	Analisa Gas N ₂ O.....	35
III.9	Pemodelan Hasil Eksperimen.....	35
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	37
IV.1	Perancangan Desain Biofilter.....	37
IV.2	Uji Kebocoran	38
IV.3	Kalibrasi Flowmeter	38
IV.4	Kalibrasi Volume Gas	40
IV.5	Persiapan Medium Biofilter.....	42
IV.6	Uji Kinerja Biofilter	43
IV.6.1	Uji Waktu Tinggal.....	43
IV.6.2	Kinerja Biofilter Terhadap Reduksi N ₂ O	44
IV.6.3	Pengaruh Panjang Kolom terhadap Reduksi N ₂ O.....	47
IV.6.4	Pengaruh Laju Alir terhadap Reduksi N ₂ O.....	50
IV.6.5	Pengaruh Penggunaan Nutrisi Terhadap Reduksi N ₂ O	53
IV.7	Pemodelan Hasil Eksperimen	56
BAB V	KESIMPULAN.....	68
DAFTAR	PUSTAKA	69
LAMPIRAN	74

DAFTAR TABEL

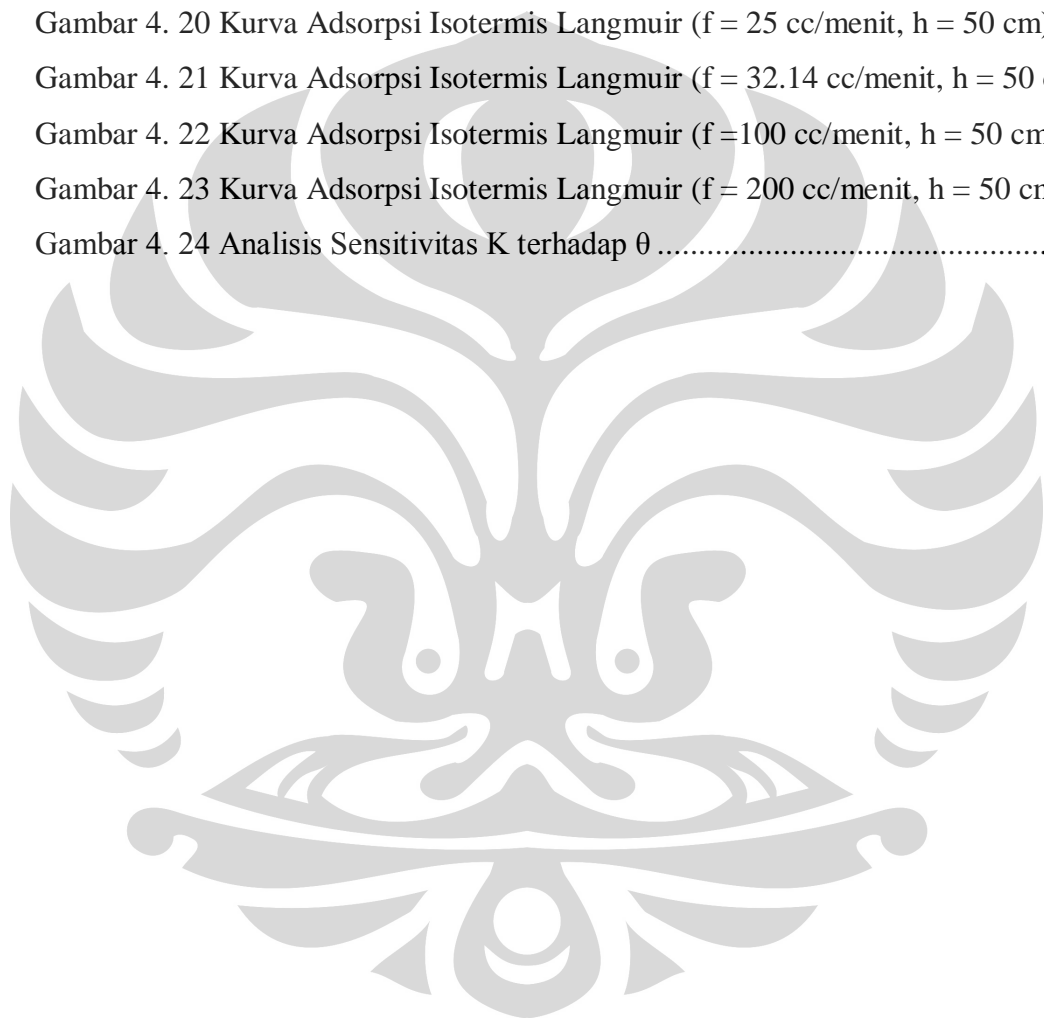
Tabel 2. 1 Sumber Gas Buang Dunia [1]	5
Tabel 2. 2 Perbandingan Teknologi Reduksi NO _x	11
Tabel 3. 1 Spesifikasi GC.....	35
Tabel 4. 1 Konstanta Langmuir pada Pengaruh Panjang	62
Tabel 4. 2 Konstanta Langmuir pada Pengaruh Laju Alir Gas N ₂ O	65



DAFTAR GAMBAR

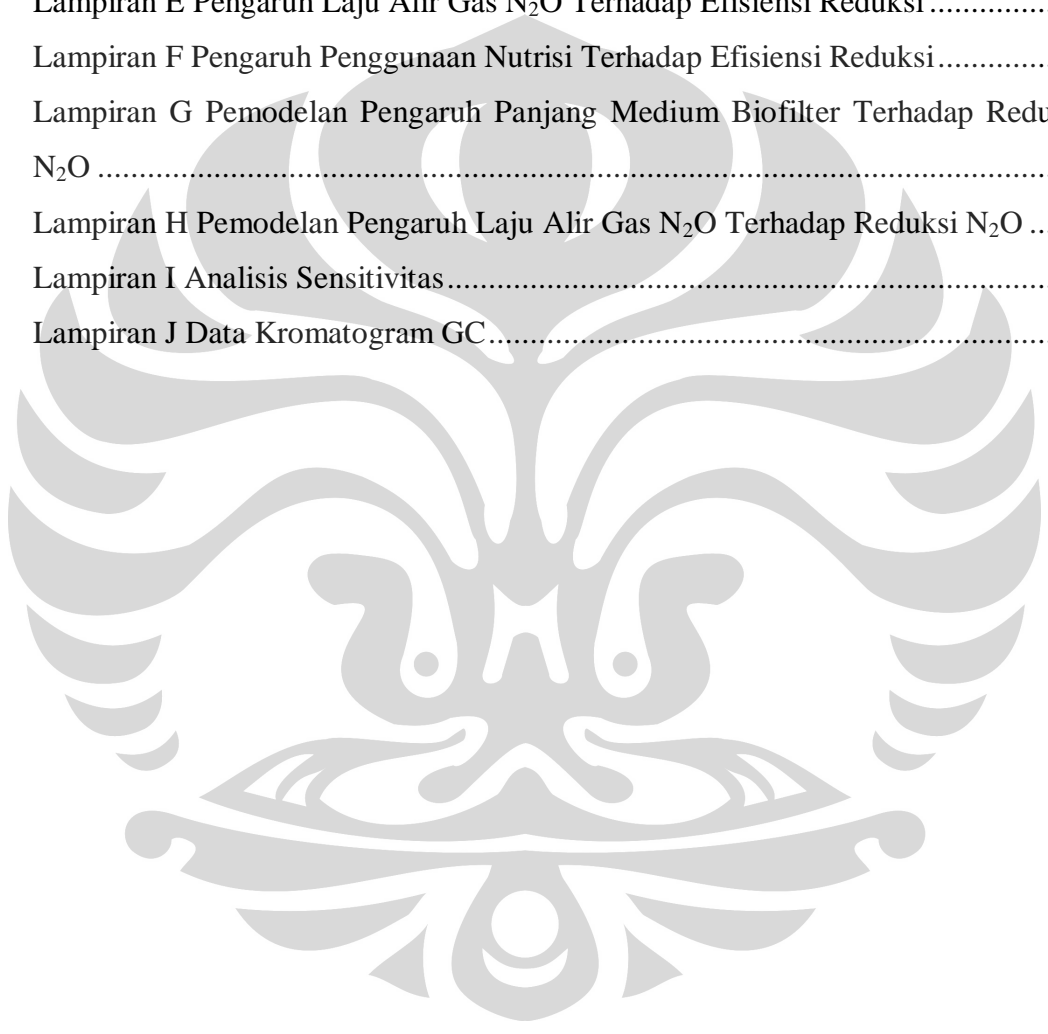
Gambar 1 Trend emisi NO _x di dunia [1]	1
Gambar 2. 1 Persentase Sumber Emisi Nitrogen Oksida [3]	6
Gambar 2. 2 Proses Diagram Alir SCR	10
Gambar 2. 3 Perbandingan Biaya Modal Teknologi Reduksi NO _x [16].....	11
Gambar 2. 4 Perbandingan Biaya Operasi Teknologi Reduksi NO _x [16].....	11
Gambar 2. 5 Biofilter	12
Gambar 2. 6 Jalur Metabolisme Nitrogen	15
Gambar 2. 7 <i>Breakthrough Curve</i> (Kurva Terobosan)	22
Gambar 2. 8 Kurva Adsorpsi Isotermis Freundlich.....	23
Gambar 2. 9 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir	24
Gambar 2. 10 Kromatogram hasil GC secara umum (Melvin, 1999).....	26
Gambar 2. 11 Kromatogram Gas Alam yang Terdeteksi pada GC Kolom <i>Molecular Sieve</i>	27
Gambar 3. 1 Bagan alir rancangan penelitian	28
Gambar 3. 2 Diagram Skematik Biofilter	31
Gambar 3. 3 Bagan Alir Uji Kebocoran	33
Gambar 3. 4 Bagan Alir Eksperimen Biofiltrasi	34
Gambar 3. 5 Ilustrasi Adsorpsi Gas N ₂ O oleh Pupuk.....	36
Gambar 4. 1 Peralatan Eksperimen Reduksi N ₂ O Menggunakan Biofilter	39
Gambar 4. 2 Kalibrasi Flowmeter	41
Gambar 4. 3 Sampel Grafik yang Terdeteksi pada Gas N ₂ O oleh GC	43
Gambar 4. 4 Sampel Grafik yang Terdeteksi pada Udara oleh GC.....	43
Gambar 4. 5 Kalibrasi Volume N ₂ O.....	44
Gambar 4. 6 Biofilter dari Pupuk	45
Gambar 4. 7 Uji Kinerja Biofilter dalam Reduksi N ₂ O	46
Gambar 4. 8 Uji Reprodusibilitas Data.....	48
Gambar 4. 9 Pengaruh Panjang Kolom Biofilter Terhadap Reduksi N ₂ O.....	49
Gambar 4. 10 Efisiensi Reduksi pada Uji Variasi Panjang Biofilter	50
Gambar 4. 11 Pengaruh Laju Alir Gas N ₂ O Terhadap Reduksi N ₂ O	52
Gambar 4. 12 Efisiensi Reduksi pada Uji Variasi Laju Alir Gas N ₂ O	53

Gambar 4. 13 Pengaruh Penggunaan Nutrisi Terhadap Reduksi N ₂ O	55
Gambar 4. 14 Uji Reprodusibiilitas Data pada Penggunaan Nutrisi	56
Gambar 4. 15 Efisiensi Reduksi pada Uji Pengaruh Pengguaan Nutrisi	57
Gambar 4. 16 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 10 cm, f = 50 cc/menit)	59
Gambar 4. 17 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 15 cm, f = 50 cc/menit)	60
Gambar 4. 18 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 25 cm, f = 50 cc/menit)	61
Gambar 4. 19 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 50 cm, f = 50 cc/menit)	62
Gambar 4. 20 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (f = 25 cc/menit, h = 50 cm)	63
Gambar 4. 21 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (f = 32.14 cc/menit, h = 50 cm) ...	63
Gambar 4. 22 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (f = 100 cc/menit, h = 50 cm)	64
Gambar 4. 23 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (f = 200 cc/menit, h = 50 cm)	64
Gambar 4. 24 Analisis Sensitivitas K terhadap θ	66



DAFTAR LAMPIRAN

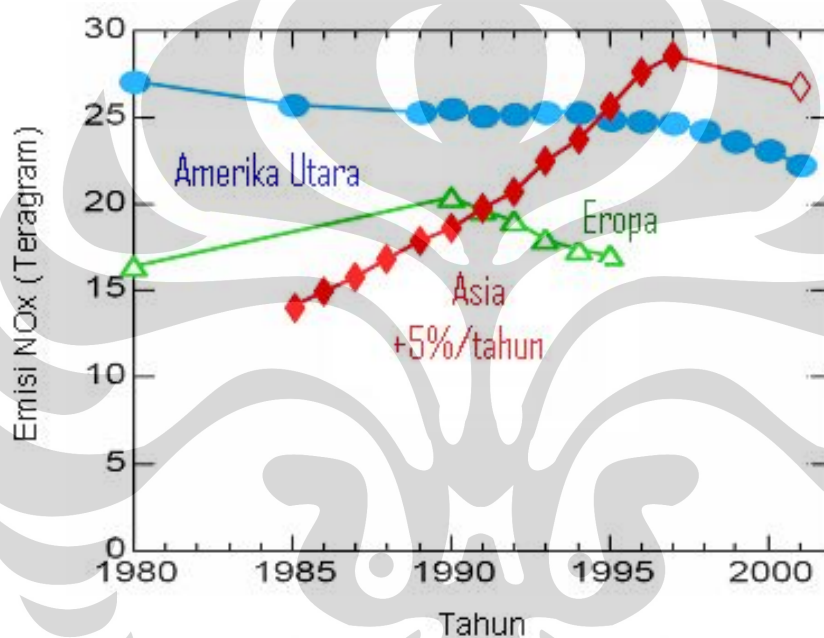
Lampiran A Hasil Uji Kebocoran.....	74
Lampiran B Uji Kalibrasi Flowmeter	75
Lampiran C Data Uji Kalibrasi Volume N ₂ O	77
Lampiran D Pengaruh Panjang Medium Biofilter Terhadap Efisiensi Reduksi	78
Lampiran E Pengaruh Laju Alir Gas N ₂ O Terhadap Efisiensi Reduksi	79
Lampiran F Pengaruh Penggunaan Nutrisi Terhadap Efisiensi Reduksi.....	80
Lampiran G Pemodelan Pengaruh Panjang Medium Biofilter Terhadap Reduksi N ₂ O	81
Lampiran H Pemodelan Pengaruh Laju Alir Gas N ₂ O Terhadap Reduksi N ₂ O	84
Lampiran I Analisis Sensitivitas.....	88
Lampiran J Data Kromatogram GC.....	92



BAB I PENDAHULUAN

I. 1. Latar Belakang Masalah

Nitrogen oksida (NO_x) merupakan emisi dari proses industri dan kegiatan transportasi [1,2]. Sebagai contoh, 44% dari total emisi NO_x di Taiwan disebabkan oleh industri tenaga listrik sebagai sumber utama [3]. Sangatlah sulit untuk mengumpulkan NO_x ketika terdispersi dalam udara sehingga NO_x hanya bisa dihilangkan secara efektif sebelum emisi [4]. Di bawah ini merupakan trend emisi NO_x di berbagai belahan dunia.



Gambar 1. Trend emisi NO_x di dunia [1]

Salah satu jenis gas nitrogen oksida adalah N₂O yang disebut juga dengan gas ketawa [5]. Tidak seperti gas nitrogen oksida lainnya, N₂O adalah salah satu gas yang memberi kontribusi terbesar pada pemanasan global [5]. Meskipun sifat pemanasan radiasinya lebih rendah dibandingkan CO₂, namun dampaknya terhadap pemanasan global 310 kali lebih besar per massa CO₂ [5]. Meskipun konsentrasinya relatif rendah, gas N₂O sangat sulit terurai di atmosfer. N₂O merupakan gas rumah kaca terbanyak keempat di atmosfer setelah CO₂, CH₄, dan uap air [5]. Gas nitrogen oksida lain juga memberikan dampak terhadap pemanasan global secara tidak langsung, dengan kontribusi terhadap produksi ozon troposferik pada pembentukan smog.

Sebelumnya, teknologi kontrol tradisional seperti *selective catalytic reduction* (SCR) dan *selective non-catalytic reduction* (SNCR) digunakan untuk mengontrol emisi NO_x pada kegiatan-kegiatan industri. Akan tetapi, kedua proses ini membutuhkan suhu yang tinggi dan penggunaan katalis. Selain itu, proses ini membutuhkan biaya instalasi dan operasi yang tinggi, serta menghasilkan produk buangan dalam jumlah cukup besar sehingga mengharuskan pemilik pabrik untuk membayar biaya pembersihan dan pembuangan [6]. Adanya masalah dari segi ekonomi dan teknis memotivasi peneliti untuk mengembangkan teknologi baru yang lebih murah dan efisien untuk menghilangkan NO_x dari gas buangan. Pengolahan NO_x bergantung pada organisme pendenitrifikasi yang banyak terdapat di alam. Organisme pendenitrifikasi memiliki kemampuan untuk mengurangi kadar NO_x pada kondisi jumlah oksigen tertentu. Proses reduksi terjadi pada penyederhanaan urutan berikut ini [13]: $NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$. Pada proses denitrifikasi, karbon organik bertindak sebagai donor elektron seperti asam asetat, metanol, dan sampah domestik [14].

Dalam penelitian ini, pupuk kompos akan digunakan sebagai media filter dalam mereduksi N₂O. Pupuk kompos sebelumnya telah diteliti sebagai media filter yang baik dalam mereduksi konsentrasi NO₂ dengan efisiensi reduksi mencapai 95% setelah 40 hari beroperasi dengan kondisi ketinggian biofilter 120 cm dan pada laju alir gas 30 L/jam [15]. Penelitian ini diharapkan memiliki efisiensi reduksi N₂O yang tinggi berdasarkan parameter-parameter yang dipilih. Parameter-parameter yang akan diteliti adalah pengaruh dari ketinggian biofilter, laju alir gas N₂O, dan penggunaan nutrisi terhadap kemampuan reduksi N₂O. Hasil penelitian ini akan disimulasikan dalam bentuk model adsorpsi Langmuir.

I. 2. Rumusan Permasalahan

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, maka dapat dikemukakan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh parameter operasi (ketinggian kolom, laju alir, dan penggunaan nutrisi) dapat mempengaruhi efisiensi penghilangan N₂O?
2. Bagaimana menurunkan model matematika yang mampu menggambarkan perilaku adsorpsi N₂O dalam biofilter?

I. 3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menyelidiki pengaruh ketinggian kolom, laju alir dan penggunaan nutrisi terhadap efisiensi penghilangan N_2O .
2. Mendapatkan penurunan model matematika yang mampu menggambarkan perilaku adsorpsi N_2O dalam biofilter.

I. 4. Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, pembatasan terhadap masalah yang akan dibahas adalah sebagai berikut :

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (RPKA) Departemen Teknik Kimia dan Bengkel, Universitas Indonesia Depok
2. Peralatan biofilter yang digunakan untuk penelitian merupakan peralatan dalam skala laboratorium
3. Gas NO_x yang dipakai adalah gas N_2O
4. Tinggi dan diameter kolom biofilter berturut-turut adalah 50 cm dan 8 cm
5. Range laju alir gas N_2O adalah 0 cc/menit hingga 200 cc/menit
6. Medium filter yang digunakan adalah kompos dari kotoran sapi lokal yang terdiri dari serpihan kayu, kotoran sapi, dan mikroorganismenya.

I. 5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam skripsi ini adalah sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Menjelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tentang prinsip dasar ilmu yang berkaitan dengan penelitian.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Menjelaskan diagram alir penelitian, bahan dan alat yang digunakan dalam penelitian, serta prosedur yang dilakukan pada percobaan.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Menjelaskan hasil penelitian dan pembahasan dari penelitian sesuai dengan tujuan penelitian dan pembatasan masalah.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Menguraikan kesimpulan yang diperoleh dari hasil dan pembahasan penelitian secara keseluruhan, disertai dengan saran.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

II. 1. Gas Buang

Gas buang dalam proses industri seringkali dikarakterisasikan dengan kehadiran berbagai jenis polutan dan konsentrasi berbagai macam senyawa. Sejumlah besar gas beracun dilepaskan dari berbagai pabrik dan proses industri. Gas ini akan secara cepat menjadi polutan atmosfer dan karenanya menjadi obyek peraturan lingkungan hidup yang ketat. Oleh karena itu, perusahaan-perusahaan yang terkait diwajibkan untuk menerapkan teknologi yang tepat untuk mengurangi emisi gas. Biasanya, emisi gas diolah dengan menggunakan berbagai metode fisiokimia, seperti adsorpsi, oksidasi kimia atau insinerasi. Teknologi kontrol gas buang yang digunakan saat ini, seperti insinerasi termal dan insinerasi katalitik, biasanya membutuhkan biaya tinggi dan sering diikuti dengan generasi oksida nitrogen. Di bawah ini adalah sumber gas buang di dunia per tahun [1]:

Tabel 2. 1 Sumber Gas Buang Dunia [1]

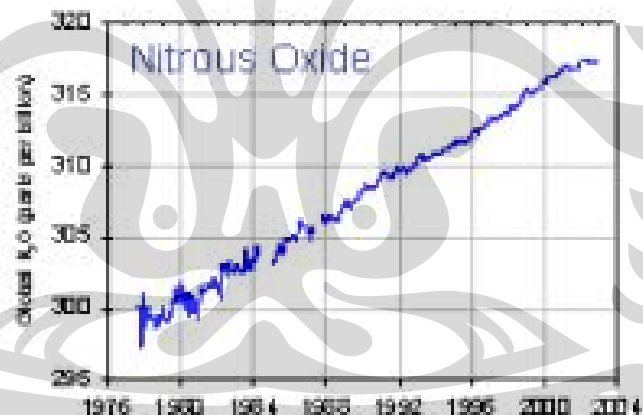
Sumber Gas Buang (Tg)	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Landfills	131.9	127.6	130.4	134.9	132.1	132.0
Wastewater Treatment	26.4	25.9	25.8	25.6	25.7	25.4
Proses Digester	7.6	7.6	7.7	7.8	7.9	8

Baru-baru ini, pengolahan gas buang dilakukan dengan lebih menekankan pada pengembangan proses pengolahan biologis dari emisi gas buang, terutama ditekankan pada ketentuan yang hemat energi dan pengolahan yang semakin efisien. Biofiltrasi dari gas buang merupakan penerapan yang baru dari teknologi bioproses dalam pengolahan limbah dan telah terbukti merupakan teknologi yang efektif dan ekonomis. Biofilter bekerja dengan menyalurkan aliran udara yang terpolusi melalui suatu media berpori yang sanggup untuk melakukan adsorpsi atas senyawa gas dan mendukung pertumbuhan biologis. Pada kondisi yang optimum, kontaminan *biodegradable* secara cepat dikonversikan menjadi karbon dioksida dan air tanpa akumulasi dari intermediet atau metabolisme akhir.

II. 2. Dinitrogen Monoksida (N₂O)

Dinitrogen Monoksida (N₂O) adalah senyawa yang umumnya digunakan sebagai senyawa anestetik dalam bidang pembedahan atau kedokteran gigi. Sering disebut juga dengan gas ketawa karena efek euforia yang ditimbulkannya ketika menghitupnya. Kandungan gas N₂O yang biasa dipakai pada suntikan anestetik adalah 50-100 ppm yang merupakan batas standar eksposur gas [5]. Gas ini juga digunakan sebagai pengoksidan dalam kendaraan balap untuk meningkatkan tenaga output dari mesin.

N₂O adalah salah satu gas yang memberi kontribusi terbesar pada pemanasan global [5]. Meskipun sifat pemanasan radiasinya lebih rendah dibandingkan CO₂, namun dampaknya terhadap pemanasan global 310 kali lebih besar per massa CO₂ [5]. Meskipun konsentrasinya relatif rendah, gas N₂O sangat sulit terurai di atmosfer. N₂O merupakan gas rumah kaca terbanyak keempat di atmosfer setelah CO₂, CH₄, dan uap air [5]. Gas nitrogen oksida lain juga memberikan dampak terhadap pemanasan global secara tidak langsung, dengan kontribusi terhadap produksi ozon troposferik pada pembentukan smog. Grafik gas rumah kaca hingga pada tahun 2003 dapat dilihat pada Gambar 2. 1:



Gambar 2. 1 Emisi Gas N₂O Hingga Tahun 2003

N₂O banyak diemisikan oleh bakteri pada tanah. Kegiatan pertanian seperti penanganan limbah binatang dan penyuburan tanah dapat memicu bakteri untuk memproduksi N₂O lebih banyak. Sektor peternakan menghasilkan 65% emisi N₂O. Sektor perindustrian menghasilkan 20% emisi N₂O seperti pada produksi nylon dan asam nitrat serta pembakaran bahan bakar pada mesin pembakaran internal.

II. 3. Jenis-Jenis Teknologi Reduksi NO_x

Ada dua teknologi utama reduksi NO_x yang digunakan selama ini yakni teknologi pra pembakaran (pre-combustion technologies) dan teknologi pasca pembakaran (post-combustion technologies)

II. 3. 1. Teknologi Pra Pembakaran

Pembentukan termal NO_x meningkat seiring dengan konsentrasi (jumlah per unit volume) dari nitrogen, oksigen, dan suhu pembakaran. Pada suhu pembakaran di bawah 2,370°F, konsentrasi kecil NO_x terbentuk, dan di bawah 1,400°F hampir tidak ada NO_x terbentuk. Metode reduksi pembentukan NO_x didasarkan pada kontrol suhu atau membatasi salah satu konsentrasi oksigen, nitrogen atau bahan bakar. Di bawah ini adalah penjelasan dari teknologi kontrol untuk mereduksi pembentukan NO_x.

1. *Less Excess Air* (LEA)

Udara berlebih yang diperlukan untuk mengoksidasi sempurna bahan bakar ditunjukkan dengan korelasi terhadap berapa banyak NO_x yang terbentuk. Membatasi aliran udara berlebih di bawah 2% akan membatasi jumlah oksigen yang diperlukan untuk membentuk NO_x [16].

2. *Air Staging*

Agar *air staging* dapat memberi efek, aliran udara dibagi ke dalam 2 aliran. Pada aliran pertama, bahan bakar dicampurkan dengan udara agar terjadi pembakaran sempurna. Aliran kedua diinjeksikan ke nyala api dan menghasilkan udara berlebih. Teknik ini digunakan untuk menjaga suhu relatif rendah dan konsentrasi oksigen pada pembakaran utamaa. Teknologi ini memiliki efisiensi yang tinggi dalam mereduksi NO_x [16].

3. *Over Fire Air* (OFA)

Teknik ini digunakan untuk mengurangi suhu pembakaran dengan menahapkan zona pembakaran utamaa sehingga suhu pembakaran dapat diturunkan sehingga menurunkan pembentukan NO_x. Pada pendekatan ini, pembakaran primer dilakukan dengan campuran bahan bakar. Kurangnya oksigen yang diperlukan untuk proses pembakaran akan menurunkan laju pembakaran yang kemudian akan menurunkan suhu pembakaran. Setelah berbagai tahapan pembakaran, bahan bakar yang tersisa dioksidasi di atas api [16].

4. *Fuel Reburning* (FR)

Ketika gas pembakaran didinginkan dan bahan bakar tambahan diresirkulasi, beberapa dari kalor pembakaran diabsorb oleh gas pembakaran yang didinginkan yang kemudian akan menurunkan suhu serta produksi NO_x . Selain itu, ketika gas pembakaran yang didinginkan dan bahan bakar ditambahkan sebagai tahap pembakaran sekunder, oksigen dalam NO_x akan cenderung teroksidasi di bahan bakar menghasilkan molekular nitrogen (N_2) dan oksigen (O_2). Pembakaran dari bahan bakar tersisa dilanjutkan pada tahap berikutnya dengan nozzle atau OFA. Teknik ini mendemonstrasikan waktu tinggal dari 0.2 detik hingga 1.2 detik. Efisiensi reduksi NO_x dengan teknik mencapai 76 % [16].

5. *Low NO_x Burners (LNB)*

Dengan LNB, nyala api tersedia pada beberapa zona berbeda. Misalnya, zona pertama bisa menjadi zona pembakaran primer, zona kedua bisa berupa FR di mana bahan bakar ditambahkan secara kimiawi guna mereduksi NO_x ke dalam molekular nitrogen (N_2) dan oksigen (O_2). Zona ketiga bisa berupa pembakaran final di mana dilakukan pada udara berlebih dalam jumlah kecil guna membatasi suhu pembakaran. Adapun banyak variasi dengan teknologi ini. Efisiensi reduksi NO_x dengan teknik mencapai 80 % [16].

6. *Catalytic Combustion*

Suatu katalis bisa digunakan untuk melakuka proses pembakaran di bawah suhu pembentukan NO_x . Ketika teknologi pembakaran katalitik dilakukan dengan dengan baik, maka produksi NO_x akan sangat rendah [16].

7. *Ultra Low Nitrogen Fuels*

Bahan bakar dengan kandungan nitrogen sangat rendah, di mana kandungan nitrogen lebih rendah 15 hingga 20 kali bahan bakar konvensional. Bahan bakar jenis ini banyak digunakan di California, Amerika Serikat karena polusi adalah salah satu masalah utama. Penggunaan bahan bakar ini dapat mengurangi 70% emisi NO_x [16].

II. 3. 2. **Teknologi Pasca Pembakaran**

Ada teknologi utama yang digunakan untuk mereduksi emisi NO_x yakni *selective non-catalytic reduction* (SNCR) dan *selective catalytic reduction* (SCR).

1. *Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR)*

Proses non katalitik ini termasuk injeksi nitrogen dalam bentuk senyawa amonia (NH_3) atau urea (NH_2CONH_2) pada suatu daerah di mana suhu gas berada dalam range 1600°F hingga 2100°F. Suhu *window* tergantung dari apakah yang digunakan

adalah amonia atau urea. Pada rentangan suhu ini, amonia atau urea diionisasi dan bereaksi terhadap NO_x dalam wujud oksigen untuk membentuk molekular nitrogen, karbon dioksida atau air [15]. Reduksi NO_x dengan teknologi ini memiliki efisiensi antara 50% hingga 70% [16].

Jika *flue gas* memiliki kandungan sulfur yang tinggi dan terdapat amonia berlebih, maka akan terbentuk amonium sulfat atau amonium bisulfat yang akan menimbulkan korosi serta menyumbat peralatan.

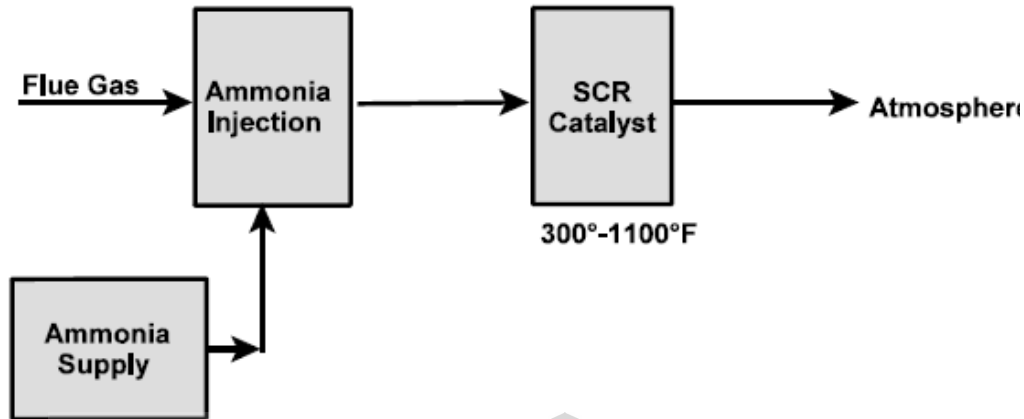
2. *Selective Catalytic Reduction* (SCR)

Aplikasi dari sistem SCR di Amerika Serikat berkembang pada dekade 1990. SCR telah menjadi metode yang banyak digunakan oleh sistem utilitas dalam reduksi NO_x . Proses teknologi ini telah diaplikasikan ke dalam sistem boiler dan memiliki efisiensi pengurangan NO_x antara 90% hingga 94%.

Meskipun teknologi ini dapat beroperasi pada jangkauan suhu yang luas antara 300°F hingga 1100°F , namun biasanya teknologi ini sering dijalankan pada 600°F hingga 750°F untuk berbagai katalis tertentu. Di bawah ini adalah pendekatan range untuk berbagai jenis katalis:

- Vanadium/Titanium Oksida ($500\text{-}800^\circ\text{F}$)
- Platinum/Palladium Oksida ($300\text{-}550^\circ\text{F}$)
- Katalis support Zeolit ($650\text{-}1100^\circ\text{F}$)

Pada teknologi SCR, amonia diinjeksikan ke dalam *flue gas* di dekat pintu keluar *economizer* dan melewati katalis. NO_x bereaksi dengan amonia untuk memproduksi molekular nitrogen dan air. Dua produk samping yang dihasilkan dari proses SCR adalah residu amonia dan sulfur trioksida (SO_3). SO_3 dibentuk dari oksidasi katalitik SO_2 . Amonia yang lolos dari proses akan bereaksi dengan SO_3 dalam reaktor membentuk amonium bisulfat (NH_4HSO_3) yang menimbulkan korosi serta menyumbat peralatan. Proses diagram alir SCR ditunjukkan oleh Gambar 2. 2:



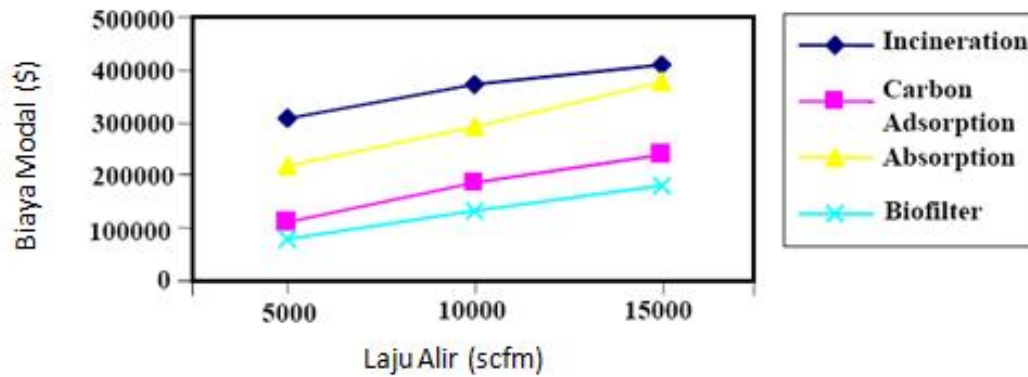
Gambar 2. 2 Proses Diagram Alir SCR

Perbandingan teknologi-teknologi reduksi NO_x yang telah dijabarkan sebelumnya dapat dilihat pada Tabel 2. 2 dengan membandingkan laju alir dan konsentrasi teknologi tersebut.

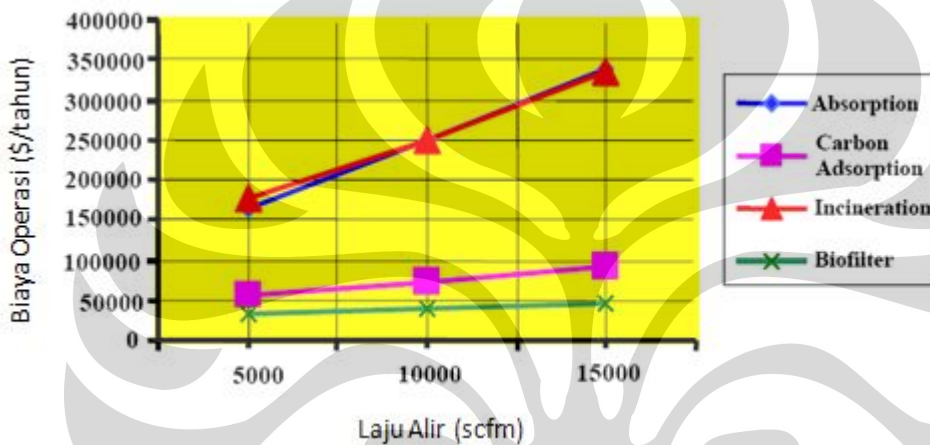
Tabel 2. 2 Perbandingan Teknologi Reduksi NO_x

Jenis Teknologi	Laju alir udara	Konsentrasi dalam ppmv
<i>Condensation</i>	200 – 20,000 m ³ /h (120 – 12,000 SCFM)	50 – 200 g/m ³ (2.8% - 11.2% by volume)
<i>Scrubbing</i>	200 – 20,000 m ³ /h (120 – 12,000 SCFM)	10 – 40 g/m ³ (0.56% - 2.3% by volume)
<i>Incineration</i>	10,000 – 100,000 m ³ /h (6000 – 60,000 SCFM)	8 – 140 g/m ³ (0.5% - 8% by volume)
<i>Catalytic Oxidation</i>	10,000 – 100,000 m ³ /h (6000 – 60,000 SCFM)	1 – 10 g/m ³ (500 ppmv – 6,000 ppmv)
<i>Regenerative Adsorption</i>	100 – 10,000 m ³ /h (60 – 6,000 SCFM)	1 – 10 g/m ³ (500 ppmv – 6,000 ppmv)
<i>Non-Regenerative Adsorption</i>	10 – 60 m ³ /h (6 – 40 SCFM)	0 – 5.0 g/m ³ (< 1 ppmv – 2,800 ppmv)
<i>Compost Biofiltration</i>	60 – 300,000 m ³ /h (40 – 180,000 SCFM)	(< 1 ppmv – 25 ppmv)
<i>Biotrickling Filter</i>	10 – 300,000 m ³ /h (6 – 180,000 SCFM)	(0 - 8.3 g/m ³ (20 ppmv – 5,000 ppmv)

Perbandingan teknologi-teknologi reduksi NO_x dengan membandingkan biaya modal dan biaya operasi terhadap laju alir dapat dilihat pada Gambar 2. 3 dan Gambar 2. 4:



Gambar 2. 3 Perbandingan Biaya Modal Teknologi Reduksi NO_x [16]



Gambar 2. 4 Perbandingan Biaya Operasi Teknologi Reduksi NO_x [16]

II. 4. Biofilter

Sistem pengolahan fisiokimia yang didasarkan pada teknik-teknik fisiokimia seperti adsorpsi, absorpsi, *scrubbing*, dan kondensasi untuk mengontrol emisi, merupakan sistem yang kurang efektif, membutuhkan banyak energi, menggunakan banyak zat kimia atau menggunakan pengoperasian yang rumit [17,18]. Sistem pengolahan gas buang secara biologis merupakan suatu pengolahan alternatif untuk proses pengolahan konvensional dan seringkali lebih disukai karena sistem ini lebih efektif dalam menangani kontaminan dalam konsentrasi rendah dengan laju alir tinggi [19, 20, 21].



Gambar 2. 5 Biofilter

Salah satu sistem pengolahan biologis yang paling sering digunakan adalah sistem biofilter yang memberikan porositas yang tinggi, ketersediaan nutrisi yang tinggi, kapasitas retensi dengan kelembaban yang tinggi dan kapasitas *buffering* yang tinggi guna mempertahankan pertumbuhan mikrobial pada matriks support yang diinginkan [19, 22, 23]. Efektivitas dari biofilter tergantung pada kegiatan dari aktivitas populasi mikroba dan jenis pengayaan (*enrichment*) yang dilakukan selama tahap inokulasi. Jenis matriks support juga mempengaruhi stabilitas jangka panjang dan kinerja dari biofilter [20,21]. Bahan packing yang paling sering digunakan dalam biofilter adalah *peat* [23] kompos [21], karbon teraktivasi [25], tanah, *heather*, serpihan kayu [26,27], dan batu lava [28].

Baru-baru ini proses biologis telah memperoleh banyak perhatian sebagai suatu alternatif untuk pengolahan dari polusi udara [29]. Prinsip dari biofiltrasi relatif sederhana; aliran udara yang terkontaminasi dialirkan melalui suatu unggun berpori di mana suatu kultur mikroorganisme pengurai polutan diimobilisasi [30]. Udara berbau dan terkontaminasi kemudian melewati *porous packed bed*, dan zat kontaminan dalam aliran udara diabsorb oleh biofilm, kemudian zat kontaminan tersebut dioksidasi untuk menghasilkan biomassa, CO_2 , H_2O , NO_3^- dan SO_4^{-2} .

Biofiltrasi merupakan suatu teknologi berkembang yang menawarkan beberapa keuntungan dibandingkan dengan metode tradisional dalam mengontrol zat polutan udara dalam konsentrasi rendah. Selain merupakan penghilang polutan yang sangat efisien, investasi modal dan biaya operasi yang rendah, kondisi operasional yang aman, dan konsumsi energi yang rendah, biofilter tidak mengeluarkan produk samping yang tidak diinginkan dan

juga mengkonversi banyak senyawa organik dan anorganik ke dalam produk oksidasi yang tidak berbahaya [19,31]. Selain itu, desain biofilter yang sederhana juga merupakan alasan mengapa biofilter sering digunakan [32].

Biaya investasi biofiltrasi dan biaya operasional adalah lebih rendah dibandingkan dengan proses termal dan oksidasi kimia [33]. Dalam biofiltrasi, beberapa faktor dikontrol sehingga mikroorganisme dapat mengabsorb dan terdekomposisi secara efisien. Suhu, kandungan kelembaban, tingkat pH, laju alir dan laju *loading* permukaan dan struktur fisik biofilter merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi dari proses biofiltrasi. Biofilter dapat beroperasi secara efisien pada kandungan kelembaban dalam range 50-70% dan suhu antara 15 sampai dengan 35°C [34].

Teknik imobilisasi dari mikroba dalam matriks pendukung seperti *alginate beads* atau bahan polimer yang sesuai, telah banyak digunakan dalam biofiltrasi. Walaupun teknik enkapsulasi telah digunakan dalam pembersihan air buang [35, 36], aplikasi dalam pengolahan biologis pada gas buang sangat jarang dan seringkali terbatas [37, 38, 39, 40, 41]. Penggunaan imobilisasi dari mikroorganisme aerobik terbatas pada kondisi operasional dimana oksigen tidak membatasi. Teknik ini melibatkan *entrapping* sel-sel mikroba dalam suatu volume kapsul di mana pengangkutan nutrisi, substrat dan produk akhir di dalam dan di luar mikrokapsul terjadi dengan difusi melalui membran kapsul.

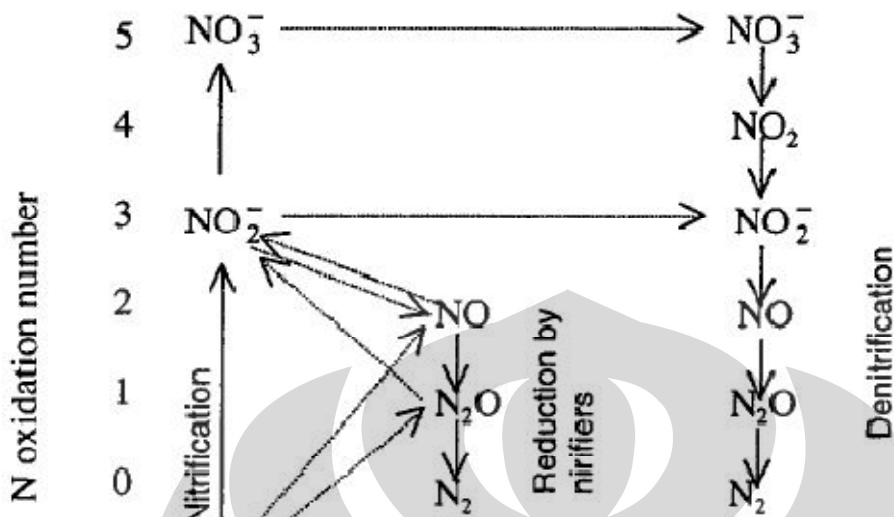
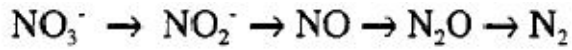
Keuntungan utama dari teknik imobilisasi dalam biofiltrasi adalah menyediakan konsentrasi sel yang tinggi, meningkatkan stabilitas genetik, dan melindungi dari kerusakan robekan (*shear damage*) dan meningkatkan lingkungan hidup mikro yang lebih baik untuk mikroba (gradien nutrisi dan pH). Chung *et al.* [37] mengevaluasi pengaruh dari faktor-faktor operasional seperti waktu retensi, suhu, dan konsentrasi inlet pada kinerja dari suatu biofilter yang diisi dengan *Thiobacillus thioparus* yang diimobilisasi dengan *Ca-alginate pellets*, dan menemukan bahwa optimal *S-loading* adalah $25 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$. Chan dan Zheng [41] mengkaji kinerja dari suatu polivinil alkohol (PVA) yang didasarkan pada media sintetis (*PVA/compost composite beads*, *PVA/peat composite beads* dan *PVA/pig manure compost*) guna mereduksi etil asetat dalam biofilter pada suatu konsentrasi 400 ppm. Walau batasan nutrisi mempengaruhi RE selama 33 hari awal operasi dalam dua *composite bead biofilters*, kinerjanya tetap konsisten (100% RE) pada operasi hari-hari berikutnya dengan EC maksimum adalah $0.71 \text{ kg asetat etil m}^{-3} \text{ bed h}^{-1}$. Respons dari sel-sel yang diimobilisasi dalam kondisi operasional *transient (shock loads)* memerlukan eksperimen lebih lanjut sebab operasi biofilter yang kontinu dalam situasi yang nyata dapat menemui kondisi yang fluktuatif.

II. 5. Metabolisme Nitrogen

Transformasi mikroba dari nitrogen ada 5 macam:

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

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. Gambar 2. 6 menunjukkan metabolisme nitrogen yang menunjukkan hubungan nitrifikasi dan denitrifikasi.



Gambar 2. 6 Jalur Metabolisme Nitrogen

II. 5. 1. Denitrifikasi

Denitrifikasi, tidak seperti reduksi asimilatif nitrogen, dilakukan oleh sejumlah bakteri tertentu. Konsep dari proses ini sama dengan penggunaan oksigen di mana reaksi yang umumnya terjadi adalah:



Reaksi yang terjadi pada proses denitrifikasi tidak dapat dimengerti sepenuhnya, namun NO_2^- , N_2O , dan NO telah diidentifikasi sebagai intermediet. Reaksi reduksi dapat dilihat pada reaksi berikut ini:



Bilangan oksidasi dari nitrogen berubah dari +5 menjadi +3 menjadi +2 menjadi +1 menjadi 0 dalam 4 langkah. Setiap intermediet dapat dilepas pada berbagai keadaan. Misalnya NO_2^- sering terakumulasi pada awal-awal operasi proses denitrifikasi tetapi menghilang secara bertahap ketika reaksi menjadi setimbang. NO dan N_2O bisa dilepaskan

sebagai akibat dari berbagai macam kondisi lingkungan seperti pH rendah atau fluktuasi tiba-tiba pada suhu.

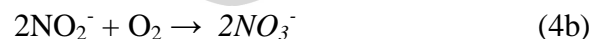
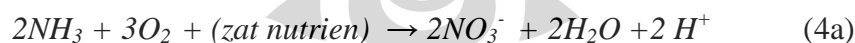
Penggunaan NO_3^- sebagai elektron akseptor memproduksi energi lebih sedikit yang diperlukan untuk pertumbuhan dibandingkan oksigen. Hasilnya oksigen lebih disukai sebagai elektron akseptor dan senyawa nitrogen teroksidasi tidak digunakan dalam jumlah banyak jika oksigen tersedia. Kondisi dari konsentrasi oksigen rendah atau kurangnya oksigen bisa menyebabkan keuntungan kompetitif untuk spesies bakteri untuk menggunakan nitrogen teroksidasi sebagai elektron akseptor.

II. 5. 2. Nitrifikasi

Kumpulan bakteri yang mampu mereduksi senyawa nitrogen (misalnya NH_3 , NO_2^-) sebagai sumber energi, dan CO_2 sebagai sumber karbon, dalam dua tahap proses yang dikenal sebagai nitrifikasi. Tahap pertama, oksidasi dari amonia menjadi ion nitrit, dibawa oleh 4 genus bakteri yang memiliki nama *Nitroso* sebagai bagian dari nama (misal *Nitrosomonas europea*, *Nitrosococcus mobilis*), sedangkan tahap kedua dibawa oleh 3 genus bakteri yang memiliki nama *Nitro* sebagai bagian dari namanya (misal *Nitrobacter*, *Nitrospira*) seperti ditunjukkan pada reaksi di bawah ini:



Stoikiometri dari transformasi pada persamaan (3a) dan (3b) tidak diberikan karena variasi pada kondisi lingkungan. Akan tetapi produksi sel selalu rendah pada kedua reaksi dan pendekatan terbaik diberikan pada persamaan (4a) dan (4b).



Nitrifikasi terjadi pada kondisi aerobik, dengan aktivitas optimal pada suhu mesofilik dan netral terhadap pH alkalin, tanpa pertumbuhan atau aktivitas pada pH asam [42].

II. 5. 3. Produksi dan Konsumsi NO_x dalam Biofilter

Nitrogen oksida diproduksi dan dikonsumsi oleh proses mikroba melalui nitrifikasi dan denitrifikasi. Reaksi biologis dan kimia lain bisa menjadi penting pada kondisi tertentu.

Umumnya investigasi terhadap produksi dan konsumsi nitrogen oksida dilakukan pada lingkungan tanah, dan separasi dari aktivitas bakteri penitrifikasi dan pendenitrifikasi seringkali mengalami kesulitan. Biofilter secara potensial merupakan sumber baik NH_3 maupun NO_x , serta metode penghilangan NO_x dari aliran gas. Nitrifikasi mikoba, respirasi NO_x , dan asimiliasi merupakan metode menjanjikan dalam menghilangkan NO_x dari aliran udara dalam biofilter.

Beberapa peneliti melaporkan kesuksesan dalam mengontrol emisi NO dengan mempromosikan mikroba denitrifikasi dalam biofilter [43]. Mikroba denitrifikasi adalah konversi balik dari NO_3^- menjadi N_2 . Akan tetapi proses tidak selalu mulai dari awal hingga akhir. Ada setidaknya 3 intermediet dalam proses denitrifikasi ($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$). Ada kemungkinan nitrogen dapat meninggalkan atau memasuki jalur pada tahap konversi manapun. Untuk mencapai konversi signifikan dari NO melalui denitrifikasi, oksigen harus dieliminasi dari aliran gas atau biofilm harus setebal mungkin untuk memastikan adanya situs anaerobik [44]. Eliminasi sempurna oksigen dari aliran gas mungkin tidak praktis pada konsentrasi awal tinggi. Akan tetapi gas buang dari proses pembakaran memiliki konsentrasi oksigen yang cukup rendah sehingga membuat proses denitrifikasi NO_x menjadi praktis.

II. 5. 4. **Produksi NO_x**

Produksi oksida nitrat oleh bakteri nitrifikasi sulit dimengerti [44]. Telah diobservasi bahwa bakteri *Nitroso* dapat memproduksi asam nitrat dalam jumlah banyak [45]. Intermediet dari bilangan oksidasi +1 (N_2O) dan +2 (NO) dalam nitrifikasi kemoautotrofik tidak diketahui dengan pasti [44]. Asam nitrat bisa diproduksi melalui bakteri penitrifikasi melalui oksidasi dari hidroxylamine (NH_2OH) menjadi NO_2^- atau reduksi NO_2^- menjadi NH_2OH [45]. Studi baru-baru ini mengenai bakteri pengoksidasi amonia pada tanah aerobik memberi bukti untuk produksi NO melalui reduksi NO_2^- [45]. Reaksi reduksi biasanya diasosiasikan terhadap aktivitas bakteri denitrifikasi. Akan tetapi ada indikasi bahwa pada kondisi tekanan parsial rendah dari oksigen, bakteri nitrifikasi dapat melakukan reaksi reduksi [44]. Akan tetapi bukti ini bertentangan, ada juga produksi asam nitrat oleh bakteri nitrifikasi yang tidak terpengaruh tekanan parsial oksigen [46].

Nitrifikasi bertanggung jawab terhadap produksi nitrat dan oksida nitrat pada kondisi tertentu di tanah. Produksi asam nitrat pada eksperimen ini tidak terpengaruh kandungan

kelembaban tanah, atau penambahan glukosa, selama tanah terinkubasi pada udara. Awalnya laju produksi sangat lambat, tetapi fertilisasi NH_4^+ meningkatkan laju produksi asam nitrat, menjelaskan produksi karena aktivitas nitrifikasi [47]. Nitrifikasi bisa menghasilkan sejumlah besar asam nitrat, tetapi laju produksi NO dalam tanah aerobik (kondisi nitrifikasi) biasanya lebih rendah dibandingkan laju pada inkubasi anaerobik [48].

II. 5. 5. **Konsumsi NO_x**

Konsumsi oksida nitrat memberi hubungan positif terhadap jumlah pengoksidasi NO_2^- yang ada. Oleh karena itu, bakteri dari genus *Nitrobacter* dapat berkontribusi secara signifikan terhadap konsumsi oksida nitrat. Kesimpulan ini sesuai dengan penelitian Freitag *et.al.* (1990) yang menunjukkan oksida nitrogen adalah substrat efisien untuk produksi NADPH oleh *Nitrobacter*.

Konsumsi oksida nitrat oleh mikroorganisme tanah mengindikasikan bahwa dalam kondisi anaerobik laju produksi lebih cepat, dan pada kondisi anaerobik laju konsumsi lebih cepat [48]. Remde *et. al.* (1989) juga menunjukkan bahwa konsumsi oksigen nitrat dependen secara linear terhadap konsentrasi oksida nitrat (hingga 600 ppb_v), mengindikasikan bahwa persamaan orde kinetika satu menjelaskan konsumsi oksida nitrat oleh mikroorganisme aerobik.

Schuster *et al.* (1992) juga menunjukkan bahwa konsumsi mikroba oksida nitrat mengikuti kinetika orde pertama dan tidak jenuh hingga 14 ppm_v NO. Konsumsi oksida nitrat tidak bisa dikorelasikan dengan kandungan air pada tanah; laju konsumsi terbaik diamati pada tanah kering [47].

II. 5. 6. **Produksi NO_x dalam Tanah**

Produksi oksida nitrat melalui denitrifikasi sulit diukur dalam lingkungan tanah karena laju reutilisasi yang tinggi dan pelepasan NO yang rendah pada kandungan air tinggi. Suatu studi yang dilakukan terhadap kultur bakteri dengan densitas tinggi dalam tanah mengindikasikan NO bukan produk utama dari denitrifikasi [46]. Akan tetapi oleh Zafiriou *et.al.* (1989) menunjukkan bahwa dengan sel suspensi berdensitas rendah menunjukkan NO merupakan produk utamaa denitrifikasi. Tergantung dengan populasi pendenitrifikasi, laju reutilisasi NO bisa tinggi pada lingkungan tanah, menyebabkan akumulasi NO yang minimal [45]. Faktor lain yang mempengaruhi laju produksi NO *bulk* adalah kandungan air pada tanah. Kandungan air yang tinggi meningkatkan waktu berdifusi NO ke dalam atmosfer, menyediakan tambahan waktu untuk reduksi menjadi N_2O atau N_2 [45].

Produksi NO dalam tanah bisa didominasi oleh pendenitrifikasi atau penitrifikasi tergantung dengan ketersediaan substrat, pH tanah, kandungan kelembaban, kandungan nitrogen, dan spesies bakteri [42].

Eksperimen menunjukkan bahwa laju produksi NO di dalam tanah pada kondisi anaerobik adalah 35 hingga 140 kali lebih tinggi dibandingkan tanah yang terinkubasi pada udara [49]. Eksperimen ini menyarankan produksi NO terstimulasi jika kondisi cocok untuk proses anaerobik seperti denitrifikasi [49]. Laju produksi maksimum yang diteliti pada eksperimen tanah adalah 200 ng NO-N/g tanah-jam (200 ng B dalam bentuk NO/g tanah-jam) pada laju alir 1.5 L N₂/min melalui pendekatan 100 g sampel tanah.

Konsentrasi NO akan menentukan apakah lingkungan tanah merupakan sumber untuk NO [49]. Eksperimen mengindikasikan bahwa produksi NO bersifat independen terhadap konsentrasi NO, tetapi laju konsumsi NO proporsional terhadap konsentrasi NO [49].

II. 5. 7. Konsumsi NO_x dalam Tanah

Konsumsi oksida nitrogen oleh mikroorganisme tidak dapat dikarakterisasi dengan baik [42]. Karena NO merupakan zat intermediet dalam reduksi bertahap NO₃⁻ menjadi N₂, bakteri pendenitrifikasi kemungkinan akan menggunakan NO sebagai elektron akseptor [50]. Reduksi NO menjadi N₂O dikatalisis oleh reduktase NO dan digabung dengan fosforiliasi [50] yang mendukung kerja NO sebagai elektron akseptor. Konsumsi NO terjadi pada *anoxic microniches* pada tanah *oxic* [42]. Konsumsi NO kadang terstimulasi kondisi inkubasi *anoxic* dan/atau penambahan nitrat dan glukosa [42]. Stimulasi positif oleh kondisi *anoxic* dan penambahan nitrat juga mendukung aktivitas denitrifikasi.

Konsumsi NO dalam tanah juga sering dimodelkan dengan kinetika Michaelis Menten [48].

$$r_{NO} = r_{NO_{max}} \left(\frac{C_{NO}}{K_m + C_{NO}} \right) \quad (5)$$

di mana:

r_{NO} = laju NO yang teramati, ng N/g tanah-jam

$r_{NO_{max}}$ = laju maksimum NO yang teramati, ng N/g tanah-jam

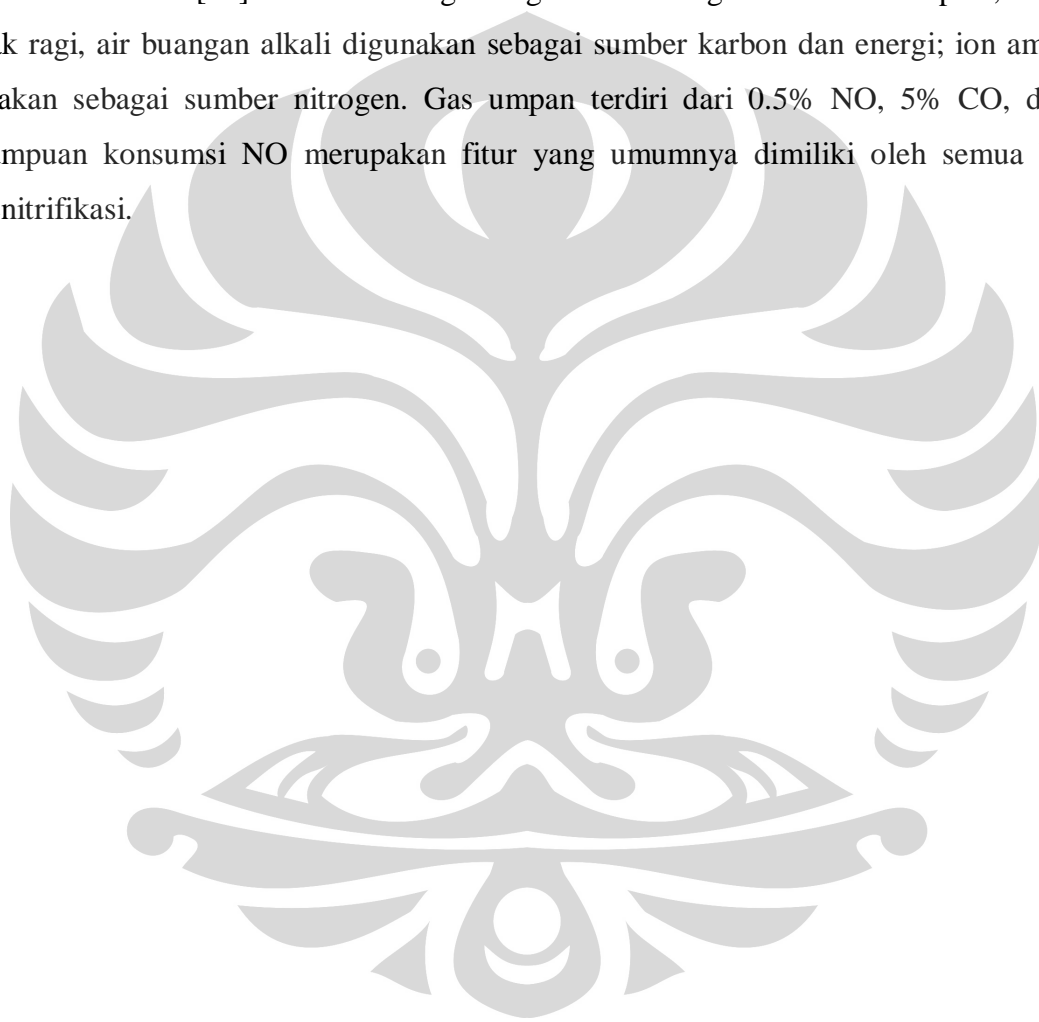
C_{NO} = konsentrasi NO-N pada fasa gas, ppb_v

K_m = koefisien affinitas

Koefisien affinitas, K_m , berbanding terbalik. K_m lebih tinggi akan menghasilkan laju reaksi lebih rendah. Koefisien aktivitas dari bakteri pendenitrifikasi NO sangat rendah. Baik

kultur murni dari pendenitrifikasi dan sampel tanah memperlihatkan kinetika konsumsi NO dengan koefisien afinitas, K_m , di bawah 8 nM [48]. Fakta bahwa pada kondisi anaerobik, laju produksi selalu lebih besar daripada laju konsumsi yang sudah dijelaskan oleh $r_{NO\ max}$ dan K_m rendah, di mana untuk tanah adalah 11-12 nmol/g-jam dan 980 ppb_v, dan untuk kultur bakteri murni memiliki range 1-109 nmol/g dan 320-3250 ppb_v.

Dua spesies pendenitrifikasi heterotrofik, *Paracoccus denitrificans* dan *Pseudomonas denitrificans*, yang bertumbuh dalam larutan media mineral tersuspensi, mampu mengkonsumsi NO [47]. Oksida nitrogen digunakan sebagai elektron akseptor; suksinat, ekstrak ragi, air buangan alkali digunakan sebagai sumber karbon dan energi; ion amonium digunakan sebagai sumber nitrogen. Gas umpan terdiri dari 0.5% NO, 5% CO, dan N₂. Kemampuan konsumsi NO merupakan fitur yang umumnya dimiliki oleh semua bakteri pendenitrifikasi.



Eksperimen juga menunjukkan bahwa laju konsumsi anaerobik dari NO dalam fasa gas tidak berpengaruh secara signifikan oleh kandungan air [52]. Hasil ini menyarankan difusi NO ke dalam partikel tanah tidak dibatasi oleh proses konsumsi NO.

II. 6. Adsorpsi

Adsorpsi terjadi ketika molekul-molekul yang berada di sekitar permukaan suatu zat padat dapat mengikat molekul senyawa cair atau gas yang dapat larut di dalamnya. Peristiwa terikatnya molekul fluida ini disebabkan oleh beberapa faktor seperti adanya tegangan permukaan, gaya tarik elektrostatik, serta afinitas molekul. Pada peristiwa ini, zat yang mengadsorpsi molekul fluida disebut adsorben, sedangkan molekul yang teradsorpsi disebut adsorbat.

II. 6. 1. Klasifikasi Adsorpsi

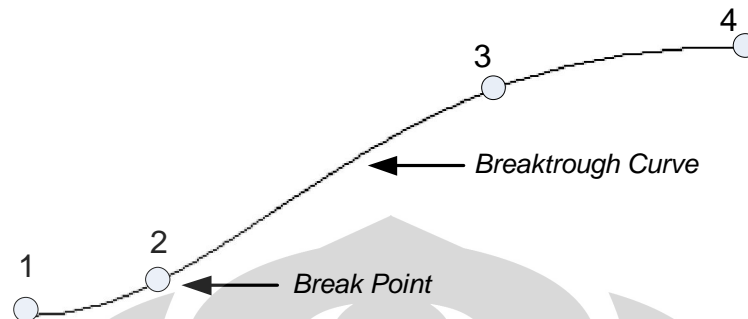
Secara umum adsorpsi dapat dibedakan menjadi dua yaitu adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia atau disebut juga adsorpsi teraktivasi. Pada adsorpsi fisika, gaya intermolekuler yang banyak mempengaruhi adalah gaya van der Waals. Karakteristik dari adsorpsi fisika adalah memiliki panas adsorpsi yang rendah yaitu hanya sekitar 10.000 kal/mol adsorbat, sehingga dapat terjadi pada temperatur ambien. Selain itu kesetimbangan pada adsorpsi fisika lebih cepat tercapai dan bersifat reversibel.

Pada adsorpsi kimia, gaya intermolekuler yang bekerja diakibatkan oleh adanya proses transfer elektron. Transfer elektron pada adsorpsi kimia memiliki kekuatan sebanding dengan pembentukan ikatan kimia antara adsorbat dan permukaan padatnya. Interaksi ini masih lebih lemah dibandingkan dengan adsorpsi fisika serta hanya mampu membentuk lapisan *monolayer* saja. Adsorpsi kimia umumnya memiliki panas adsorpsi yang besar, antara 20.000 – 100.000 kal/mol, sehingga hanya mungkin terjadi pada kondisi temperatur tinggi.

II. 6. 2. Breakthrough Curve

Kurva terobosan (*breakthrough curve*) merupakan kurva yang menggambarkan suatu rentang kondisi dimana mengenai 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. 7 Breakthrough Curve (Kurva Terobosan)

Breakthrough curve di atas menggambarkan fenomena yang terjadi selama proses adsorpsi:

- 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.

II. 6. 3. Adsorpsi Isotermis

Kesetimbangan adsorpsi merupakan suatu kondisi dimana proses adsorpsi berlangsung, laju perindahan massa antara adsorbat yang teradsorpsi ke permukaan adsorben dan adsorbet yang terdesorpsi dari adsorben adalah sama. Pada kondisi ini, adsorben seakan-akan tidak lagi dapat mengadsorpsi adsorbat dan mencapai keadaan jenuh. Jika data kesetimbangan adsorpsi diperoleh pada temperatur konstan, adsorpsi ini disebut sebagai adsorpsi isotermis.

Karena temperatur konstan, adsorpsi isothermis merupakan fungsi dari tekanan. Persamaan yang sering digunakan untuk menggambarkan variasi antara jumlah zat teradsorpsi per unit area/massa dengan tekanan adalah persamaan *Freundlich* dan *Langmuir*.

II. 6. 3. 1. *Adsorpsi Isothermis Freundlich*

Secara matematis, persamaan adsorpsi isothermis Freundlich dapat dituliskan sebagai berikut :

$$y = k C^{1/n} \quad (6)$$

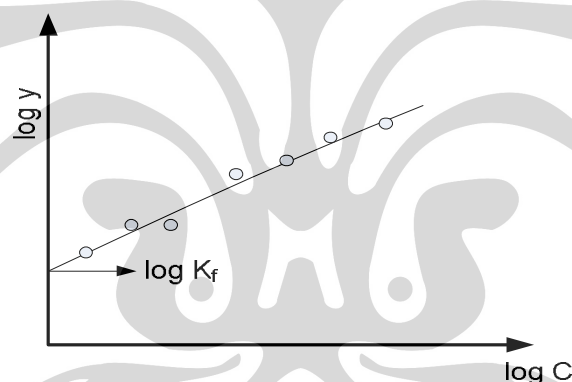
Dimana : y = massa zat teradsorpsi per unit massa adsorben

C = konsentrasi equilibrium dari larutan yang sedang diadsorpsi

k dan n adalah konstanta empiris.

Jika persamaan (1) diubah dalam bentuk logaritma akan menjadi:

$$\log y = \log k + \frac{1}{n} \log C \quad (7)$$



Gambar 2. 8 Kurva Adsorpsi Isothermis Freundlich

Dari persamaan logaritma tersebut dapat dibuat plot kurva antara $\log C$ dan $\log y$ seperti pada gambar 2.2 di atas. Jika sesuai dengan persamaan Freundlich, maka akan terbentuk kurva linear dengan gradien n dan perpotongan dengan sumbu- y sebesar $\log k$. Pada persamaan isothermis Freundlich, harga n dan K_f adalah konstan. Dengan kata lain, meningkatnya konsentrasi fasa cair akan meningkatkan konsentrasi fasa padat yang sebanding dengan n dan K_f . Pada kasus dimana konsentrasi fasa padat bernilai rendah, konstanta eksponen Freundlich akan meningkat seiring dengan penurunan konsentrasi fasa padat. Hal ini mengakibatkan persamaan isothermis Freundlich tidak berlaku pada konsentrasi fasa padat yang rendah.

II. 6. 3. 2. Adsorpsi Isotermis Langmuir

Selain persamaan Freundlich di atas, persamaan Langmuir juga dapat digunakan pada proses adsorpsi isotermis (Sontheimer,1988) :

$$q = q_m \frac{K_L C}{1 + K_L C} \quad (8)$$

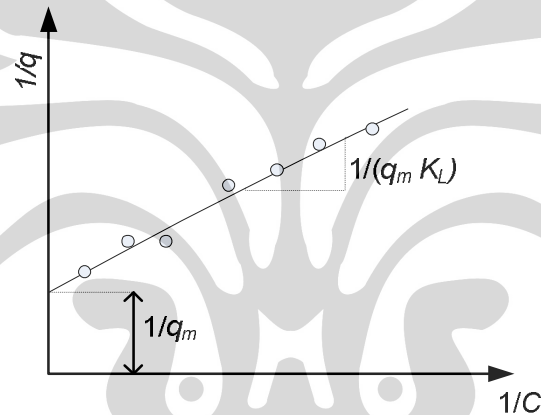
$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L} \frac{1}{C} \quad (9)$$

dimana : q = jumlah massa zat teradsorpsi yang teradsorpsi per unit masa adsorben

C = konsentrasi equilibrium dari larutan yang diadsorpsi

K_L = konstanta Langmuir yang berhubungan dengan enthalpi adsorpsi

q_m = jumlah massa adsorbat yang teradsorpsi per gram adsorben untuk membentuk lapisan tunggal (*monolayer*)



Gambar 2. 9 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir

Persamaan isotermis Langmuir tidak dapat diterapkan untuk semua kondisi adsorpsi, sehingga perlu digunakan beberapa asumsi agar persamaan Langmuir dapat berlaku. Asumsi-asumsi tersebut adalah :

1. Adsorpsi hanya terjadi pada lapisan tunggal molekul yang teradsorpsi pada permukaan adsorben saja.
2. Molekul yang teradsorpsi tidak dapat bergerak bebas atau tidak terjadi migrasi molekul pada lapisan permukaan.
3. Entalpi adsorpsi konstan dan sama untuk setiap molekul.
4. Selain itu, terdapat dua batasan untuk dapat mengaplikasikan persamaan adsorpsi isotermis Langmuir. Batasan tersebut antara lain :
 - Untuk fasa cair yang memiliki konsentrasi fasa cair yang rendah, persamaan langmuir menjadi persamaan isotermis linear karena nilai $K_L C \ll 1$.

$$\lim_{c \rightarrow 0} q = q_m K_L C$$

- Untuk fasa cair dengan konsentrasi yang tinggi, $K_L.C \gg 1$, konsentrasi fasa padatnya tidak tergantung pada konsentrasi larutan.

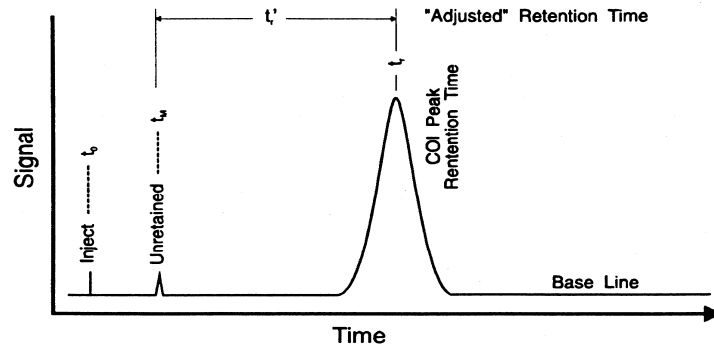
$$\lim_{c \rightarrow \infty} q = q_m$$

Jika data percobaan sesuai dengan teori Langmuir, plot antara $1/q$ dan $1/C$ akan menghasilkan kurva yang berupa garis lurus. Harga q_m dan konstanta K_L dapat dihitung dari harga perpotongan dengan sumbu-y yaitu $1/q_m$ dan kemiringan $1/(q_m K_L)$.

II.7 Kromatografi Gas (*Gas Chromatography*)

Kromatografi gas merupakan salah satu peralatan yang sangat penting di bidang kimia. Alat ini digunakan untuk untuk menganalisa suatu campuran secara kuantitatif juga secara kualitatif. Dengan demikian, gas kromatografi dapat digunakan untuk menganalisa komposisi campuran asam lemak.

Kromatografi gas merupakan teknik yang digunakan untuk memisahkan substansi volatil dari campuran fasa gasnya. Sampel yang akan dipisahkan diinjeksikan ke dalam kromatografi gas. Suatu gas pembawa (biasanya helium) bergerak melewati suatu kolom yang terdiri atas lapisan dinding ataupun padatan yang disusun didalamnya (*packed solid*). Gas pembawa ini disebut sebagai fasa yang bergerak (*mobile phase*), dan gas ini membawa sampel. Kolom berada pada fasa diam (*stationary phase*). Saat *mobile phase* bergerak melalui kolom, komponen dari sampel bersentuhan (kontak) dengan *stationary phase*. Jika berbagai komponen sampel memiliki afinitas yang berbeda untuk *stationary phase*, maka pemisahan akan terjadi. Semakin besar gaya tarik terhadap *stationary phase*, maka semakin lama komponen tersebut keluar dari kolom. Sebuah detektor mengamati *mobile phase* yang keluar dari kolom, dan mengirimkan sinyal ke alat perekam yang merekam waktu lamanya komponen-komponen sampel keluar dari kolom. Analisis gas kromatografi menghasilkan sebuah kromatogram dimana setiap material ditampilkan dalam bentuk suatu puncak. Gambar berikut ini menampilkan skema kromatogram:



Gambar 2. 10 Kromatogram hasil GC secara umum (Melvin, 1999)

Dimana:

t_0 = waktu injeksi

t_r = waktu tinggal-waktu yang diukur dari injeksi hingga maksimum puncak

t_m = waktu *mobile phase*-waktu dari injeksi hingga munculnya puncak

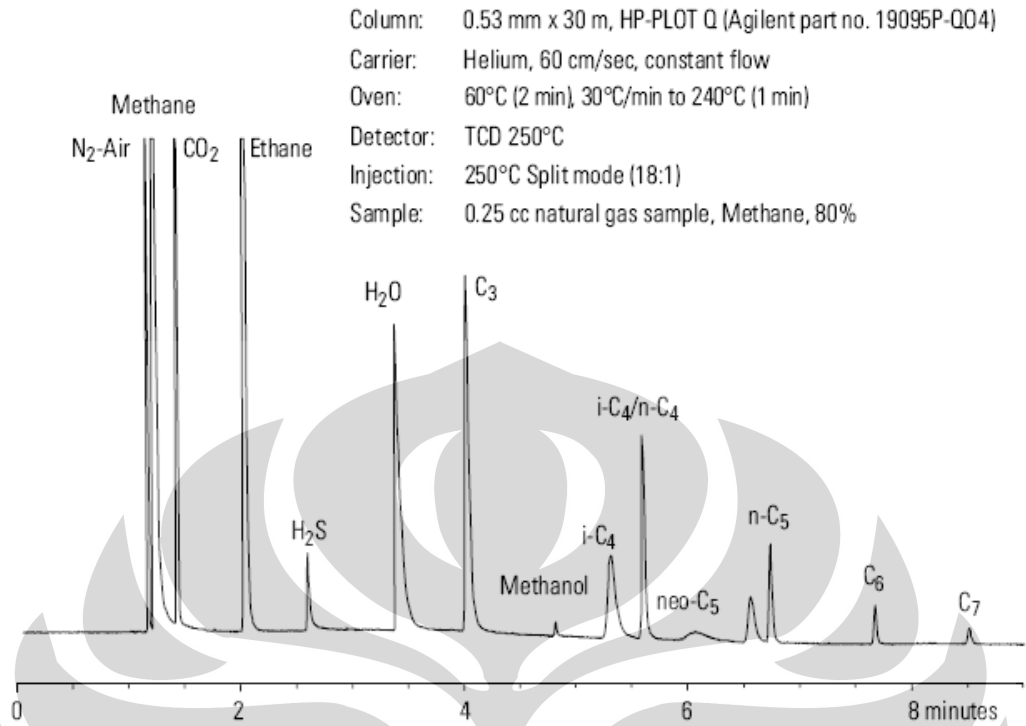
= waktu yang dibutuhkan *mobile phase* untuk melewati kolom

t_r' = waktu tinggal yang disesuaikan- $(t_r - t_m)$

= waktu komponen tinggal di dalam *stationary phase*

Proses kromatografi gas dapat digunakan untuk analisis kualitatif dan juga analisa kuantitatif. Perbandingan waktu-waktu tinggal dapat digunakan untuk menolong mengidentifikasi material di dalam sampel (analisis kualitatif). Dengan membandingkan waktu-waktu tinggal dari puncak-puncak (*peaks*) komponen di dalam sampel dengan waktu-waktu tinggal dari puncak-puncak (*peaks*) standar murni komponen tersebut, maka dapat dilakukan identifikasi. Sedangkan dengan mengukur luas area di bawah *peaks* tunggal dalam sebuah komponen sampel dan membandingkan tiap area dengan area total, maka dapat diperkirakan konsentrasi komponen tersebut dalam sampel yang diuji (Melvin, 1999). Berikut ini adalah contoh analisa gambar kromatogram yang terdeteksi pada gas alam dengan kolom *molecular sieve*:

**Resolution of air/CO, CO₂, and methane in a natural gas sample
(C₇ concentration is approximately 200 ppm)**

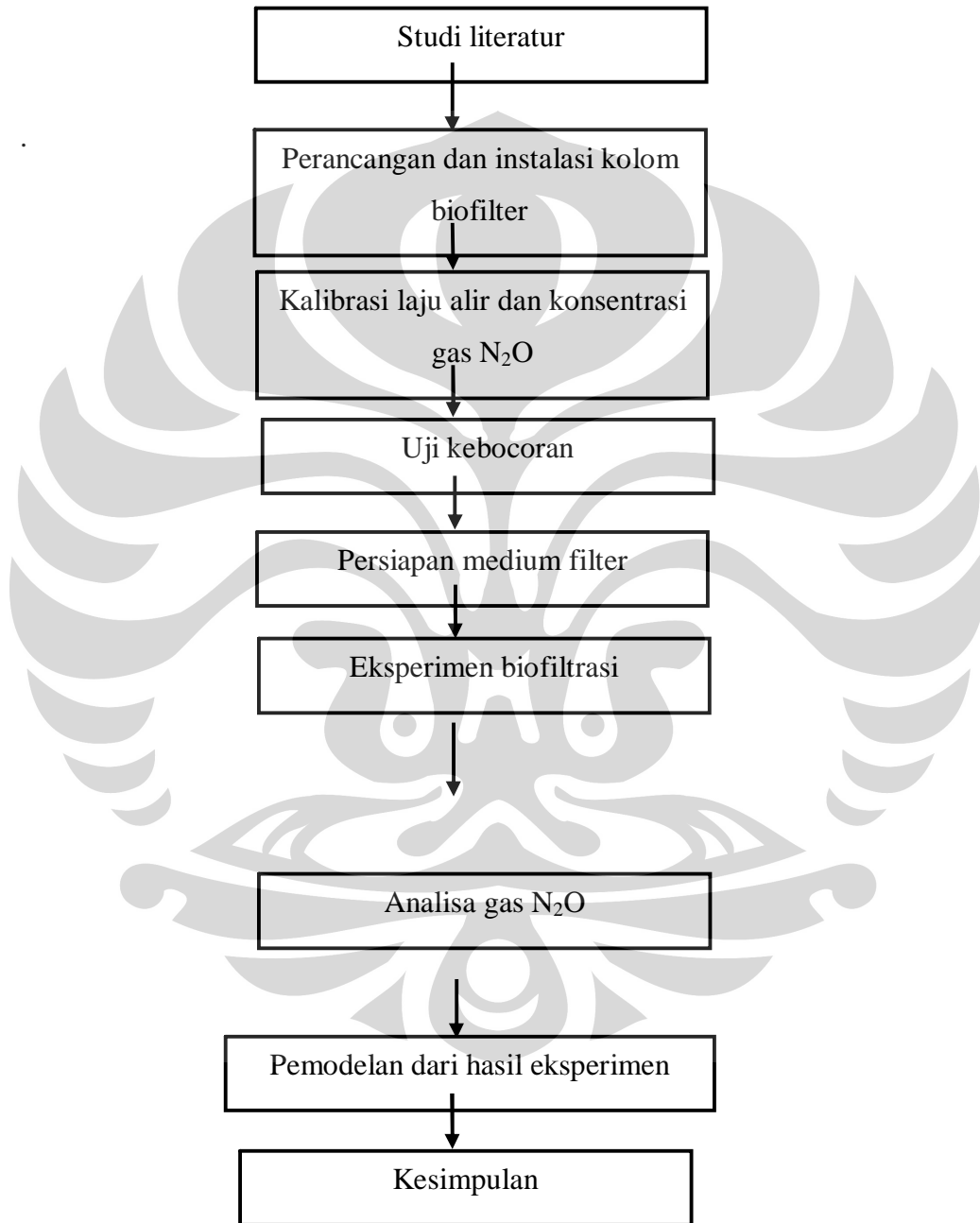


Gambar 2. 11 Kromatogram Gas Alam yang Terdeteksi pada GC Kolom *Molecular Sieve*

METODOLOGI PENELITIAN

III. 1. Rancangan Penelitian

Diagram alir dari penelitian ditunjukkan oleh Gambar 3. 1:



Gambar 3. 1 Bagan alir rancangan penelitian

Rancangan penelitian diawali dengan studi literatur berupa studi jurnal-jurnal publikasi internasional mengenai biofiltrasi. Kemudian perancangan biofilter dilakukan guna mendapatkan desain bentuk biofilter yang akan digunakan untuk eksperimen biofiltrasi. Setelah perancangan biofilter dilakukan, flowmeter yang akan digunakan dan volume gas N₂O harus dikalibrasi. Tujuan dari proses kalibrasi ini adalah untuk mendapatkan laju alir aktual (sesungguhnya) dari gas yang dialirkan ke dalam sistem biofilter, serta luas area N₂O pada volume sampel N₂O standar. Setelah kalibrasi flowmeter dan volume gas N₂O, selanjutnya dilakukan uji kebocoran. Uji kebocoran dilakukan untuk memastikan konsentrasi gas N₂O berkurang karena proses adsorpsi, bukan karena kebocoran. Preparasi medium filter dilakukan dengan pengayakan guna mendapatkan penyeragaman ukuran. Eksperimen biofiltrasi bertujuan untuk menghilangkan N₂O menggunakan biofilter dengan menginvestigasi berbagai faktor operasi seperti ketinggian kolom, laju alir gas N₂O, dan penggunaan nutrisi. Gas N₂O disirkulasi selama 6 jam menggunakan pompa peristaltik dan sampel gas diambil setiap 1 jam dengan syringe. Gas efluen kemudian dianalisa dengan *gas chromatography* (GC). Terakhir, hasil dari eksperimen biofiltrasi kemudian dimodelkan dalam bentuk model adsorpsi isoteremis

III. 2. Material

Medium filter terdiri dari serpihan kayu dan kompos. Kompos diayak terlebih dahulu untuk menyeragamkan ukuran pupuk. Kultur inokulum kemudian disiapkan dengan mencampurkan air limbah dari kandang binatang dengan medium denitrifikasi^[20]. Gas terdiri dari nitrogen oksida dan udara. Suplemen nutrisi gizi untuk biofilter disiapkan sebagai sumber karbon (glukosa), zat anorganik, dan kelembaban. Larutan nutrisi (pH 8.0) mengandung komponen berikut ini (dalam 1 L air):

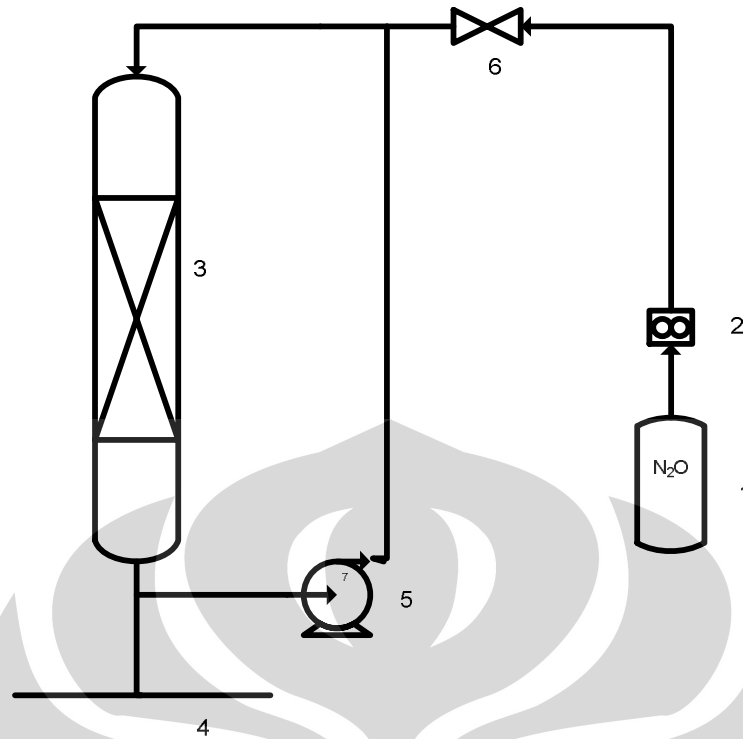
- K_2HPO_4 (0.4 g)
- NH_4Cl (0.3 g)
- $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (0.4 g)
- CH_3COONa (2.93 g)

Material anorganik ini dipilih karena sebelumnya pernah digunakan mengembangkan bakteri penitrifikasi aerobik [21].

Pupuk kompos yang digunakan merupakan pupuk kandang yang berasal dari kotoran sapi yang diambil dari peternakan sapi di Kukusan Kelurahan berupa kompos, serpihan kayu dan mikroorganisme. Pupuk kompos tersebut merupakan hasil buangan langsung dari peternakan sapi Kukusan Kelurahan yang langsung dikeringkan di atas area tanah selama lebih dari dua minggu pada areal peternakan sapi dan tidak diberikan tambahan suplemen nutrisi. Pengeringan pupuk kompos dilakukan pada suhu ruang $25^\circ C$ dengan humiditas relatif sekitar 60-72%.

III. 3. Desain Biofilter

Diagram skematik dari biofilter yang digunakan pada eksperimen ditunjukkan pada Gambar 3. 2:



Gambar 3. 2 Diagram Skematik Biofilter

Komponen-komponen dalam biofilter adalah sebagai berikut:

1. Suplai gas N_2O (PT. Aneka Gas Indonesia tahun keluaran 1997)
2. Flow control (Dwyer ©, Range laju alir gas 0 – 200 cc/menit)
3. Kolom biofilter (Merakit sendiri, bahan *acrylic*)
4. Tempat pengambilan sampel N_2O (Merakit sendiri)
5. Pompa peristaltik (MasterFlex® L/S™ model 7518-12, 230VAC, 50/60Hz, 6-600 RPM)
6. Valve (On-off valve, stainless steel)

Persambungan pada pipa selang dilapisi insulator Parafilm® dan Cable Ties® guna menghindari adanya kebocoran pada sistem biofilter.

III. 4. Kalibrasi Laju Alir dan Konsentrasi Gas N_2O

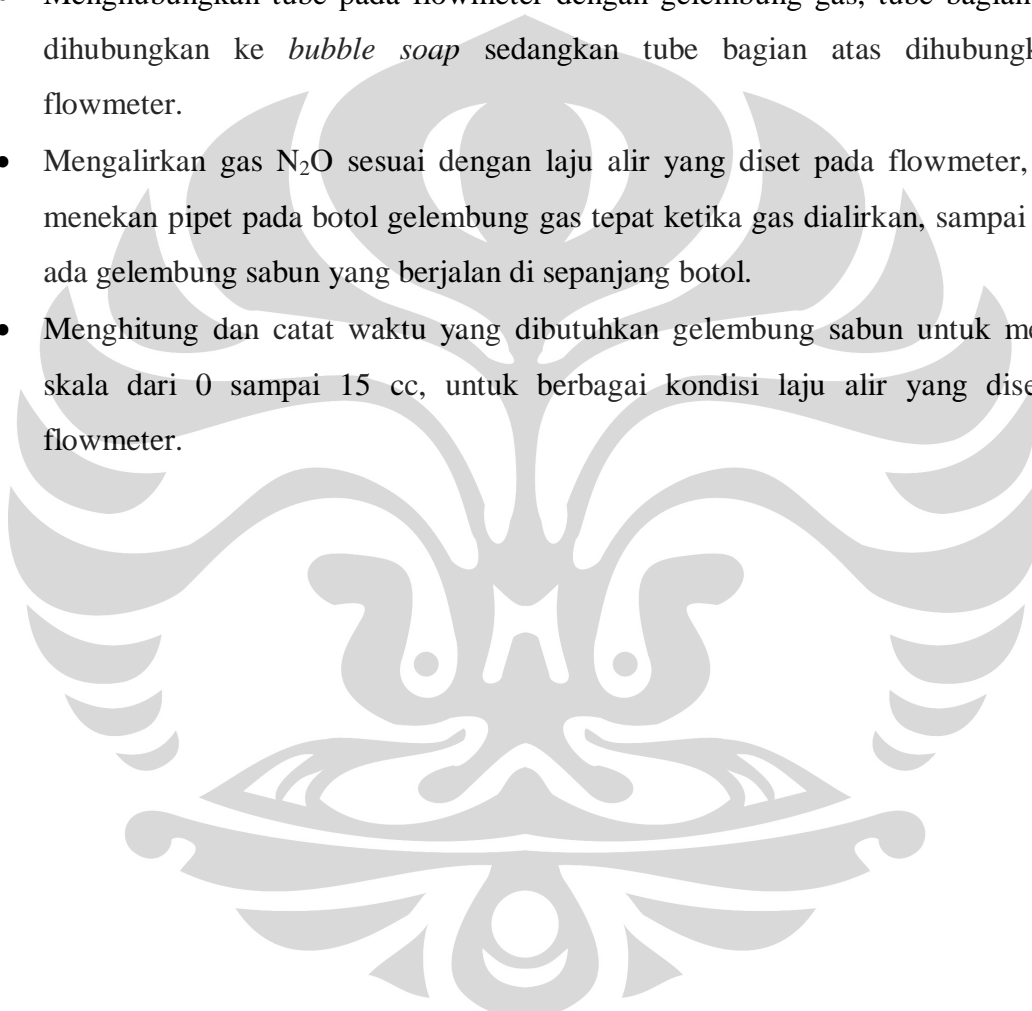
Sebelum digunakan untuk eksperimentasi biofiltrasi, flowmeter yang digunakan harus dikalibrasi. Tujuan dari proses kalibrasi ini adalah mendapatkan laju alir aktual (sesungguhnya) dari gas yang dialirkan ke dalam sistem biofilter. Hal ini dikarenakan laju alir

yang diset pada flowmeter belum tentu menghasilkan laju alir yang sama, tergantung pada jenis flowmeter serta jenis gas yang digunakan.

Proses kalibrasi ini cukup singkat dan sederhana, hanya melibatkan flowmeter yang akan dikalibrasi, gas yang akan dialirkan, serta *bubble soap* atau gelembung gas yaitu suatu alat sejenis botol kaca berisi gelembung sabun yang digunakan untuk mengukur laju alir aktual dari flowmeter.

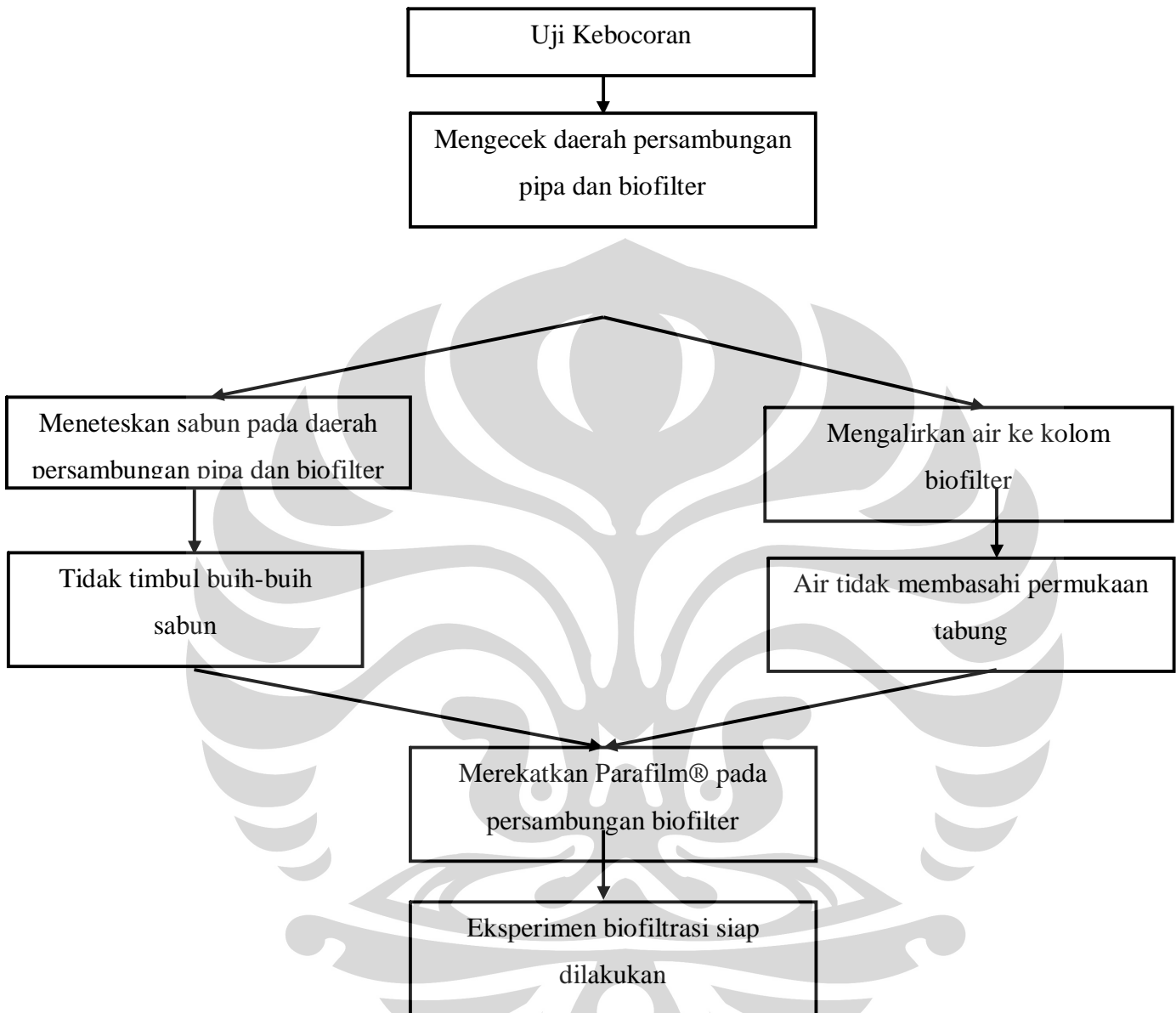
. Prosedur kalibrasi flowmeter gas adalah sebagai berikut:

- Menghubungkan tube pada flowmeter dengan gelembung gas, tube bagian bawah dihubungkan ke *bubble soap* sedangkan tube bagian atas dihubungkan ke flowmeter.
- Mengalirkan gas N_2O sesuai dengan laju alir yang diset pada flowmeter, sambil menekan pipet pada botol gelembung gas tepat ketika gas dialirkan, sampai terlihat ada gelembung sabun yang berjalan di sepanjang botol.
- Menghitung dan catat waktu yang dibutuhkan gelembung sabun untuk mencapai skala dari 0 sampai 15 cc, untuk berbagai kondisi laju alir yang diset pada flowmeter.



III. 5. Uji Kebocoran

Tahapan pengerjaan untuk uji kebocoran dapat dilihat pada Gambar 3. 3:



Gambar 3. 3 Bagan Alir Uji Kebocoran

Uji kebocoran dilakukan dengan meneteskan sabun pada daerah persambungan pipa dan mengalirkan air di sepanjang sistem biofilter tersebut, kemudian melihat apakah terjadi kebocoran pada setiap komponen sistem tersebut. Jika diketahui terjadi kebocoran pada selang atau sambungan pipa, maka dilakukan isolasi pada bagian yang bocor. Sedangkan jika kebocoran terjadi pada komponen/alat tertentu seperti kolom biofilter, atau tempat pengambilan sampel maka dilakukan penggantian dengan alat yang baru untuk menjaga agar sistem tetap berjalan dengan baik.

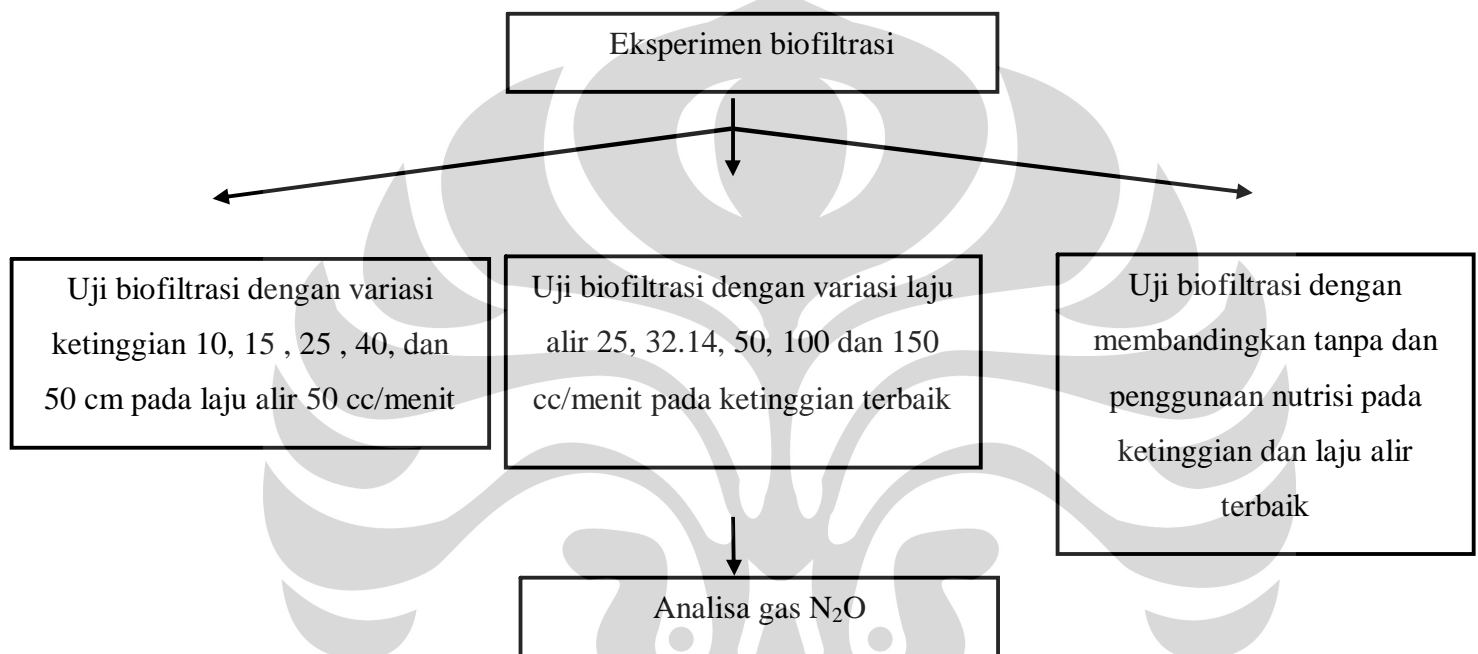


III. 6. Preparasi Medium Filter

Biofilter merupakan pupuk kandang yang berasal dari kotoran sapi yang diambil dari peternakan sapi di Kukusan Kelurahan berupa kompos, serpihan kayu dan mikroorganisme. Persiapan biofilter dilakukan dengan ditumbuk dan diayak dengan ayakan mesh 1.7-2.1 mm.

III. 7. Rancangan Percobaan Eksperimen Biofiltrasi

Tahapan pengerjaan untuk uji kebocoran dapat dilihat pada Gambar 3. 4:



Gambar 3. 4 Bagan Alir Eksperimen Biofiltrasi

Gas N_2O diumpankan menuju kolom biofilter dan disirkulasi dengan pompa peristaltik selama 6 jam. Sampel diambil setiap satu jam pada septum dengan menggunakan syringe GC. Jarum suntik kemudian diinjeksikan ke dalam GC jenis TCD (Thermal Conductivity Detector). Konsentrasi keluaran gas N_2O ditunjukkan pada data peak pada GC, yang telah disiapkan dan dikalibrasikan sebelum percobaan dilaksanakan. Efek dari faktor operasi seperti ketinggian kolom, laju alir, dan pengaruh nutrisi akan kemudian diinvestigasi dan dianalisa.

III. 8. Analisa Gas N₂O

Konsentrasi efluen gas N₂O kemudian diukur dengan menggunakan *Gas Chromatography* (GC) jenis TCD.

Spesifikasi GC yang digunakan adalah sebagai berikut:

Merek dan Tipe	Hitachi 263-50
Kolom	Porapak Q
Suhu Kolom Injektor	100°C
Suhu Kolom Detektor	130°C
<i>Gas Carrier</i>	Ar
Jenis Detektor	TCD

Data yang diambil adalah luas peak dari gas N₂O yang datanya akan diplot terhadap waktu.

Data yang akan diplot terhadap waktu adalah efisiensi reduksi N₂O. Pengolahan datanya adalah dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$= 100\% \times \frac{A_{t=0} - A_{t=n}}{A_{t=0}} \quad (10)$$

Di mana:

Eff N₂O = efisiensi reduksi N₂O

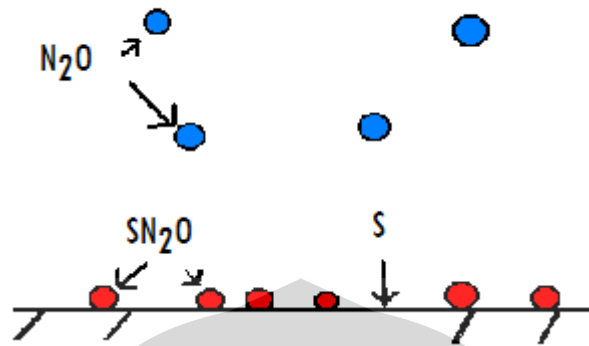
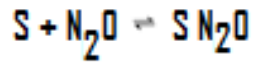
A_{t=0} = luas area puncak N₂O pada waktu t = 0 jam

A_{t=n} = luas area puncak N₂O pada waktu t = n jam

III. 9. . Pemodelan Hasil Eksperimen

Berikut ini adalah penurunan rumus adsorpsi Langmuir yang akan digunakan pada penelitian ini:

Proses adsorpsi yang terjadi antara molekul gas N₂O, A, permukaan situs aktif pada pupuk yang tidak ditempati, S, dan permukaan situs aktif pada pupuk yang ditempati, SA dapat ditunjukkan pada persamaan reaksi di bawah ini:



Gambar 3. 5 Ilustrasi Adsorpsi Gas N₂O oleh Pupuk

Di mana:

- [SN₂O] = permukaan situs aktif pupuk yang ditempati oleh molekul yang teradsorpsi, (x)
- [S] = permukaan situs aktif pupuk yang kosong, (1-x)
- [N₂O] = tekanan atau konsentrasi gas ekuilibrium, P atau C

Saat adsorpsi:



Saat desorpsi:



Sehingga laju adsorpsi adalah:

$$= [] [] \quad (13)$$

dan laju desorpsi adalah:

$$= [] \quad (14)$$

Karena laju adsorpsi dan laju desorpsi diasumsikan sama maka:

$$= \quad (15)$$

$$[] [] = [] \quad (16)$$

$$\frac{[]}{[]} = \frac{[]}{[]} \quad (17)$$

Karena

$$= \quad (18)$$

Maka:

$$\frac{[]}{[]} = \frac{[]}{[]} \quad (19)$$

Jumlah situs adsorpsi:

$$= [] + [] \quad (20)$$

Jumlah massa yang teradsorpsi θ , dapat dicari dengan:

$$= \frac{[]}{[]} \quad (21)$$

$$= \frac{[]}{[]} \quad (22)$$

$$= \frac{[]}{[]} \quad (23)$$

$$= \frac{[]}{[]} \quad (24)$$

$$= \frac{[]}{2} \quad (25)$$

Maka:

$$= \frac{[]}{[]} \quad (26)$$

Linearisasi dari persamaan (26) adalah:

$$- = - + 1 \quad (27)$$

$$- = - - + 1 \quad (28)$$

Plot pada grafik adalah $-$ sebagai sumbu x vs $-$ sebagai sumbu y.

Pengolahan data untuk pemodelan eksperimen adalah sebagai berikut:

1. Menghitung fraksi volume N_2O dari luas area komponen-komponen senyawa yang terdeteksi oleh GC.

$$= \frac{[]}{[]} \quad (29)$$

Di mana:

= fraksi volume N_2O

= luas area puncak N_2O

= luas area udara

= luas area air

2. Menghitung volume N₂O dalam udara. Data ini didapatkan dengan persamaan kalibrasi volume N₂O dalam udara terhadap luas area N₂O
3. Menghitung volume N₂O yang terkandung di dalam udara.

$$= \quad \times \quad (30)$$

4. Menghitung massa N₂O

$$= \quad \times \quad (31)$$

Densitas N₂O pada suhu 25°C dan 1 atm adalah 1.799 g/L [5].

5. Menghitung fraksi massa N₂O yang teradsorb dalam adsorbent, θ_n:

$$= \frac{\quad}{\quad} \quad (32)$$

6. Menghitung konsentrasi equilibrium N₂O, c_n

$$= \frac{\quad^2}{\quad^2 \quad^2} \quad (33)$$

7. Memplot grafik terhadap 1

Pengolahan data untuk analisis sensitivitas adalah sebagai berikut:

1. Menghitung nilai C terkalkulasi

$$- = - - + 1 \quad (28)$$

$$- - 1 = - - \quad (34)$$

$$- = \quad (35)$$

$$= \frac{\quad}{\quad} \quad (36)$$

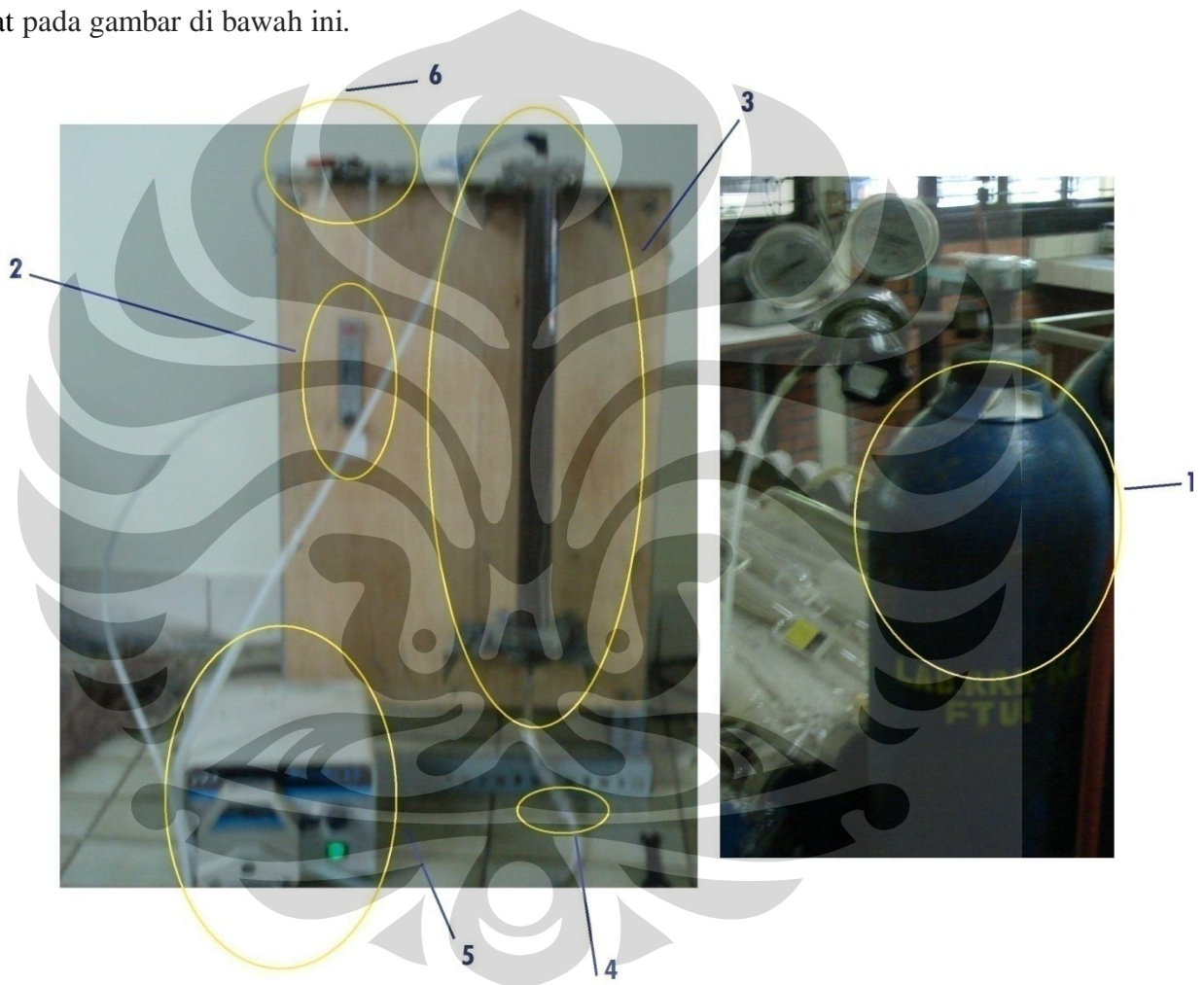
Nilai θ adalah 0 hingga 1 dengan inkremen 0.01

2. Menghitung nilai C terkalkulasi untuk 0.5K dan 2 K
3. Memplot grafik antara C_{kalk} terhadap θ untuk K, 0.5K dan 2 K

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

IV. 1. Perancangan Desain Biofilter

Perancangan alat biofilter harus dilakukan terlebih dahulu karena alat biofilter sebelumnya tidak terdapat di Departemen Teknik Kimia UI. Perancangan alat biofilter dilakukan sesuai dengan skema alat pada Bab III. Hasil rancangan peralatan biofilter dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4. 1 Peralatan Eksperimen Reduksi N_2O Menggunakan Biofilter

Komponen desain biofilter tersebut adalah sebagai berikut:

1. Suplai gas N_2O dengan konsentrasi yang belum diketahui
2. Flow control dengan jangkauan laju alir dari 0 cc/menit - 200 cc/menit
3. Kolom biofilter berbentuk silindris dengan diameter 8 cm dan tinggi 50 cm dengan bahan polimer *acrylic*

4. Tempat mengambil sampel gas dengan syringe GC
5. Pompa peristaltik
6. Valve

IV. 2. Uji Kebocoran

Uji kebocoran dilakukan dengan meneteskan air sabun pada daerah kolom biofilter yang rentan terjadinya kebocoran karena sekrup dan baut tidak tertutup dengan rapat, atau antara sambungan antar pipa pada kolom biofilter. Indikasi terjadinya kebocoran adalah timbulnya busa sabun yang berbuih pada daerah kolom biofilter yang tidak tertutup dengan rapat. Hal ini juga menandai adanya udara yang terekspos terhadap kolom biofilter. Selain itu, uji kebocoran dilakukan dengan mengalirkan air ke kolom biofilter. Dengan mengalirkan air ke kolom biofilter, kebocoran dapat diidentifikasi dengan jelas. Kebocoran dengan cara ini ditandai dengan merembesnya air pada permukaan kolom biofilter. Hal ini dapat ditangani dengan membongkar persambungan pada kolom biofilter dan merekatkannya kembali dengan lem perekat yang lebih kuat.

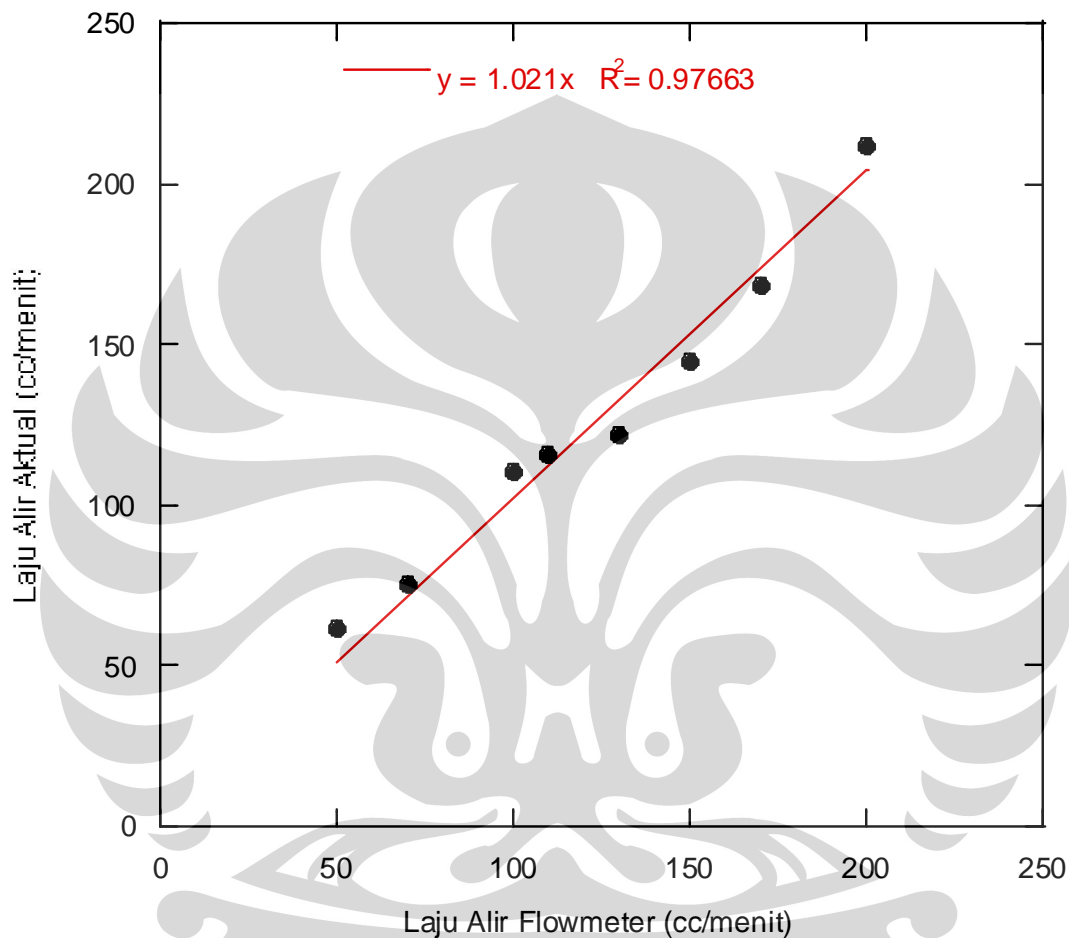
Akibat dari kebocoran adalah berkurangnya konsentrasi N_2O karena tereksposnya udara pada sistem biofiltrasi. Hal ini harus dihindari dalam pengujian biofiltrasi. Pengujian kebocoran memakan waktu hingga satu setengah bulan karena ingin didapatkan sampel data seakurat mungkin. Hasil dari uji kebocoran dapat dilihat pada lampiran A. Karena konsentrasi gas N_2O relatif tidak berubah dan tidak ada gelembung gas setelah uji kebocoran, maka dapat dianggap bahwa tidak terdapat kebocoran pada sistem. Dengan demikian, dapat diasumsikan bahwa berkurangnya konsentrasi gas N_2O terjadi karena adanya fenomena adsorpsi dan degradasi gas oleh medium biofilter,

IV. 3. Kalibrasi Flowmeter

Kalibrasi dengan flowmeter dilakukan dengan gelembung sabun. Cara kerja alat gelembung sabun adalah dengan mengalirkan aliran gas N_2O melalui gelembung sabun, kemudian menekan pipet sehingga cairan gelembun dapat bergerak ke atas pada suatu titik tertentu dalam wujud cincin kecoklat-coklatan. Cara pengukurannya adalah mengukur berapa lama jarak cincin bergerak dari titik 0 hingga ke suatu titik tertentu dengan alat bantu stopwatch. Dalam percobaan ini dilakukan hingga ke titik 15 cc. Tujuan dari kalibrasi flowmeter itu sendiri adalah untuk mengetahui laju alir gas N_2O aktual (sesungguhnya) pada

alat flowmeter terhadap laju alir aliran gas N_2O yang mengalir pada kolom biofilter. Pengolahan data untuk kalibrasi flowmeter dapat dilihat di lampiran B. Data uji kalibrasi tersebut kemudian akan diplot ke dalam bentuk grafik.

Kemudian setelah menghitung laju alir terhitung, maka dibuat grafik antara laju alir tertera dan laju alir terhitung, seperti yang terlihat pada Gambar 4. 2:



Gambar 4. 2 Kalibrasi Flowmeter

Dari grafik di atas, dapat dilihat bahwa grafik uji kalibrasi flowmeter memiliki kecenderungan garis linear. Apabila diberi trendline garis linear, maka nilai pendekatannya adalah $R^2 = 0.976$. Suatu grafik dapat dikatakan memiliki kecenderungan linear apabila $R^2 \geq 0.90$. Maka uji kalibrasi flowmeter dapat disimpulkan tidak bermasalah sehingga flowmeter tersebut layak digunakan untuk uji biofiltrasi selanjutnya.

Langkah berikutnya adalah mencari berapa laju alir terkecil yang dapat diakomodasi oleh biofilter. Dari laju alir terkecil biofilter, didapat waktu tempuh sebagai berikut: 30,27 s;

28,58 s; 28,64 s; 26,70 s, 25,80 s. Maka laju alir terkecil yang dapat diakomodasi oleh biofilter adalah sebagai berikut:

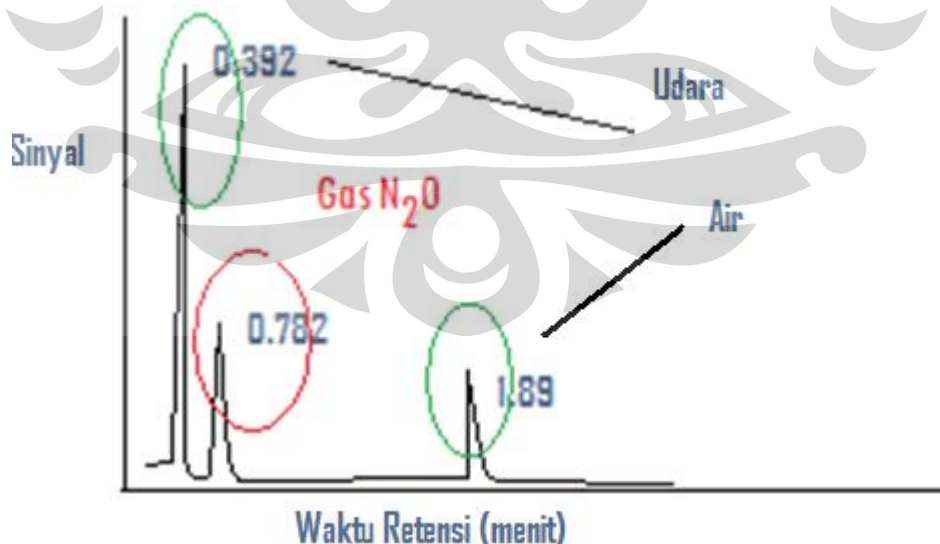
$$\frac{30,27 + 28,58 + 28,64 + 26,70 + 25,80}{5} = 27,998$$

$$\frac{15}{27,998} \times \frac{60}{1} = 32,14 \quad /$$

IV. 4. Kalibrasi Volume Gas

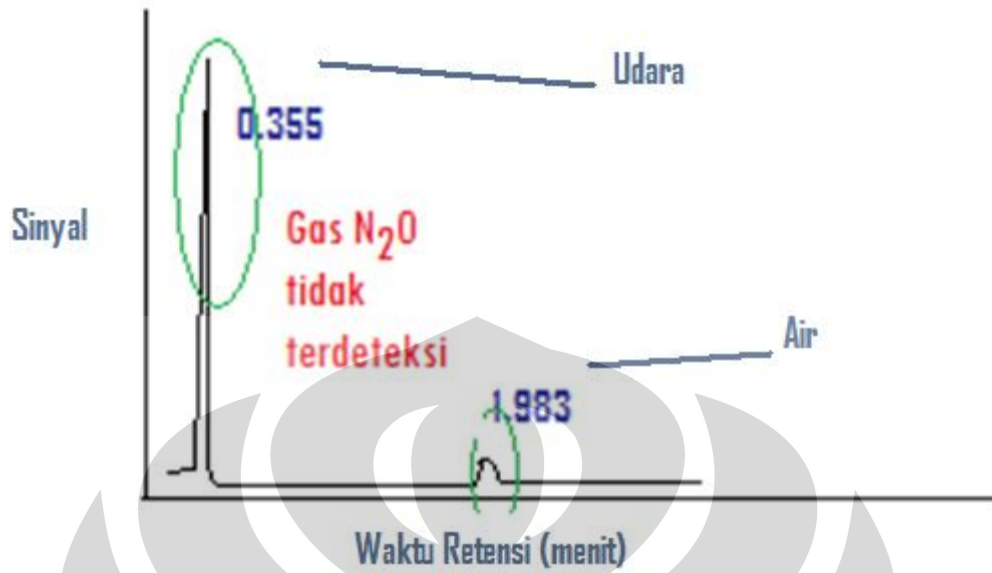
Kalibrasi volume gas dilakukan dengan tujuan mengetahui konsentrasi gas N₂O awal di mana harus diketahui berapa luas area dari gas N₂O sebelum diisi biofilter. Konsentrasi gas N₂O di dalam udara belum dapat diketahui sehingga untuk sementara gas N₂O dianggap 100% dengan menyesuaikannya terhadap luas area yang tertera dari pembacaan GC. Cara pengukuran uji kalibrasi gas adalah dengan mengalirkan gas N₂O ke dalam *sample tube*. *Sample tube* kemudian ditutup dengan rapat. Sampel kemudian diambil dari *sample tube* dengan menggunakan syringe kaca. Syringe kaca kemudian diinjeksikan ke dalam Gas Chromatography (GC) untuk mendeteksi keberadaan gas beserta konsentrasinya.

Hasil yang terbaca berupa peak dengan luas area tertentu. Contoh pembacaan hasil kromatograf pada sampel gas N₂O dengan volume 1000 µl dapat dilihat pada Gambar 4. 3:



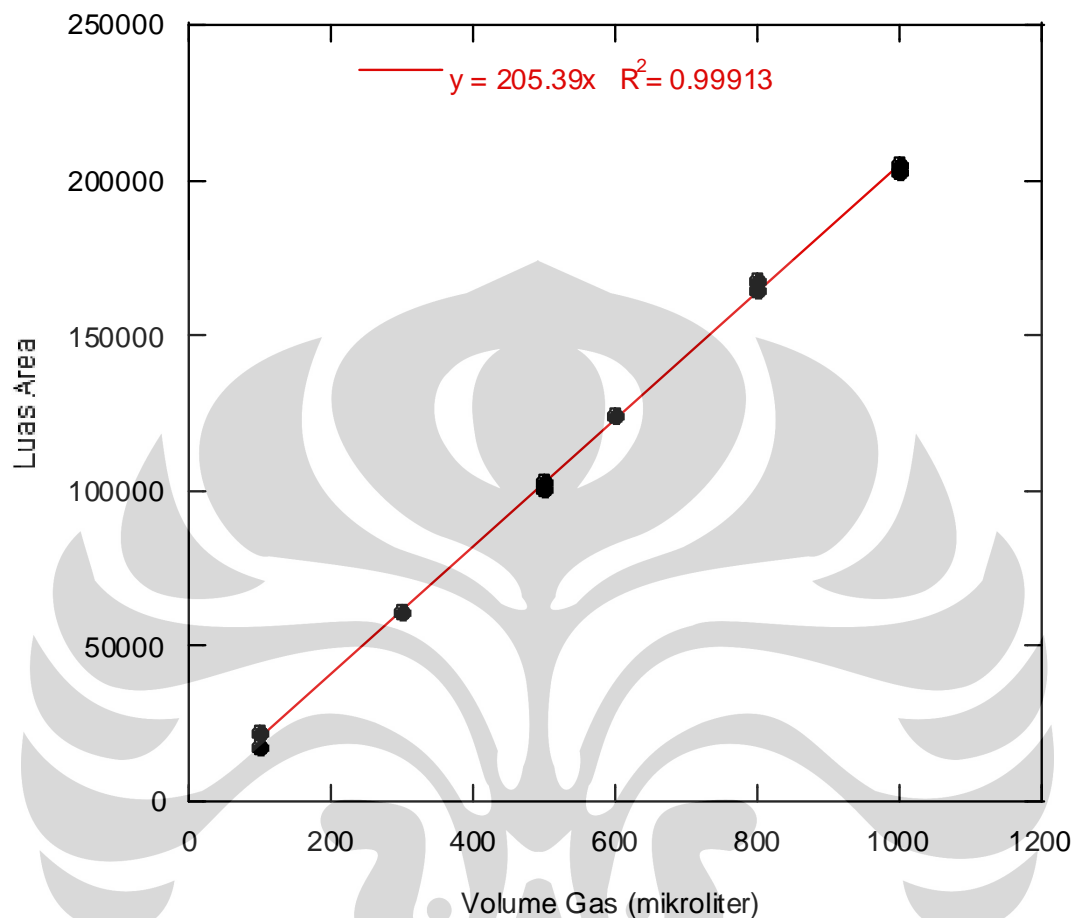
Gambar 4. 3 Sampel Grafik yang Terdeteksi pada Gas N₂O oleh GC

Gas N_2O merupakan peak yang di tengah karena sebelumnya dilakukan kalibrasi gas udara. Hasil yang terbaca dapat dilihat pada Gambar 4. 4:



Gambar 4. 4 Sampel Grafik yang Terdeteksi pada Udara oleh GC

Kemudian dilakukan kalibrasi gas N₂O dengan variasi volume gas 100, 300, 500, 600, 800, 1000 µl. Hasilnya adalah sebagai berikut:



Gambar 4. 5 Kalibrasi Volume N₂O

IV. 5. Persiapan Medium Biofilter

Biofilter merupakan pupuk kandang yang berasal dari kotoran sapi yang diambil dari peternakan sapi di Kukusan Kelurahan berupa kompos, serpihan kayu dan mikroorganismenya. Mikroorganismenya yang terkandung dalam pupuk kandang telah diidentifikasi pada penelitian sebelumnya sebagai bakteri denitrifikasi [47]. Persiapan medium biofilter dilakukan dengan ditumbuk dan diayak dengan ayakan berdiameter 2-3 mm. Hasil medium biofilter yang sudah dikeringkan dapat dilihat pada Gambar 4. 6:



Gambar 4. 6 Biofilter dari Pupuk

Medium biofilter sudah dianggap kering sehingga tidak perlu dilakukan pengeringan lebih lanjut. Media filter berupa pupuk tidak perlu diberi perlakuan pemanasan seperti pada zeolit karena akan membunuh mikroba yang terdapat pada pupuk dan menjadikan pH pupuk menjadi sangat basa (pH 10-11). Mikroba tidak dapat bekerja dengan baik pada rentang pH ini sehingga prosedur ini hanya dilakukan jika kondisi tanah bersifat sangat asam, misalnya tanah gambut dari rawa.

IV. 6. Uji Kinerja Biofilter

Uji biofiltrasi yang akan dianalisa adalah uji waktu tinggal, uji reproduibilitas data, dan pengaruh panjang, laju alir dan penggunaan nutrisi terhadap reduksi N₂O.

IV. 6. 1. Uji Waktu Tinggal

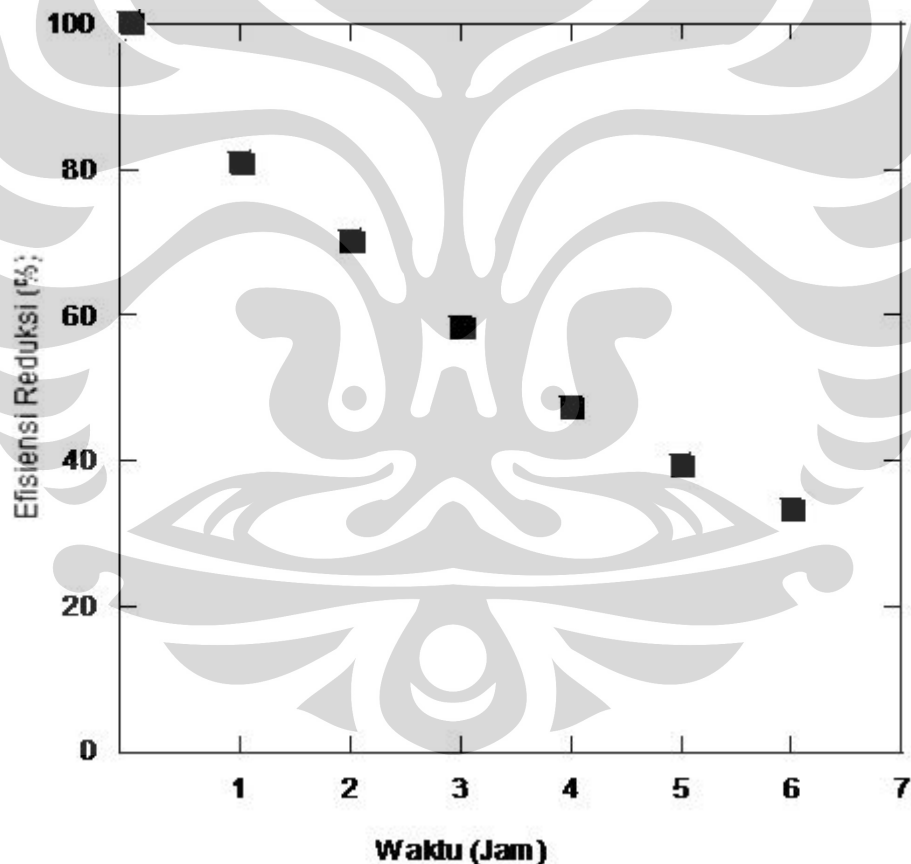
Hal yang dilakukan pertama kali adalah mengisi kolom biofilter dengan panjang 50 cm. Gas kemudian mengalir dari atas kolom. Waktu tinggal gas N₂O dalam kolom biofilter dapat dicari dengan rumus waktu tinggal di mana:

$$\begin{aligned}
 &= \frac{3,14 \times 4}{32,14} \times 50 = \frac{2512}{32,14} \\
 &= 76.58
 \end{aligned}
 \tag{37}$$

Faktanya adalah gas tersebut dapat dideteksi pada kolom biofilter seketika aliran gas N_2O dinyalakan. Ini berarti waktu tinggalnya sangat kecil sehingga rumus di atas harus dikoreksi kembali. Ini juga mengindikasikan sistem kolom biofilter tidak dapat mengakomodasi aliran gas tanpa sirkulasi karena waktu tinggalnya yang hanya sebentar. Sistem kolom biofiltrasi akan kemudian dijalankan dengan cara sirkulasi.

IV. 6. 2. Kinerja Biofilter Terhadap Reduksi N_2O

Dalam sub-bab ini akan dianalisa mengenai kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O . Kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O ditunjukkan oleh berkurangnya luas area N_2O pada GC karena adsorpsi oleh pupuk. Dalam penelitian ini, pengamatan biofiltrasi dilakukan setiap jam dalam 6 jam dengan menggunakan GC. Berikut ini adalah grafik uji biofiltrasi yang dilakukan pada panjang biofilter 50 cm dan laju alir gas N_2O 50 cc/menit:



Gambar 4. 7 Uji Kinerja Biofilter dalam Reduksi N_2O

($h = 50$ cm, $f = 50$ cc/menit, medium kering)

Contoh perhitungan untuk mendapatkan data efisiensi reduksi adalah sebagai berikut.:

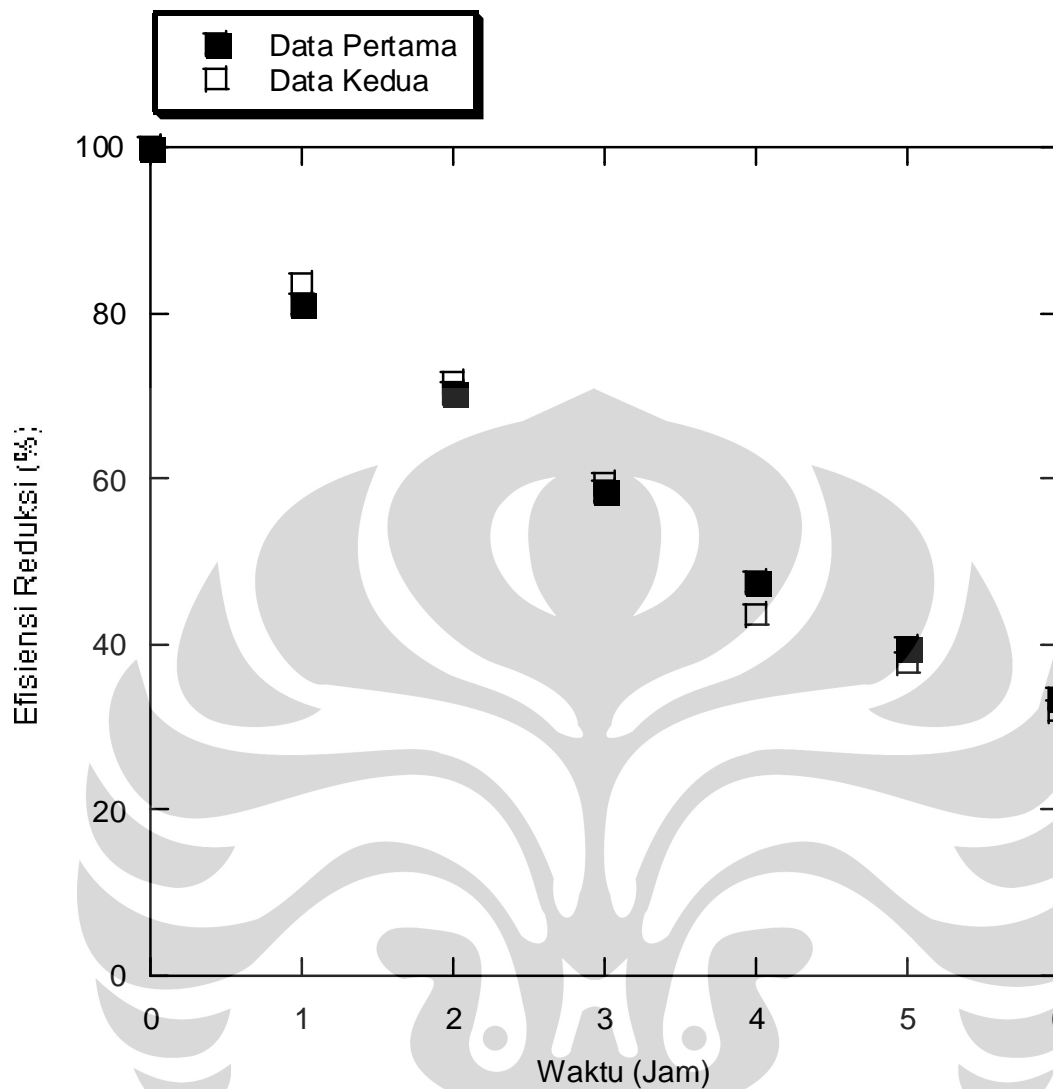
Untuk trial pertama didapat luas area gas N₂O pada t = 0 jam adalah 260.310. Pada t = 1 jam didapat luas area N₂O adalah 217.332. Sehingga efisiensi reduksi pada waktu t = 1 jam adalah:

$$= 100\% \times \frac{260.310 - 217.332}{260.310} = 16,51\% \quad (38)$$

Dapat dilihat bahwa konsentrasi N₂O berkurang setiap jamnya. Akan tetapi, belum dapat diperkirakan apakah konsentrasi N₂O ini berkurang karena teradsorpsi pupuk. Dalam kasus ini, uji reproduibilitas harus dilakukan untuk memperkuat hipotesis data dari alat biofilter tersebut

Sebelum variasi uji biofiltrasi selanjutnya dilakukan, validitas dari suatu data harus diperkuat dengan uji reproduibilitas. Uji reproduibilitas pada dasarnya merupakan usaha pengambilan sampel sebanyak lebih dari satu kali pada variabel yang sama. Hal yang ingin diobservasi dari uji reproduibilitas adalah kecenderungan dan kemiripan data-data yang diambil. Apabila hasil yang didapatkan dari data yang satu dengan data yang lain kurang lebih sama, maka data yang diambil dapat disimpulkan cukup valid.

Pada percobaan ini, uji reproduibilitas diambil pada panjang media filter 50 cm dan laju alir gas 50 cc/menit. Laju alir gas yang digunakan adalah 50 cc/menit karena mengacu pada laju alir gas yang umumnya digunakan pada uji biofiltrasi pada jurnal internasional [15]. Hasil dari uji reproduibilitas dapat dilihat pada Gambar 4. 8:

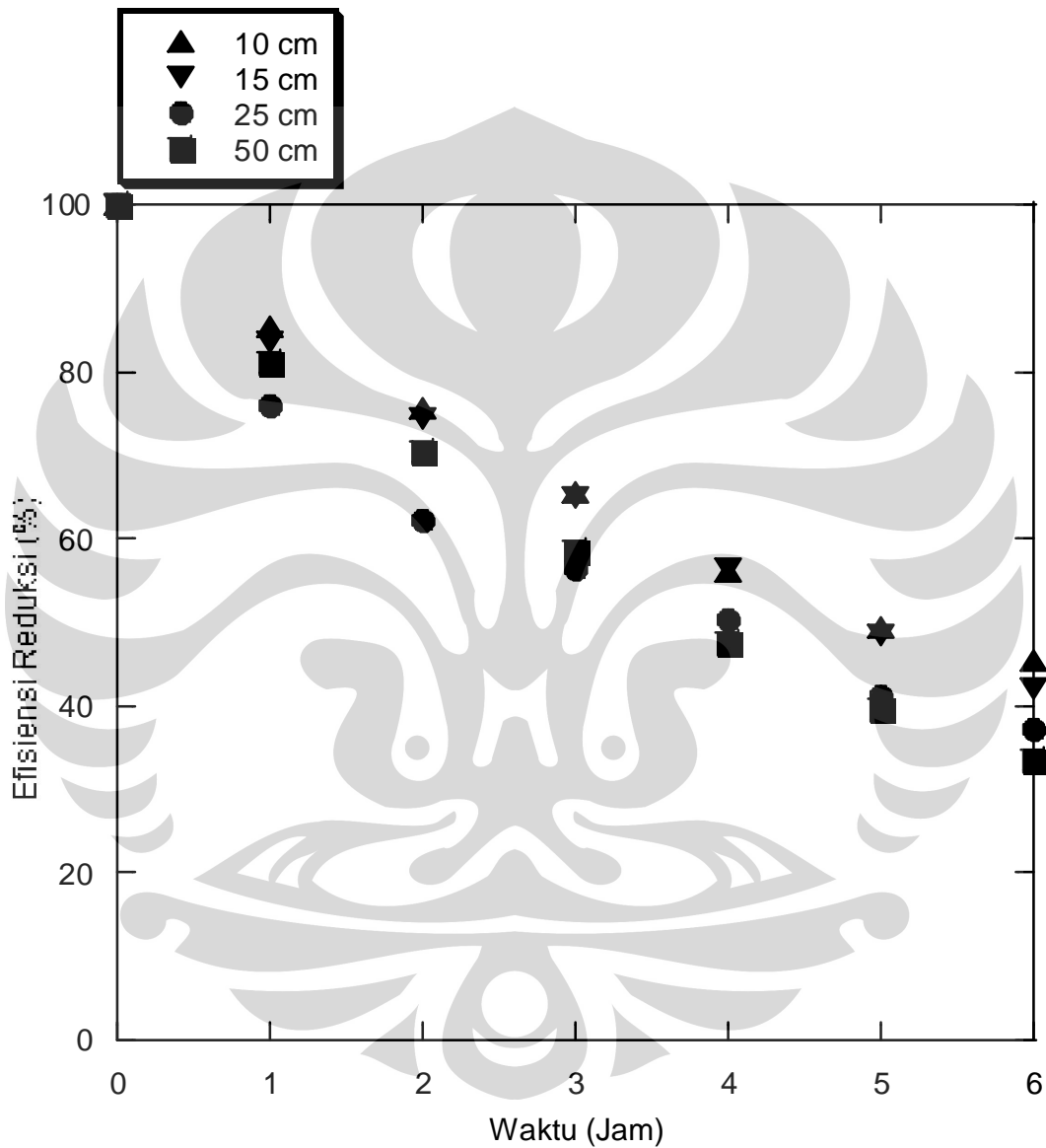


Gambar 4. 8 Uji Reprodusibilitas Data
(h = 50 cm, f = 50 cc/menit, medium kering)

Dari hasil di atas, dapat dilihat bahwa antara data pertama dengan data kedua memiliki hasil yang kurang lebih sama pada setiap jam. Hal ini dapat dilihat dari berimpitnya titik-titik pada data pertama dan kedua. Adapun efisiensi reduksi pada data pertama mencapai 67,86% dan data kedua mencapai 66,52%. Cara perhitungan untuk mendapatkan efisiensi reduksi dapat dilihat pada halaman lampiran. Karena hasil dari data pertama dan kedua saling mendekati, maka uji reproduibilitas dapat dianggap valid sehingga uji biofiltrasi selanjutnya layak untuk dijalankan.

IV. 6. 3. Pengaruh Panjang Kolom Terhadap Reduksi N₂O

Tujuan eksperimen biofiltrasi dengan variasi panjang adalah ingin melihat pengaruh dari panjang media filter pupuk terhadap reduksi gas N₂O. Panjang media filter diset dengan panjang 10, 15, 25, dan 50 cm. Hasil dari uji biofiltrasi dengan variasi panjang biofilter dapat dilihat pada Gambar 4. 9:

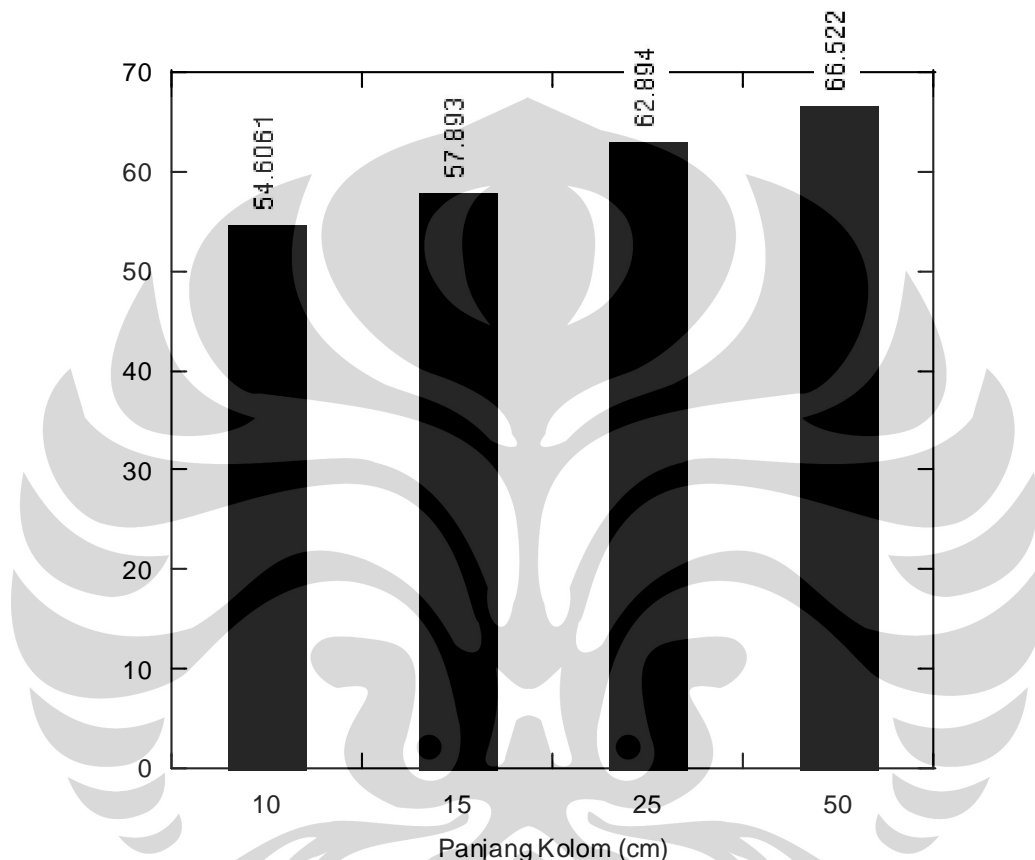


Gambar 4. 9 Pengaruh Panjang Kolom Biofilter Terhadap Reduksi N₂O

(f = 50 cc/menit/medium kering)

Fenomena yang terjadi pada proses ini adalah reduksi N₂O karena pengaruh lama waktunya adsorpsi gas N₂O oleh pupuk dan pengaruh panjang biofilter. Grafik ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak antara pupuk dan gas N₂O serta panjang

biofilter menyebabkan efisiensi reduksi N_2O yang lebih tinggi. Grafik ini juga menunjukkan bahwa semakin tinggi panjang biofilter maka efisiensi reduksi N_2O lebih tinggi. Hal ini ditunjukkan oleh kecenderungan garis yang semakin menurun terhadap lama waktu kontak dan panjang biofilter. Efisiensi reduksi dari masing-masing panjang biofilter dapat dilihat pada Gambar 4. 10:



Gambar 4. 10 Efisiensi Reduksi pada Uji Variasi Panjang Biofilter
($f = 50$ cc/menit, medium kering, $t = 6$ jam)

Pada Gambar 4. 10 dapat dilihat bahwa efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada panjang biofilter tertinggi 50 cm dengan efisiensi reduksi 67,86%. Fenomena yang terjadi pada proses ini disebabkan oleh proses adsorpsi karena pengaruh lama kontak antara pupuk dan gas N_2O serta panjang biofilter. Faktor yang lebih dominan di sini adalah panjang biofilter karena uji biofiltrasi pada variabel tetap waktu yang sama. Efisiensi reduksi pada panjang biofilter 50 cm adalah yang paling besar karena jumlah mikroba denitrifikasi dalam media biofilter lebih banyak secara kuantitas dibandingkan dengan panjang biofilter yang

lainnya. Mikroba denitrifikasi adalah komponen paling penting dalam reduksi gas N_2O . Hal ini karena mikroba denitrifikasi membantu menguraikan senyawa gas N_2O menjadi senyawa N_2 dan O_2 yang tidak berbahaya. Senyawa N_2 dan O_2 adalah komponen penyusun udara terbesar. Jika dikaitkan dengan pembacaan hasil analisa kromatograf pada GC, maka pada setiap jam peak udara akan bertambah besar seiring dengan mengecilnya luas area puncak pada N_2O . Secara kuantitatif, hal ini ditunjukkan dengan bertambah besarnya luas area udara yang waktu retensinya 0,3-0,4 menit dan berkurangnya luas area N_2O yang waktu retensinya 0,7-0,8 menit. Karena mikroba denitrifikasi pada panjang biofilter 50 cm lebih banyak dibandingkan dengan panjang biofilter lainnya, maka gas N_2O akan semakin banyak terurai. Karena semakin banyak gas N_2O yang terurai maka konsentrasi gas N_2O akan menurun. Menurunnya konsentrasi gas N_2O berarti efisiensi reduksi N_2O semakin tinggi karena jumlah gas N_2O yang teradsorpsi berbanding lurus terhadap efisiensi reduksi N_2O .

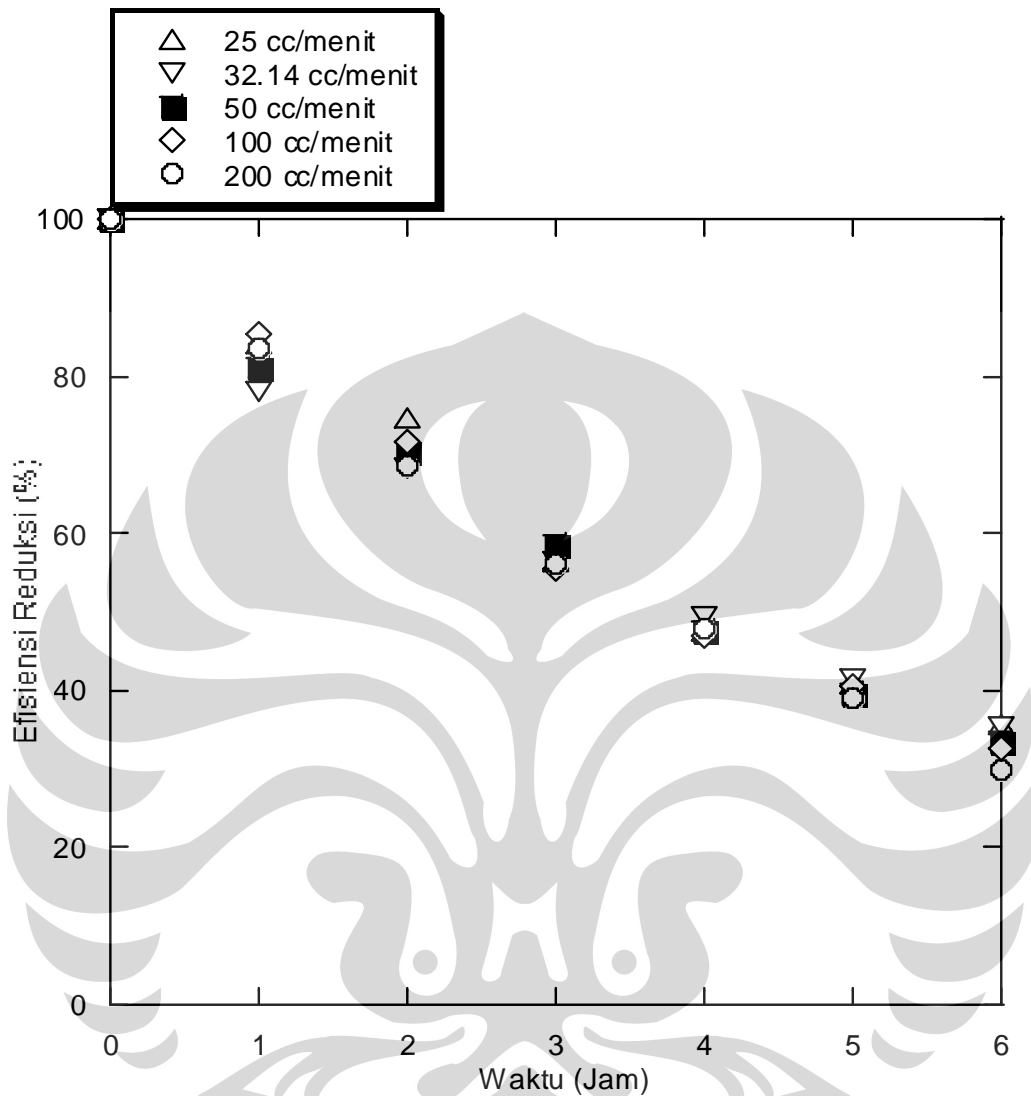
Efisiensi reduksi gas N_2O juga semakin besar pada setiap jam waktu kontak antara pupuk dengan gas N_2O . Waktu kontak pada uji biofiltrasi ini adalah 6 jam. Adapun uji biofiltrasi dilakukan dengan sistem sirkulasi dengan pompa peristaltik. Pada percobaan ini, gas N_2O dialirkan pada suatu sistem selama 45 menit. Hal ini untuk memastikan bahwa volume gas dalam sistem cukup banyak jika ingin dilakukan pengambilan sampel. Pada saat 45 menit telah berlalu, valve dan regulator gas ditutup sehingga gas N_2O yang akan diteliti hanyalah gas yang tersirkulasi pada sistem.

Jika dikaitkan dengan kurva terobosan adsorpsi pada umumnya, maka konsentrasi suatu adsorbat akan menurun karena diserap oleh adsorben hingga pada waktu tertentu sebelum mengalami kesetimbangan adsorpsi. Dengan demikian, konsentrasi N_2O akan menurun karena teradsorpsi oleh media biofilter pada setiap interval waktu tertentu sebelum media biofilter mengalami penenuhan. Kontak waktu yang semakin lama antara gas N_2O dengan media biofilter meningkatkan kemungkinan adsorpsi antara gas N_2O dengan media biofilter. Hal ini karena gas N_2O akan lebih lama tinggal dalam media biofilter. Adsorpsi gas N_2O oleh media biofilter akan menyebabkan penurunan konsentrasi N_2O yang berarti efisiensi reduksi N_2O yang semakin tinggi.

IV. 6. 4. Pengaruh Laju Alir Resirkulasi Terhadap Reduksi N_2O

Tujuan eksperimen biofiltrasi dengan variasi laju alir resirkulasi adalah ingin melihat pengaruh dari laju alir gas N_2O terhadap reduksi gas N_2O . Laju alir gas N_2O diset dengan laju

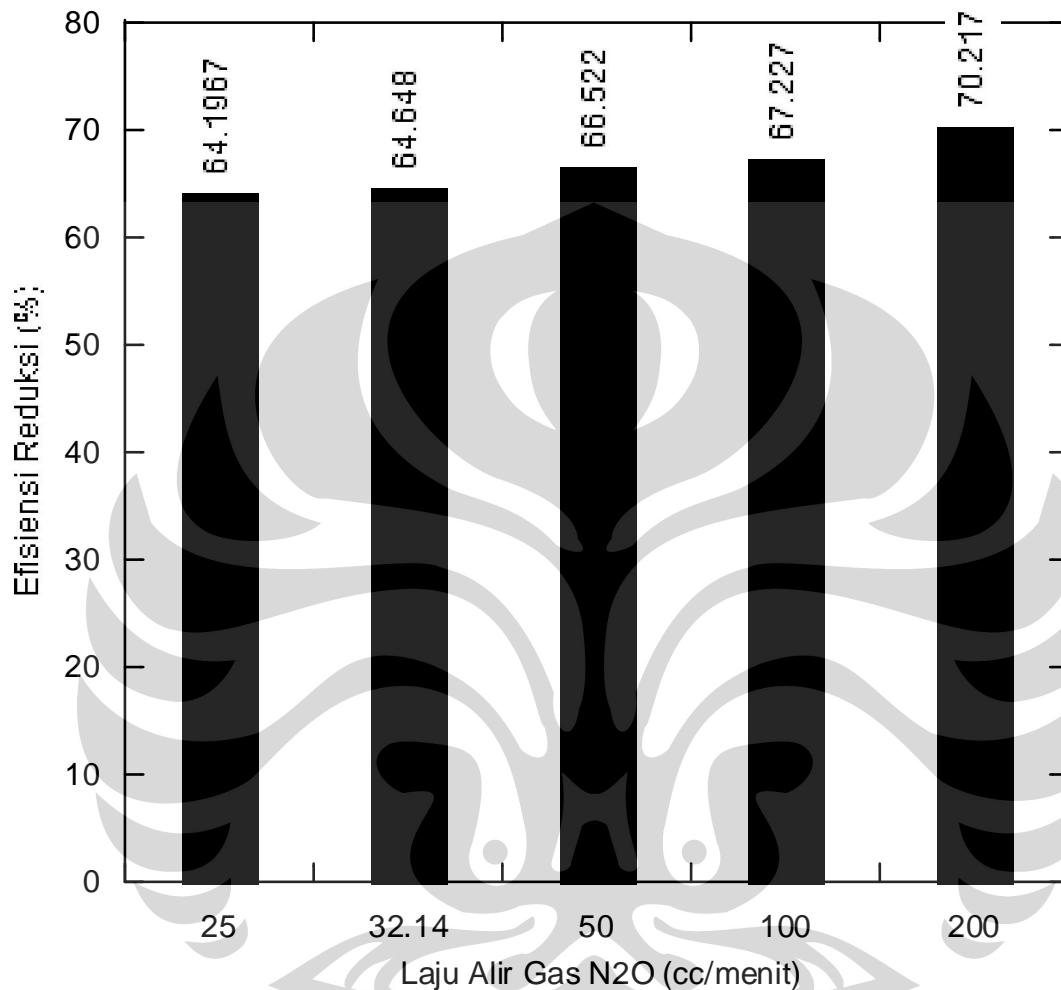
alir 25, 32.14, 50, 100, 200 cc/menit. Hasil dari uji biofiltrasi dengan variasi laju alir dapat dilihat pada Gambar 4. 11:



Gambar 4. 11 Pengaruh Laju Alir Gas N₂O Terhadap Reduksi N₂O
(h = 50 cm, medium kering)

Fenomena yang terjadi pada proses ini adalah reduksi N₂O karena pengaruh lama waktunya adsorpsi gas N₂O oleh media biofilter dan pengaruh laju alir gas resirkulasi N₂O. Grafik ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak antara pupuk dan gas N₂O serta panjang biofilter menyebabkan efisiensi reduksi N₂O yang lebih tinggi. Grafik ini juga menunjukkan bahwa semakin besar laju alir gas N₂O maka efisiensi reduksi N₂O lebih tinggi. Hal ini ditunjukkan oleh kecenderungan garis yang semakin menurun terhadap lama waktu

kontak dan laju alir gas N_2O . Efisiensi reduksi dari masing-masing panjang biofilter dapat dilihat pada Gambar 4. 12:



**Gambar 4. 12 Efisiensi Reduksi pada Uji Variasi Laju Alir Gas N_2O
(h = 50 cm, medium kering, t = 6 jam)**

Pada Gambar 4. 12 dapat dilihat bahwa efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada laju alir gas N_2O tertinggi 200 cc/menit dengan efisiensi reduksi 70,22%. Fenomena yang terjadi pada proses ini disebabkan oleh proses adsorpsi karena pengaruh lama kontak antara pupuk dan gas N_2O serta laju alir gas resirkulasi N_2O . Faktor yang lebih dominan di sini adalah laju alir gas resirkulasi N_2O karena uji biofiltrasi pada variabel tetap waktu yang sama.

Pada uji biofiltrasi dengan variasi laju alir resirkulasi, dapat dilihat pada halaman lampiran bahwa luas area gas N_2O pada t = 0 jam berbeda-beda pada setiap laju alir resirkulasi yang berbeda. Hal ini mengindikasikan jumlah volume gas awal N_2O yang

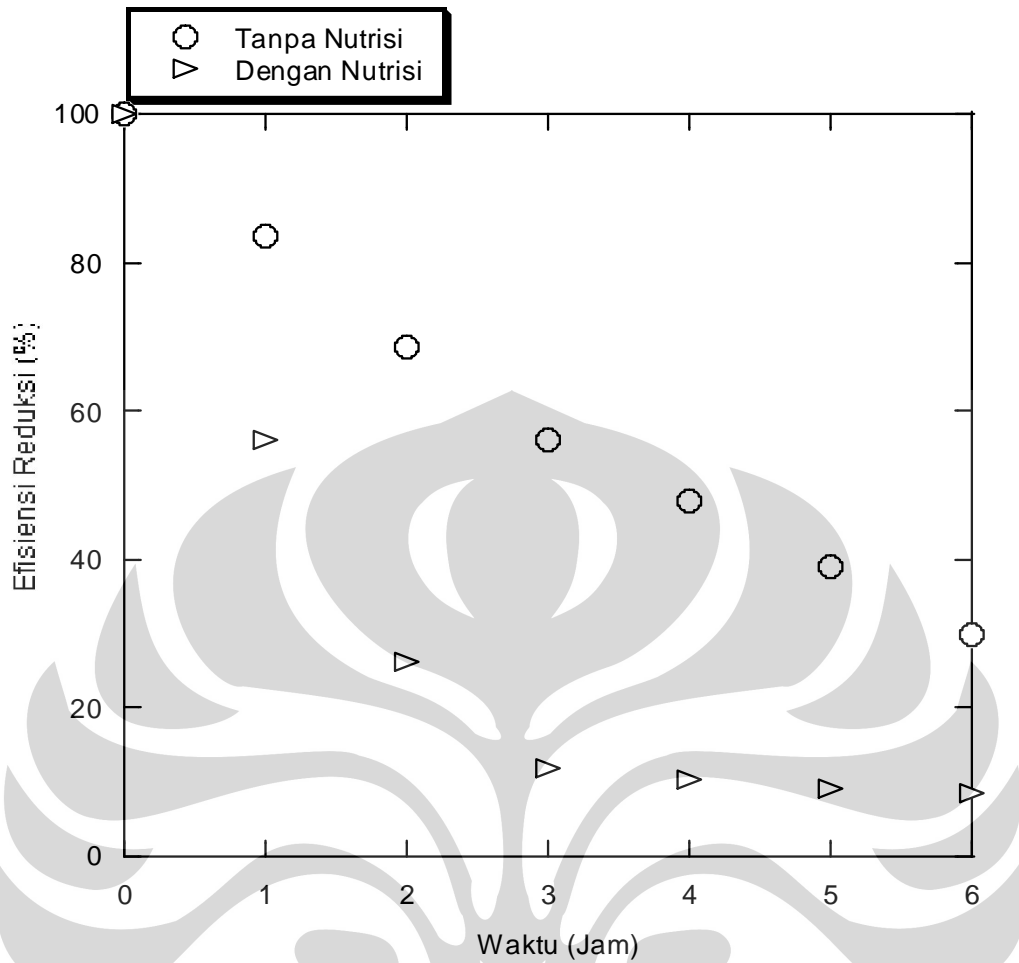
dialirkan sebelum valve ditutup berbeda-beda pada masing-masing laju alir yang bersesuaian terhadap volume gas tersebut. Oleh karena itu pada saat pengambilan data $t = 0$ jam, luas area awal berbeda-beda dan berbanding lurus terhadap laju alir gas N_2O . Hal ini tentunya berbeda pada uji variasi panjang biofilter di mana luas area peak N_2O kurang lebih sama pada panjang yang berbeda. Luas area peak N_2O pada uji variasi panjang biofilter kurang lebih sama karena laju alir gas N_2O adalah pada laju alir yang sama.

Efisiensi reduksi gas N_2O cenderung meningkat pada kenaikan laju alir gas resirkulasi N_2O . Hal ini karena frekuensi gas N_2O dalam mensirkulasi sistem menjadi lebih banyak. Pada laju alir gas resirkulasi N_2O yang lebih tinggi, aliran gas lebih banyak bersirkulasi di dalam sistem sehingga waktu kontak antara gas dan medium biofilter lebih lama. Hal ini karena waktu tinggal gas di dalam kolom biofilter lebih tinggi. Akibatnya saat gas keluar dari kolom biofilter, aliran gas N_2O yang berlaju alir tinggi langsung bersirkulasi masuk ke atas kolom biofiltrasi dengan lebih cepat. Hal ini memungkinkan gas N_2O mengalami proses adsorpsi lebih banyak pada laju alir gas resirkulasi N_2O yang lebih tinggi dibandingkan dengan laju alir resirkulasi gas N_2O lebih rendah.

Efisiensi reduksi gas N_2O juga semakin besar pada setiap jam waktu kontak antara pupuk dengan gas N_2O . Sesuai dengan penjelasan pada sub-bab sebelumnya, dan jika dikaitkan dengan kurva terobosan adsorpsi pada umumnya, maka konsentrasi suatu adsorbat akan menurun karena diserap oleh adsorben hingga pada waktu tertentu sebelum mengalami kesetimbangan adsorpsi. Dengan demikian, konsentrasi N_2O akan menurun karena teradsorpsi oleh pupuk pada setiap interval waktu tertentu sebelum pupuk mengalami penjumlahan. Kontak waktu yang semakin lama antara gas N_2O dengan pupuk meningkatkan kemungkinan adsorpsi antara gas N_2O dengan pupuk. Hal ini karena gas N_2O akan lebih lama tinggal dalam pupuk. Adsorpsi gas N_2O oleh pupuk akan menyebabkan penurunan konsentrasi N_2O yang berarti efisiensi reduksi N_2O semakin tinggi.

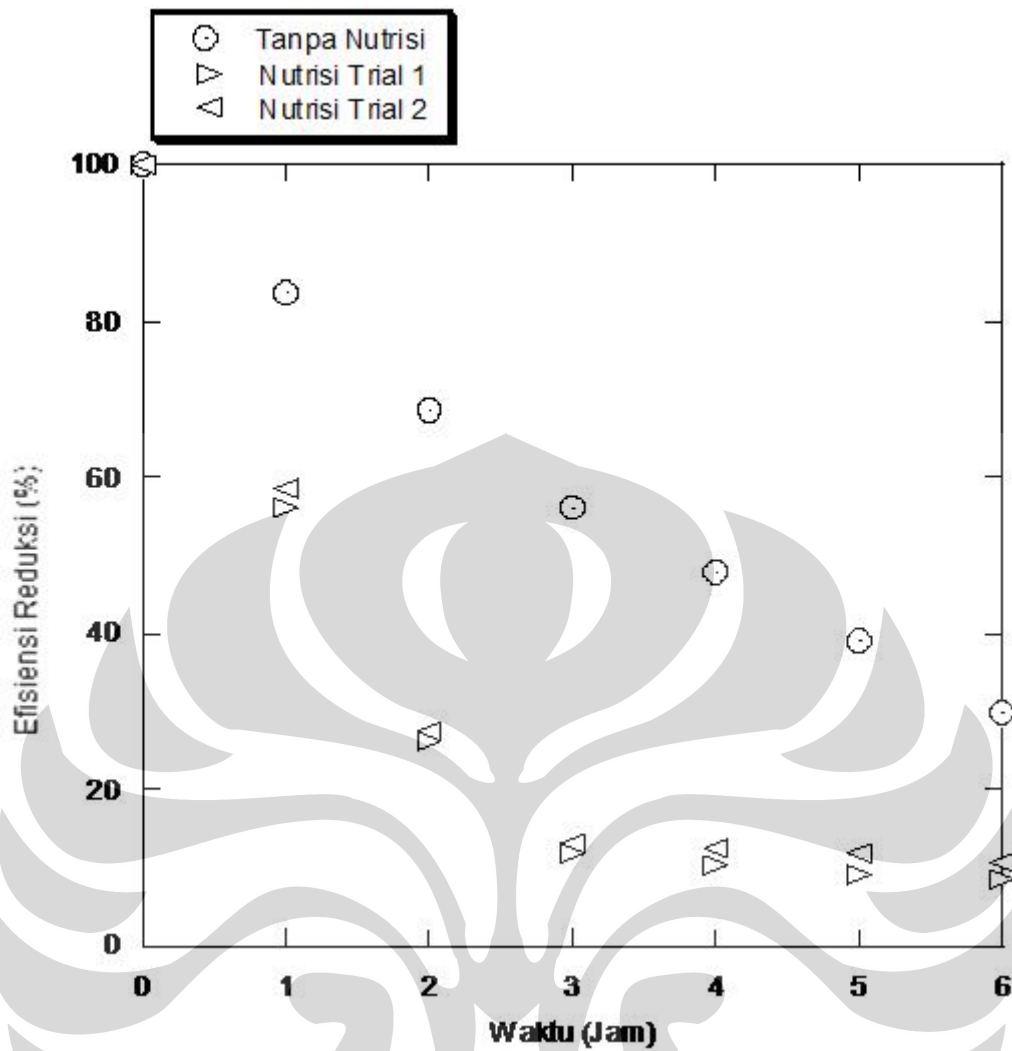
IV. 6. 5. Pengaruh Penggunaan Nutrisi Terhadap Reduksi N_2O

Tujuan eksperimen biofiltrasi dengan membandingkan tanpa dan penggunaan nutrisi pada panjang dan laju alir terbaik adalah ingin melihat pengaruh penggunaan nutrisi terhadap reduksi gas N_2O . Nutrisi pupuk dibuat dengan bahan-bahan kimia pada Bab III. Material anorganik tersebut dipilih karena sebelumnya pernah digunakan mengembangkan bakteri penitrifikasi aerobik [21]. Hasil perbandingan dari tanpa dan penggunaan nutrisi pada panjang dan laju alir terbaik, yakni pada 50 cm dan 200 cc/menit dapat dilihat pada Gambar 4. 13:



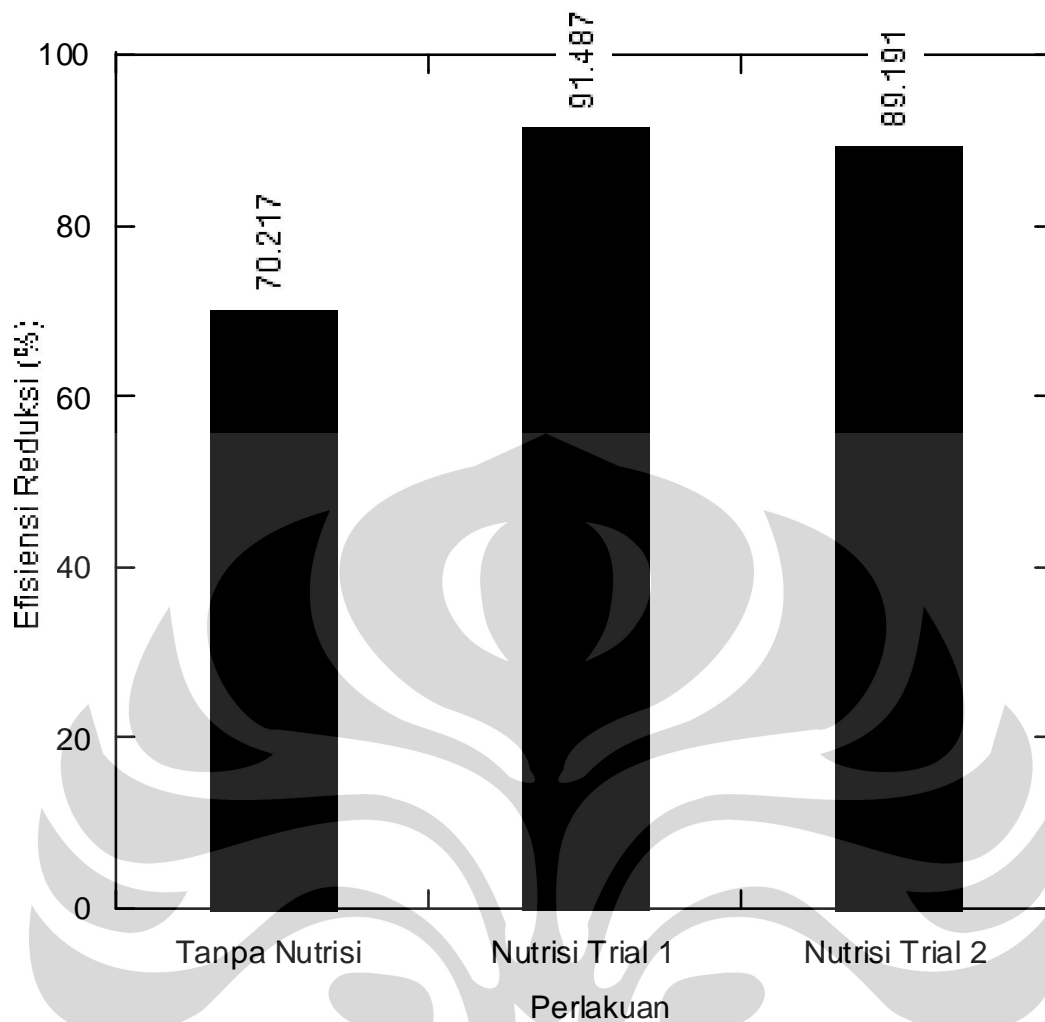
Gambar 4. 13 Pengaruh Penggunaan Nutrisi Terhadap Reduksi N₂O
(h = 50 cm, f = 200 cc/menit)

Untuk memperkuat validitas data eksperimen dengan penggunaan nutrisi, maka validitas dari suatu data harus diperkuat dengan uji reproduibilitas. Hasil uji reproduibilitas data untuk penggunaan nutrisi dapat dilihat pada Gambar 4. 14:



Gambar 4. 14 Uji Reprodusibiilitas Data pada Penggunaan Nutrisi

Fenomena yang terjadi pada proses ini adalah reduksi N_2O karena peristiwa adsorpsi dan degradasi N_2O oleh pupuk dengan penambahan nutrisi. Efisiensi reduksi dari masing-masing proses dapat dilihat pada Gambar 4. 15:



Gambar 4. 15 Efisiensi Reduksi pada Uji Pengaruh Penggunaan Nutrisi
($h = 50 \text{ cm}$, $f = 200 \text{ cc/menit}$, $t = 6 \text{ jam}$)

Pada Gambar 4. 15, dapat dilihat efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada saat penggunaan nutrisi dengan efisiensi reduksi mencapai 91,49%. Dapat dilihat pula pada Gambar 4. 13, bahwa adsorpsi gas N_2O oleh pupuk telah mengalami penjumlahan pada $t = 3$ jam. Hal ini ditandai dengan penurunan jumlah adsorbat yang tidak sedrastis sebelumnya. Selain proses adsorpsi, terjadi proses degradasi gas N_2O karena penambahan nutrisi pada pupuk.

Nutrisi pada pupuk mengandung unsur C, N, dan P karena ketiga unsur ini merupakan tiga nutrisi utama (makronutrien) yang dibutuhkan oleh bakteri dalam melakukan metabolisme sel untuk menghasilkan senyawa-senyawa yang penting dalam pertumbuhan bakteri. Nutrisi ini juga memungkinkan adanya perkembangan jumlah bakteri di dalam pupuk. Unsur C

merupakan unsur utama yang berperan dalam penyusunan sel-sel bakteri. Unsur N memiliki peranan yang sangat penting dalam penyusunan asam nukleat, asam amino dan enzim-enzim. Sedangkan unsur P berperan dalam pembentukan asam nukleat dan fosfolipid. Sumber nutrisi C berasal dari CH_3COONa , sumber nutrisi N berasal dari NH_4Cl karena senyawa ini memiliki energi asimilasi yang rendah, dan sumber nutrisi P berasal dari K_2HPO_4 . Nutrisi yang digunakan memiliki perbandingan C:N:P = 100:10:1 dalam 1 liter air [15]. Rasio ini telah diteliti sebagai rasio paling optimum dalam mendegradasi senyawa nitrogen. Hal inilah yang menyebabkan efisiensi reduksi N_2O menjadi lebih besar dibandingkan tanpa penggunaan nutrisi.

IV. 7. Pemodelan Hasil Eksperimen

Pemodelan hasil eksperimen menggunakan persamaan adsorpsi Langmuir. Hal ini karena dalam penelitian ini diasumsikan bahwa adsorpsi hanya terjadi pada lapisan tunggal molekul yang teradsorp pada permukaan adsorben saja. Selain itu proses adsorpsi merupakan proses adsorpsi fisika karena terjadi pada suhu ruang dan tekanan atmosferik sehingga persamaan Langmuir lebih mengakomodasi data pada penelitian ini (Sontheimer, 2008). Persamaan Langmuir tidak dapat mengakomodasi penelitian biofiltrasi dengan penggunaan nutrisi karena terjadi proses degradasi dan adsorpsi.

Berikut ini adalah contoh pengolahan salah satu data adsorpsi isoterms Langmuir pada tinggi biofilter 50 cm dan laju alir 50 cc/menit.:

1. Pada $t = 0$, luas area yang terdeteksi oleh GC adalah sebagai berikut:

- Luas area udara = 10.141
- Luas area N_2O = 264.231
- Luas area air = 10.901

2. Menghitung fraksi volume N_2O dengan persamaan (29)

$$= \frac{264.231}{10.141 + 264.231 + 10.901} = 0.93 \quad (29)$$

3. Menghitung volume N_2O dalam udara menggunakan persamaan kalibrasi volume N_2O .

Persamaan kalibrasi volume N_2O adalah $y = 205,9x$

$$= \frac{264.231}{205,9} \times \frac{1}{1.000.000} = 0,001285$$

4. Menghitung volume N₂O yang terkandung di dalam udara menggunakan persamaan (30)

$$= \quad \times \quad (30)$$

$$= 0,93 \times 0,001285 = 0,001190$$

5. Menghitung massa N₂O menggunakan persamaan (31)

$$= \quad \times \quad (31)$$

$$2 = 0,001190 \times 1,799 = 0,002141$$

6. Menghitung fraksi massa N₂O yang teradsorb dalam adsorbent, θ , menggunakan persamaan (32)

$$= \frac{\quad}{\quad} (32)$$

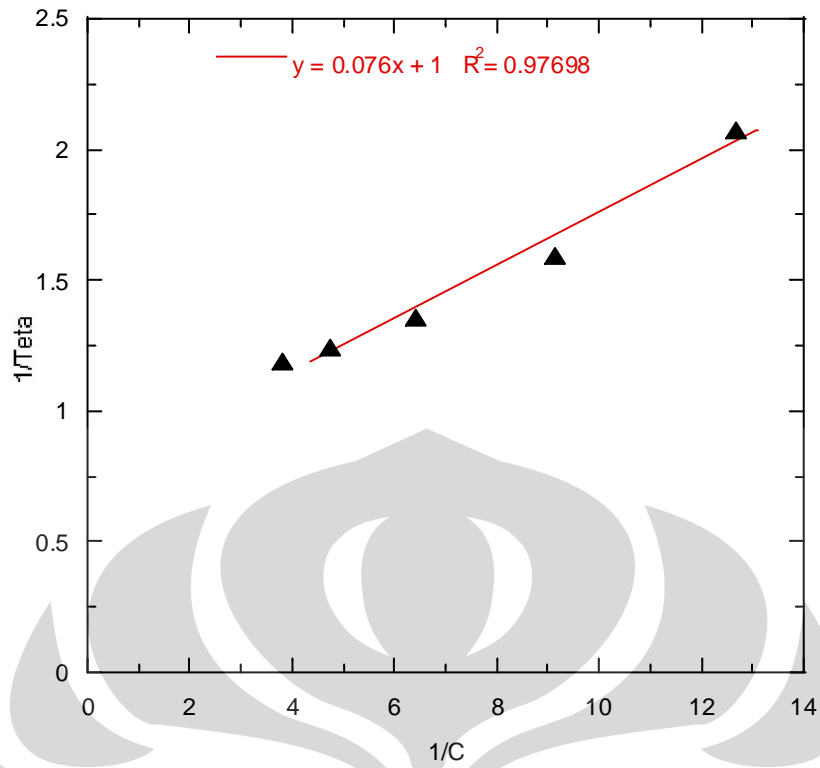
$$= \frac{0,002141 - 0,002141}{0,002141} = 0$$

7. Menghitung konsentrasi equilibrium N₂O, c_n , menggunakan persamaan (33)

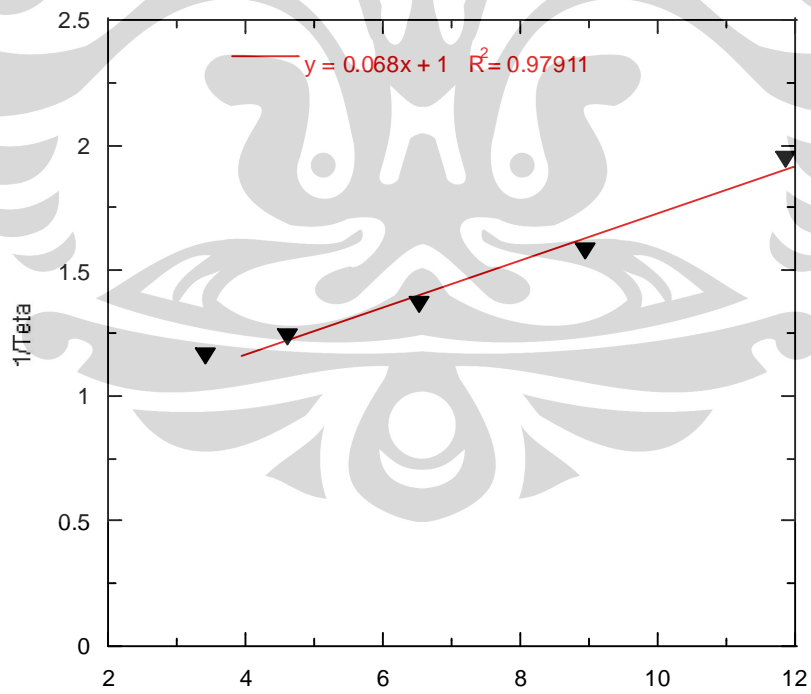
$$= \frac{\quad^2}{\quad^2} (33)$$

$$= \frac{0,002141^2}{0,001190^2} = 0,0408$$

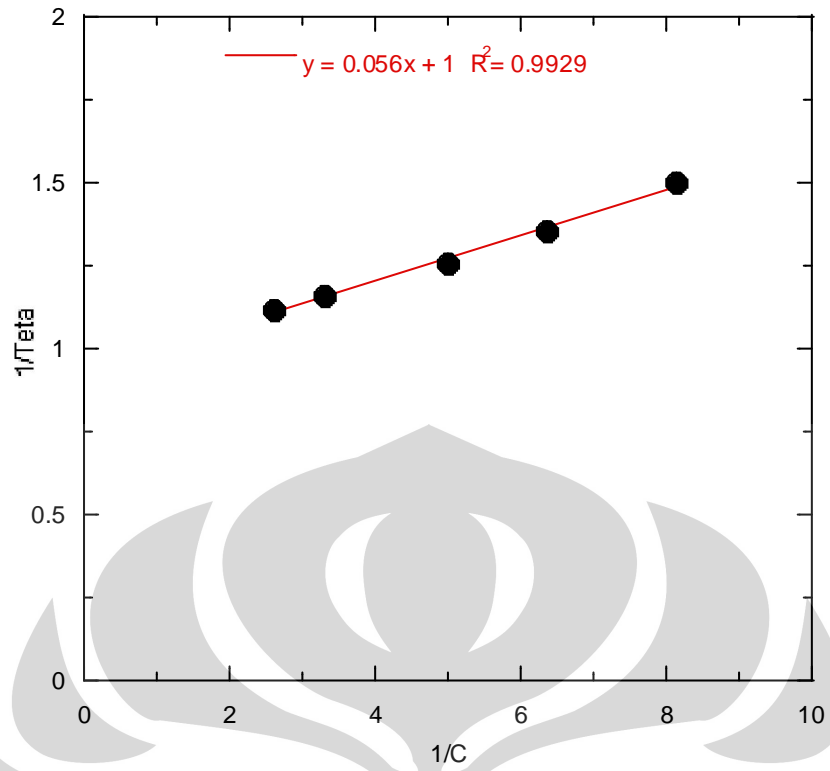
Pengolahan data dilakukan terhadap data-data yang diperoleh pada tiap jam selama 6 jam penelitian. Data-data kemudian diplot antara $\frac{1}{c_n} - \frac{1}{c_0}$ sesuai dengan persamaan adsorpsi Langmuir yang terlinearisasi. Berikut ini dapat dilihat grafik-grafik linearisasi adsorpsi isotermis pada variabel pengaruh panjang biofilter pada Gambar 4. 16, Gambar 4. 17, Gambar 4. 18, Gambar 4. 19:



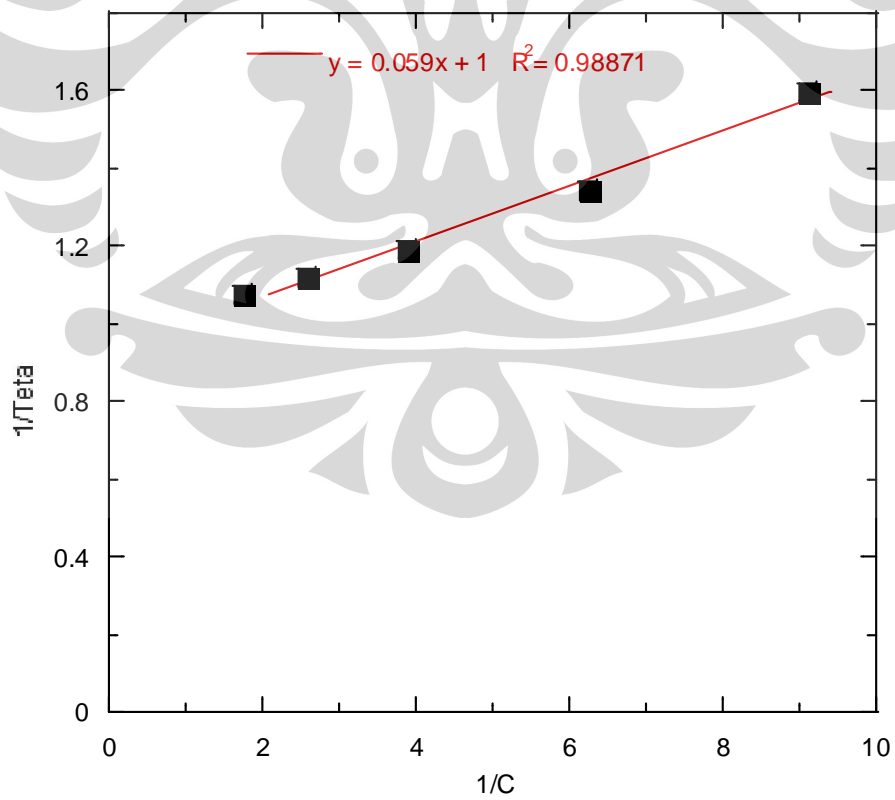
Gambar 4. 16 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 10 cm, f = 50 cc/menit)



Gambar 4. 17 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 15 cm, f = 50 cc/menit)



Gambar 4. 18 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 25 cm, f = 50 cc/menit)



Gambar 4. 19 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 50 cm, f = 50 cc/menit)

Karena persamaan linear untuk adsorpsi isoteremis Langmuir adalah:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{K} + \frac{1}{q_{\infty}} \quad (28)$$

maka konstanta Langmuir dapat dicari sesuai persamaan di atas di mana konstanta Langmuir adalah satu per gradien pada persamaan garis. Contoh perhitungannya pada Gambar 4. 16 adalah sebagai berikut:

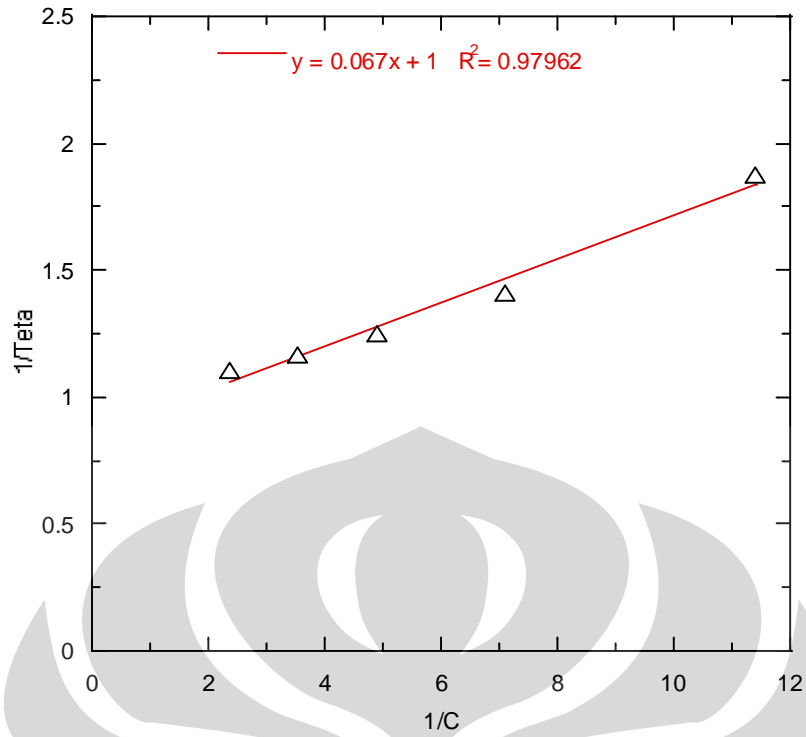
Persamaan garis pada $h = 10$ cm dan $f = 50$ cc/menit adalah $y = 0.106x + 1$, maka $K = \frac{1}{0.106} = 9.433$.

Tabel 4. 1 Konstanta Langmuir pada Pengaruh Panjang
($f = 50$ cc/menit, medium kering)

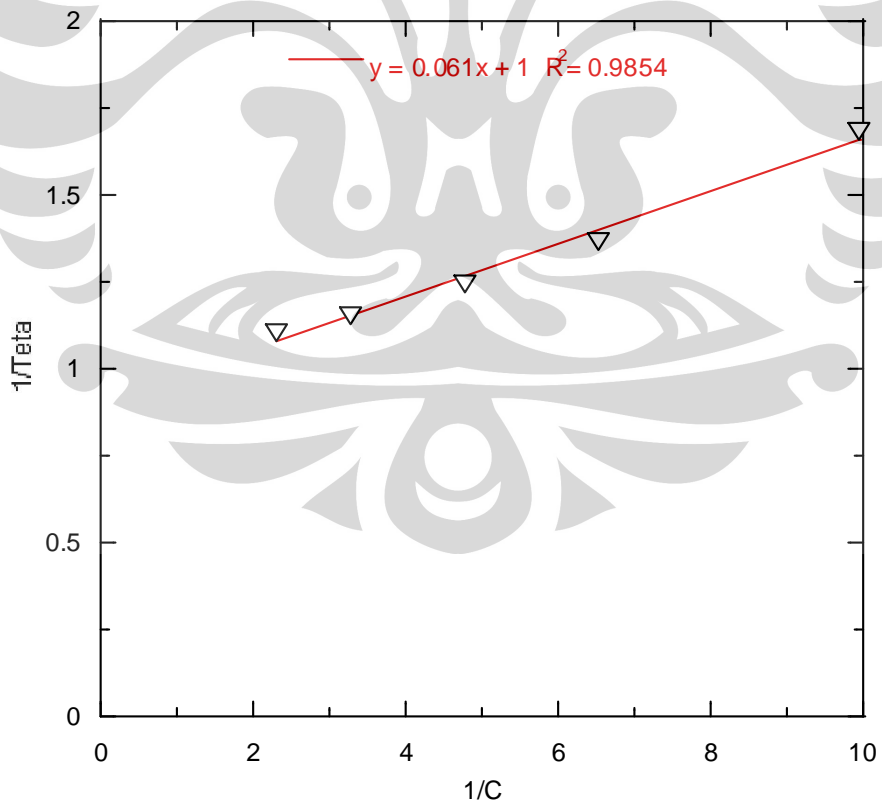
Tinggi Biofilter (cm)	K_{Langmuir} (liter/mol)
10	16,949
15	17,857
25	14,706
50	14,085
K rata-rata	15,899 liter/mol

Dari data konstanta Langmuir pada Tabel 4. 1, dapat diteliti bahwa semakin panjang media biofilter dalam kolom maka nilai konstanta Langmuir kurang lebih bernilai sama. Hal ini dikarenakan konstanta Langmuir lebih banyak dipengaruhi oleh sifat karakteristik suatu material adsorben dalam mengadsorpsi suatu bahan. Semakin tinggi nilai K suatu material adsorben, maka kemampuan mengadsorpsi adsorben tersebut akan lebih banyak, dan sebaliknya.

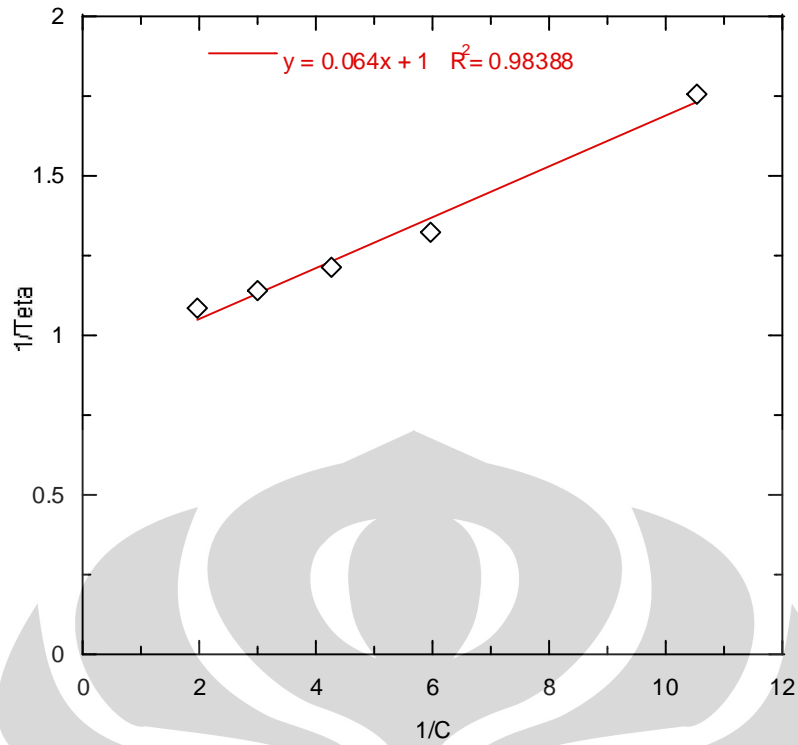
Pengaruh laju alir terhadap efisiensi reduksi N_2O dapat juga dimodelkan dalam persamaan adsorpsi Langmuir. Berikut ini dapat dilihat grafik-grafik linearisasi adsorpsi isoteremis pada variabel pengaruh laju alir gas N_2O pada Gambar 4. 20, Gambar 4. 21, Gambar 4. 19, Gambar 4. 22, Gambar 4. 23:



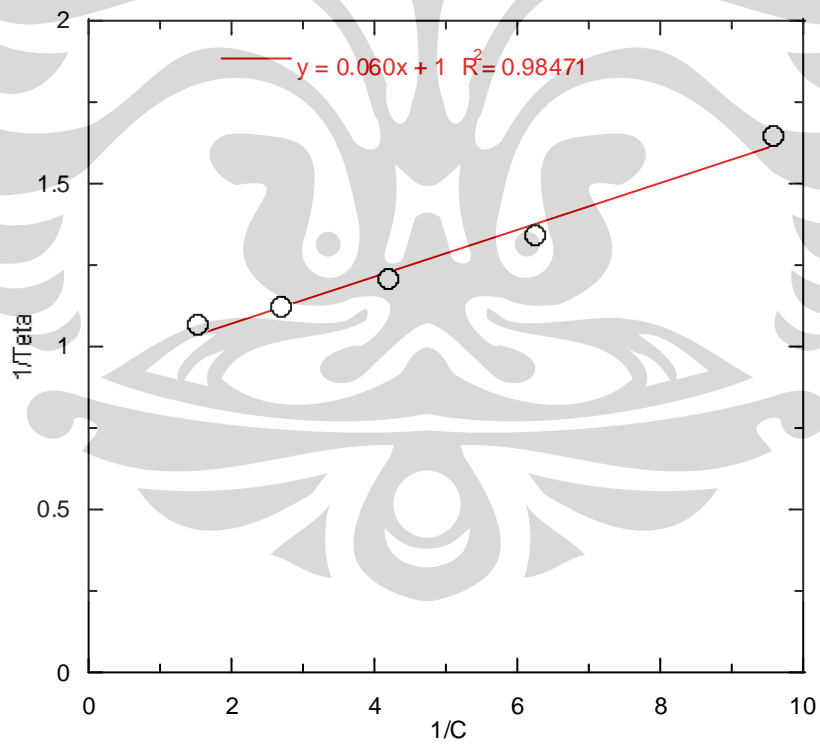
Gambar 4. 20 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir ($f = 25$ cc/menit, $h = 50$ cm)



Gambar 4. 21 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir ($f = 32.14$ cc/menit, $h = 50$ cm)



Gambar 4. 22 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir ($f = 100$ cc/menit, $h = 50$ cm)



Gambar 4. 23 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir ($f = 200$ cc/menit, $h = 50$ cm)

Konstanta Langmuir dapat dicari sesuai persamaan di atas di mana konstanta Langmuir adalah satu per gradien pada persamaan garis. Berikut ini adalah konstanta Langmuir tiap variabel pada uji pengaruh laju alir gas N₂O terhadap reduksi N₂O:

Tabel 4. 2 Konstanta Langmuir pada Pengaruh Laju Alir Gas N₂O
(h = 50 ccm, medium kering)

Laju Alir Resirkulasi (cc/menit)	K _{Langmuir} (liter/mol)
25	14,925
32.14	16,393
50	16,949
100	15,625
200	16,667

K rata-rata 16,112 (liter/mol)

$$- = \frac{\dots}{\dots} \quad (39)$$

$$- = \frac{\dots}{\dots} = 16,006 \text{ liter/mol}$$

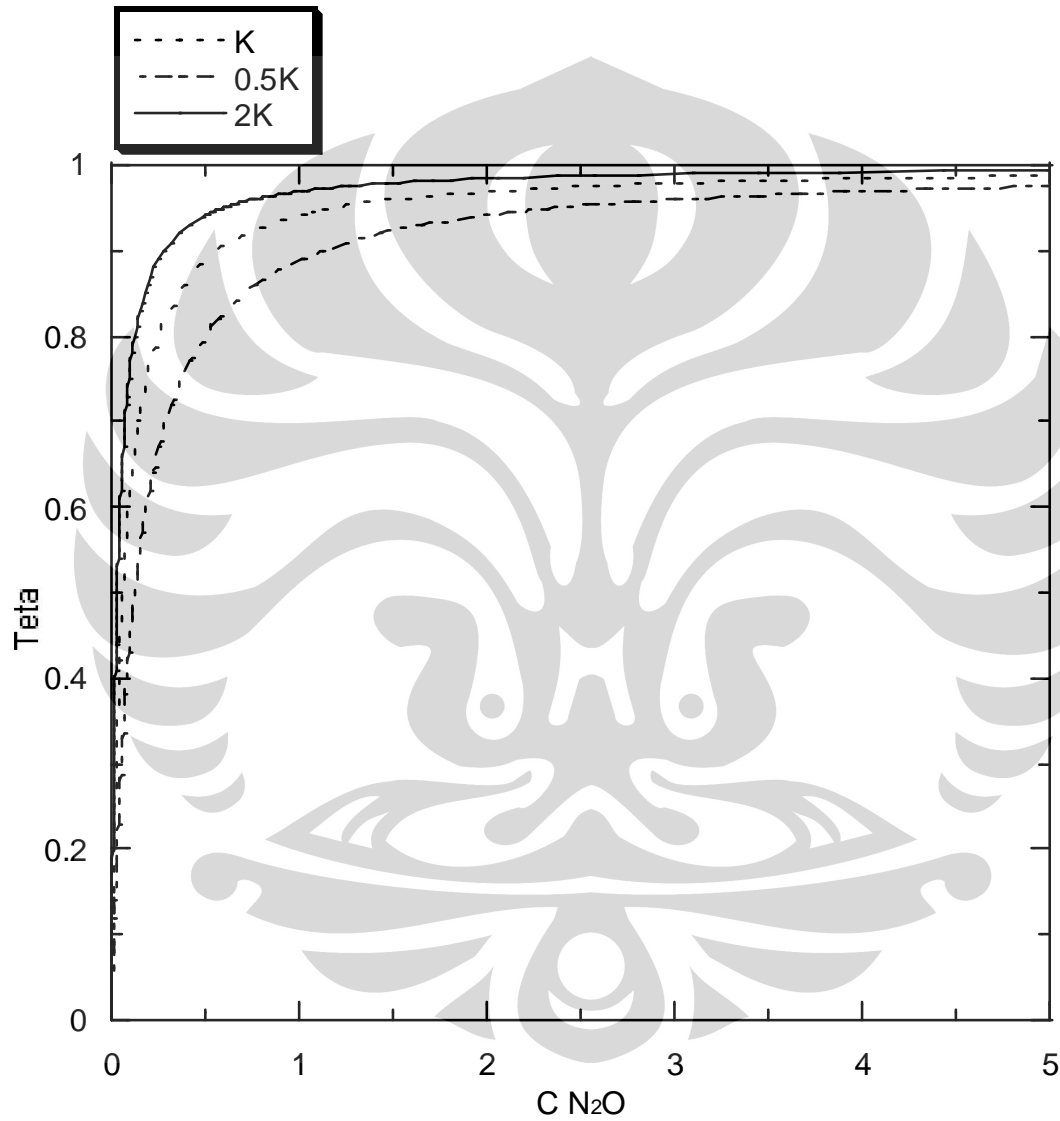
Dari data konstanta Langmuir pada Tabel 4. 2, dapat diteliti bahwa semakin tinggi laju alir gas N₂O dalam kolom maka nilai konstanta Langmuir kurang lebih bernilai sama. Hal ini dikarenakan konstanta Langmuir lebih banyak dipengaruhi oleh sifat karakteristik suatu material adsorben dalam mengadsorpsi suatu bahan. Semakin tinggi nilai K suatu material adsorben, maka kemampuan mengadsorpsi adsorben tersebut akan lebih banyak, dan sebaliknya.

Pemodelan hasil eksperimen selanjutnya adalah melakukan analisis sensitivitas terhadap data-data percobaan. Tujuan khusus analisis sensitivitas dalam penelitian ini adalah untuk meneliti seberapa besar pengaruh perubahan konstanta Langmuir terhadap fraksi molekul gas N₂O yang teradsorp, θ . Hal ini dilakukan dengan memvariasikan nilai K_{Langmuir} menjadi setengah kali dan dua kali nilai awal dari K_{Langmuir}. Dalam pemodelan ini, nilai konsentrasi terkalkulasi dihitung sebagai sebagai berikut:

$$= \frac{\dots}{\dots} \quad (26)$$

$$= \frac{\theta}{K + \theta} \quad (36)$$

Nilai K yang digunakan adalah nilai K Langmuir yang didapatkan pada persamaan adsorpsi Langmuir yang dimodelkan. Nilai θ diambil dari 0 hingga 1 dengan inkremen 0.05. Hasil analisis sensitivitas K terhadap θ pada panjang biofilter 50 cm dan laju alir gas N_2O dapat dilihat pada Gambar 4. 24:



Gambar 4. 24 Analisis Sensitivitas K terhadap θ

(h = 50 cm, f = 50 cc/menit, medium kering)

Dari Gambar 4. 24 dapat dilihat bahwa nilai K mempengaruhi jumlah gas N_2O yang teradsorpsi pada medium biofilter, θ . Apabila nilai K dinaikkan dua kalinya menjadi 2K, maka jumlah zat N_2O yang teradsorpsi oleh medium biofilter akan menjadi lebih banyak dalam.

Sebaliknya jika nilai K diturunkan setengah kalinya menjadi $0.5K$, maka jumlah zat N_2O yang teradsorp oleh medium biofilter lebih sedikit.

Hal ini menyarankan bahwa dalam mengadsorpsi suatu adsorbat, maka adsorben yang digunakan harus memiliki nilai K yang tinggi. Nilai K Langmuir dari suatu eksperimen mencerminkan karakteristik suatu material adsorben dalam mengadsorpsi suatu adsorbat. Dengan demikian adsorben dengan nilai K yang tinggi dapat mengadsorp suatu adsorbat yang lebih banyak, dan sebaliknya. Hal ini juga menyarankan bahwa dalam penelitian reduksi gas Dinitrogen monoksida dapat menggunakan suatu medium biofilter yang memiliki nilai K yang lebih tinggi.



KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang didapatkan dari penelitian biofiltrasi gas N₂O oleh pupuk kompos antara lain:

1. Pupuk kompos dapat digunakan sebagai medium biofilter dalam mereduksi gas N₂O.
2. Semakin tinggi panjang medium biofilter, maka semakin banyak gas N₂O yang teradsorp oleh medium biofilter.
3. Semakin tinggi laju alir gas N₂O, maka semakin banyak gas N₂O yang teradsorp oleh medium biofilter.
4. Efisiensi reduksi tertinggi gas N₂O oleh medium biofilter adalah 70,22% pada kondisi panjang biofilter 50 cm dan laju alir gas N₂O 200 cc/menit pada 6 jam percobaan.
5. Fenomena adsorpsi dan degradasi gas N₂O dapat diteliti dengan penggunaan nutrisi terhadap medium biofilter. Hal ini karena efisiensi reduksi dapat mencapai 91,49%, sehingga dapat disimpulkan penggunaan nutrisi dapat mempertinggi reduksi gas N₂O.
6. Penelitian biofiltrasi N₂O dapat dimodelkan dalam adsorpsi isoteremis Langmuir. K Langmuir yang didapatkan pada penelitian ini adalah 16,006 liter/mol.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. D. Grano, in: U.S. Ozkan, S.K. Agarwald, G. Marcelin (Eds.), *Reduction of Nitrogen Oxide Emissions*, American Chemical Society, Washington DC, 1995, p. 14.
- [2]. B.D. Lee, W.A. Apel, W.A. Smith, Oxygen effects on thermophilic microbial populations in biofilters treating nitric oxide containing off-gas streams, *Environ. Prog.* 20 (2001) 157–166.
- [3]. Environmental Protection Administration (EPA), Taiwan. The evaluation of regulation and reduction on nitrogen oxides in industrial sectors: cases in asphalt, glass, brick-making, boiler, and power generation, EPA-85-1401-09-40, Taipei, Taiwan, 1996.
- [4]. E. Chagnot, S. Taha, G. Martin, J.F. Vicard, Treatment of nitrogen oxides on a percolating biofilter after pre-concentration on activated carbon, *Proc. Biochem.* 33 (1998) 617–624.
- [5]. Anonim. Nitrous Oxide. http://en.wikipedia.org/wiki/Nitrous_oxide. Diakses pada tanggal 10 Januari 2008
- [6]. Y. Jin, M. Veiga, C. Kennes, Bioprocesses for the removal of nitrogen oxides from polluted air, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 80 (2005) 483–494.
- [7]. W.P. Flanagan, W.A. Apel, J.M. Barnes, B.D. Lee, Development of gas bioreactors for the removal of nitrogen oxides from synthetic flue gas streams, *Fuel* 81 (2002) 1953–1961.
- [8]. M. Schlegelmilch, J. Streese, R. Stegmann, Odour management and treatment technologies: an overview, *Waste Manage.* 25 (2005) 928–939.
- [9]. K. Kardono, E.R. Allen, Elimination of Benzene Using a Compost Biofilter, 88th Annual AWMA Meeting & Exhibition, 95-TP9C.01, 1995.
- [10]. L. Lackey, T. Holt, Not for the birds, *WEF Industrial Wastewater* 4 (1996) 31–33.
- [11]. M. Zilli, A. Converti, A. Lodi, D.M. Borghi, G. Ferraiolo, Phenol removal from waste gases with a biological filter by *Pseudomonas putida*, *Biotechnol. Bioeng.* 41 (1993) 693–699.
- [12]. E. Morgenroth, E.D. Schoeder, D.P.Y. Chang, K.M. Scow, Nutrient limitation in a compost biofilter degrading hexane, 88th Annual AWMA Meeting & Exhibition, 95-TP9C.05, 1995.

- [13]. J.M. Barnes, W.A. Apel, K.B. Barrett, Removal of nitrogen oxides from gas streams using biofiltration, *J. Hazard. Mater.* 41 (1995) 315–326.
- [14]. G. Bitton, *Wastewater Microbiology*, JohnWiley & Sons, New York, New York, 1994.
- [15]. Yang, Wan-Fa, et al., The effects of selected parameters on the nitric oxide removal using biofilter. *Hazard. Mater.* (2007)
- [16]. The Texas Institute for Advancement of Chemical Technology. A Summary of NO_x Reduction Technologies. Newman Printing Co., Inc.
- [17]. Khan, F.I., Ghoshal, A.K., 2000. Removal of volatile organic compounds from polluted air. *J. Loss Prevent Proc. Ind.* 13, 527–545.
- [18]. Burgess, J.E., Parsons, S.A., Stuetz, R.M., 2001. Developments in odour control and waste gas treatment biotechnology: a review. *Biotechnol. Adv.* 19, 35–63.
- [19]. J.S. Devigny, M.A. Deshusses, T.S. Webster, *Biofiltration for Air Pollution Control*, Lewis Publishers, 1999.
- [20]. Kennes, C., Thalasso, F., 1998. Waste gas biotreatment technology. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 72, 303–319.
- [21]. Rene, E.R., Murthy, D.V.S., Swaminathan, T., 2005. Performance evaluation of a compost biofilter treating toluene vapours. *Process. Biochem.* 40, 2771–2779.
- [22]. Kennes, C., Veiga, M.C., 2001. Conventional biofilters. In: Kennes, C., Veiga, M.C. (Eds.), *Bioreactors for Waste Gas Treatment*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp. 47–98.
- [23]. Dastous, P.A., Soreanu, G., Nikiema, J., Heitz, M., 2005. Biofiltration of the alcohols on a mature bed compost. In: *Proceedings of the Annual Air & Waste Management Association*, Pittsburgh, PA.
- [24]. Togashi, I., Suzuki, M., Hirai, M., 1986. Removal of NH₃ by a peat biofilter without and with nitrifier. *J. Ferment. Technol.* 64, 425–432.
- [25]. Aizpuru, A., Malhautier, L., Roux, J.C., Fanlo, J.L., 2003. Biofiltration of a mixture of volatile organic compounds on granular activated carbon. *Biotechnol. Bioeng.* 83, 479–488.
- [26]. Carlson, D.A., Leiser, C.P., 1981. Soil beds for control of sewage odors. *J. Water Pollut. Control Fed.* 38, 829–840.
- [27]. Kurita, M., Kamata, O., 1990. Deodorization systems used at sewage treatment plants in Nagoya city. *Sewage Works Japan*, 114–119.

- [28]. Prado, O' .J., Veiga, M.C., Kennes, C., 2005. Treatment of gas-phase methanol in conventional biofilters packed with lava rock. *Water Res.* 39, 2385–2393.
- [29]. N.-J. Kim, Y. Sugano, M. Hirai, M. Shoda, Removal of a high load of ammonia gas by a marine bacterium, *Vibrio alginolyticus*, *J. Biosci. Bioeng.* 90 (2000) 410–415.
- [30]. M.A. Deshusses, H.H.J. Cox, *Biotrickling Filters for Air Pollution Control*, Department of Chemical and Environmental Engineering University of California.
- [31]. B.A. Sheridan, T.P. Curran, V.A. Dodd, Assessment of the influence of media particle size on the biofiltration of odorous exhaust ventilation air from a piggery facility, *Bioresour. Technol.* 84 (2002) 129–143.
- [32]. M. Zilli, E. Palazzi, L. Sene, A. Converti, M. Del Borghi, Toluene and styrene removal from air in biofilter, *Process Biochem.* 37 (2001) 423–429.
- [33]. Govind, R., 1999. Biotrickling filter. In: *Resources*. ASAE, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659, USA, May, pp. 13–14.
- [34]. Janni, K.A., Nicolai, R., 2000. Designing biofilters for livestock facilities. In: *Livestock and Poultry Odor Workshop II*. Department of Biosystems and Agricultural Engineering, University of Minnesota, St. Paul, MN, USA.
- [35]. Sekhar, K.S., Kamala, C.T., Chary, N.S., Sastry, A.R.K., Rao, T.N., Vairamani, M., 2004. Removal of lead from aqueous solutions using an immobilized biomaterial derived from a plant biomass. *J. Hazard Mater.* 108, 111–117.
- [36]. Georgiou, D., Hatiras, J., Aivasidis, A., 2005. Microbial immobilization in a two-stage fixed-bed-reactor pilot plant for on-site anaerobic decolorization of textile wastewater. *Enzyme Microb. Technol.* 37, 597–605.
- [37]. Chung, Y.C., Huang, C., Tseng, C.P., 1996. Operation optimization of *Thiobacillus thioparus* CH11 biofilter for hydrogen sulfide removal. *J. Biotechnol.* 52, 31–38.
- [38]. Chung, Y.C., Huang, C., Tseng, C.P., 1997. Removal of hydrogen sulphide by immobilized *Thiobacillus* sp. Strain CH11 in a biofilter. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 68, 58–62.
- [39]. Chung, Y.C., Huang, C., Tseng, C.P., Pan, J.R., 2000. Biotreatment of H₂S and NH₃ containing waste gases by co-immobilized cells biofilter. *Chemosphere* 41, 329–336.
- [40]. Chung, Y.C., Huang, C., Tseng, C.P., 2001. Biological elimination of H₂S and NH₃ from waste gases by biofilter packed with immobilized heterotrophic bacteria. *Chemosphere* 43, 1043–1050.

- [41]. Chan, W.C., Zheng, R.X., 2005. A new synthetic biofiltration material: poly(vinyl alcohol)/pig manure compost composite beads. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 80, 574–580.
- [42]. Baumgartner, M., and R. Conrad. 1992. Effects of Soil Variables and Season on the Production and Consumption of Nitric Oxide in Oxic Soils. *Biology and Fertility of Soils.* vol 14, pp. 166-174.
- [43]. Skiba, U., K. A. Smith, D. Fowler. 1993. Nitrification and Denitrification as Sources of Nitric Oxide and Nitrous Oxide in Sandy Loam Soils. *Soil Boil. Biochem.* vol 25, pp. 1527-1536.
- [44]. Du Plessis, Chris. 1998. Denitrification and Nitric Oxide Reduction in an Aerobic-Toluene Treating Biofilter. *Biotechnology and Bioengineering.* vol 58., no 44, pp. 408-415.
- [45]. Firestone, M. K. J. M. Tiedje. 1979. Temporal Change in Nitrous Oxide and Dinitrogen From Denitrification Following Onset of Anaerobiosis, *Applied Environmental Microbiology.* vol 38, pp. 673-679.
- [46]. Anderson, I. C. 1986. Relative Rates of Nitric Oxide and Nitrous Oxide Production by Nitrifiers, Denitrifiers, and Nitrate Respirers. *Applied Environmental Microbiology,* vol 51, pp. 938-845.
- [47]. Schuster, M. 1992. Metabolism of Nitric Oxide and Nitrous Oxide during Nitrification and Denitrification in Soil at Different Incubation Conditions, *FEMS Microbial Ecology.* vol 101, pp.133-143.
- [48]. Remde, A. 1991. Role of Nitrification and Denitrification for NO Metabolism in Soil. *Biogeochemistry.* vol 12, pp. 189-205.
- [49]. Remde, A. 1989. Microbial Production and Uptake of Nitric Oxide in Soil. *FEMS Microbial Ecology.* vol 62, pp. 221-230.
- [50]. Ye, R. W. 1994. Denitrification: Production and Consumption of Nitric Oxide, *Applied Environmental Microbiology.* vol 60, pp 1053-1058.

LAMPIRAN

Lampiran A Hasil Uji Kebocoran



Lampiran B Uji Kalibrasi Flowmeter

Contoh perhitungan untuk laju alir 50 cc/menit:

$$\frac{14.3 + 14.8 + 15.47 + 14.21 + 14.35}{5} = 14.626$$

$$\frac{15}{14.626} \times \frac{60}{1} = 61.53 \quad /$$

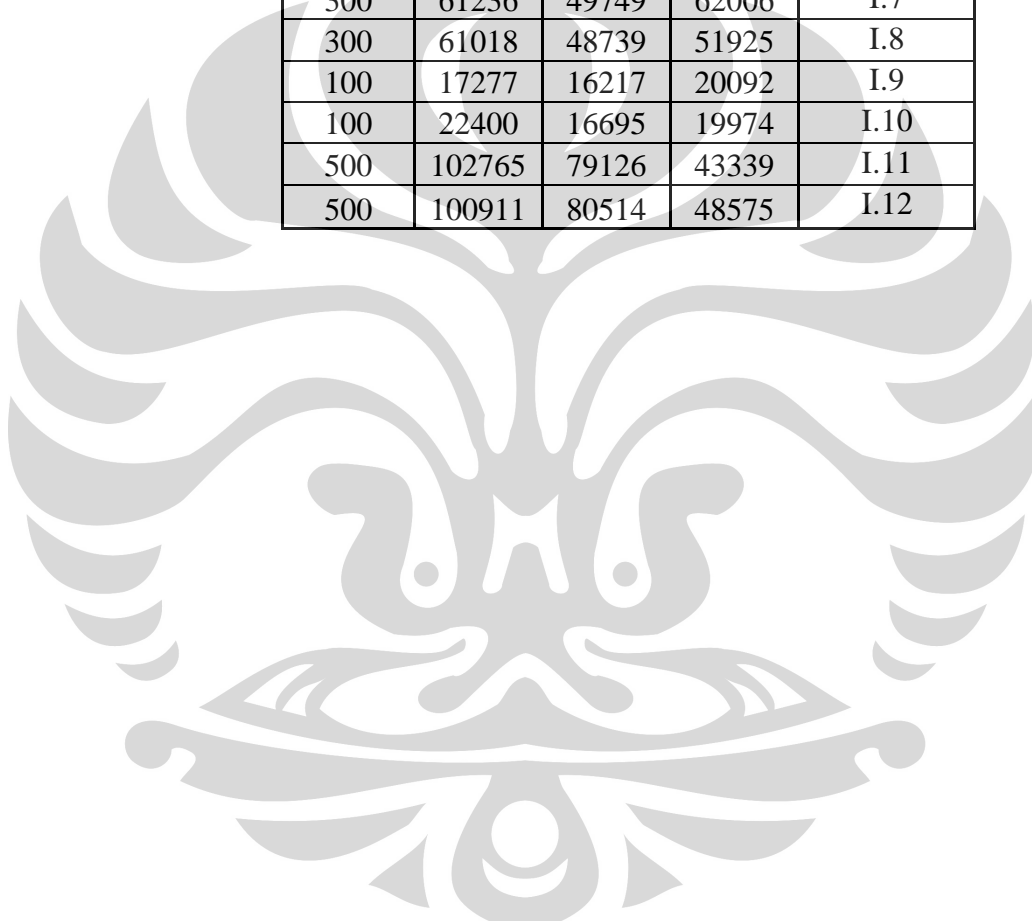
Laju alir tertera	Waktu (s)	Laju alir terhitung
50	14.3	61.53
	14.8	
	15.47	
	14.21	
	14.35	
70	11.77	75.69
	11.48	
	12.15	
	11.84	
	12.21	
100	8	110.4
	7.3	
	8.65	
	8.52	
	8.29	
110	7.77	115.83
	7.71	
	7.83	
	7.83	
	7.71	
130	7.14	121.98
	7.3	
	7.29	
	7.54	
	7.62	
150	6.15	144.69
	6.2	
	6.3	
	6.2	
	6.25	

170	5.15	168.47
	5.18	
	5.52	
	5.5	
	5.36	
200	4.28	211.67
	4.25	
	4.31	
	4.2	
	4.22	



Lampiran C Data Uji Kalibrasi Volume N₂O

Volume syringe	Luas Area			Keterangan Data
	N2O	Udara	Air	
1000	202567	148773	126776	I.1
1000	204918	142902	145031	I.2
800	167447	122173	99607	I.3
800	164925	120542	90161	I.4
600	124563	92283	21501	I.5
600	124586	95049	32079	I.6
300	61236	49749	62006	I.7
300	61018	48739	51925	I.8
100	17277	16217	20092	I.9
100	22400	16695	19974	I.10
500	102765	79126	43339	I.11
500	100911	80514	48575	I.12



Lampiran D Pengaruh Panjang Medium Biofilter Terhadap Efisiensi Reduksi

Tinggi	Luas Area	Persen	Ket. Data
10 cm	256369		
	256369	100	II.1
	219087	85.45768	II.2
	193639	75.53136	II.3
	167725	65.42328	II.4
	144228	56.25797	II.5
	126998	49.53719	II.6
	116376	45.39394	II.7

Tinggi	Luas Area	Persen	Ket. Data
15 cm	254883		
	254883	100	III.1
	212795	83.48733	III.2
	189776	74.45612	III.3
	165385	64.88663	III.4
	143746	56.39686	III.5
	123318	48.3822	III.6
	107323	42.10677	III.7

Tinggi	Luas Area	Persen	Ket. Data
25 cm	255741		
	255741	100	VI.1
	194133	75.91	VI.2
	158914	62.13865	VI.3
	144119	56.3535	VI.4
	128328	50.17889	VI.5
	105407	41.21631	VI.6
	94894	37.10551	VI.7

Trial 1

Tinggi	Luas Area	Persen	Ket. Data
50 cm	264231		
	264231	100	IV.1
	214676	81.24558	IV.2
	186256	70.48984	IV.3
	154435	58.44696	IV.4
	125907	47.65035	IV.5
	104716	39.63047	IV.6
	88458	33.47753	IV.7

Trial 2

Tinggi	Luas Area	Persen	Ket. Data
50 cm	260310		
	260310	100	V.1
	217332	83.48969	V.2
	186256	71.55161	V.3
	154983	59.53786	V.4
	113884	43.74938	V.5
	98332	37.77496	V.6
	83652	32.13553	V.7

Lampiran E Pengaruh Laju Alir Gas N₂O Terhadap Efisiensi Reduksi

Laju Alir	Luas Area	Persen	Ket. Data
25 cc/menit	207730		
	207730	100	VII.1
	179555	86.43672	VII.2
	150130	72.2717	VII.3
	120603	58.05757	VII.4
	101217	48.72527	VII.5
	87022	41.89188	VII.6
	71366	35.80333	VII.7

Laju Alir	Luas Area	Persen	Ket. Data
100 cc/menit	267044		
	267044	100	IX.1
	227713	85.27172	IX.2
	191274	71.6264	IX.3
	148007	55.4242	IX.4
	125550	47.01472	IX.5
	108181	40.51055	IX.6
	87519	32.77325	IX.7

Laju Alir	Luas Area	Persen	Ket. Data
32.14 cc/menit	227818		
	227818	100	VIII.1
	177788	78.03949	VIII.2
	155563	68.28389	VIII.3
	128474	56.39326	VIII.4
	112463	49.36528	VIII.5
	94414	41.44273	VIII.6
	80539	35.35234	VIII.7

Laju Alir	Luas Area	Persen	Ket. Data
200 cc/menit	282056		
	282056	100	X.1
	236075	83.69792	X.2
	193682	68.66792	X.3
	158496	56.1931	X.4
	135091	47.8951	X.5
	109729	38.90327	X.6
	84006	29.78345	X.7

Laju Alir	Luas Area	Persen	Ket. Data
50 cc/menit	264231		
	264231	100	IV.1
	214676	81.24558	IV.2
	186256	70.48984	IV.3
	154435	58.44696	IV.4
	125907	47.65035	IV.5
	104716	39.63047	IV.6
	88458	33.47753	IV.7

Lampiran F Pengaruh Penggunaan Nutrisi Terhadap Efisiensi Reduksi

Tanpa Nutrisi

Laju Alir	Luas Area	Persen	Ket. Data
200 cc/menit	282056		
	282056	100	X.1
	236075	83.69792	X.2
	193682	68.66792	X.3
	158496	56.1931	X.4
	135091	47.8951	X.5
	109729	38.90327	X.6
	84006	29.78345	X.7

Nutrisi Trial 1

Laju Alir	Luas Area	Persen	Ket. Data
200 cc/menit	278707		
	278707	100	XI.1
	156371	56.10587	XI.2
	73287	26.29536	XI.3
	32779	11.7611	XI.4
	28867	10.35747	XI.5
	25684	9.215413	XI.6
	23728	8.5136	XI.7

Nutrisi Trial 2

Laju Alir	Luas Area	Persen	Ket. Data
200 cc/menit	281408		
	281408	100	XII.1
	227026	80.67503	XII.2
	178613	63.47119	XII.3
	135392	48.11235	XII.4
	85895	30.5233	XII.5
	61358	21.80393	XII.6
	33231	11.80883	XI.7

Lampiran G Pemodelan Pengaruh Panjang Medium Biofilter Terhadap Reduksi N₂O



h = 10 cm

T (jam ke-)	Luas Area			Fraksi Volume			Volume N2O dalam Udara	Volume N2O	Massa N2O	Teta	C	1/Teta	1/C
	Udara	N2O	Air	Udara	N2O	Air	(L)	(L)	(L)				
0	63673	256369	19060	0.187769	0.756023	0.056207	0.001247	0.000943	0.001696	0.000000	0.040886	#DIV/0!	24.458032
1	121142	219087	6222	0.349666	0.632375	0.017959	0.001066	0.000674	0.001213	0.285018	0.057185	3.508550	17.487051
2	167514	193639	12630	0.448158	0.518052	0.03379	0.000942	0.000488	0.000878	0.482198	0.078961	2.073839	12.664428
3	210496	167725	10948	0.540886	0.430982	0.028132	0.000816	0.000352	0.000633	0.626766	0.109546	1.595491	9.128558
4	245670	144228	19258	0.600431	0.352501	0.047068	0.000702	0.000248	0.000445	0.737405	0.155701	1.356106	6.422552
5	275044	126998	28444	0.638915	0.295011	0.066074	0.000619	0.000182	0.000328	0.806421	0.211213	1.240047	4.734562
6	307563	116376	23259	0.687756	0.260234	0.052011	0.000567	0.000148	0.000265	0.843482	0.261225	1.185561	3.828114

h = 15 cm

T (jam ke-)	Luas Area			Fraksi Volume			Volume N2O dalam Udara	Volume N2O	Massa N2O	Teta	C	1/Teta	1/C
	Udara	N2O	Air	Udara	N2O	Air	(L)	(L)	(L)				
0	69008	254883	30992	0.194453	0.718217	0.08733	0.001240	0.000890	0.001602	0.000000	0.040886	#DIV/0!	24.45803
1	142691	212795	30481	0.369697	0.55133	0.078973	0.001035	0.000571	0.001027	0.358941	0.063779	2.785974	15.67904
2	185119	189776	30948	0.456135	0.467609	0.076256	0.000923	0.000432	0.000777	0.515002	0.084302	1.941738	11.86208
3	223791	165385	19706	0.547324	0.404481	0.048195	0.000805	0.000326	0.000586	0.634295	0.111801	1.576554	8.944434
4	258814	143746	21325	0.610576	0.339116	0.050308	0.000700	0.000237	0.000427	0.733422	0.153375	1.363471	6.519962
5	288877	123318	29901	0.653426	0.278939	0.067635	0.000601	0.000168	0.000301	0.811810	0.217261	1.231816	4.602766
6	316331	107323	27507	0.701149	0.237882	0.060969	0.000523	0.000124	0.000224	0.860265	0.292600	1.162432	3.417639

h = 25 cm

T (jam ke-)	Luas Area			Fraksi Volume			Volume N2O dalam Udara	Volume N2O	Massa N2O
	Udara	N2O	Air	Udara	N2O	Air	(L)	(L)	(L)
0	59843	255741	16618	0.18014	0.769836	0.050024	0.001244	0.000958	0.0017
1	171703	194133	24173	0.440254	0.497765	0.061981	0.000945	0.000470	0.0008
2	217933	158914	8477	0.565584	0.412417	0.022	0.000774	0.000319	0.0005
3	249822	144119	11627	0.615981	0.355351	0.028668	0.000702	0.000249	0.0004
4	271586	128328	10161	0.662284	0.312938	0.024778	0.000625	0.000196	0.0003
5	303516	105407	9565	0.725268	0.251876	0.022856	0.000514	0.000129	0.0002
6	325362	94894	10814	0.754778	0.220136	0.025086	0.000463	0.000102	0.0001

h = 50 cm

T (jam ke-)	Luas Area			Fraksi Volume			Volume N2O dalam Udara	Volume N2O	Massa N2O
	Udara	N2O	Air	Udara	N2O	Air	(L)	(L)	(L)
0	10141	264231	10901	0.035548	0.926239	0.038213	0.001285	0.001190	0.002
1	113578	214676	15180	0.330713	0.625087	0.044201	0.001044	0.000653	0.001
2	177770	186256	16271	0.46745	0.489765	0.042785	0.000906	0.000444	0.000
3	210215	154435	16863	0.551004	0.404796	0.0442	0.000752	0.000304	0.000
4	265307	125907	17931	0.648442	0.307732	0.043826	0.000613	0.000189	0.000
5	306866	104716	14657	0.719939	0.245674	0.034387	0.000510	0.000125	0.000
6	323701	88458	32518	0.727946	0.198926	0.073127	0.000431	0.000086	0.000

Lampiran H Pemodelan Pengaruh Laju Alir Gas N₂O Terhadap Reduksi N₂O



f = 25 cc/menit

T (jam ke-)	Luas Area			Fraksi Volume			Volume N2O dalam Udara	Volume N2O	Massa N2O	Teta	C	1/Teta	1/C
	Udara	N2O	Air	Udara	N2O	Air	(L)	(L)	(L)				
0	149984	207730	11678	0.406029	0.562357	0.031614	0.001011	0.000568	0.001022	0.000000	0.040886	#DIV/0!	24.458032
1	195253	179555	12536	0.504082	0.463554	0.032364	0.000874	0.000405	0.000729	0.287301	0.057368	3.480665	17.431206
2	250343	150130	13527	0.604693	0.362633	0.032674	0.000731	0.000265	0.000477	0.533648	0.087673	1.873894	11.406052
3	295996	120603	12916	0.68914	0.280789	0.030071	0.000587	0.000165	0.000297	0.709749	0.140866	1.408948	7.098959
4	323397	101217	12877	0.739208	0.231358	0.029434	0.000493	0.000114	0.000205	0.799173	0.203590	1.251294	4.911835
5	349260	87022	12858	0.777619	0.193753	0.028628	0.000424	0.000082	0.000148	0.855318	0.282595	1.169155	3.538629
6	366665	71366	13122	0.812729	0.158186	0.029085	0.000348	0.000055	0.000099	0.903040	0.421684	1.107370	2.371443

f = 33.14 cc/menit

T (jam ke-)	Luas Area			Fraksi Volume			Volume N2O dalam Udara	Volume N2O	Massa N2O	Teta	C	1/Teta	1/C
	Udara	N2O	Air	Udara	N2O	Air	(L)	(L)	(L)				
0	91180	227818	17027	0.271349	0.677979	0.050672	0.001108	0.000751	0.001352	0.000000	0.040886	#DIV/0!	24.458032
1	162785	177788	14854	0.457998	0.50021	0.041792	0.000865	0.000433	0.000779	0.423971	0.070980	2.358650	14.088528
2	211735	155563	18523	0.548791	0.4032	0.048009	0.000757	0.000305	0.000549	0.593610	0.100609	1.684607	9.939491
3	253635	128474	18718	0.632779	0.320522	0.046698	0.000626	0.000201	0.000361	0.733067	0.153171	1.364132	6.528655
4	287846	112463	19867	0.685061	0.267657	0.047283	0.000548	0.000147	0.000264	0.804795	0.209454	1.242552	4.774328
5	318258	94414	18513	0.738101	0.218964	0.042935	0.000460	0.000101	0.000181	0.865854	0.304790	1.154929	3.280953
6	346630	80539	19636	0.775797	0.180255	0.043948	0.000393	0.000071	0.000127	0.905735	0.433739	1.104076	2.305533

f = 50 cc/menit

T (jam ke-)	Luas Area			Fraksi Volume			Volume N2O dalam Udara (L)	Volume N2O (L)	Massa N2O (L)
	Udara	N2O	Air	Udara	N2O	Air			
0	10141	264231	10901	0.035548	0.926239	0.038213	0.001285	0.001190	0.002
1	113578	214676	15180	0.330713	0.625087	0.044201	0.001044	0.000653	0.001
2	177770	186256	16271	0.46745	0.489765	0.042785	0.000906	0.000444	0.000
3	210215	154435	16863	0.551004	0.404796	0.0442	0.000752	0.000304	0.000
4	265307	125907	17931	0.648442	0.307732	0.043826	0.000613	0.000189	0.000
5	306866	104716	14657	0.719939	0.245674	0.034387	0.000510	0.000125	0.000
6	323701	88458	32518	0.727946	0.198926	0.073127	0.000431	0.000086	0.000

f = 100 cc/menit

T (jam ke-)	Luas Area			Fraksi Volume			Volume N2O dalam Udara (L)	Volume N2O (L)	Massa N2O (L)
	Udara	N2O	Air	Udara	N2O	Air			
0	29951	267044	27399	0.092329	0.823209	0.084462	0.001299	0.001069	0.001
1	104140	227713	21367	0.29483	0.644678	0.060492	0.001108	0.000714	0.001
2	171803	191274	23309	0.444641	0.495033	0.060326	0.000931	0.000461	0.000
3	233776	148007	27163	0.571655	0.361923	0.066422	0.000721	0.000261	0.000
4	260897	125550	25307	0.633623	0.304915	0.061461	0.000612	0.000186	0.000
5	298273	108181	30403	0.68277	0.247635	0.069595	0.000527	0.000131	0.000
6	329937	87519	18997	0.755951	0.200523	0.043526	0.000427	0.000086	0.000

f = 200 cc/menit

T (jam ke-)	Luas Area			Fraksi Volume			Volume N2O dalam Udara	Volume N2O	Mass N2O
	Udara	N2O	Air	Udara	N2O	Air	(L)	(L)	(L)
0	14567	282056	12568	0.047113	0.912239	0.040648	0.001372	0.001251	0.002
1	98532	236075	11967	0.284303	0.681168	0.034529	0.001148	0.000782	0.001
2	167324	193682	11448	0.449247	0.520016	0.030737	0.000942	0.000490	0.000
3	213165	158496	11518	0.556307	0.413634	0.030059	0.000772	0.000319	0.000
4	267138	135091	13125	0.643157	0.325243	0.0316	0.000658	0.000214	0.000
5	301109	109729	12804	0.710763	0.259014	0.030224	0.000535	0.000138	0.000
6	344600	84006	11313	0.783326	0.190958	0.025716	0.000410	0.000078	0.000



Lampiran I Analisis Sensitivitas

	K	0.5 K	2 K
Teta	N2O calc	N2O calc	N2O calc
0	0	0	0
0.01	0.000631076	0.001262153	0.000315538
0.02	0.001275032	0.002550064	0.000637516
0.03	0.001932265	0.00386453	0.000966133
0.04	0.00260319	0.005206381	0.001301595
0.05	0.003288241	0.006576481	0.00164412
0.06	0.003987866	0.007975733	0.001993933
0.07	0.004702538	0.009405075	0.002351269
0.08	0.005432745	0.010865491	0.002716373
0.09	0.006179002	0.012358003	0.003089501
0.1	0.006941841	0.013883683	0.003470921
0.11	0.007721823	0.015443647	0.003860912
0.12	0.008519532	0.017039065	0.004259766
0.13	0.00933558	0.018671159	0.00466779
0.14	0.010170605	0.020341209	0.005085302
0.15	0.011025277	0.022050555	0.005512639
0.16	0.011900299	0.023800599	0.00595015
0.17	0.012796406	0.025592812	0.006398203
0.18	0.013714369	0.027428739	0.006857185
0.19	0.014654998	0.029309996	0.007327499
0.2	0.015619143	0.031238286	0.007809571
0.21	0.016607696	0.033215392	0.008303848
0.22	0.017621597	0.035243194	0.008810799
0.23	0.018661833	0.037323666	0.009330916
0.24	0.019729444	0.039458887	0.009864722
0.25	0.020825524	0.041651048	0.010412762
0.26	0.021951228	0.043902455	0.010975614
0.27	0.023107773	0.046215546	0.011553886
0.28	0.024296444	0.048592889	0.012148222
0.29	0.0255186	0.051037199	0.0127593
0.3	0.026775673	0.053551347	0.013387837
0.31	0.028069184	0.056138368	0.014034592
0.32	0.029400739	0.058801479	0.01470037
0.33	0.030772043	0.061544085	0.015386021
0.34	0.0321849	0.064369801	0.01609245
0.35	0.033641231	0.067282461	0.016820615
0.36	0.035143071	0.070286143	0.017571536
0.37	0.036692589	0.073385179	0.018346295
0.38	0.038292092	0.076584184	0.019146046

0.39	0.039944037	0.079888075	0.019972019
0.4	0.041651048	0.083302095	0.020825524
0.41	0.043415922	0.086831845	0.021707961
0.42	0.045241655	0.09048331	0.022620828
0.43	0.047131449	0.094262897	0.023565724
0.44	0.049088735	0.098177469	0.024544367
0.45	0.051117195	0.102234389	0.025558597
0.46	0.053220783	0.106441566	0.026610391
0.47	0.055403752	0.110807504	0.027701876
0.48	0.057670681	0.115341362	0.028835341
0.49	0.06002651	0.120053019	0.030013255
0.5	0.062476571	0.124953143	0.031238286
0.51	0.065026635	0.130053271	0.032513318
0.52	0.067682952	0.135365904	0.033841476
0.53	0.070452304	0.140904608	0.035226152
0.54	0.073342062	0.146684124	0.036671031
0.55	0.076360254	0.152720508	0.038180127
0.56	0.079515636	0.159031272	0.039757818
0.57	0.082817781	0.165635561	0.04140889
0.58	0.08627717	0.17255434	0.043138585
0.59	0.08990531	0.17981062	0.044952655
0.6	0.093714857	0.187429714	0.046857428
0.61	0.097719765	0.195439531	0.048859883
0.62	0.101935458	0.203870917	0.050967729
0.63	0.106379027	0.212758054	0.053189513
0.64	0.11106946	0.22213892	0.05553473
0.65	0.116027918	0.232055836	0.058013959
0.66	0.12127805	0.2425561	0.060639025
0.67	0.126846372	0.253692744	0.063423186
0.68	0.132762714	0.265525428	0.066381357
0.69	0.139060755	0.278121511	0.069530378
0.7	0.145778666	0.291557333	0.072889333
0.71	0.152959881	0.305919763	0.076479941
0.72	0.16065404	0.321308081	0.08032702
0.73	0.168918137	0.337836274	0.084459069
0.74	0.177817934	0.355635867	0.088908967
0.75	0.187429714	0.374859428	0.093714857
0.76	0.197842476	0.395684951	0.098921238
0.77	0.209160695	0.41832139	0.104580348
0.78	0.221507844	0.443015687	0.110753922
0.79	0.235030911	0.470061822	0.117515456
0.8	0.249906285	0.49981257	0.124953143
0.81	0.266347488	0.532694976	0.133173744

0.82	0.284615491	0.569230983	0.142307746
0.83	0.305032672	0.610065343	0.152516336
0.84	0.328001999	0.656003999	0.164001
0.85	0.354033904	0.708067808	0.177016952
0.86	0.383784652	0.767569304	0.191892326
0.87	0.418112439	0.836224877	0.209056219
0.88	0.458161523	0.916323046	0.229080761
0.89	0.505492259	1.010984517	0.252746129
0.9	0.562289142	1.124578283	0.281144571
0.91	0.631707554	1.263415108	0.315853777
0.92	0.71848057	1.43696114	0.359240285
0.93	0.830045876	1.660091751	0.415022938
0.94	0.978799617	1.957599234	0.489399808
0.941	0.996448366	1.992896732	0.498224183
0.942	1.014705692	2.029411385	0.507352846
0.943	1.033603627	2.067207253	0.516801813
0.944	1.053176487	2.106352975	0.526588244
0.945	1.073461088	2.146922177	0.536730544
0.946	1.094496971	2.188993942	0.547248486
0.947	1.116326661	2.232653321	0.55816333
0.948	1.138995953	2.277991907	0.569497977
0.949	1.162554238	2.325108476	0.581277119
0.95	1.187054854	2.374109709	0.593527427
0.951	1.212555496	2.425110992	0.606277748
0.952	1.239118664	2.478237328	0.619559332
0.953	1.266812179	2.533624359	0.63340609
0.954	1.295709761	2.591419522	0.647854881
0.955	1.32589168	2.651783359	0.66294584
0.956	1.357445503	2.714891007	0.678722752
0.957	1.390466947	2.780933894	0.695233473
0.958	1.42506084	2.850121681	0.71253042
0.959	1.461342241	2.922684481	0.73067112
0.96	1.499437711	2.998875422	0.749718855
0.961	1.539486795	3.07897359	0.769743398
0.962	1.581643726	3.163287451	0.790821863
0.963	1.626079409	3.252158819	0.813039705
0.964	1.672983742	3.345967484	0.836491871
0.965	1.722568323	3.445136645	0.861284161
0.966	1.775069643	3.550139286	0.887534822
0.967	1.830752862	3.661505723	0.915376431
0.968	1.889916281	3.779832563	0.944958141
0.969	1.952896696	3.905793392	0.976448348
0.97	2.020075805	4.04015161	1.010037902

0.971	2.091887956	4.183775912	1.045943978
0.972	2.168829546	4.337659092	1.084414773
0.973	2.251470513	4.502941027	1.125735257
0.974	2.340468478	4.680936956	1.170234239
0.975	2.43658628	4.87317256	1.21829314
0.976	2.540713899	5.081427798	1.270356949
0.977	2.653896093	5.307792187	1.326948047
0.978	2.777367578	5.554735156	1.388683789
0.979	2.912598252	5.825196504	1.456299126
0.98	3.061351993	6.122703986	1.530675997
0.981	3.225764023	6.451528045	1.612882011
0.982	3.408444056	6.816888111	1.704222028
0.983	3.612615857	7.225231715	1.806307929
0.984	3.842309134	7.684618268	1.921154567
0.985	4.102628181	8.205256362	2.051314091
0.986	4.400135663	8.800271327	2.200067832
0.987	4.743413528	9.486827055	2.371706764
0.988	5.143904369	10.28780874	2.571952185
0.989	5.617211727	11.23442345	2.808605864
0.99	6.185180557	12.37036111	3.092590279
0.991	6.879364683	13.75872937	3.439682341
0.992	7.747094839	15.49418968	3.87354742
0.993	8.862747898	17.7254958	4.431373949
0.994	10.35028531	20.70057062	5.175142655
0.995	12.43283769	24.86567537	6.216418843
0.996	15.55666625	31.1133325	7.778333125
0.997	20.76304719	41.52609438	10.3815236
0.998	31.17580907	62.35161814	15.58790454
0.999	62.41409471	124.8281894	31.20704736
1	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Lampiran J Data Kromatogram GC

