

**PENGEMBANGAN BIOFILTER SEBAGAI ALTERNATIF
PEREDUKSI EMISI NITROGEN OKSIDA MELALUI
PEMANFAATAN KOMPOS SEBAGAI MEDIUM FILTER**

DISERTASI

**TANIA SURYA UTAMI
0806400932**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
AGUSTUS 2011**

**PENGEMBANGAN BIOFILTER SEBAGAI ALTERNATIF
PEREDUKSI EMISI NITROGEN OKSIDA MELALUI
PEMANFAATAN KOMPOS SEBAGAI MEDIUM FILTER**

DISERTASI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor

**TANIA SURYA UTAMI
0806400932**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
AGUSTUS 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Tania Surya Utami

NPM : 0806400932

Tanda Tangan :

Tanggal : 15 Agustus 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh :
Nama : Tania Surya Utami
NPM : 0806400932
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Disertasi : Pengembangan Biofilter sebagai Alternatif
Pereduksi Emisi Nitrogen Oksida melalui
Pemanfaatan Kompos sebagai Medium Filter

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

DEWAN PENGUJI

Promotor : Prof. Dr. Ir. Mohamad Nasikin, M.Eng.
Kopromotor : Dr. Heri Hermansyah, ST., M.Eng.
Tim Penguji : 1. Ariyanti Oetari, Ph.D.
2. Dr. Yopi
3. Prof. Dr. Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc.
4. Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA.
5. Prof. Dr. Ir. Slamet, MT.

KATA PENGANTAR / UCAPAN TERIMA KASIH

Alhamdulillah, sujud dan syukur kepada Allah SWT, hanya dengan kehendak dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan disertasi ini. Penulisan disertasi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Doktor Program Studi Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya sangat menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari banyak pihak, tidak mungkin saya dapat menyelesaikan disertasi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Pimpinan Fakultas Teknik dan Departemen Teknik Kimia atas kesempatan yang diberikan untuk melanjutkan studi;
2. Promotor Prof. M. Nasikin dan Kopromotor Dr. Heri Hermansyah, yang telah memberikan waktu dan pikiran selama menjalani riset dan dalam penulisan disertasi ini;
3. Ariyanti Oetari, Ph.D. ; Dr. Yopi ; Prof. Dr. Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc. ; Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA. ; Prof. Dr. Ir. Slamet, MT., selaku penguji atas saran dan arahan yang diberikan;
4. Rekan-rekan staf pengajar dan karyawan Departemen Teknik Kimia dengan simpul erat kekerabatannya;
5. Tim Peneliti Biofilter 2007-2011 serta Kelompok Riset Teknologi Bioproses, atas kerjasama, dukungan, dan bantuannya dalam pelaksanaan riset;
6. Sahabat seperjuangan mahasiswa Program Doktor FTUI dengan aliran semangat dan canda yang tak pernah putus;
7. Komunitas dan Green Lab. Sekolah Alam Indonesia yang telah membantu dalam proses pembuatan dan penyediaan kompos;
8. Keluarga tercinta, suami, ananda Hizrian, Rumaisha, dan Saffanah, serta para adinda, atas doa, kasih, dan dukungannya.

Semoga Allah SWT memberi balasan dengan kebaikan yang berlipat ganda, dan semoga disertasi ini memberi manfaat bagi pengembangan ilmu dan masyarakat.

Depok, 15 Agustus 2011

Tania Surya Utami

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

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

Nama : Tania Surya Utami

NPM : 0806400932

Program Studi : Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Disertasi

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

Pengembangan Biofilter sebagai Alternatif Pereduksi Emisi Nitrogen Oksida melalui Pemanfaatan Kompos sebagai Medium Filter

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 15 Agustus 2011

Yang menyatakan

(Tania Surya Utami)

ABSTRAK

Nama : Tania Surya Utami
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Pengembangan Biofilter sebagai Alternatif Pereduksi Emisi Nitrogen Oksida melalui Pemanfaatan Kompos sebagai Medium Filter

Gas nitrogen oksida antara lain adalah NO, NO₂, dan N₂O mempunyai peranan penting dalam perubahan kimia pada lapisan ozon. Dinitrogen monoksida (N₂O) merupakan gas rumah kaca yang harus mendapat perhatian karena memiliki potensi pemanasan global yang besar. Biofiltrasi adalah proses pengolahan polutan gas di dalam suatu unggun medium, dan polutan akan mengalami degradasi oleh mikroorganisme. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem biofilter dalam mereduksi emisi gas buang N₂O melalui pemanfaatan kompos sebagai medium filter, dengan melakukan kajian pada parameter-parameter operasi biofilter serta penyusunan model biosorpsi dan biodegradasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dari aspek karakteristik medium dan kinerja medium sebagai filter dalam mereduksi polutan gas N₂O, medium kompos berbasis kotoran kambing lebih baik daripada medium kompos berbasis kotoran sapi, dengan rata-rata efisiensi reduksi mencapai 65% dan stabil hingga 200 jam pada kedalaman medium 100 cm, laju alir gas N₂O 88 cm³/menit, dan kandungan air 60%. Proses biofiltrasi gas N₂O dengan medium kompos dapat dimodelkan dengan baik oleh model kinetika berbasis mekanisme Michaelis-Menten Adsorpsi, dengan parameter kinetika V_{Max}, K_M, dan K_{N₂O} berturut-turut adalah 14,847 g/m³.jam ; 0,131 g/m³ ; 1,343 x 10⁻³ m³/g untuk medium kompos ruah, dan 461 g/m³.jam ; 558 g/m³ ; 0,22 m³/g untuk medium pelet kompos.

Kata kunci: Biofilter, efisiensi reduksi, kompos kotoran hewan, Michaelis-Menten, N₂O

ABSTRACT

Name : Tania Surya Utami
Study Program : Chemical Engineering
Title : Biofilter Development as Alternatives of Nitrogen Oxide
Emission Reduction through Utilization of Compost as
Filter Medium

Nitrogen oxides i.e. NO, NO₂, and N₂O have an important role in chemical changes in the ozone layer. Nitrous oxide (N₂O) is a greenhouse gas that should get attention because it has a great potential for global warming. Biofiltration is the processing of gas pollutants in a medium bed, and pollutants will be degraded by microorganisms. This research aims to develop a biofilter system to reduce N₂O emissions using compost as a filter medium, by studying the parameters of biofilter operation as well as the developing of biosorption and the biodegradation model. The results show that in term of medium characteristics and the performance in reducing N₂O, goat manure-based compost medium is better than cow manure-based compost medium, with an average removal efficiency reached 65% and stable up to 200 hours at medium depth of 100 cm, N₂O gas flow rate of 88 cm³/minute, and water content of 60%. Biofiltration of N₂O with manure-based compost medium can be well modeled by the kinetic based model of Michaelis-Menten for adsorption mechanism, with kinetics parameters V_{Max}, K_M, and K_{N₂O} 14,847 g/m³.hour ; 0,131 g/m³ ; 1,343 x 10⁻³ m³/g for bulk compost, and 461 g/m³.hour ; 558 g/m³ ; 0,22 m³/g for pelletized compost.

Key words: Biofilter, manure-based compost, Michaelis-Menten, N₂O, removal efficiency

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
DAFTAR SINGKATAN.....	xiv
1. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Permasalahan.....	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	5
1.4. Hipotesis.....	5
1.5. Batasan Masalah.....	5
2. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Biofiltrasi.....	6
2.2. Medium Biofilter.....	7
2.2.1. Kompos sebagai Medium Filter.....	9
2.2.2. Medium Sintetik.....	11
2.2.3. Gabungan Medium Alami dan Sintetik.....	13
2.3. <i>State of The Arts</i> Penelitian Biofiltrasi dengan Medium Alami.....	15
2.3.1. Biofiltrasi Bau.....	15
2.3.2. Biofiltrasi VOCs.....	20
2.3.3. Biofiltrasi Amonia.....	23
2.3.4. Biofiltrasi NOx.....	25
2.4. Metabolisme Nitrogen dalam Biofiltrasi.....	27
2.5. Model Biofiltrasi.....	30
2.5.1. Model Biosorpsi.....	30
2.5.2. Model Biodegradasi.....	31
3. METODOLOGI PENELITIAN	
3.1. Kerangka Penelitian.....	39
3.2. Perancangan Sistem Biofilter.....	43
3.3. Deskripsi dan Preparasi Medium Filter.....	44
3.4. Karakterisasi Medium.....	49
3.5. Pengujian Kebocoran dan Kalibrasi.....	51
3.6. Proses Biofiltrasi.....	53

3.6.1. Penelitian Awal.....	53
3.6.2. Optimasi Proses Biofiltrasi.....	54
3.7. Analisis.....	57
3.7.1. Analisis Konsentrasi Gas dengan Kromatografi.....	57
3.7.2. Enumerasi Jumlah Koloni Bakteri dengan Metode TPC.....	58
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1. Hasil Penelitian Awal.....	59
4.1.1. Pengaruh Kedalaman Medium Filter Pupuk Kandang.....	59
4.1.2. Pengaruh Laju Alir Sirkulasi Gas N ₂ O.....	60
4.1.3. Pengaruh Penambahan Nutrisi Sintetik.....	61
4.1.4. Model Biosorpsi N ₂ O pada Medium Filter Pupuk Kandang.....	62
4.2. Optimasi Proses Biofiltrasi dengan Medium Filter Kompos Berbasis Kotoran Sapi.....	66
4.2.1. Pengaruh Laju Alir Gas N ₂ O.....	66
4.2.2. Pengaruh Penambahan Kandungan Air dalam Medium Filter.....	67
4.2.3. Analisis Perubahan Jumlah Bakteri pada Permukaan Medium.....	69
4.3. Optimasi Proses Biofiltrasi dengan Medium Filter Kompos Berbasis Kotoran Kambing.....	72
4.3.1. Pengaruh Laju Alir Gas N ₂ O.....	72
4.3.2. Pengaruh Penambahan Kandungan Air dalam Medium Filter.....	74
4.3.3. Analisis Perubahan Jumlah Bakteri pada Permukaan Medium.....	75
4.4. Pemilihan Material Kompos sebagai Medium dalam Biofiltrasi Gas Dinitrogen Monoksida.....	77
4.4.1. Karakteristik Medium Kompos.....	78
4.4.2. Hasil Uji Kinerja Medium Kompos.....	80
4.4.3. Penggunaan <i>Nitrobacter</i> , sp. dan Penambahan Nutrisi.....	83
4.5. Optimasi Lanjut Biofiltrasi Dinitrogen Monoksida dengan Medium Kompos Berbasis Kotoran Kambing.....	85
4.5.1. Pengaruh Kedalaman Medium Filter.....	85
4.5.2. Pengaruh Waktu Inkubasi Medium.....	87
4.5.3. Pengaruh Dimensi Medium Filter.....	88
4.5.4. Biofiltrasi N ₂ O secara Kontinyu dengan Filter Pelet Kompos.....	90
4.5.5. Karakteristik Medium Filter Pelet Kompos Setelah Biofiltrasi.....	93
4.5.6. Studi Adsorpsi N ₂ O di Permukaan Kompos.....	96
4.6. Penyusunan Model Biosorpsi – Biodegradasi.....	101
4.6.1. Model Biosorpsi N ₂ O pada Medium Pelet Komp.....	101
4.6.2. Model Biodegradasi N ₂ O pada Medium Pelet Kompos.....	104
4.6.3. Model Kinetika Berbasis Mekanisme Michaelis-Menten untuk Biofiltrasi Dinitrogen Monoksida.....	108
5. KESIMPULAN.....	121
DAFTAR REFERENSI.....	122
LAMPIRAN.....	137

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Pengaruh <i>Shock Loading</i> terhadap RE.....	12
Gambar 2.2.	Pengaruh Laju <i>Loading</i> terhadap RC H ₂ S.....	13
Gambar 2.3.	Hubungan antara Laju <i>Loading</i> Amonia dengan EC.....	14
Gambar 2.4.	Konsentrasi Piridin pada Inlet dan Outlet Kolom Biofilter.....	17
Gambar 2.5.	Penurunan Tekanan yang Terjadi dalam Kolom Biofilter.....	19
Gambar 2.6.	EC Et.Asetat pada Periode Biofiltrasi yang Berbeda.....	21
Gambar 2.7.	RE Amonia pada Proses Pengomposan Biomassa Hewan.....	25
Gambar 2.8.	Pengaruh Konsentrasi O ₂ terhadap RE NO.....	26
Gambar 2.9.	Pengaruh Penambahan Glukosa.....	26
Gambar 2.10.	Jalur Metabolisme Umum Nitrogen.....	28
Gambar 2.11.	Skema Proses Biodegradasi Kontaminan oleh Bakteri.....	29
Gambar 2.12.	Proses Adsorpsi pada Biofilter.....	29
Gambar 2.13.	Posisi Riset terhadap Perkembangan Penelitian Biofiltrasi.....	33
Gambar 3.1.	Kerangka Penelitian Biofiltrasi N ₂ O.....	40
Gambar 3.2.	Diagram Alir Penelitian Optimasi Parameter Operasi.....	42
Gambar 3.3.	Diagram Skematik Biofilter Skala Laboratorium.....	43
Gambar 3.4.	Hasil Perancangan Sistem Biofilter.....	44
Gambar 3.5.	Prosedur Pembuatan Kompos.....	46
Gambar 3.6.	Proses Pengomposan.....	47
Gambar 3.7.	Prosedur Preparasi Kompos Sebelum Digunakan.....	48
Gambar 3.8.	Tahap Akhir Preparasi Medium Kompos.....	49
Gambar 3.9.	Tahapan Pengujian Kebocoran pada Sistem Biofilter.....	52
Gambar 4.1.	RE pada Variasi Kedalaman Medium Pupuk Kandang.....	59
Gambar 4.2.	RE pada Variasi Laju Alir Sirkulasi Gas N ₂ O (pupuk kandang).....	60
Gambar 4.3.	RE pada Penambahan Nutrisi Sintetik (pupuk kandang).....	61
Gambar 4.4.	Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir.....	64
Gambar 4.5.	Analisis Sensitivitas Konstanta Langmuir.....	65
Gambar 4.6.	RE pada Variasi Laju Alir Gas N ₂ O (kompos kotoran sapi).....	66
Gambar 4.7.	RE pada Variasi Kandungan Air (kompos kotoran sapi).....	68
Gambar 4.8.	Koloni Bakteri Sebelum/Setelah Biofiltrasi.....	70
Gambar 4.9.	Hasil Analisis SEM pada Kompos Berbasis Kotoran Sapi.....	71
Gambar 4.10.	RE pada Variasi Laju Alir Gas N ₂ O (kompos kotoran kambing).....	72
Gambar 4.11.	RE pada Variasi Kandungan Air (kompos kotoran kambing).....	74
Gambar 4.12.	Koloni Bakteri Sebelum/Setelah Biofiltrasi (kompos kambing).....	76
Gambar 4.13.	Hasil Analisis SEM pada Kompos Berbasis Kotoran Kambing.....	77
Gambar 4.14.	Profil EC Biofiltrasi N ₂ O (kompos kotoran sapi).....	81
Gambar 4.15.	Profil EC Biofiltrasi N ₂ O (kompos kotoran kambing).....	82
Gambar 4.16.	RE pada Penggunaan <i>Nitrobacter, sp.</i> dan Penambahan Nutrisi.....	84
Gambar 4.17.	RE pada Variasi Kedalaman Medium Kompos.....	86
Gambar 4.18.	RE pada Variasi Waktu Inkubasi Medium Kompos.....	87
Gambar 4.19.	RE pada Variasi Dimensi Medium Kompos.....	89
Gambar 4.20.	Konsentrasi Keluaran Gas N ₂ O pada Uji Stabilitas Medium.....	91
Gambar 4.21.	Penurunan Tekanan pada Uji Stabilitas Medium.....	92

Gambar 4.22. Kurva Terobosan pada Adsorpsi N ₂ O.....	97
Gambar 4.23. Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir untuk Kompos Ruah.....	99
Gambar 4.24. Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir untuk Pelet Kompos.....	99
Gambar 4.25. Linierisasi Model Biosorpsi Langmuir.....	103
Gambar 4.26. Linierisasi Model Biodegradasi Michaelis-Menten.....	107
Gambar 4.27. Ilustrasi Proses Adsorpsi pada <i>Biofilm</i>	109
Gambar 4.28. Prosedur Estimasi Parameter Kinetika.....	114
Gambar 4.29. Hasil <i>Fitting</i> Model Kinetika MM Kompos Ruah.....	115
Gambar 4.30. Hasil <i>Fitting</i> Model Kinetika MM Pelet Kompos	115
Gambar 4.31. Hasil <i>Fitting</i> Model Kinetika MM & MM-Ads Kompos Ruah...	116
Gambar 4.32. Hasil <i>Fitting</i> Model Kinetika MM & MM-Ads Pelet Kompos..	116

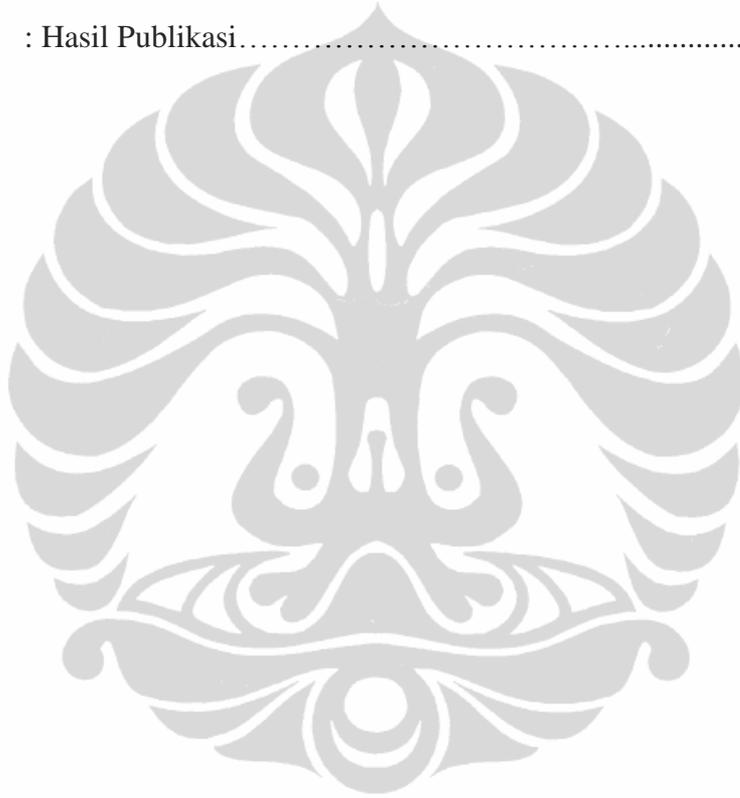


DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Karakteristik Medium Kompos.....	16
Tabel 2.2.	Periode Pengoperasian Kolom Biofilter.....	20
Tabel 2.3.	Karakteristik Medium Filter Sebelum/Setelah Pengoperasian.....	23
Tabel 2.4.	Rangkuman Hasil Studi Literatur.....	34
Tabel 3.1.	Ketersediaan Kotoran Ternak di Indonesia pada Tahun 2002.....	55
Tabel 3.2.	Perkiraan Kandungan Unsur Hara Makro Kotoran Hewan.....	56
Tabel 3.3.	Spesifikasi Kromatografi Gas Jenis TCD.....	58
Tabel 4.1.	Kedalaman Medium Filter Setelah 9 jam Proses Biofiltrasi.....	69
Tabel 4.2.	Kandungan Air pada Beberapa Jenis Kotoran Ternak.....	73
Tabel 4.3.	Hasil Karakterisasi Kandungan Kompos.....	78
Tabel 4.4.	Hasil Karakterisasi Permukaan dan Pori Kompos.....	79
Tabel 4.5.	Hasil Enumerasi Mikroorganisme dalam Kompos.....	80
Tabel 4.6.	Sifat Fisika dan Kimia Kompos Sebelum Biofiltrasi.....	80
Tabel 4.7.	Perbandingan RE untuk Kedua Jenis Medium Kompos.....	81
Tabel 4.8.	Hasil TPC untuk Kedua Jenis Medium Kompos.....	83
Tabel 4.9.	Perubahan Jumlah Koloni Bakteri (kompos kotoran kambing)....	85
Tabel 4.10.	Perubahan Kandungan Kompos Setelah Proses Biofiltrasi.....	94
Tabel 4.11.	Enumerasi Mikroorganisme dalam Kompos Setelah Biofiltrasi...	94
Tabel 4.12.	Sifat Fisika dan Kimia Kompos Setelah Proses Biofiltrasi.....	96
Tabel 4.13.	Parameter Adsorpsi Isotermis Langmuir.....	100
Tabel 4.14.	q_m dan K_L pada Medium Pelet Kompos Kotoran Kambing.....	100
Tabel 4.15.	Parameter Hasil Estimasi Model Kinetika MM.....	117
Tabel 4.16.	Parameter Hasil Estimasi Model Kinetika MM-Ads.....	119
Tabel 4.17.	Analisis Sensitivitas untuk Parameter Model MM-Ads.....	120

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	: Data Biofiltrasi.....	135
Lampiran 2	: Perhitungan Model Matematis.....	159
Lampiran 3	: Data Studi Adsorpsi.....	166
Lampiran 4	: <i>Listing</i> Program Kinetika MM-Adsorpsi.....	169
Lampiran 5	: Kurva Kalibrasi.....	176
Lampiran 6	: Hasil Publikasi.....	177



DAFTAR SINGKATAN



C/N	: Rasio Carbon - Nitrogen
DTK-UI	: Departemen Teknik Kimia – Universitas Indonesia
EBRT	: <i>Empty Bed Residence Time</i>
EC (RC)	: <i>Elimination/Removal Capacity</i>
EPA	: <i>Environmental Protection Agency</i>
GC	: <i>Gas Chromatograph</i>
IPB	: Institut Pertanian Bogor
IL	: <i>Inlet Loading</i>
IPCC	: <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
KLH	: Kementerian Lingkungan Hidup
Lab. RBP	: Laboratorium Rekayasa Bioproses
Lab. RPKA	: Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam
LIPI	: Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
MC	: <i>Moisture Content</i>
NO _x	: Nitrogen oksida
N ₂ O	: Dinitrogen monoksida
RE (X)	: <i>Removal Efficiency</i>
SAI	: Sekolah Alam Indonesia
SCR	: <i>Selective Catalytic Reduction</i>
SEM	: <i>Scanning Electron Microscope</i>
SNCR	: <i>Selective Non Catalytic Reduction</i>
TCD	: <i>Thermal Conductivity Detector</i>
TPC	: <i>Total Plate Count</i>
VOC	: <i>Volatile Organic Compound</i>
WC	: <i>Water Content</i>
WHC	: <i>Water Holding Capacity</i>

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Nitrogen oksida (NO_x) terbentuk dari kombinasi N₂ dan O₂ pada suhu dan tekanan tinggi, yang terjadi pada proses pembakaran bahan bakar fosil seperti gasolin, solar, biodisel, propan, batubara, dan etanol. *Environmental Protection Agency* (EPA) memperkirakan 49% dari emisi NO_x berasal dari kendaraan bermotor, 27% dari pembangkit listrik, dan sisanya berasal dari kegiatan industri dan pemukiman penduduk. Emisi NO_x, berkontribusi secara luas terhadap gangguan kesehatan dan juga permasalahan lingkungan. Nitrogen oksida merupakan komponen utama pada lapisan bawah ozon dan mengakibatkan pemanasan global (Yang, *et al*, 2007).

Sumber NO_x antara lain adalah NO, NO₂, dan N₂O yang mempunyai peranan penting dalam perubahan kimia pada lapisan ozon. Gas NO dan NO₂, dapat merusak keberadaan nutrisi bagi ekosistem di perairan dan daratan. Dinitrogen monoksida (N₂O) merupakan produk samping dari penggunaan nitrogen di pertanian. Gas N₂O dapat diemisikan dari tanah pertanian, juga dapat tertimbun di tanah non-pertanian, dan secara biokimia dikonversikan serta diemisikan ke atmosfer (KLH, 1990). Peningkatan penggunaan dari *biofuel*, selain dapat menurunkan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, pada akhirnya akan menyebabkan konsentrasi N₂O di atmosfer bumi meningkat akibat aktivitas lahan perkebunan.

Potensi pemanasan global N₂O 310 kali lebih besar dari CO₂ (US Dept. of Energy), yang berarti setiap 1 kg N₂O memiliki dampak sama dengan 310 kg CO₂. Gas N₂O merupakan gas rumah kaca yang harus mendapat perhatian selain memiliki potensi pemanasan global yang besar, juga berkontribusi terhadap kerusakan lapisan ozon. Gas N₂O sangat kuat dan mampu bertahan lama di atmosfer, serta diemisikan secara alami di alam. Saat ini konsentrasi N₂O semakin meningkat, disebabkan penggunaan pupuk yang semakin intensif serta proses

pengomposan yang menjadi alternatif dari pengelolaan limbah organik (IPCC, 2001). Bidang pertanian menyumbang lebih 50% dari emisi N₂O.

Pengelolaan terhadap limbah organik dilakukan dengan berbagai cara seperti penumpukan/*landfill* (54%), pembakaran/*incineration* (38%), daur ulang/*recycling* (6%), dan pengomposan/*composting* (2%). Dua metode pengelolaan yang pertama terbukti tidak ramah terhadap lingkungan. Penumpukan dapat mengakibatkan gangguan bau dan polusi terhadap air tanah (Yun, *et al*, 2000). Pembakaran membutuhkan konsumsi bahan bakar, usia pakai insinerator yang pendek, serta menghasilkan polutan baru seperti dioksin (Suzuki, *et al*, 2004).

Proses pengomposan telah mendapat banyak perhatian karena bersifat ramah terhadap lingkungan, dan merupakan proses alternatif dengan tingkat keberlangsungan yang baik dalam hal pengelolaan dan daur ulang limbah organik (Saebo dan Ferrini, 2006). Proses pengomposan mengkonversi berbagai jenis komponen dalam limbah organik menjadi substansi yang relatif lebih stabil, yang dapat digunakan sebagai zat yang mampu memperbaiki kondisi tanah (pupuk organik).

Proses pengomposan juga memiliki dampak negatif terhadap lingkungan dengan adanya emisi gas bau (Pagans, *et al*, 2006). Hal ini telah mendapat perhatian yang besar pada negara-negara berkembang, salah satunya adalah Taiwan, dengan ditutupnya beberapa industri pengomposan (Chung, 2007). Lebih dari 100 jenis gas diemisikan dalam proses pengomposan, antara lain adalah: senyawa-senyawa yang mengandung nitrogen, senyawa-senyawa yang mengandung sulfur, dan senyawa-senyawa asam lemak rantai pendek (C3-C4). Konsentrasi gas yang diemisikan dipengaruhi oleh komposisi bahan baku kompos, suhu, konsentrasi oksigen, dan pH dalam proses pengomposan (Wang, *et al*, 2002).

Penghilangan NO_x efektif jika dilakukan sebelum gas tersebut diemisikan. Teknologi pengelolaan yang telah ada seperti SCR (*Selective Catalytic Reduction*) dan SNCR (*Selective Non Catalytic Reduction*), memiliki beberapa kelemahan antara lain: membutuhkan suhu tinggi, konsumsi katalis

tinggi, biaya instalasi dan operasi yang besar, serta menghasilkan limbah baru dalam jumlah besar.

Biofiltrasi dan *biotrickling* filtrasi merupakan teknologi biologis yang paling sering digunakan dalam pengelolaan polusi udara (Devinny, *et al*, 1999; Kennes dan Veiga, 2001). Biofiltrasi adalah proses pengolahan polutan gas di dalam suatu unggun medium ketika polutan mengalami degradasi oleh mikroorganisme, sedangkan di dalam *biotrickling* filtrasi terdapat cairan yang diteteskan di atas unggun medium untuk menghasilkan kondisi optimum pada lapisan *biofilm* (Cox dan Deshusses, 1998). Dalam biofilter polutan akan ditransfer langsung pada *biofilm*, sedangkan dalam *biotrickling* filter polutan ditransfer melalui cairan yang diteteskan di atas medium filter.

Aplikasi biofilter pada skala industri mulai banyak ditemukan, antara lain pada industri pengelolaan limbah cair, industri makanan, industri cat dan resin, serta proses dekontaminasi tanah (Kennes dan Veiga, 2004; Rappert dan Muller, 2005). Teknologi pengelolaan emisi gas secara biologis dalam hal ini biofiltrasi, lebih unggul pada beberapa aspek, karena kondisi operasi yang aman, tidak dibutuhkan biaya besar dalam penyediaan mikroorganisme yang terlibat, efisiensi penghilangan polutan yang tinggi, konsumsi energi rendah, desain peralatan yang sederhana, tidak menghasilkan produk samping yang tidak diinginkan, dan mengoksidasi senyawa organik dan anorganik menjadi senyawa lain yang tidak berbahaya. Beberapa kelompok bakteri berfungsi untuk mendegradasi polutan dalam biofilter. Umumnya kelompok bakteri yang terkandung dalam kompos atau *peat* dalam mereduksi polutan adalah spesies dari genus *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Corynebacterium*, *Sphingomonas*, *Xanthomonas*, *Nocardia*, *Mycobacterium*, *Rhodococcus*, *Xanthobacter*, *Clostridium* dan *Enterobacter* (Kennes dan Veiga, 2001).

Biofiltrasi merupakan teknologi yang murah jika dibandingkan dengan teknologi konvensional seperti oksidasi termal, *scrubbing*, ataupun adsorpsi (Devinny, *et al*, 1999). Teknologi pengelolaan polutan gas secara biologis adalah metode yang baik untuk emisi bau dengan konsentrasi yang rendah, *Volatile Organic Compound* (VOC), dan senyawa anorganik (Shoda, 1991). Biofiltrasi merupakan teknik pereduksi bau yang telah diaplikasikan dalam mereduksi emisi

yang berasal dari proses pengomposan (Hong dan Park, 2004). Teknologi ini dianggap cukup sesuai untuk mendaur ulang limbah dan mereduksi emisi, dengan konstruksi sederhana dan biaya operasi yang rendah (Lang dan Lager, 1992).

Biofiltrasi terbukti ekonomis dalam mengelola gas dengan kandungan senyawa organik dan anorganik volatil yang *biodegradable*, dalam konsentrasi rendah (Kennes dan Veiga, 2001). Biofiltrasi memiliki potensi untuk mereduksi emisi gas-gas penyebab bau dari proses pengomposan secara simultan. Kolom biofilter sederhana dalam desain dan pengoperasian, memiliki kemudahan akses terhadap mikroorganisme di dalam medium, serta pembentukan limbah baru dapat dihindari (Devinny, *et al*, 1999).

Dalam beberapa penelitian, pengelolaan dengan sistem biofilter telah terbukti efektif dalam mengatasi bau, amonia, dan VOC, yaitu: biofiltrasi benzena dengan medium kompos (Kardono, *et al*, 1995), biofiltrasi stirena (Lackey dan Holt, 1996), biofiltrasi fenol dengan memanfaatkan mikroorganisme *Pseudomonas putida* (Zilli, *et al*, 1993), biofiltrasi heksana dengan medium kompos (Morgenroth, *et al*, 1995), biofiltrasi amonia dengan memanfaatkan mikroorganisme laut (Kim, *et al*, 2000), biofiltrasi bau pada peternakan babi (Sheridan, *et al*, 2002), serta biofiltrasi toluena dan stirena dari udara (Zilli, *et al*, 2001).

1.2. Permasalahan

Sistem biofilter dapat pula diaplikasikan untuk menindaklanjuti emisi gas-gas dari proses pengomposan. Pemasangan sistem biofilter pada pusat-pusat pengomposan yang ada, dapat mengurangi sumbangan emisi gas-gas rumah kaca yang dihasilkan selama proses pengomposan berlangsung.

Saat ini, penelitian biofilter yang ada lebih difokuskan pada reduksi NH_3 dan H_2S . Sedikit sekali peneliti yang tertarik untuk mengaplikasikannya dalam reduksi NO_x . Untuk mendukung aplikasi lebih lanjut, dibutuhkan studi pada skala laboratorium untuk optimasi parameter operasi, khususnya pengaruh jenis material pada medium filter, laju alir gas masuk, kelembaban, kedalaman medium, nutrisi, dan lain sebagainya.

Kajian yang lebih mendalam sebaiknya disertai juga dengan pengembangan model yang mampu menjelaskan dan memprediksi perilaku dari sistem biofilter. Saat ini belum ada studi yang sistematis dan komprehensif meliputi penyusunan model biosorpsi dan biodegradasi dalam biofilter berbasis medium kompos dalam mereduksi nitrogen oksida.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan umum penelitian ini adalah mengembangkan sistem biofilter dalam mereduksi emisi gas buang N_2O dengan memanfaatkan kompos sebagai medium filter.

Tujuan khusus yang ingin dicapai:

- Mengkaji parameter-parameter operasi biofilter, terhadap kemampuan biofilter dalam mereduksi gas N_2O dan perkembangan mikroorganisme dalam medium.
- Menyusun model biosorpsi dan biodegradasi dalam biofilter berbasis medium kompos dalam mereduksi nitrogen oksida.

1.4. Hipotesis

1. Sistem biofilter dengan memanfaatkan kompos sebagai medium filter dapat dengan baik mereduksi emisi N_2O .
2. Konsorsium mikroba yang ada di dalam kompos memiliki potensi untuk mereduksi emisi N_2O .

1.5. Batasan Masalah

1. Gas Nitrogen Oksida yang direduksi berupa campuran gas N_2O dalam udara.
2. Mikroorganisme yang berperan dalam proses biofiltrasi berupa konsorsium mikroba yang ada di dalam medium kompos.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Biofiltrasi

Biofiltrasi didasarkan kepada kemampuan mikroorganisme dalam mendegradasi senyawa penyebab bau, pada kondisi aerobik, menjadi biomassa dan mineral (Diks dan Ottengraf, 1991). Di dalam kolom biofilter, polutan gas akan dialirkan melalui lapisan medium yang aktif secara biologis dan memiliki luas permukaan spesifik yang relatif besar. Kontaminan dialirkan melalui lapisan tipis mikroorganisme (*biofilm*) di permukaan material filter seperti: tanah, serpihan kayu, kompos, ataupun material campuran, selanjutnya diikuti dengan proses biodegradasi dari polutan yang diadsorb. Produk samping dari aktivitas mikroorganisme ini berupa air, CO₂, garam mineral, beberapa senyawa organik volatil, dan biomassa (Nicolai dan Janni, 2001).

Prinsip kerja biofiltrasi adalah mengalirkan aliran udara dan polutan yang telah dihumidifikasi melalui media yang berpori, yang memiliki kemampuan mengadsorb senyawa-senyawa gas dan mendukung pertumbuhan mikroorganisme yang ada. Pada kondisi yang optimum, kontaminan dapat dengan cepat mengalami proses biodegradasi dan dikonversi menjadi CO₂ dan air tanpa akumulasi dari produk-produk intermediet (*dead-end metabolites*).

Efektivitas, performansi, dan stabilitas biofilter dipengaruhi oleh aktivitas mikroorganisme, jenis pengayaan (*enrichment*) terhadap mikroorganisme yang dilakukan selama proses inokulasi, dan jenis medium yang digunakan (Kennes dan Thalasso, 1998; Rene, *et al.*, 2005). Pemilihan medium dan mikroorganisme yang digunakan dalam proses biofiltrasi, dipengaruhi oleh proses biofiltrasi itu sendiri. Indikator kualitas dari medium yang digunakan dipengaruhi oleh densitas mikroorganisme, porositas, kelembaban, pH, luas area, penurunan tekanan, dan biaya.

Aktivitas mikroorganisme dalam biofilter dipengaruhi oleh kelembaban, pH, keterbatasan nutrisi, suhu, dan karakteristik mikroorganisme dari medium.

Kandungan air di dalam medium merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi kinerja dari biofilter (Gostomski, *et al.*, 1997; Auria, *et al.*, 1998; Auria, *et al.*, 2000; Sun, *et al.*, 2002; Morales, *et al.*, 2003).

Dalam penelitian-penelitian biofiltrasi beberapa istilah di bawah ini akan sering ditemui, yaitu *Inlet Loading* (IL), *Removal Efficiency* (RE atau X), *Elimination Capacity* (EC), dan *Empty Bed Residence Time* (EBRT) yang didefinisikan sebagai berikut:

$$IL = \frac{QC_{in}}{V} \quad (2.1)$$

$$RE = \left(1 - \frac{C_{out}}{C_{in}}\right) \times 100\% \quad (2.2)$$

$$EC = \frac{Q(C_{in} - C_{out})}{V} \quad (2.3)$$

dengan:

Q : laju alir udara kontaminan, m²/detik

C_{in} : konsentrasi kontaminan yang masuk kolom biofilter, g/m³

C_{out} : konsentrasi kontaminan yang keluar kolom biofilter, g/m³

V : volum kolom biofilter kosong, m³

Empty Bed Residence Time (EBRT) merupakan parameter penting dalam mendesain suatu sistem biofilter. Evaluasi EBRT dilakukan dengan mengalirkan polutan gas dengan konsentrasi tetap dan laju alir bervariasi. *Inlet Loading* (IL) adalah massa udara terkontaminasi yang memasuki kolom biofilter setiap unit area/volum dari medium filter per-satuan waktu. *Removal Efficiency* (RE) dan *Elimination Capacity* (EC) merupakan dua parameter yang digunakan dalam menentukan kinerja dari suatu sistem biofilter.

2.2. Medium Biofilter

Berdasarkan medium yang digunakan, sistem biofiltrasi dapat dibedakan menjadi sistem dengan medium alami, sintetik, ataupun gabungan keduanya. Kelebihan dari medium yang digunakan dalam kolom biofilter adalah memiliki

porositas besar, keberadaan nutrisi, kapasitas kelembaban yang tinggi, serta kapasitas *buffering* yang baik untuk mempertahankan pertumbuhan mikroorganisme dalam medium (Devinny, *et al.*, 1999; Kennes dan Veiga, 2001; Dastous, *et al.*, 2005). Beberapa material yang sering digunakan dalam proses biofiltrasi adalah tanah gambut (*peat*) (Togashi *et al.*, 1986; Hartikainen *et al.*, 1996), kompos (Rene *et al.*, 2005), tanah, bulu unggas dan serpihan kayu (Carlson dan Leiser, 1981; Kurita dan Kamata, 1990), batuan lava (Prado, *et al.*, 2005), cacing tanah (Lee, *et al.*, 2002), serta campuran kompos dan kulit kelapa (Hong dan Park, 2005).

Karakteristik dari medium filter merupakan salah satu faktor yang menentukan dalam proses biofiltrasi. Medium filter yang baik harus dapat memberikan lingkungan yang sesuai kepada mikroorganisme, khususnya dalam hal kelembaban, suhu, pH, nutrisi, dan suplai oksigen (Elias, *et al.*, 2002; Ramirez-Lopez, *et al.*, 2003; Andres, *et al.*, 2006). Pemilihan medium merupakan salah satu faktor penting yang menentukan kinerja dari sistem biofilter. Perkembangan dan aktivitas mikroorganisme dipengaruhi oleh sifat dan karakteristik medium biofilter.

Kandungan air di dalam medium akan mempengaruhi daya adsorpsi serta mendukung pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme (Gabriel, *et al.*, 2007). Karakteristik utama yang sebaiknya dipertimbangkan dalam pemilihan medium adalah luas permukaan spesifik, densitas, porositas, pH, *water holding capacity* (WHC), kapasitas *buffering*, dan komposisi material (Bohn, 1996). Komposisi material akan menentukan ketersediaan nutrisi bagi pertumbuhan mikroorganisme di dalamnya.

Medium filter yang ideal memiliki karakteristik sebagai berikut: (Gaudin, *et al.*, 2008)

- ukuran partikel yang sesuai, fraksi kosong, dan luas permukaan spesifik, yang menunjukkan permukaan yang tersedia bagi mikroorganisme,
- kapasitas penyediaan nutrisi yang tinggi dan kemampuan dalam menjaga kelembaban yang baik,
- kapasitas *buffering* yang tinggi untuk menghindari fluktuasi pH, dan

- tahanan mekanik yang baik.

Medium filter, baik yang alami maupun sintetik, memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Medium alami yang umum digunakan adalah tanah gambut, tanah, kompos, serpihan kayu, bagas (Sene, *et al.*, 2002), dan kulit kacang (Ramirez-Lopez, *et al.*, 2003). Kekurangan dari medium alami antara lain sering terjadinya penurunan tekanan yang dapat menurunkan efisiensi biofilter, sulit untuk diregenerasi, dan butuh penggantian setelah 3-5 tahun (Gabriel dan Deshusses, 2003).

Medium sintetik yang biasanya digunakan berupa keramik, *crystalite* (Hirai, *et al.*, 2001), dan *perlite* (Kennedy, *et al.*, 1996). Kekurangan medium sintetik adalah memerlukan biaya dan tidak adanya ketersediaan nutrisi bagi mikroorganisme. Medium filter dengan bentuk geometris berupa silinder terbukti lebih baik dibandingkan bentuk lainnya (Shinabe, *et al.*, 2000; Elias, *et al.*, 2002).

Material padatan yang aktif secara biologis lebih banyak digunakan sebagai medium dalam biofiltrasi, antara lain: tanah gambut, kompos, tanah, daun, dan kulit kayu, dengan tambahan material pendukung yang berfungsi mengurangi penurunan tekanan (Chung, *et al.*, 2004). Parameter fisik dan kimia dari medium harus dilengkapi dengan pengujian terhadap kondisi operasi sistem biofilter, baik di skala laboratorium maupun pilot, sebelum diaplikasikan pada skala industri (besar).

2.2.1. Kompos sebagai Medium Filter

Jika dibandingkan dengan material lainnya kompos memiliki beberapa kelebihan yaitu: murah, mudah diperoleh, mengandung komunitas mikroorganisme yang kompleks, serta mempunyai kandungan nitrogen organik dan mikro-nutrien lainnya dalam jumlah yang signifikan sehingga relatif tidak membutuhkan tambahan nutrisi (Pagans, *et al.*, 2005).

Medium berbasis kompos telah sering digunakan sebagai media dalam biofilter karena kandungan komunitas mikroorganisme di dalamnya, yang memiliki kemampuan mendegradasi beberapa jenis polutan. Kompos juga mempunyai sifat tahan terhadap air, dan kandungan bahan organik yang sesuai.

Selain itu, kompos terbukti tidak mahal, serta mudah diperoleh. Tambahan nutrisi tidak selalu dibutuhkan oleh medium biofilter yang berbasis kompos, karena kompos mengandung nitrogen organik dan mikro-nutrien lainnya dalam jumlah yang signifikan (Pagans, *et al.*, 2005).

Salah satu alasan penggunaan kompos sebagai medium filter adalah bahwa nutrisi pada kompos dapat diperoleh melalui proses mineralisasi, dan dapat berdifusi pada *biofilm* untuk menggantikan nutrisi yang telah dikonsumsi oleh mikroorganisme. Kompos memiliki variasi yang signifikan pada rasio C/N (karbon-nitrogen). Beberapa jenis kompos bahkan dapat melepaskan seluruh nutrisi yang ada dalam beberapa minggu saja. Jenis kompos lain melepaskan nutrisi lebih lama, namun dapat menyediakan nutrisi hingga bertahun-tahun.

Medium kompos juga memiliki kekurangan (Dehganzadeh, 2005), yaitu terjadinya *back-pressure* dan demineralisasi dari mikroorganisme. Kompos dapat dicampur dengan *bulking agent* untuk menghindari penurunan tekanan, *clogging* dan *channeling* aliran, serta meningkatkan durabilitas (Nicolai dan Janni, 2001; Liang, *et al.*, 2000).

Penurunan tekanan pada kompos umumnya lebih tinggi daripada tanah gambut, yang disebabkan oleh kompaksi pada medium, sehingga dirasa penting untuk mencampur kompos dengan *bulking agent* (Ottengraph, 1977; Devinny, *et al.*, 1999). Kompos telah pula digunakan dalam bentuk pellet sebagai medium pada biofiltrasi bau (Onde Ltighus, 1997). Medium kompos yang dicampur dengan serpihan kayu memberikan penurunan tekanan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan kompos tradisional (Devinny, *et al.*, 1999).

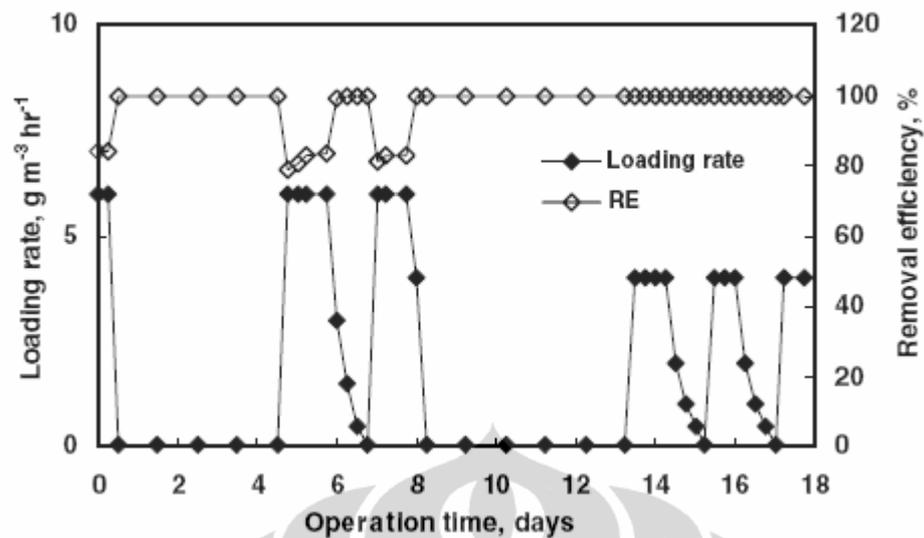
Nicolai dan Janni (2001) merekomendasikan medium filter yang terdiri dari campuran serpihan kayu dan kompos dengan komposisi 70:30% hingga 50:50% berat. Medium filter berupa campuran dapat menyebabkan tahanan yang besar pada aliran udara, yang dapat diatasi dengan menggunakan kipas berdaya besar, namun akan meningkatkan konsumsi energi (Devinny, *et al.*, 1999; Garlinski dan Mann, 2003). Medium filter dengan basis serpihan kayu, memiliki kemampuan untuk mengurangi penurunan tekanan (*pressure-drop*).

2.2.2. Medium Sintetik

Beberapa jenis medium sintetik telah digunakan dalam proses biofiltrasi NH_3 dan H_2S . Kim, *et al.* (2007) melakukan proses biofiltrasi amonia dalam aliran udara pada kolom berskala kecil dengan biomedium (mikroorganisme) yang diimmobilisasi pada *sodium alginate* dan *poly-vinyl alcohol* (PVA). Kultur mikroorganisme diisolasi dari pabrik pengolahan limbah cair. Proses *enrichment* dilakukan di dalam reaktor *batch* dengan menggunakan medium garam mineral untuk membantu pertumbuhan bakteri nitrifikasi. Sel mikroorganisme dicampur dengan *sodium alginate* dan PVA, selanjutnya dicetak membentuk kubus gel dengan konsentrasi sel sekitar 825 mg/L. Kubus gel diisikan ke dalam *pall rings* komersial, dan diaktivasi dengan air demin sebelum dimasukkan ke dalam kolom biofilter (Kim, *et al.*, 2007).

Penelitian Kim, *et al.* (2007) merupakan *shock loading experiment*, yang bertujuan untuk menguji stabilitas dan respon dari mikroorganisme di dalam biofilter yang terimmobilisasi. Hal ini didasari oleh adanya kondisi mikroorganisme di dalam sistem biofilter yang fluktuatif (tidak stabil) selama pengoperasian. Sistem biofilter membutuhkan waktu selama beberapa hari untuk beradaptasi dengan nilai konsentrasi yang baru, dan dalam waktu singkat akan mencapai kondisi setimbang yang baru pula. Sistem biofilter dengan sel yang diimmobilisasi, memiliki aktivitas yang baik dan stabil, bahkan dari awal proses biofiltrasi berlangsung.

Suatu sistem biofilter yang aktif sebaiknya memiliki kemampuan mengatasi perubahan kondisi, dan tetap dapat memberikan nilai RE yang maksimum. Sistem biofilter dengan sel yang diimmobilisasi ini hanya membutuhkan waktu tidak lebih dari 2 hari, untuk kembali memberikan nilai RE yang maksimum, seperti yang diperlihatkan oleh Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Pengaruh *Shock Loading* terhadap RE

Sumber: Kim, *et al.*, 2006

Dalam penelitiannya, Kim, *et al.* (2007) juga melakukan analisis biokinetika. Konstanta kinetika yang diperoleh dari persamaan matematika sederhana, dapat digunakan untuk membandingkan karakteristik dan kemampuan dari sistem biologis yang diimmobilisasi, dengan sumber, medium filter, dan konfigurasi reaktor yang berbeda. Laju penghilangan NH₃ dalam sistem biofilter yang diimmobilisasi dapat dimodelkan menggunakan persamaan Michaelis-Menten yang telah dimodifikasi, sebagai berikut:

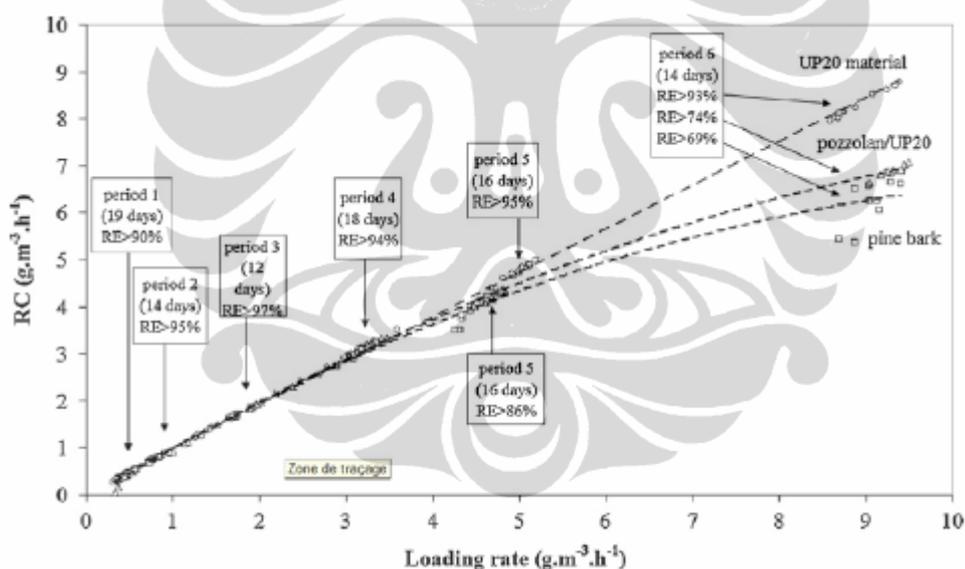
$$\frac{1}{R} = \frac{K_s}{V_m} \frac{1}{C_{ln}} + \frac{1}{V_m} \quad (2.4)$$

Data yang digunakan dalam studi biokinetika ini adalah data pada kondisi setimbang. Konstanta kinetika V_m dan K_s yang diperoleh sebesar 4,83 g NH₃ m⁻³. jam⁻¹ dan 1,53 mg NH₃ m⁻³.

Dumont, *et al.* (2008) juga telah melakukan penelitian dengan menggunakan medium sintetik dalam biofiltrasi H₂S. Medium sintetik yang digunakan dalam penelitian tersebut diberi nama UP20, berbentuk silinder, dengan komponen utama kalsium karbonat dan senyawa organik sebagai

pengikat. UP20 terbukti memiliki keunggulan dalam menangani polutan dengan konsentrasi tinggi, melalui penyediaan nutrisi dan kapasitas *buffering* yang baik (Gaudin, *et al.*, 2008).

Salah satu tujuan dalam penelitian Dumont, *et al.* (2008) adalah untuk mengkaji reduksi emisi polutan H₂S dalam kolom biofilter melalui beberapa parameter yaitu EC, RE, perubahan pH, dan penurunan tekanan. Pengaruh *inlet loading* (laju *loading*) H₂S terhadap kapasitas penghilangan (*Elimination/Removal Capacity* = RC) H₂S di dalam biofilter dapat dilihat pada Gambar 2.2. Gambar 2.2 memperlihatkan hubungan yang linier antara laju *loading* dengan RC. Terlihat bahwa medium UP20 memberikan hasil yang lebih baik dalam pengelolaan H₂S pada konsentrasi polutan yang lebih tinggi, dengan menyediakan nutrisi serta kapasitas *buffering* yang baik terhadap pertumbuhan mikroorganisme.



Gambar 2.2. Pengaruh Laju *Loading* terhadap RC H₂S

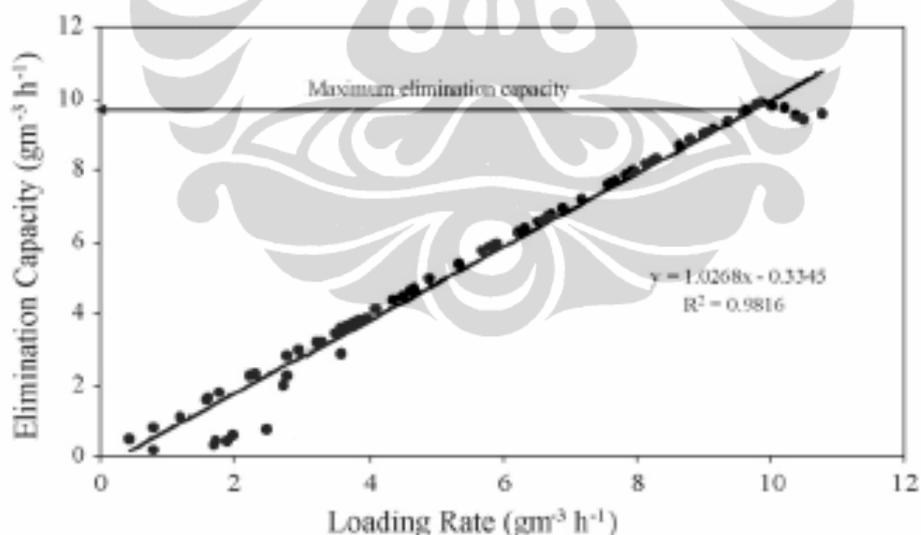
Sumber: Dumont, *et al.*, 2008

2.2.3. Gabungan Medium Alami dan Sintetik

Taghipour, *et al.* (2007) melakukan proses biofiltrasi dari gas model yang mengandung amonia dengan gabungan medium alami dan sintetik, berupa campuran kompos, lumpur, dan kepingan plastik. Penelitian tersebut bertujuan

untuk mengestimasi perioda aklimasi dari biofilter dalam mendegradasi amonia, mengkaji pengaruh parameter-parameter operasi: konsentrasi inlet, laju *loading*, pH dan alkalinitas dari medium filter, penurunan tekanan, dan EBRT, serta menentukan efektivitas dari medium biofilter yang digunakan. Sistem biofilter pada penelitian tersebut, dioperasikan pada laju alir udara $0,388 \text{ m}^3/\text{jam}$ (berdasarkan EBRT = 60 detik), dan laju *loading* rata-rata $2,15 \text{ g NH}_3 / \text{m}^3 \cdot \text{jam}$.

Pada awal proses biofiltrasi, sistem belum stabil. Pada hari ke-10 RE amonia mencapai 97,9%, dan selanjutnya sistem menjadi stabil. Dapat ditarik kesimpulan bahwa setelah 10 hari (periode adaptasi mikroorganisme atau periode aklimasi), proses nitrifikasi oleh mikroorganisme dan penghilangan amonia secara biologis, menjadi dominan. Setelah periode aklimasi, konsentrasi amonia pada inlet dan laju *loading* ditingkatkan, dan sejalan dengan peningkatan tersebut RE dan EC juga mengalami peningkatan. Nilai maksimum EC = $9,85 \text{ g NH}_3 / \text{m}^3 \cdot \text{jam}$ dan RE 99,9%, dicapai pada laju *loading* $9,86 \text{ g NH}_3 / \text{m}^3 \cdot \text{jam}$ (atau konsentrasi inlet 236 ppm_v), dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Hubungan antara Laju *Loading* Amonia dengan EC

Sumber: Taghipour, *et al.*, 2007

Taghipour, *et al.* (2007), juga mengamati adanya perubahan pH dan alkalinitas dari medium yang digunakan selama proses biofiltrasi berlangsung.

Proses nitrifikasi akan mengakibatkan pengurangan alkalinitas dari medium. pH juga akan mengalami penurunan disebabkan oleh oksidasi dari amonia dan pembentukan nitrat. Pada penelitian ini kontrol terhadap pH dan alkalinitas tidak dibutuhkan, karena medium yang digunakan memiliki kemampuan untuk mengatur pH dan menyediakan lingkungan yang sesuai bagi mikroorganisme nitrifikasi, jika dibandingkan dengan medium inorganik seperti yang dilakukan oleh Hirai *et al.* (2001).

Kontrol diperlukan untuk penurunan tekanan yang terjadi di dalam kolom biofilter, karena gangguan pada sistem aliran merupakan faktor penting yang akan menentukan jumlah energi yang dibutuhkan dalam pengoperasian sistem biofilter. Penurunan tekanan yang terjadi selama pengoperasian biofilter, dapat disebabkan oleh kandungan air di dalam medium filter. Dalam sistem biofilter ini juga dapat dihindarkan terjadinya *back-pressure* yang besar, yang dapat disebabkan oleh peningkatan laju alir dan laju *loading*. Hal ini dikarenakan medium filter yang digunakan memiliki porositas yang tinggi (Taghipour, *et al.*, 2007).

2.3. State of The Arts Penelitian Biofiltrasi dengan Medium Alami

Medium alami seperti serpihan kayu dan serat kelapa, banyak digunakan dalam proses biofiltrasi bau dan amonia (Gabriel, *et al.*, 2007; Chen, *et al.*, 2008). Peneliti-peneliti tersebut telah menyimpulkan bahwa menjaga kelembaban medium dan mengatur fungsi sistem pengairan pada kolom biofilter, merupakan faktor penting untuk menjamin proses biofiltrasi dan aktivitas biologis dalam sistem biofilter dapat berlangsung dengan baik. Optimasi beberapa parameter operasi dari sistem biofilter dengan medium kompos telah dilakukan oleh beberapa peneliti, terutama untuk filtrasi senyawa penghasil bau, VOC, dan amonia, seperti yang diuraikan berikut.

2.3.1. Biofiltrasi Bau

Pandey, *et al.* (2007) telah mengkaji proses biofiltrasi senyawa penghasil bau (piridin) dengan menggunakan kolom biofiltrasi skala menengah dengan medium filter berupa campuran kompos dan limbah campuran kayu. Medium

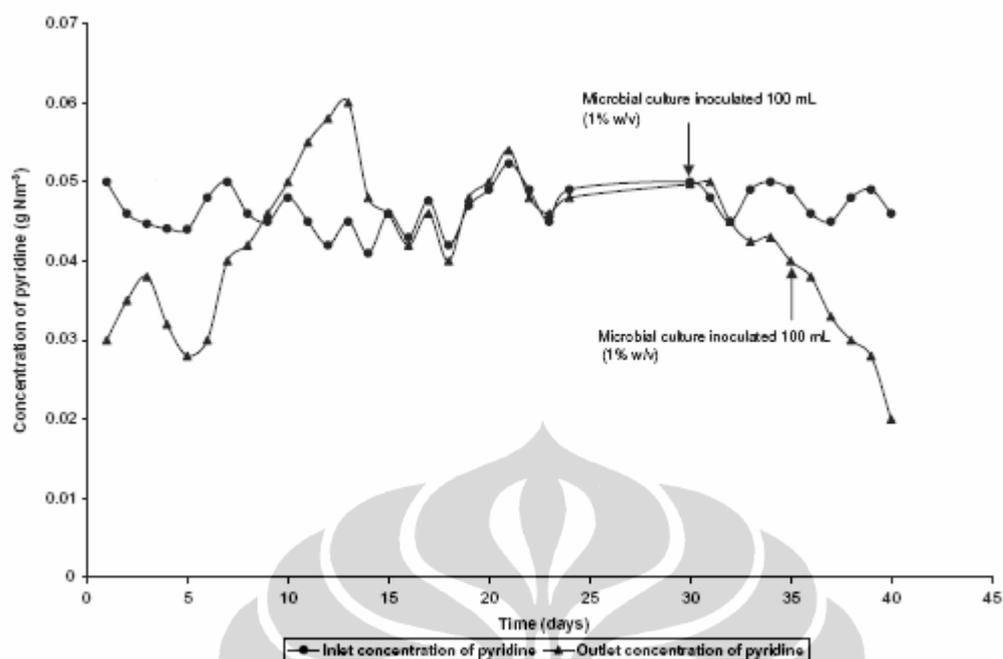
yang digunakan adalah medium basal untuk pertumbuhan mikroorganisme *Pseudomonas pseudoalcaligenes*-KPN. Karakteristik kompos yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.1. Data pada tabel menunjukkan bahwa kompos memiliki kapasitas retensi air yang baik, pH netral, dan nutrisi yang mencukupi untuk pertumbuhan mikroorganisme.

Tabel 2.1. Karakteristik Medium Kompos

Parameter	
Major elements	% Magnitude (w/w)
C	38.0
N	0.03
P	0.20
K	0.71
Ca	1.62
Mg	0.14
Na	0.01
Trace element	mg kg ⁻¹
Cu	44
Mn	360
Zn	70
Mean diameter	0.6 μm

Sumber: Pandey, *et al.*, 2006

Penelitian Pandey, *et al.* (2007) bertujuan mengkaji pengolahan biologis dari emisi gas yang mengandung piridin, menggunakan kolom biofilter skala laboratorium, dengan medium kompos dan serpihan kayu yang diperkaya dengan *Pseudomonas pseudoalcaligenes*-KPN. Evaluasi dilakukan terhadap kinerja awal dari biofilter dan kondisi operasi pada kondisi *steady* yang menghasilkan penghilangan piridin yang efektif, yaitu: EBRT, laju *loading* pada EBRT optimum, dan kelembaban optimum dari medium.



Gambar 2.4. Konsentrasi Piridin pada Inlet dan Outlet Kolom Biofilter

Sumber: Pandey, *et al.*, 2006

Seperti yang terlihat pada Gambar 2.4, pada tahap awal proses biofiltrasi dilakukan tanpa penambahan *Pseudomonas pseudoalcaligenes*-KPN, dengan konsentrasi piridin rata-rata dalam gas $0,05 \text{ g N m}^{-3}$ (15 ppm). Penurunan konsentrasi piridin selama 10 hari yang terjadi, dapat disebabkan karena adsorpsi piridin oleh medium filter. Setelah 12 hari, konsentrasi piridin meningkat hingga 16,5-18 ppm. Peningkatan ini dapat terjadi karena desorpsi dari piridin yang diadsorpsi oleh medium, akibat fluktuasi laju alir dan konsentrasi polutan gas. Penambahan 100 ml inokulum *Pseudomonas pseudoalcaligenes*-KPN ke dalam sistem biofilter dilakukan pada hari ke-30 dan 35. Pada hari ke-40 terjadi penurunan konsentrasi piridin pada outlet dari 14,7 ppm menjadi 6 ppm.

Mikroorganisme dalam biofilter menggunakan piridin sebagai sumber karbon, nitrogen, dan energi (Hunt, *et al.*, 1958; Watson dan Cain, 1975; Sims dan Sommers, 1986). Mikroorganisme tersebut juga membutuhkan nutrisi mineral, dan kompos memiliki kemampuan untuk mensuplainya. Pada penelitian ini, kompos yang diperkaya dengan *Pseudomonas pseudoalcaligenes*-KPN, memiliki potensi untuk mendegradasi piridin dalam 10 hari inokulasi. Periode aklimasi dari

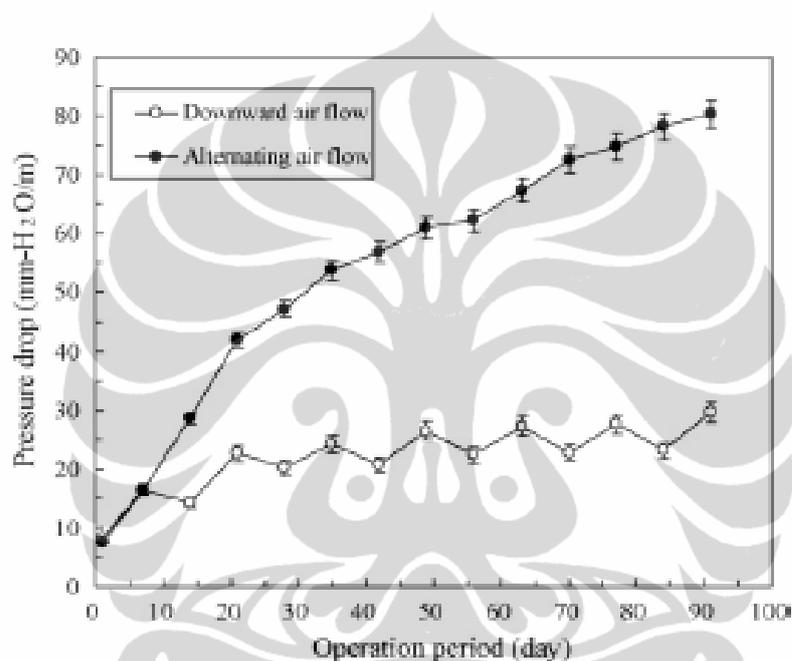
biofilter dengan medium kompos pada proses pengolahan uap gasolin, akan lebih cepat jika medium tersebut diinokulasi dengan kultur mikroorganisme yang ditumbuhkan dalam gasolin (Wright, *et al.*, 1997). Inokulasi mikroorganisme yang memiliki potensi untuk mendegradasi senyawa tertentu, dapat meningkatkan kecepatan proses *enrichment* dalam medium filter (Lesson dan Smith, 1997).

Pandey, *et al.*, memperoleh nilai EBRT optimal pada 28,5 detik dengan RE piridin sebesar 99%, dan tidak terjadi peningkatan yang signifikan pada RE untuk nilai EBRT yang lebih besar. Hasil ini lebih baik jika dibandingkan dengan sistem biofilter yang lain, yang dikembangkan oleh Devanny, *et al.*, (1999); Lu, *et al.*, (2001); Lee, *et al.*, (2002). *Loading* piridin bervariasi sesuai dengan perubahan konsentrasi piridin di inlet, pada nilai EBRT optimal (28,5 detik).

Kelembaban medium yang optimum diperlukan untuk menghasilkan proses adsorpsi piridin yang efektif, mencegah *clogging* pada medium, dan menjaga aktivitas mikroorganisme. Kelembaban medium 68% memberikan nilai RE yang maksimum (Pandey, *et al.*, 2007). Kelembaban yang lebih tinggi akan menyebabkan nutrisi di dalam medium terbawa oleh aliran gas. Hasil ini dapat dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan oleh Mendoza, *et al.*, (2003) untuk biofiltrasi bau dan VOC. Amonia (NH_3) yang dihasilkan selama proses biodegradasi piridin tidak meningkatkan pH medium, akibat kapasitas *buffering* yang dimiliki kompos, biotransformasi parsial dari NH_3 menjadi NO_2^- dan NO_3^- , serta adanya suplai medium cair ke dalam biofilter.

Penelitian yang dilakukan oleh Chung (2007) bertujuan untuk mengkaji karakteristik pengoperasian biofilter yaitu: RE, penurunan tekanan, dan reduksi emisi bioaerosol, serta keragaman komunitas bakteri dalam medium. Dalam penelitian ini digunakan kolom berskala kecil. Medium filter yang digunakan adalah hasil proses pengomposan dari 2 jenis material yang menjadi bahan baku kompos, dengan penambahan 10% (b/b) karbon granular teraktivasi. Medium biofilter kemudian diinokulasi dengan 5% lumpur yang berasal dari proses pengelolaan limbah cair. Jumlah awal bakteri pada medium berkisar antara $(3,2-8,6) \times 10^9$ CFU/g-kompos. Nutrien terdiri dari 4,08 g/l KH_2PO_4 dan 5,22 g/l K_2HPO_4 . pH medium filter dijaga netral dengan penambahan 2N NaOH atau HCl.

pH dari medium filter berada dalam rentang pH mendekati netral selama proses biofiltrasi berlangsung, yang merupakan salah satu faktor pendukung yang dapat diperoleh dari medium biofilter berbasis kompos. Kelembaban medium dijaga tetap antara 40-60%, untuk mempertahankan aktivitas mikroorganisme. Kompos merupakan medium filter yang memiliki kemampuan relatif mudah dalam mendegradasi polutan, jika dibandingkan dengan medium tanah gambut dan karbon teraktivasi (Langenhove, *et al.*, 1992).



Gambar 2.5. Penurunan Tekanan yang Terjadi dalam Kolom Biofilter

Sumber: Chung, 2007

Masalah yang harus diantisipasi dalam penggunaan kompos sebagai medium filter adalah besarnya penurunan tekanan yang dapat terjadi di dalam kolom. Dari Gambar 2.5 di atas dapat dilihat bahwa penurunan tekanan yang terjadi selama pengoperasian biofilter dengan aliran gas dari bagian atas kolom, memberikan hasil sesuai yang diharapkan sekaligus menunjukkan adanya dispersi yang baik di dalam sistem (Den, *et al.*, 1998). Untuk jenis aliran gas lainnya, walaupun penurunan tekanan yang terjadi lebih besar, namun tetap lebih baik daripada penelitian sejenis yang menggunakan medium tanah gambut, bebatuan,

fuyolit, dan keramik, dalam rentang kondisi operasi yang sama (Leson dan Winer, 1991; Lackey, *et al.*, 1998).

2.3.2. Biofiltrasi VOCs

Liu, *et al.* (2005), melakukan biofiltrasi gas VOC berupa campuran dari toluena, etil asetat, dan isopropanol, dalam kolom biofilter skala kecil. Medium filter yang digunakan terdiri dari campuran kompos, lava, dan tanah dengan kandungan humus tinggi. Medium kompos diinokulasi dengan campuran lumpur dari fasilitas pengelolaan limbah cair, yang telah dikultivasi dengan etil asetat dan toluena selama 20 hari. Pada penelitian ini, aliran gas masuk dijaga di atas 95%, dan kandungan air dalam medium antara 50-65%.

Penelitian Liu, *et al.* (2005), bertujuan untuk mengamati proses biofiltrasi campuran etil asetat, isopropanol, dan toluena, yang diemisikan dari industri dengan konsentrasi etil asetat dan alkohol yang relatif tinggi, menggunakan kompos sebagai medium filter, dan mengkaji interaksi antara ketiga senyawa tersebut di atas dalam proses biofiltrasi, serta menganalisis pengaruh pH, kandungan nitrogen, rekonstruksi medium filter agar diperoleh rentang nilai optimum dalam pengoperasian biofilter. Periode penelitian tersebut dibagi dalam 5 tahap, seperti terlihat dalam Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2. Periode Pengoperasian Kolom Biofilter

The operation stages of the biofilter			
Period	V ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$)	EBRT (s)	Pollutants
A	0.1	90	Ethyl acetate, isopropanol
B	0.1	90	Ethyl acetate, isopropanol, toluene
C	0.15	60	Ethyl acetate, isopropanol, toluene
D	0.2	45	Ethyl acetate, isopropanol, toluene
E	0.1	90	Ethyl acetate, isopropanol, toluene

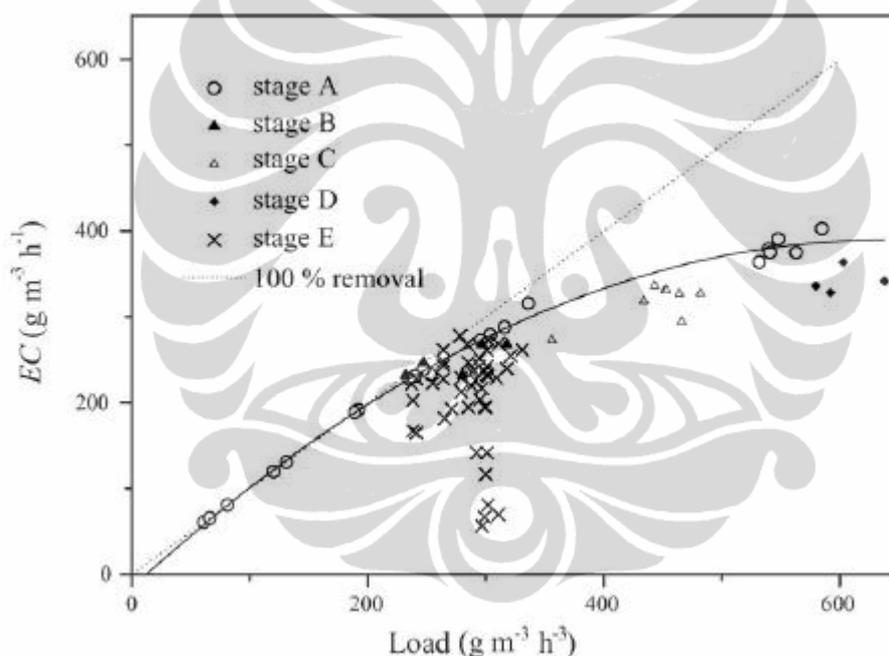
V , gas flow rate; EBRT, empty bed retention time.

Sumber: Liu, *et al.*, 2004

Liu, *et al.* (2005), menyimpulkan bahwa proses biofiltrasi dapat menghilangkan etil asetat dan isopropanol dengan sempurna, sedangkan RE untuk

toluena berkisar antara 40-100%, walaupun konsentrasi toluena pada gas inlet relatif lebih rendah. Interaksi antara proses biodegradasi etil asetat dan isopropanol, hanya dapat dilihat dari kinerja biofilter pada bagian atas kolom, karena proses penghilangan kedua polutan tersebut sebagian besar terjadi di bagian atas dari biofilter.

Gambar 2.6 di bawah ini memperlihatkan EC maksimum dari etil asetat pada bagian atas dari biofilter sebesar $350 \text{ g m}^{-3} \text{ medium h}^{-1}$. Pada periode E, nilai EC tidak sehomogen periode-periode sebelumnya, disebabkan oleh deteriorasi biofilter. EC isopropanol pada bagian teratas dari biofilter mencapai $150 \text{ g m}^{-3} \text{ medium h}^{-1}$, pada *loading* yang bervariasi antara $160\text{-}300 \text{ g m}^{-3} \text{ medium h}^{-1}$.



Gambar 2.6. EC Etil Asetat pada Periode Pengoperasian Biofilter yang Berbeda

Sumber: Liu, *et al.*, 2004

EC etil asetat pada periode A (tanpa isopropanol) sedikit lebih tinggi jika dibandingkan dengan periode lainnya untuk *loading* yang sama, menunjukkan adanya kompetisi di antara mikroorganisme dan di antara substrat, ketika isopropanol mengalami biodegradasi secara simultan dengan etil asetat. Kompetisi seperti disebutkan di atas juga dilaporkan oleh beberapa peneliti untuk biofiltrasi

campuran VOC (Deshusses, *et al.*, 1995; Aizpuru, *et al.*, 2001; Baltzis, *et al.*, 2001).

Konsentrasi VOC sepanjang ketinggian biofilter, memperlihatkan bahwa hanya sedikit atau tidak ada penghilangan toluena yang terjadi pada bagian dimana konsentrasi etil asetat dan isopropanol tinggi. Hal ini menunjukkan keberadaan etil asetat dan isopropanol dalam konsentrasi tinggi, dapat menghambat (inhibisi) biodegradasi dari toluena. Fenomena inhibisi yang sama juga ditemukan oleh beberapa peneliti (Deshusses, 1999; Mohsen dan Allen, 2000; Hwang, *et al.*, 2003).

Deteriorasi biofilter dapat disebabkan oleh kompaksi/*channeling* pada medium, asidifikasi medium, dan keterbatasan nutrien. Evaluasi faktor-faktor tersebut, dilakukan pada proses biofiltrasi periode E. Fenomena kompaksi/*channeling* pada medium dapat terjadi setelah biofilter beroperasi beberapa lama, yang disebabkan oleh arah aliran gas ataupun pembentukan biomassa dalam jumlah yang besar di dalam medium. Pencegahan dapat dilakukan dengan pendekatan secara fisik/mekanikal, kimia maupun biologis (Sorial, *et al.*, 1995; Webe dan Hartmans, 1996; Delhomenie, *et al.*, 2003).

Asidifikasi medium dapat dianalisis melalui pengaruh variasi pH medium. Keberadaan etanol dan etil asetat di dalam aliran gas, serta *loading* VOC yang tinggi, dapat menyebabkan munculnya produk intermediet seperti asetat dan asetaldehida dalam medium. Akumulasi dari produk samping ini akan menurunkan pH dan EC dari polutan. Proses lain yang juga dapat menyebabkan penurunan pH adalah nitrifikasi dari amonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) menjadi nitrat nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$). Mikroorganisme memanfaatkan kedua senyawa ini sebagai sumber nitrogen. Nitrifikasi terjadi pada kondisi aerobik. Jika medium filter dapat menetralkan proton yang dihasilkan dari proses biodegradasi dan nitrifikasi, pH akan konstan. Jika netralisasi tidak dapat dilakukan, medium filter akan mengalami asidifikasi.

Nitrogen merupakan salah satu nutrien yang menjadi bagian utama dari protein dan asam nukleik penyusun mikroorganisme. Beberapa penelitian telah mengkaji keterbatasan nitrogen sebagai nutrien dalam biofilter (Morgenroth, *et*

al., 1995; Gribbins dan Loehr, 1998; Delhomenie, *et al.*, 2001; Moe dan Irwine, 2001; Demeestere, *et al.*, 2002). Ketika kontaminan didegradasi, pembentukan ataupun keberadaan nitrogen adalah konstan menurut fungsi waktu dan posisi di dalam medium filter. Pertumbuhan sel mikroorganisme akan menghasilkan nitrogen organik. Pada proses kematian sel, nitrogen organik dikonversi menjadi amonia, dan kemudian dapat menguap. Nitrogen dalam bentuk gas dapat digunakan oleh mikroorganisme tertentu untuk pertumbuhannya, atau mengalami denitrifikasi menjadi gas nitrogen dan/atau amonia.

2.3.3. Biofiltrasi Amonia

Pagans, *et al.* (2005) melakukan biofiltrasi amonia dalam kolom biofiltrasi skala kecil dengan medium kompos. Karakteristik dari kompos yang digunakan sebagai medium dalam biofilter sebelum dan setelah pengoperasian dapat dilihat pada Tabel 2.3 di bawah ini.

Tabel 2.3. Karakteristik Medium Filter Sebelum dan Setelah Pengoperasian

Parameter	Initial	Final
Moisture content (% wb)	40.40	60.80
Organic matter content (% db)	59.69	48.57
pH	8.70	8.98
Electrical conductivity (mS cm^{-1})	3.33	3.95
Organic-N (% db)	3.46	3.28
$\text{NH}_4^+\text{-N}$ (% db)	0.33	0.93
C/N	8.72	6.40
Respirometric index ($\text{mg O}_2 \text{ g OM}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	1.03	1.82

wb: wet basis; db: dry basis.

Sumber: Pagans, *et al.*, 2005

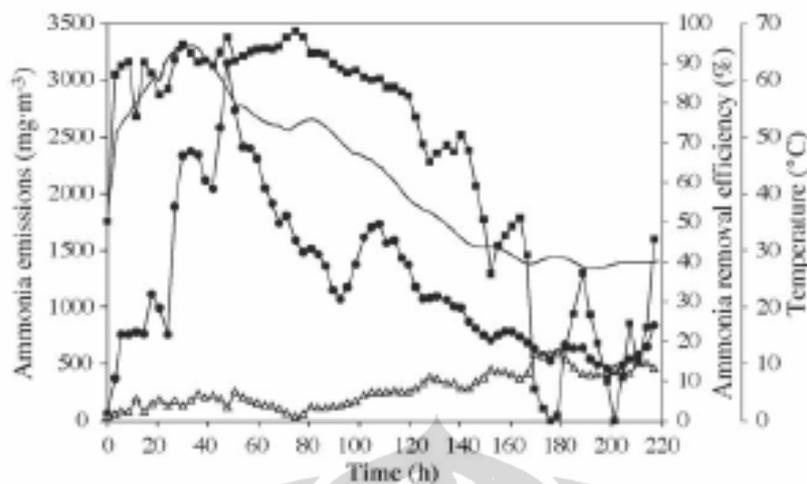
Tujuan penelitian Pagans, *et al.* (2005), adalah mengkaji efisiensi dari sistem biofilter dengan medium kompos untuk penghilangan amonia dari gas keluaran proses pengomposan material organik yang bersumber dari limbah padat rumah tangga, lumpur dari industri, dan hewan.

Dari Tabel 2.3 terlihat bahwa kelembaban (*Moisture Content/MC*) medium mengalami kenaikan dari 40,4% menjadi 60,8%, akibat adanya kelembaban yang diadsorp dari gas keluaran proses pengomposan yang umumnya

berada dalam kondisi jenuh. Nilai pH dan konduktivitas tidak mengalami perubahan yang signifikan. Dalam penelitian Pagans, *et al.* (2005) dan penelitian Liang, *et al.* (2000), konsentrasi $\text{NH}_4^+\text{-N}$ meningkat karena medium kompos mengadsorpsi amonia, dan nitrogen organik mengalami penurunan. Rasio C/N menurun selama proses biofiltrasi dari gas keluaran proses pengomposan. Aktivitas biologis yang diukur sebagai indeks respirometrik (*Respirometric Index/RI*) mengalami peningkatan, menunjukkan bahwa terdapat pertumbuhan biomassa aktif selama proses biofiltrasi dilakukan. Peningkatan RI dapat disebabkan oleh reaktivasi dari aktivitas biologis medium kompos itu sendiri, atau pembentukan koloni biologis aktif yang baru akibat proses biofiltrasi.

Penurunan tekanan yang terjadi dalam penelitian ini dapat disebabkan oleh *clogging* dan kompaksi dari material medium (partikel kompos), akibat dari kenaikan laju *loading* dan kelembaban medium. Penurunan tekanan yang terjadi tidak melebihi nilai kritisnya, dan fenomena *channeling* tidak terlihat selama proses berlangsung. Tidak ada periode *start-up* di dalam medium selama proses biofiltrasi dijalankan. Pada awal pengoperasian biofilter, medium akan menunjukkan kinerja yang baik sebagai adsorber (Devinny, *et al.*, 1999).

Untuk kompos yang berasal dari hewan, RE mengalami penurunan yang besar pada hari ke-4, seperti diperlihatkan dalam Gambar 2.7 (Pagans, *et al.*, 2005). Fenomena ini dapat disebabkan karena biofilter kompos telah mencapai kapasitas adsorpsi amonia yang maksimum selama proses biofiltrasi berjalan, kapasitas adsorpsi menjadi jenuh dan penghilangan amonia kemungkinan terjadi karena degradasi biologis. Hal tersebut dapat juga disebabkan adanya aktivitas mikroorganisme yang terhambat oleh kandungan amonia yang tinggi dalam gas ($>2000 \text{ mg.m}^{-3}$).



Gambar 2.7. RE Amonia pada Proses Pengomposan Biomassa Hewan

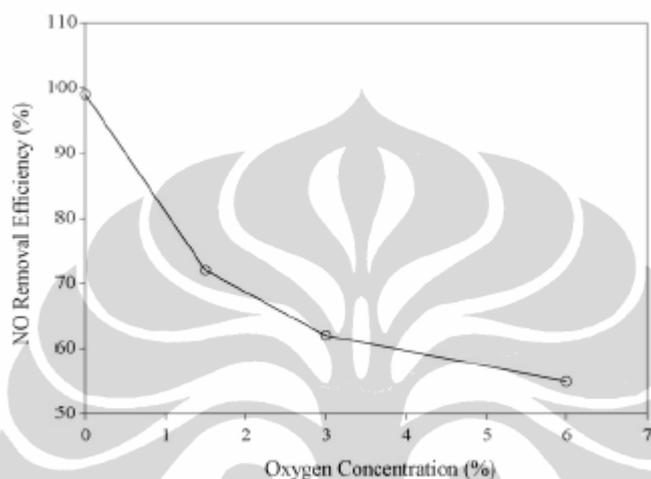
Sumber: Pagans, *et al.*, 2005

Toksifikasi dari biofilter dapat menyebabkan penurunan RE amonia pada gas buang yang mengandung $45\text{-}50 \text{ mg NH}_3 \text{ m}^{-3}$ (Hartikainen, *et al.*, 1996). Namun tidak ada efek toksisitas amonia pada aktivitas nitrifikasi dalam biofilter, bahkan untuk konsentrasi amonia mencapai $550 \text{ mg NH}_3 \text{ m}^{-3}$ (Smet, *et al.*, 2000). Studi pemodelan untuk biofiltrasi amonia, menyatakan bahwa konsentrasi yang tinggi dari amonia bebas di dalam medium dapat sangat menghambat aktivitas biologis dari biofilter (Baquerizo, *et al.*, 2004). Hal ini dapat mengakibatkan nilai EC yang rendah pada laju *loading* yang rendah.

2.3.4. Biofiltrasi NOx

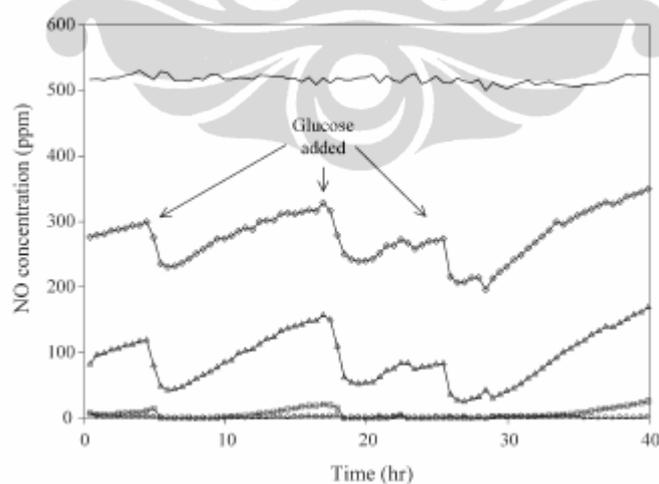
Yang, *et al.* (2007), telah mengkaji pengaruh konsentrasi O_2 , ketinggian kolom biofilter, konsentrasi NO, dan penambahan glukosa sebagai sumber karbon, terhadap efisiensi penghilangan NO dalam kolom biofilter skala menengah dengan medium berupa campuran kompos dan serpihan kayu (jenis *cyatheaceae*) sebagai *bulking agent*. Dalam penelitian tersebut, mikroorganisme yang digunakan berasal dari air limbah peternakan. Medium denitrifikasi, nutrisi anorganik, serta *buffer* sebagai kontrol pH dan kelembaban, digunakan sebagai faktor pendukung dalam pertumbuhan mikroorganisme.

Hasil penelitian Yang, *et al.* (2007), memperlihatkan bahwa oksigen dapat menghambat proses denitrifikasi oleh mikroorganisme di dalam biofilter (Gambar 2.8). Penurunan RE dari NO juga dapat disebabkan oleh defisiensi (kekurangan jumlah) mikroorganisme, serta penambahan glukosa sebagai sumber karbon (Gambar 2.9). Peningkatan konsentrasi NO dapat meningkatkan jumlah mikroorganisme pada kondisi nutrisi yang mencukupi.



Gambar 2.8. Pengaruh Konsentrasi O₂ terhadap RE NO
(Flow rate = 30 L/jam, NO = 200 ppm, dan penambahan glukosa = 1 g/hari)

Sumber: Yang, *et al.*, 2007



Gambar 2.9. Pengaruh Penambahan Glukosa
(Flow rate = 30 L/jam, dan anaerobik)

Sumber: Yang, *et al.*, 2007

Karakterisasi medium filter dilakukan sebagai dasar dalam mengkaji pertumbuhan mikroorganisme. Analisis dengan SEM menunjukkan bahwa pertumbuhan mikroorganisme pada medium filter telah ada, setelah kolom biofilter dioperasikan selama 6 hari. Mikroorganisme menggunakan NO sebagai elektron akseptor dalam proses metabolismenya. Yang, *et al.* (2007), juga mendapatkan hubungan linier antara pengaruh ketinggian kolom biofilter dengan $\ln([\text{NO}_{\text{out}}]/[\text{NO}_{\text{in}}])$, berdasarkan asumsi bahwa penghilangan NO dalam medium filter mengikuti kinetika orde satu (*first-order kinetics*) terhadap konsentrasi inlet NO.

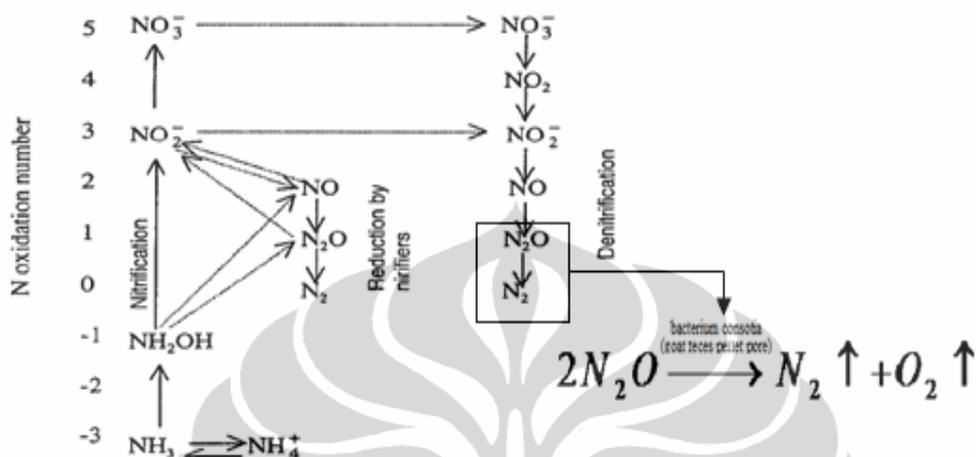
2.4. Metabolisme Nitrogen dalam Biofiltrasi

Transformasi mikroorganisme dari nitrogen ada 5 macam (Hudepohl, 1999), yaitu:

1. Respirasi atau denitrifikasi, penggunaan senyawa nitrogen atau ion-ion sebagai terminal akseptor nitrogen yang memiliki kegunaan yang sama dengan oksigen.
2. Nitrifikasi, penggunaan senyawa nitrogen sebagai sumber energi.
3. Asimilasi, penggabungan senyawa nitrogen atau ion-ion ke dalam jaringan sel baru.
4. Fiksasi, konversi nitrogen molekular menjadi amonia.
5. Produksi amonia melalui deaminasi amina.

Nitrogen merupakan nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan dalam jumlah besar, dan pada basis kering merupakan elemen ketiga yang paling banyak terdapat dalam jaringan. Sebagian besar spesies bakteri mampu mengasimilasi nitrogen pada berbagai jangkauan bilangan oksidasi, umumnya adalah -3 (NH_3 , NH_4^+) dan +5 (NO_3^-). Nitrogen yang tergabung ke dalam senyawa sel seperti protein dan asam nukleat selalu berada dalam bilangan oksidasi -3. Jika nitrogen yang tersedia berada dalam bilangan oksidasi di atas -3, maka biasanya akan tereduksi melalui reaksi katalitik enzim. Sebagian besar nitrogen yang berada di alam ditemukan dalam bilangan oksidasi -3 atau +5, dan kebanyakan literatur

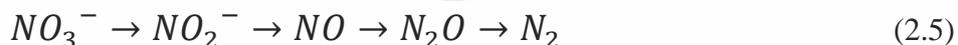
mengenai metabolisme nitrogen menggambarkan situasi ini. Gambar metabolisme nitrogen secara keseluruhan yang menunjukkan titik dimana nitrifikasi dan denitrifikasi saling berhubungan dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10. Jalur Metabolisme Umum Nitrogen

Sumber: Hudepohl, 1999

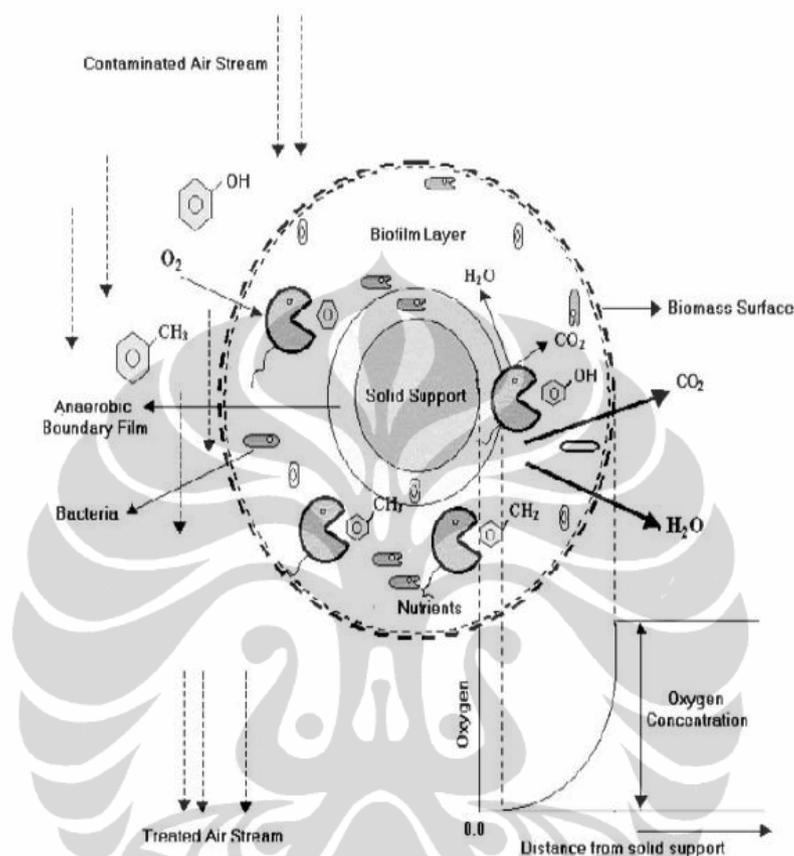
Denitrifikasi, tidak seperti reduksi asimilatif nitrogen, dilakukan oleh sejumlah bakteri tertentu. Reaksi yang terlibat pada proses denitrifikasi masih belum dapat dimengerti sepenuhnya, namun NO_2^- , N_2O , dan NO telah diidentifikasi sebagai intermediet pada beberapa penelitian (Barnes, Apel, dan Barrett, 1995). Tahap reaksi reduksi dapat dilihat pada persamaan berikut:



Mikroorganisme yang terkandung dalam kompos dan medium filter organik lainnya membutuhkan rentang jumlah nutrisi tertentu untuk pertumbuhan dan aktivitas untuk melakukan biodegradasi polutan yang mengalir pada biofilter. Nutrien tersebut secara alami terdapat di dalam medium filter organik, tetapi lebih baik juga ditambahkan oleh nutrisi sintetis atau inert pada medium filter.

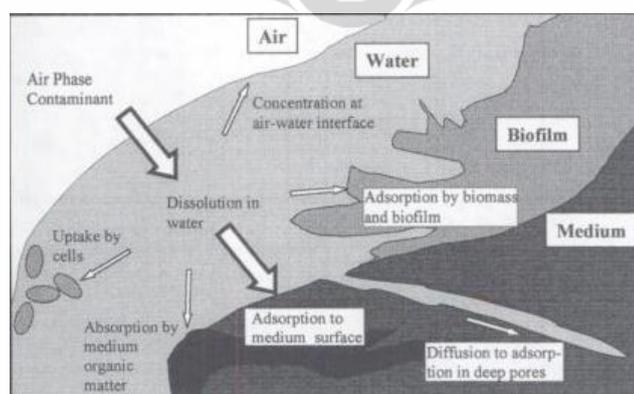
Pada penggunaan biofilter dengan medium kompos, kontaminan dari gas akan berdifusi ke dalam pori-pori partikel kompos, terlarut ke dalam lapisan

biofilm, teradsorpsi pada fraksi organik dan inorganik dari kompos tersebut, kemudian terbiodegradasi akibat bakteri kompos aktif di dalamnya, serta terperangkap di sekitar partikel kompos (Pandey, 2004), seperti terlihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Skema Proses Biodegradasi Kontaminan oleh Bakteri di *Biofilm*

Sumber: Pandey, 2004



Gambar 2.12. Proses Adsorpsi pada Biofilter

Sumber: Devinyinny *et al.*, 1999

Gambar 2.12 (Devinny *et al.*, 1999) menggambarkan proses yang terjadi dalam medium filter ketika dialiri kontaminan. Pada proses ini terjadi kontak antara kontaminan sebagai fasa gas, permukaan medium filter (*biofilm*) sebagai fasa cair, dan partikel padatan medium sebagai fasa padat. Transformasi kontaminan dari fasa gas ke *biofilm* dan partikel kompos adalah langkah dasar dari degradasi terhadap kontaminan. Molekul kontaminan dengan mudah terlarut di fasa cair dan didegradasi oleh mikroorganismenya tetapi juga dapat diadsorpsi oleh permukaan medium filter.

2.5. Model Biofiltrasi

Model-model yang telah ada umumnya didasarkan pada asumsi kondisi operasi yang dikaji (*steady-state* atau *transient*), dan mekanisme perpindahan yang terjadi pada fasa-fasa yang ada dalam sistem biofilter, apakah difusi, dispersi, adsorpsi, atau yang lainnya. Model tersebut juga harus mempertimbangkan aktivitas mikroorganismenya sebagai penyebab utama dari reduksi polutan (Delhomenie *et al.*, 2008).

Beberapa faktor penting yang mempengaruhi kinerja dari sistem biofilter adalah perpindahan massa eksternal, proses difusi, dan kinetika biodegradasi. Pemahaman terhadap faktor-faktor di atas, penting terutama dalam meningkatkan kinerja dan desain dari jenis bioreaktor yang digunakan (Kim dan Deshusses, 2005). Beberapa peneliti telah berusaha mengkaji hal ini, antara lain Kirchner, *et al.*, (1992), Barton, *et al.*, (1999), Picioeanu, *et al.*, (2000), Kim dan Deshusses, (2003), serta Kan dan Deshusses, (2006).

2.5.1. Model Biosorpsi

Beberapa model telah digunakan untuk menjelaskan data eksperimen dari proses adsorpsi pada *biofilm*. Model adsorpsi Langmuir dan Freundlich adalah yang paling sering digunakan (Lin, *et al.*, 2009). Model Langmuir menggunakan asumsi sebagai berikut:

- Permukaan adsorben seragam, sehingga seluruh situs aktif adsorpsi bersifat ekuivalen.
- Tidak ada interaksi antara molekul-molekul yang teradsorp.
- Seluruh proses adsorpsi terjadi menurut mekanisme yang sama.
- Pada kondisi adsorpsi yang maksimum, hanya terbentuk lapisan tunggal: molekul tidak teradsorpsi di atas molekul lain yang telah lebih dahulu teradsorp, melainkan hanya pada permukaan adsorben yang kosong.

Pendekatan Langmuir seperti ditunjukkan dalam Pers. 2.5., cukup baik untuk menggambarkan proses adsorpsi lapisan tunggal (*monolayer*) pada permukaan dengan situs aktif yang identik. Model adsorpsi Langmuir merupakan model adsorpsi isotermis yang dikenal karena simplisitas dan kemampuannya untuk mengadopsi data-data eksperimen (Lin, *et al.*, 2009).

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.6)$$

dimana:

q_e : konsentrasi adsorben pada keadaan setimbang, g/kg

q_m : kapasitas adsorpsi *biofilm*, g/kg

K_L : konstanta Langmuir, m³/g

C_e : konsentrasi adsorben, g/m³

Disamping menggunakan model adsorpsi di atas, Olgun dan Atar (2009) juga menggunakan model persamaan isotermis tergeneralisasi dalam persamaan berikut ini:

$$\ln \left[\frac{q_{\max}}{q_e} - 1 \right] = \ln K - n \ln C_e \quad (2.7)$$

2.5.2. Model Biodegradasi

Model kinetika biodegradasi merupakan inti dari pemodelan pada sistem biofilter. Delhomenie, *et al.* (2008) telah menyusun model kinetika biodegradasi untuk polutan gas metana ataupun toluena. Untuk sistem biofilter pada kondisi

steady-state kontinyu dan tanpa memperhitungkan perubahan biomassa, model kinetika biodegradasi berdasarkan pada kinetika enzimatik, yaitu makrokinetika Michaelis-Menten (Ottengraph dan Van den Oever, 1983; Dammann, *et al.*, 1999; Wani, *et al.*, 1999; Lim, 2001; Gebert, *et al.*, 2003). Untuk sistem biofilter pada kondisi *steady-state* ataupun *transient*, model kinetika biodegradasi berdasarkan pada laju pertumbuhan mikroorganisme, yaitu mikrokinetika Monod atau Haldane (Shareefdeen dan Baltzis, 1994; Tang dan Hwang, 1997; Baltzis, *et al.*, 1997; Arcangeli dan Arvin, 1999; Schwartz, *et al.*, 2001; Jorio, *et al.*, 2005).

Parameter kinetika yang terlibat dalam model dapat ditentukan melalui eksperimen, dengan beberapa metode. Metode yang paling banyak digunakan adalah dengan mengisolasi mikroorganisme dari medium filter kemudian melarutkannya dalam medium pertumbuhan cair (Ottengraph dan Van den Oever, 1983; Oh, *et al.*, 1994; Smith dan McCarty, 1997; Tang, *et al.*, 1997; Arcangeli dan Arvin, 1999; Acuna, *et al.*, 1999; Schirmer, *et al.*, 1999; Jorio, *et al.*, 2005; Lin dan Cheng, 2007). Kelemahan dari metode ini adalah diperlukan *pretreatment* untuk pengkondisian biomassa, tidak menunjukkan pertumbuhan sesungguhnya dari konsorsium mikroorganisme yang saling berinteraksi dalam medium, dan tidak memperlihatkan keterbatasan dari aspek perpindahan massa yang terjadi dalam sistem biofilter. Salah satu metode baru dalam penentuan parameter kinetika adalah melalui ekstraksi sampel biomassa dari medium filter, seperti yang dilakukan oleh Delhomenie, *et al.* (2009).

Kim, *et al.* (2007) serta Dumont, *et al.* (2008) menggunakan model biokinetika degradasi berdasarkan persamaan Michaelis-Menten termodifikasi (Pers. 2.4). Konstanta kinetika yang diperoleh dapat digunakan untuk membandingkan karakteristik dan kinerja dari sistem biologis yang berbeda. Yang, *et al.* (2008) membuat beberapa pendekatan sehingga persamaan Monod dapat dimodifikasi dalam bentuk model saturasi menjadi Pers. 2.8.

$$\eta = \frac{\eta_{max}t}{K_t+t} \quad (2.8)$$

Persamaan ini dapat digunakan untuk mendeskripsikan secara matematis kinetika dan proses perpindahan di dalam kolom biofilter.

Gambar 2.13 bertujuan untuk memperjelas posisi dari riset yang akan dilakukan terhadap perkembangan penelitian biofiltrasi, dalam rangka mereduksi emisi NO_x, khususnya N₂O.

Emisi Gas	N ₂ O					Riset ini	
	NO		Chen, 2006		Lee, 2001 Wang, 2006	Yang, 2007	
	VOCs	Delhomenie, 2008	Prado, 2005 Turan, 2009		Zilli, 1993 Sene, 2002 Aizpure, 2003	Kardono, 1995 Morgenroth, 1995 Delhomenie, 2002 Liu, 2002 Dehganzadeh, 2005 ; Liu, 2005 Rene, 2005	
	H ₂ S	Chung, 1996 Chung, 2000 Hirai, 2001 Dumont, 2008 Kim, 2008		Hirai, 1990	Chung, 2004	Barona, 2005	
	Ammonia	Chung, 2000 Hirai, 2001 Kim, 2007		Hartikainen, 1996 Lee, 2002	Hong dan Park, 2004	Kim, 2000 Gabriel, 2007	Liang, 2000 Smet, 2000 Demeestere, 2002 Pagans, 2005
	Emisi Bau				Nicolai dan Janni, 2001 Chen, 2008		Onde Lttighus, 1997 Pandey, 2007 Chung, 2007
		Sintetik	Batuan	Tanah	Kayu	ampas tebu, serat kelapa, act. carbon	KOMPOS
		Jenis medium filter →					

Gambar 2.13. Posisi Riset terhadap Perkembangan Penelitian Biofiltrasi

Tabulasi dari studi literatur yang dilakukan telah dirangkum dalam Tabel 2.4, yang dapat dilihat di bawah ini dan pada halaman-halaman selanjutnya.

Tabel 2.4. Rangkuman Hasil Studi Literatur

No.	Peneliti	Ruang Lingkup		Deskripsi / Hasil
		Gas	Medium	
1	Delhomenie, <i>et al.</i> 2008	VOCs	Sintetik	Model kinetika biodegradasi untuk polutan gas metana dan toluena.
2	Chung, <i>et al.</i> 1996	H ₂ S	Sintetik	Biofiltrasi H ₂ S dengan medium sintetik.
3	Chung, <i>et al.</i> 2000	H ₂ S Amonia	Sintetik	Biofiltrasi H ₂ S dan amonia secara simultan dengan medium sintetik yang telah diimmobilisasi dengan mikroorganisme.
4	Hirai, <i>et al.</i> 2001	H ₂ S Amonia	Sintetik (cristobalite)	Perbandingan karakteristik 4 jenis medium inorganik dalam biofiltrasi H ₂ S dan amonia.
5	Dumont, <i>et al.</i> 2008	H ₂ S	Sintetik (UP 20)	Biofiltrasi H ₂ S dengan medium sintetik UP 20 yang berbentuk silinder, dengan komponen utama kalsium karbonat dan senyawa organik sebagai pengikat.
6	Kim, <i>et al.</i> 2008	H ₂ S	Sintetik (sodium alginate dan PVA)	Proses biofiltrasi polutan gas dalam aliran udara pada kolom berskala kecil dengan biomedium (mikroorganisme) yang diimmobilisasi pada sodium alginate dan PVA.
7	Kim, <i>et al.</i> 2007	Amonia	Sintetik	Analisis biokinetika yang dapat digunakan untuk membandingkan karakteristik dan kemampuan dari sistem biologis yang diimmobilisasi, dengan sumber, medium filter, dan konfigurasi reaktor yang berbeda.
8	Taghipour, <i>et al.</i> 2007	Amonia	Sintetik + Alami	Proses biofiltrasi dari gas model yang mengandung amonia dengan gabungan medium alami dan sintetik, berupa campuran kompos, lumpur, dan kepingan plastik.

Tabel 2.4. Rangkuman Hasil Studi Literatur (lanjutan)

No.	Peneliti	Ruang Lingkup		Deskripsi / Hasil
		Gas	Medium	
9	Lee, <i>et al.</i> 2001	NO	Alami	Pengaruh oksigen terhadap populasi mikroorganisme dalam sistem biofilter yang mereduksi polutan NO.
10	Chen, <i>et al.</i> 2006	NO	Alami (batuan lava dan busa karbon)	Biofiltrasi NO dengan medium berupa campuran batuan lava dan busa karbon dengan ukuran pori yang berbeda. Evaluasi dilakukan terhadap RE, pressure drop, dan pH.
11	Wang, <i>et al.</i> 2006	NO	Alami	Pengaruh inkubasi dan suhu penyimpanan pada proses biofiltrasi NO.
12	Zilli, <i>et al.</i> 1993	VOCs	Alami	Proses biofiltrasi fenol dari polutan gas dengan mikroorganisme <i>Pseudomonas putida</i> .
13	Sene, <i>et al.</i> 2002	VOCs	Alami (bagas)	Kajian pada bagas sebagai medium alternatif dalam biofiltrasi benzena.
14	Aizpure, <i>et al.</i> 2003	VOCs	Alami	Membuktikan adanya kompetisi di antara mikroorganisme dan di antara substrat, biofiltrasi campuran VOC.
15	Prado, <i>et al.</i> 2005	VOCs	Alami (batuan lava)	Biofiltrasi metanol dalam fasa gas dengan medium batuan lava.
16	Turan, <i>et al.</i> 2009	VOCs	Alami - natural zeolite - exp. perlite - pumice - exp. vermiculite	Material alami dapat mereduksi emisi VOCs secara signifikan.
17	Hirai, <i>et al.</i> 1990	H ₂ S	Alami (tanah gambut)	Biofiltrasi amonia menggunakan medium tanah gambut, dengan dan tanpa penambahan bakteri nitrifikasi.
18	Lee, <i>et al.</i> 2002	Amonia	Alami (cacing tanah)	Pengaruh keberadaan hidrogen sulfida pada proses biofiltrasi amonia.

Tabel 2.4. Rangkuman Hasil Studi Literatur (lanjutan)

No.	Peneliti	Ruang Lingkup		Deskripsi / Hasil
		Gas	Medium	
19	Chung, <i>et al.</i> 2004	H ₂ S	Alami (karbon teraktivasi)	Material padatan yang aktif secara biologis lebih banyak digunakan sebagai medium dalam biofiltrasi, dengan tambahan material pendukung yang berfungsi mengurangi penurunan tekanan.
20	Hartikainen, <i>et al.</i> 1996	Amonia	Alami (tanah gambut)	Toksifikasi dari biofilter dapat menyebabkan penurunan RE amonia pada gas buang yang mengandung 45-50 mg NH ₃ m ⁻³
21	Kim, <i>et al.</i> 2000	Amonia	Alami (mikroorganisme laut)	Proses biofiltrasi dari polutan amonia dengan konsentrasi tinggi, melalui pemanfaatan mikroorganisme laut.
22	Hong dan Park 2004	Amonia	Alami (serpihan kayu)	Biofiltrasi merupakan teknik pereduksi bau yang telah diaplikasikan dalam mereduksi emisi yang berasal dari proses pengomposan.
23	Gabriel, <i>et al.</i> 2007	Amonia	Alami (sabut kelapa)	Kandungan air di dalam medium akan mempengaruhi daya adsorpsi serta mendukung pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme.
24	Nicolai dan Janni 2001	Bau	Alami (serpihan kayu)	Kompos dapat dicampur dengan bulking agent untuk menghindari penurunan tekanan, clogging dan channeling aliran, dan meningkatkan durabilitas. Peneliti merekomendasikan medium filter yang terdiri dari campuran serpihan kayu dan kompos dengan komposisi 70:30% hingga 50:50% berat.
25	Chen, <i>et al.</i> 2008	Bau	Alami (serpihan kayu)	Menggunakan analisis statistik ANOVA untuk menguji faktor-faktor operasi dalam penelitian, yaitu jenis medium filter yang berbasis serpihan kayu, kelembaban medium, dan EBRT.

Tabel 2.4. Rangkuman Hasil Studi Literatur (lanjutan)

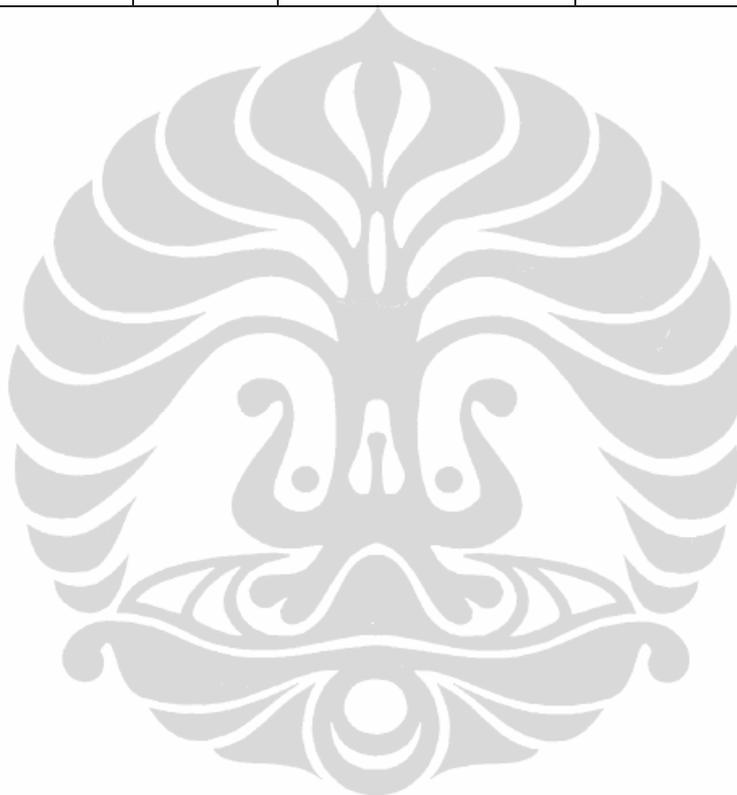
No.	Peneliti	Ruang Lingkup		Deskripsi / Hasil
		Gas	Medium	
26	Kardono, <i>et al.</i> 1995	VOCs	Kompos	Sistem biofilter dengan medium kompos, terbukti efektif dalam mengatasi polutan benzena.
27	Morgenroth, <i>et al.</i> 1995	VOCs	Kompos	Adanya keterbatasan nitrogen sebagai nutrisi dalam biofiltrasi heksana dengan medium kompos.
28	Delhomenie, <i>et al.</i> 2002	VOCs	Kompos	Pada saat kontaminan didegradasi, pembentukan ataupun keberadaan nitrogen adalah konstan menurut fungsi waktu dan posisi di dalam medium filter.
29	Liu, <i>et al.</i> 2002	VOCs	Kompos	Pengaruh kelembaban medium pada proses biofiltrasi etil asetat dan toluena.
30	Dehganzadeh, <i>et al.</i> 2005	VOCs	Kompos	Medium kompos juga memiliki kekurangan, yaitu terjadinya <i>back-pressure</i> dan demineralisasi dari mikroorganisme.
31	Liu, <i>et al.</i> 2005	VOCs	Kompos	Mengamati proses biofiltrasi campuran etil asetat, isopropanol, dan toluena, yang diemisikan dari industri dengan konsentrasi etil asetat dan alkohol yang relatif tinggi, menggunakan kompos sebagai medium filter, dan mengkaji interaksi antara ketiga senyawa tersebut di atas dalam proses biofiltrasi.
32	Rene, <i>et al.</i> 2005	VOCs	Kompos	Efektivitas, performansi, dan stabilitas biofilter sangat dipengaruhi oleh aktivitas mikroorganisme, jenis pengayaan (<i>enrichment</i>) terhadap mikroorganisme yang dilakukan selama proses inokulasi, dan jenis medium yang digunakan.

Tabel 2.4. Rangkuman Hasil Studi Literatur (lanjutan)

No.	Peneliti	Ruang Lingkup		Deskripsi / Hasil
		Gas	Medium	
33	Barona, <i>et al.</i> 2005	H ₂ S	Kompos	Pemanfaatan medium kompos dalam biofiltrasi H ₂ S.
34	Liang, <i>et al.</i> 2000	Amonia	Kompos	Konsentrasi NH ₄ ⁺ -N meningkat karena medium kompos mengadsorp amonia, dan nitrogen organik mengalami penurunan. Rasio C/N menurun selama proses biofiltrasi dari gas keluaran proses pengomposan.
35	Smet, <i>et al.</i> 2000	Amonia	Kompos	Tidak ada efek toksisitas amonia pada aktivitas nitrifikasi dalam biofilter, bahkan untuk konsentrasi amonia mencapai 550 mg NH ₃ m ⁻³ .
36	Demeestere, <i>et al.</i> 2002	Amonia	Kompos	Proses regenerasi kompos sebagai medium filter, akibat adanya keterbatasan nutrien nitrogen.
37	Pagans, <i>et al.</i> 2005	Amonia	Kompos	Mengkaji efisiensi dari sistem biofilter dengan medium kompos untuk penghilangan amonia dari gas keluaran proses komposting material organik yang bersumber dari limbah padat rumah tangga, lumpur dari industri, dan hewan.
38	Onde Lttighus, <i>et al.</i> 1997	Bau	Kompos	Kompos digunakan dalam bentuk pellet sebagai medium pada biofiltrasi bau.
39	Pandey, <i>et al.</i> 2007	Bau	Kompos	Pada biofiltrasi piridin, diperoleh nilai EBRT optimal pada 28,5s dengan RE piridin sebesar 99%, dan tidak terjadi peningkatan yang signifikan pada RE untuk nilai EBRT yang lebih besar.
40	Chung, 2007	Bau	Kompos	Mengkaji karakteristik pengoperasian biofilter yaitu: RE, penurunan tekanan, dan reduksi emisi bioaerosol, serta keragaman komunitas bakteri dalam medium.

Tabel 2.4. Rangkuman Hasil Studi Literatur (lanjutan)

No.	Peneliti	Ruang Lingkup		Deskripsi / Hasil
		Gas	Medium	
41	Yang, <i>et al.</i> 2007	NO	Kompos	Oksigen dapat menghambat proses denitrifikasi oleh mikroorganisme di dalam biofilter, dan penurunan RE dari NO dapat disebabkan oleh defisiensi mikroorganisme, serta penambahan glukosa sebagai sumber karbon.



BAB 3

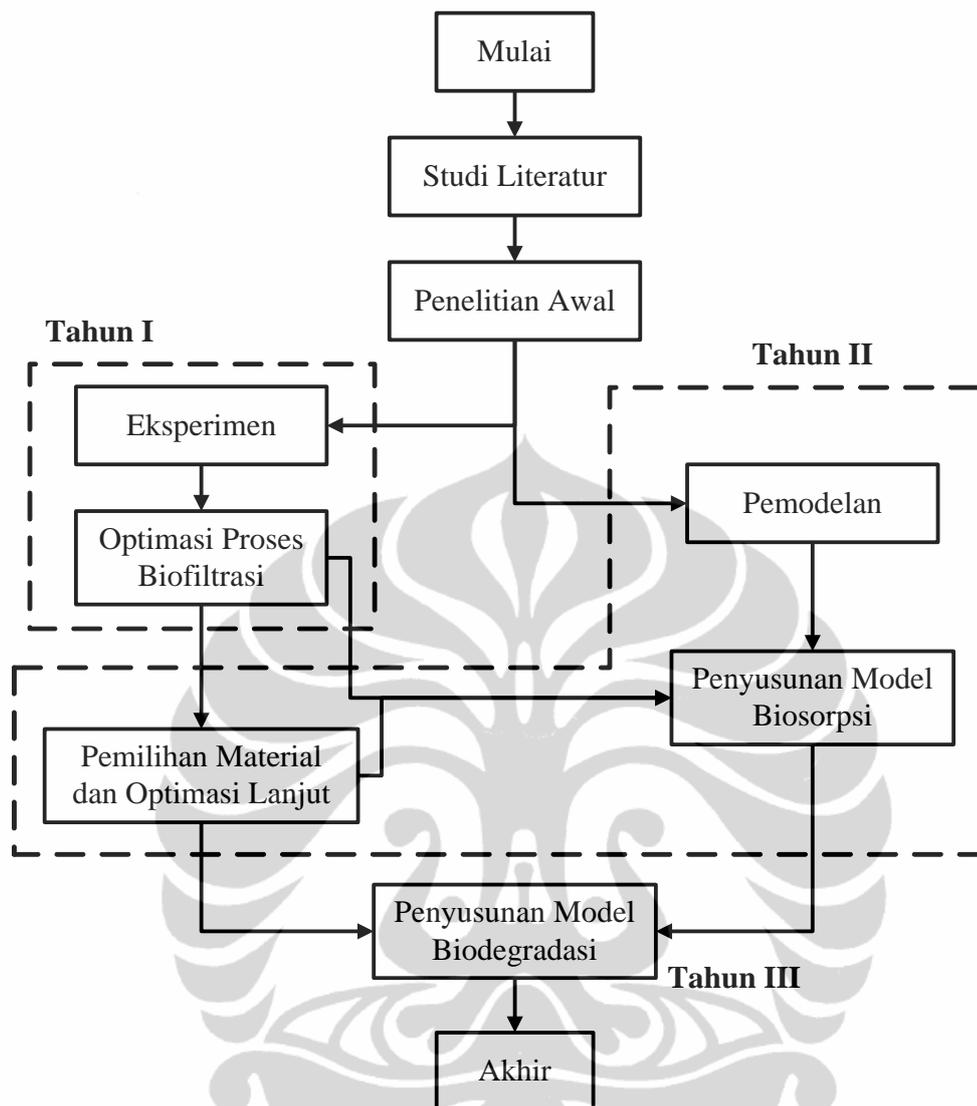
METODE PENELITIAN

3.1. Kerangka Penelitian

Penelitian biofiltrasi ini dapat dibagi ke dalam 5 (lima) tahapan sebagai berikut:

1. Perancangan sistem biofilter
2. Preparasi medium filter
3. Optimasi proses biofiltrasi
4. Pemilihan material terbaik dan tahap optimasi lanjut
5. Penyusunan model biosorpsi dan biodegradasi

Penelitian dilakukan di Lab. Rekayasa Bioproses (RBP) dan Lab. Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (RPKA), Departemen Teknik Kimia - Universitas Indonesia (DTK-UI). Kerangka penelitian selama 3 (tiga) tahun ditunjukkan oleh Gambar 3.1 berikut:



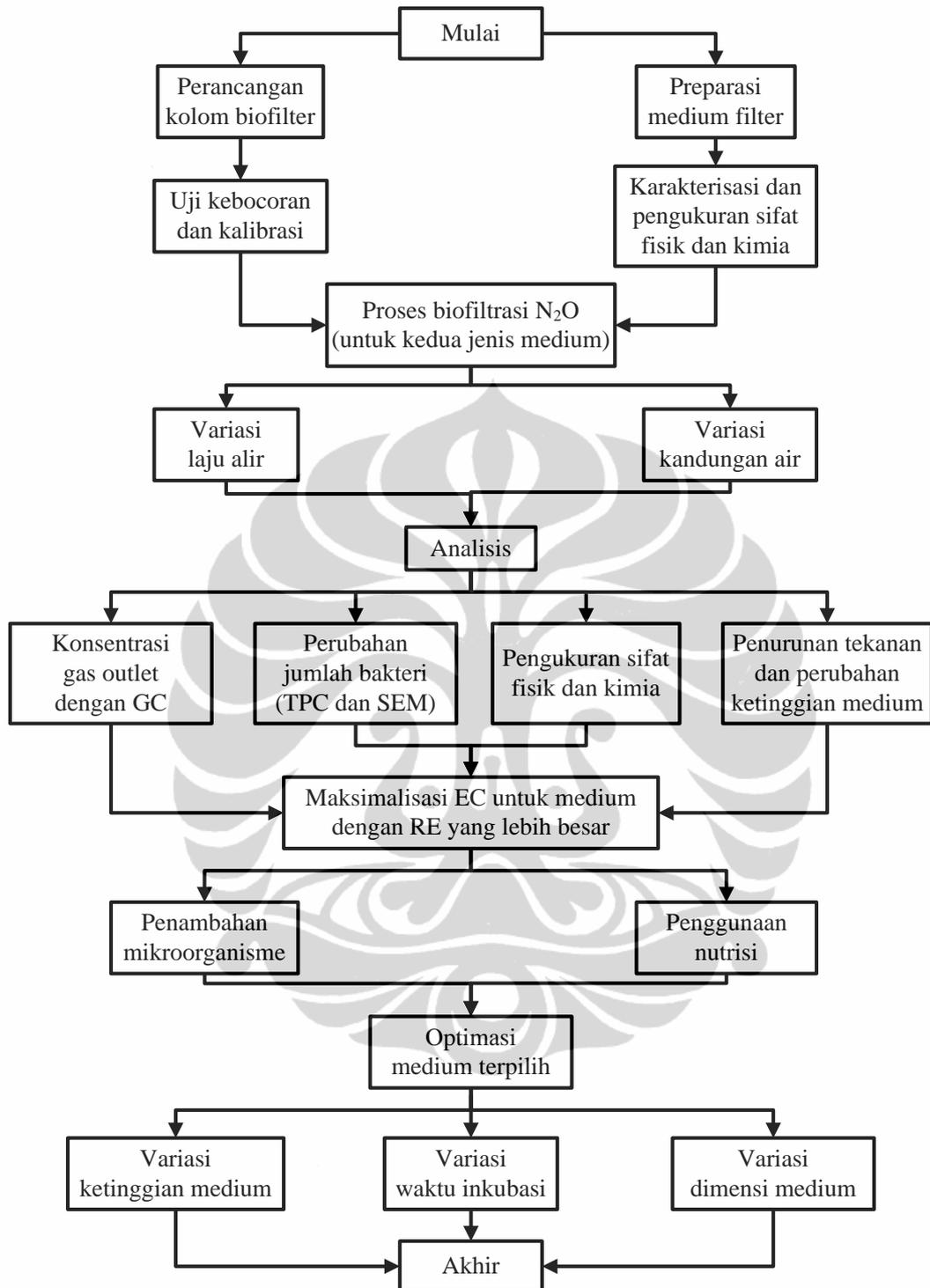
Gambar 3.1. Kerangka Penelitian Biofiltrasi N₂O

Tahap pertama penelitian adalah perancangan sistem biofilter dengan desain sesuai kebutuhan penelitian berdasarkan informasi yang diperoleh dari hasil studi literatur. Pada penelitian ini digunakan 2 sistem aliran biofilter yaitu sistem aliran sirkulasi dan kontinyu dengan menggunakan *mass flow regulator* yang mempunyai kemampuan mengatur laju alir pada rentang tertentu. Laju alir dari tabung gas N₂O diatur seminimal mungkin sehingga waktu tinggal gas N₂O pada medium filter dapat lebih lama, dan konsentrasi gas N₂O yang teradsorpsi dan terdegradasi oleh medium filter menjadi lebih maksimal. Tahap berikutnya adalah preparasi kompos sebagai medium filter. Preparasi diawali dengan

pengeringan kotoran hewan (pupuk kandang), serta pembuatan kompos yang dilakukan di Sekolah Alam Indonesia - Ciganjur. Preparasi lanjutan dilakukan dengan mengeringkan dan menyeragamkan ukuran kompos.

Tahap ketiga adalah optimasi proses biofiltrasi dengan mengkaji kemampuan sistem biofilter dalam menurunkan konsentrasi gas N_2O . Optimasi dilakukan dengan memperhatikan beberapa parameter operasi seperti laju alir gas N_2O dan pengaruh penambahan kandungan air pada medium filter, terhadap daya adsorpsi dan degradasi biofilter. Sebelum tahapan ini dilakukan, perlu dilaksanakan pengujian kebocoran pada sistem biofilter serta kalibrasi konsentrasi gas N_2O . Gas yang keluar dari sistem biofilter, setiap jam dianalisis dengan *Gas Chromatograph* (GC). Analisis juga dilakukan terhadap medium kompos untuk mengetahui perubahan jumlah koloni bakteri yang ada di dalamnya dengan metode *Total Plate Count* (TPC). Hasil TPC dilengkapi dengan analisis perubahan morfologi permukaan medium kompos dengan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

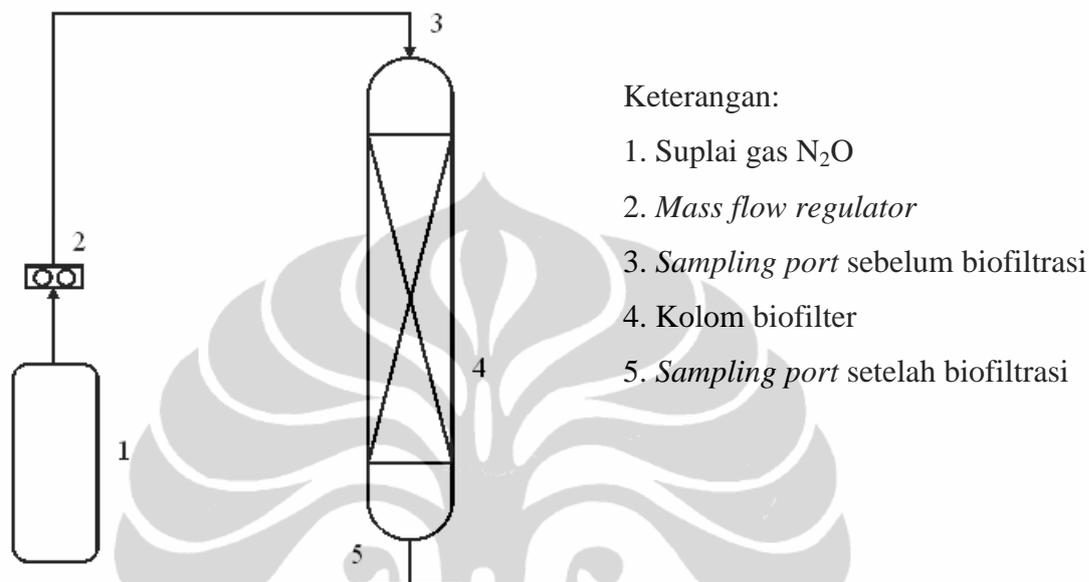
Pemilihan material yang dilakukan pada tahap berikutnya, didasarkan kepada medium filter yang memberikan nilai *Elimination Capacity* (EC) dari proses biofiltrasi N_2O yang lebih maksimal. Pada material terpilih dilakukan optimasi untuk meningkatkan nilai EC dan *Removal Efficiency* (RE) melalui penambahan bakteri, pemberian nutrisi, variasi kedalaman medium, variasi waktu inkubasi medium, serta variasi dimensi medium. Tahap akhir dari penelitian ini adalah penyusunan model biosorpsi dan biodegradasi dari proses biofiltrasi N_2O dengan medium kompos. Diagram alir penelitian untuk optimasi parameter operasi yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.2 di bawah ini:



Gambar 3.2. Diagram Alir Penelitian Optimasi Parameter Operasi

3.2. Perancangan Sistem Biofilter

Diagram skematik dari sistem biofilter yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.3. berikut:



Gambar 3.3. Diagram Skematik Biofilter Skala Laboratorium

Kolom biofilter terbuat dari *acrylic* dengan tinggi kolom 120 cm, diameter dalam dan diameter luar kolom berturut-turut 7,35 cm dan 8 cm. Sistem biofilter yang digunakan terdiri dari sumber gas polutan berupa campuran N₂O dan udara (15.000 ppm) di dalam sebuah tabung bertekanan, *mass flow regulator* sebagai pengatur laju alir gas N₂O yang masuk ke dalam kolom, serta kolom biofilter sebagai tempat terjadinya proses biofiltrasi. Setiap bagian dari sistem dihubungkan dengan perpipaan dari bahan *stainless steel 304*.

Model aliran yang digunakan pada sistem biofilter ini adalah *down-flow mode* (model aliran ke bawah). Model aliran ini dipilih untuk mempermudah kontrol terhadap kelembaban medium (Pagans, *et al*, 2005). Sistem biofiltrasi ini juga dilengkapi dengan 2 *sampling port* yang digunakan sebagai tempat pengambilan sampel yang masuk atau keluar kolom, dan 2 *port* yang diletakkan di bagian atas dan bawah kolom untuk memantau perubahan tekanan yang terjadi

selama proses biofiltrasi. Hasil perancangan sistem biofilter ditunjukkan oleh Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Hasil Perancangan Sistem Biofilter

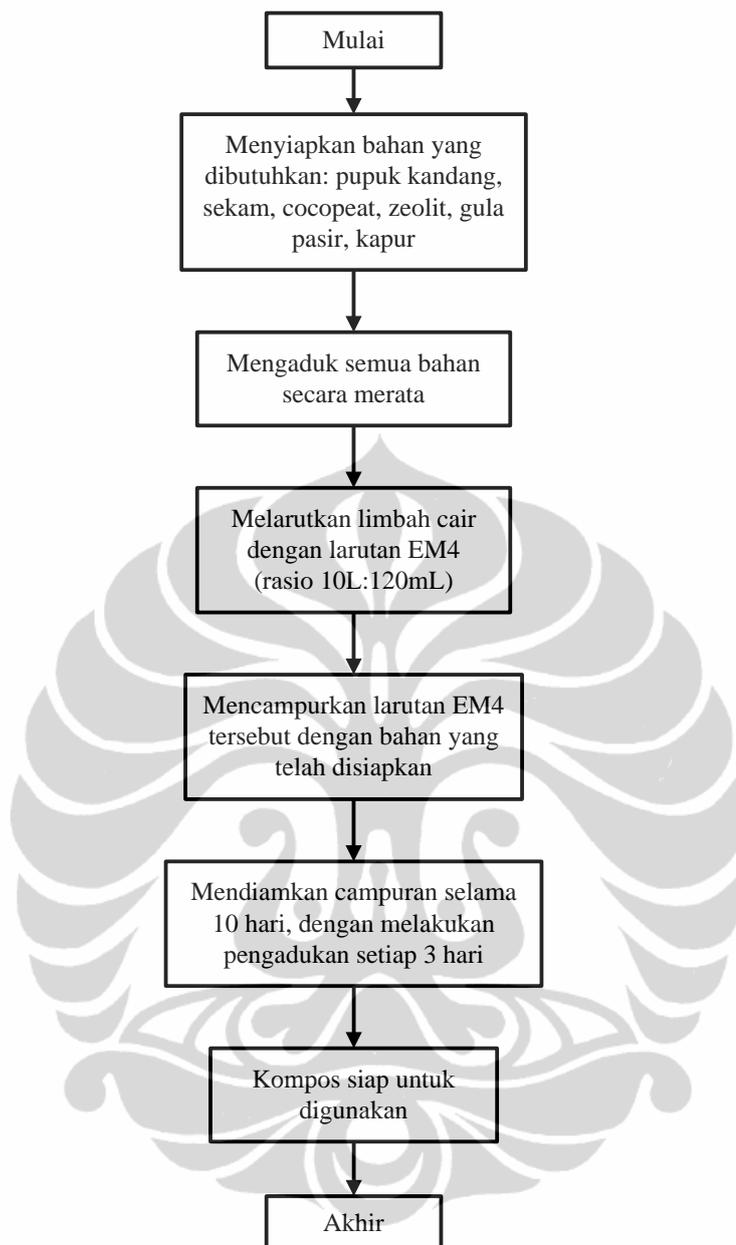
3.3. Deskripsi dan Preparasi Medium Filter

Medium filter yang digunakan dalam proses biofiltrasi ini adalah kompos. Berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan, pada penelitian ini dipilih dan digunakan 3 jenis medium filter. Pemilihan didasarkan kepada beberapa aspek, antara lain: keekonomisan, aksesibilitas, keselamatan dan kesehatan, serta karakteristik dari medium itu sendiri. Medium filter yang digunakan berasal dari 2 sumber yaitu dari peternakan sapi di Kelurahan Kukusan Depok, dan dari *Green Lab*. Sekolah Alam Indonesia (SAI), Ciganjur.

Dari peternakan sapi diperoleh medium berupa pupuk kandang, yang digunakan pada tahap awal penelitian untuk mengkaji kemampuan limbah organik peternakan (kotoran hewan) sebagai komponen utama kompos, dalam mereduksi

polutan gas N_2O . *Green Lab*. SAI memfasilitasi proses dan penyediaan bagi kedua jenis medium lainnya. Medium kedua berupa kompos yang memiliki basis bahan organik kotoran sapi, dengan sekam dan *cocopeat* (sabut kelapa yang telah dikeringkan dan dihancurkan) sebagai *bulking agent*. Medium jenis ketiga adalah kompos berbasis kotoran kambing yang dicampur dengan sekam dan *cocopeat* sebagai *bulking agent*.

Preparasi medium kompos dilakukan dalam 2 tahap. Untuk medium pupuk kandang, tahap pertama adalah proses pengeringan di udara terbuka selama 2 minggu untuk mengurangi kandungan air yang tinggi pada kotoran hewan. Untuk medium kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing, tahap pertama adalah proses pembuatan kompos (*composting*) yang dilakukan di *Green Lab*. Sekolah Alam Indonesia. Sumber bahan organik kompos yang digunakan berupa limbah peternakan (kotoran hewan). Selain limbah peternakan, bahan baku lainnya yang ditambahkan dalam proses pengomposan adalah sekam dan *cocopeat*, yang berfungsi sebagai *bulking agent*. Sekam dan *cocopeat* juga berperan dalam penyerapan kelebihan air yang sering terjadi pada proses pengomposan, serta membantu keseimbangan unsur hara makro yang ada di dalam kompos. Prosedur dan proses pembuatan kompos dapat dilihat pada Gambar 3.5. dan 3.6.

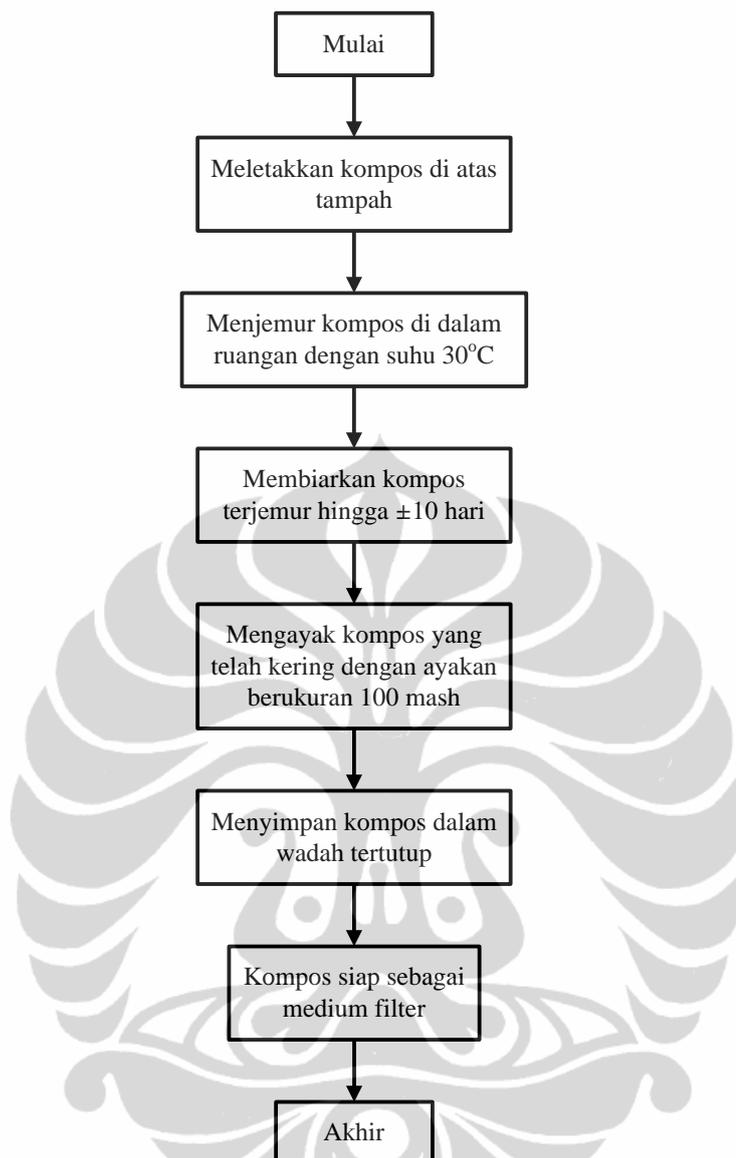


Gambar 3.5. Prosedur Pembuatan Kompos

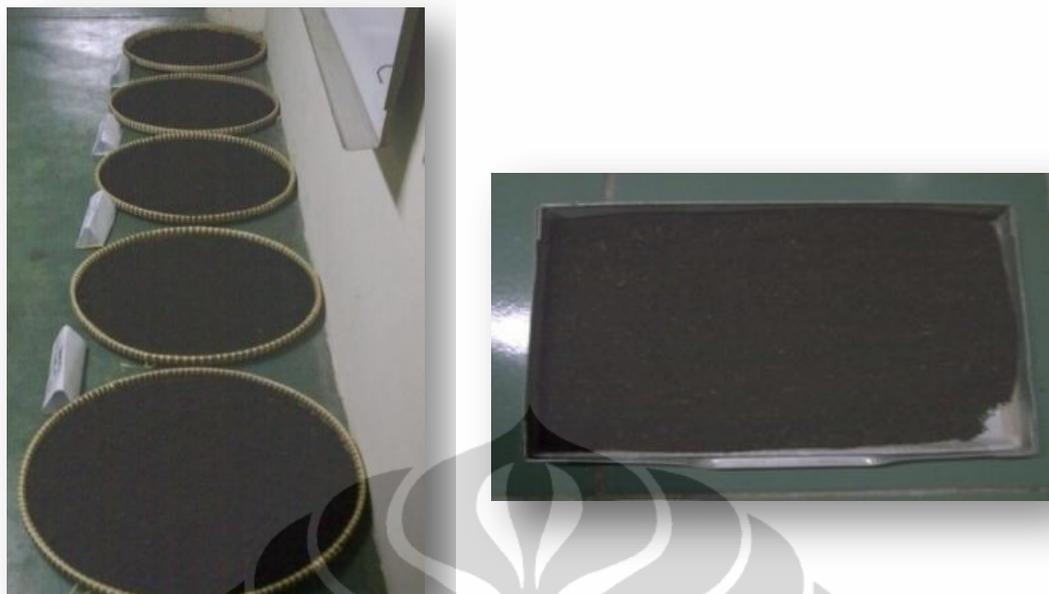


Gambar 3.6. Proses Pengomposan

Tahap kedua dari preparasi medium kompos adalah proses pengeringan dan pengayakan dari kompos sebelum siap untuk digunakan sebagai medium filter. Tahapan kedua dilaksanakan di Departemen Teknik Kimia UI. Proses pengeringan dilakukan selama 7 hari, disertai dengan pengadukan secara manual, pada suhu ruang 30°C dan humiditas 70%. Proses pengeringan dilanjutkan dengan pengayakan agar didapatkan ukuran partikel kompos yang seragam sehingga dapat mengurangi penurunan tekanan (*pressure drop*) yang dapat terjadi di sepanjang kolom biofilter. Ayakan yang digunakan memiliki diameter lubang sekitar 1,5-2 mm. Gambar 3.7. memperlihatkan prosedur preparasi kompos sebelum digunakan sebagai medium dalam proses biofiltrasi. Tahapan pengeringan dan medium kompos siap pakai dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.7. Prosedur Preparasi Kompos Sebelum Digunakan sebagai Medium



Gambar 3.8. Tahap Akhir Preparasi Medium Kompos

3.4. Karakterisasi Medium

Sebelum digunakan sebagai medium dalam proses biofiltrasi N_2O , dilakukan karakterisasi terhadap kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing. Karakterisasi meliputi analisis Brunauer-Emmett-Teller (BET) untuk mengetahui luas permukaan dan diameter pori medium, analisis kandungan dan komposisi kompos, serta analisis enumerasi kelimpahan mikroorganisme pada kompos. Enumerasi mikroorganisme pada medium kompos dilakukan oleh Laboratorium Mikrobiologi LIPI Cibinong, sedang analisis karakterisasi kandungan kompos dilakukan oleh Laboratorium Sucofindo Cibitung.

Karakterisasi luas permukaan dan diameter pori kompos dianalisis dengan metode BET menggunakan alat *Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption*. Adsorbat yang digunakan dalam evaluasi porositas kompos ini adalah nitrogen pada suhu 77 K. Analisis dilakukan di Lab. Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (RPKA) Departemen Teknik Kimia UI. Selain itu, pengukuran beberapa parameter sifat fisik dan kimia dari kedua jenis medium kompos juga dilakukan, yang meliputi: densitas, porositas, kelembaban, dan pH. Pengukuran

terhadap sifat fisik dan kimia ini juga dilakukan setelah proses biofiltrasi berlangsung.

Pengukuran densitas kompos

- 1) Menyiapkan dan menimbang *beaker glass* kosong berukuran 50 mL.
- 2) Memasukkan kompos yang akan digunakan ke dalam *beaker glass* dengan cara memadatkan kompos hingga mencapai volum 50 mL.
- 3) Menimbang massa kompos di dalam *beaker glass* tersebut.
- 4) Menghitung densitas kompos dengan cara membagi massa kompos dan volum *beaker glass* yang digunakan yaitu 50 mL.

Pengukuran porositas kompos

- 1) Menimbang massa kompos yang akan dihitung porositasnya.
- 2) Menghitung volum kompos tersebut dengan cara membagi massa kompos dengan densitas kompos yang telah diperoleh sebelumnya.
- 3) Menghitung volum kolom biofilter kosong dengan menggunakan kedalaman sesuai dengan eksperimen yang dilakukan.
- 4) Menghitung porositas kompos dengan cara membagi volum kompos dengan volum kolom biofilter kosong tersebut.

$$\emptyset = \frac{v_{kompos}}{v_{kolom}} = \frac{v_{kompos}}{\pi \times \text{jari-jari}_{tabung}^2 \times \text{tinggi}_{tabung}} \quad (3.1)$$

Pengukuran kandungan air kompos

- 1) Menyiapkan cawan keramik kosong dan memasukkannya ke dalam oven untuk dipanaskan pada suhu 105°C selama 2 jam.
- 2) Mengeluarkan cawan keramik dari dalam oven dan memasukkannya ke dalam desikator untuk kemudian ditimbang.
- 3) Memasukkan 5 g kompos yang akan dihitung kandungan airnya ke dalam cawan keramik tersebut dan memasukkannya kembali ke dalam oven untuk dipanaskan pada suhu 105°C selama 2 jam.
- 4) Mengeluarkan cawan keramik berisi kompos tersebut dan memasukkannya ke dalam desikator untuk kemudian ditimbang.

- 5) Menghitung massa sisa padatan kompos dengan cara mengurangkan massa cawan keramik berisi kompos tersebut dengan massa cawan keramik kosong.
- 6) Menghitung massa air yang menguap dengan cara mengurangkan massa kompos awal (5 g) dengan massa sisa padatan kompos (g).
- 7) Menghitung kandungan air kompos melalui persamaan berikut:

$$\text{Water content} = \frac{\text{massa air yang menguap (g)}}{\text{massa kompos awal(g)}} \times 100\% \quad (3.2)$$

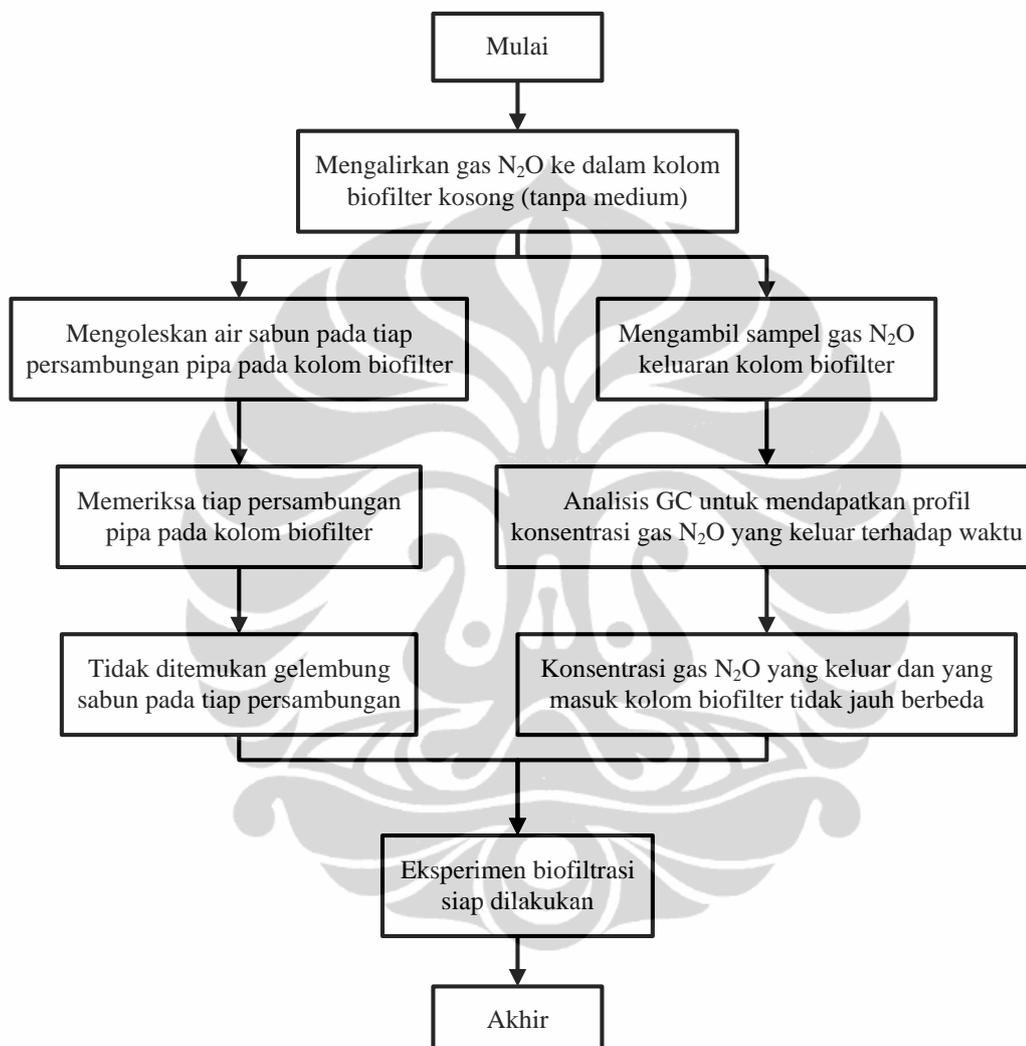
Pengukuran pH kompos

- 1) Menyiapkan dan menimbang kompos yang akan diukur pH-nya sebanyak 5 gram.
- 2) Menyiapkan *aquadest* sebanyak 50 mL.
- 3) Melarutkan kompos yang telah disiapkan ke dalam *aquadest* dan mengaduknya hingga tercampur secara merata.
- 4) Memasukkan pH indikator ke dalam campuran tersebut untuk mengukur pH larutan, dilakukan sebanyak 3 kali.
- 5) Memasukkan pH meter ke dalam campuran tersebut untuk memperoleh nilai pH yang lebih akurat, dilakukan sebanyak 3 kali.
- 6) Merata-ratakan nilai pH yang diperoleh dari pengukuran dengan menggunakan pH indikator dan pH meter.

3.5. Pengujian Kebocoran dan Kalibrasi

Setelah perancangan selesai, selanjutnya dilakukan uji kebocoran dan kalibrasi dari sistem biofilter ini. Uji kebocoran bertujuan untuk meyakinkan bahwa penurunan konsentrasi gas N₂O yang keluar dari bagian bawah kolom, yang ditunjukkan dengan penurunan luas *peak* N₂O pada kromatogram GC, hanya disebabkan oleh proses biofiltrasi yang terjadi di dalam kolom. Pengujian dilakukan dengan 2 cara. Cara pertama yang paling sederhana adalah dengan meneteskan cairan sabun di tiap sambungan yang ada pada sistem biofilter, kemudian mengalirkan udara bertekanan, dan mengamati ada atau tidaknya kebocoran dengan timbul atau tidaknya gelembung-gelembung sabun. Cara

berikutnya dilakukan melalui uji blangko (*blank test*), dengan mengalirkan gas N_2O ke dalam sistem dan mengamati serta membandingkan konsentrasi gas N_2O yang keluar terhadap konsentrasi gas yang masuk ke dalam kolom. Tahapan uji kebocoran yang dilakukan ditunjukkan oleh Gambar 3.9.



Gambar 3.9. Tahapan Pengujian Kebocoran pada Sistem Biofilter

Setelah dapat dipastikan bahwa sistem biofilter yang dirancang tidak mengalami kebocoran, selanjutnya dilakukan kalibrasi konsentrasi gas N_2O dengan mengalirkan gas ke dalam *sampling gas*. Gas diambil dari dalam *sampling gas* menggunakan *syringe* dengan volum tertentu, diinjeksikan ke dalam GC, lalu dicatat luas *peak* yang ditunjukkan oleh kromatogram GC. Prosedur ini dilakukan

untuk volum yang berbeda-beda, sehingga dapat dibentuk relasi antara konsentrasi GC dengan luas *peak* dari kromatogram yang dihasilkan. Hasil kurva kalibrasi yang diperoleh dapat dilihat pada lampiran.

3.6. Proses Biofiltrasi

Optimasi proses biofiltrasi dilakukan dengan sistem aliran sirkulasi untuk medium pupuk kandang, dan sistem aliran kontinyu untuk kedua jenis medium lainnya. Optimasi dilakukan dengan memperhatikan beberapa parameter operasi terhadap daya adsorpsi dan degradasi biofilter. Pengujian dilakukan dengan mengkaji kemampuan sistem biofilter dalam mereduksi gas N_2O dan perubahan jumlah koloni bakteri pada medium kompos sebelum dan setelah proses biofiltrasi. Pengambilan data pada tahap ini dilakukan dengan memperhatikan aspek replikasi dan randomisasi.

3.6.1. Penelitian Awal

Proses biofiltrasi dengan menggunakan medium pupuk kandang didesain untuk dilakukan di tahap awal penelitian. Ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan limbah organik peternakan (kotoran hewan) yang merupakan komponen utama kompos, dalam aplikasinya sebagai medium pada proses biofiltrasi polutan gas N_2O . Proses biofiltrasi dilakukan di dalam kolom biofilter hasil rancangan, dengan sistem aliran sirkulasi selama 6 jam operasi. Sistem aliran ini dipilih agar dapat memaksimalkan kemampuan medium dalam mengadsorb polutan gas.

Pada penelitian awal ini, dilakukan studi untuk mengkaji pengaruh parameter operasi kedalaman medium filter, laju alir gas N_2O , dan penambahan nutrisi sintetik pada medium. Optimasi pada parameter operasi kedalaman medium filter dilakukan dengan memvariasikan kedalaman medium dari 10 cm hingga 50 cm. Optimasi tidak dilakukan pada kedalaman medium filter > 50 cm, dengan pertimbangan bahwa medium tanpa penambahan *bulking agent* memiliki porositas kecil sehingga penurunan tekanan yang besar akan terjadi pada kedalaman medium yang lebih besar.

Kajian pengaruh parameter operasi laju alir gas N₂O dilakukan dengan memvariasikan laju alir gas yang bersirkulasi di dalam kolom biofilter pada kedalaman medium 50 cm. Evaluasi dilakukan pada rentang laju alir sirkulasi yang cukup besar (25 – 200 cm³/menit), agar kemampuan medium dalam proses biofiltrasi dapat teramati dengan lebih maksimal.

Selanjutnya agar dapat mengoptimalkan kinerja medium pupuk kandang dalam mereduksi polutan gas N₂O, dilakukan penambahan nutrisi sintetik pada medium. Proses biofiltrasi dilakukan pada kedalaman medium filter 50 cm dan laju alir sirkulasi gas N₂O 200 cm³/menit.

Pada medium kompos berbasis kotoran sapi dan medium kompos berbasis kotoran kambing, sistem aliran yang digunakan adalah aliran kontinyu. Studi literatur memperlihatkan bahwa sistem aliran kontinyu lebih aplikatif jika dibandingkan dengan sistem aliran sirkulasi. Laju alir gas N₂O yang digunakan juga berada dalam rentang yang lebih sempit dari optimasi yang dilakukan sebelumnya pada tahap penelitian awal.

Penambahan *bulking agent* dalam medium kompos berbasis kotoran sapi dan medium kompos berbasis kotoran kambing dilakukan untuk meningkatkan porositas dan menghindari terjadinya penurunan tekanan, yang akan memperbaiki kinerja medium filter. Optimasi dari proses biofiltrasi selanjutnya dilakukan untuk kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing, agar dapat ditentukan medium kompos yang memiliki kemampuan mereduksi polutan gas N₂O terbaik.

3.6.2. Optimasi Proses Biofiltrasi

Optimasi dilakukan terlebih dahulu untuk sistem biofilter dengan medium kompos berbasis kotoran sapi. Salah satu alasan dari pemilihan ini adalah karena aspek ketersediaan (*availability*) dari kompos berbasis kotoran sapi. Ketersediaan kompos jenis ini erat kaitannya dengan ketersediaan dari kotoran sapi sebagai sumber bahan organik pada kompos. Data ketersediaan kotoran ternak di Indonesia pada tahun 2002 ditunjukkan oleh Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Ketersediaan Kotoran Ternak di Indonesia pada Tahun 2002

Jenis Ternak	Kotoran Ternak Basah (juta ton)	Kotoran Ternak Kering (juta ton)
Sapi	11,815	5,908
Kerbau	2,668	1,334
Kuda	0,489	0,244
Kambing	2,381	1,190
Domba	1,398	0,699
Ayam	39,128	19,563

Sumber: Kemen. Pertanian RI, 2002

Dari Tabel 3.1. diketahui bahwa kotoran ternak dengan tingkat ketersediaan paling besar adalah kotoran ayam. Namun demikian, kotoran ayam tidak menjadi pilihan karena alasan kesehatan dan keselamatan (*health and safety*). Selain sebagai salah satu sumber penyebaran virus flu burung H5N1, kotoran ayam juga mengandung bakteri *Salmonella*, sp., yang merupakan salah satu bakteri penyebab penyakit pencernaan pada manusia.

Kotoran sapi juga diketahui memiliki kandungan air yang cukup besar, sekitar 85-92%. Diharapkan kondisi ini membuat medium kompos berbasis kotoran sapi dapat menyediakan kondisi lingkungan yang lebih baik untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme di dalamnya. Optimasi dilakukan dengan mengkaji beberapa parameter operasi pada proses biofiltrasi, yaitu: laju alir gas N₂O yang masuk ke dalam kolom biofilter, dan penambahan kandungan air dalam kompos sebagai medium filter. Pengaruh parameter operasi terhadap efisiensi penghilangan (*Removal Efficiency/RE*) dari gas N₂O, menjadi dasar dari optimasi yang dilakukan. Optimasi pada parameter operasi laju alir gas N₂O dilakukan dengan memvariasikan laju alir gas N₂O yang masuk ke dalam kolom biofilter dengan kedalaman medium 50 cm.

Penggunaan kompos berbasis kotoran kambing sebagai medium dalam biofiltrasi N₂O, juga didasari oleh aspek keberadaan dari medium jenis ini. Dari literatur diketahui pula bahwa kandungan unsur hara makro yaitu nitrogen, pada kotoran kambing dan domba lebih tinggi jika dibandingkan dengan kotoran hewan sejenis lainnya, seperti yang tertera pada Tabel 3.2. berikut.

Tabel 3.2. Perkiraan Kandungan Unsur Hara Makro Kotoran Hewan

Jenis Ternak	Nitrogen/N (%)	Phosporus/P (%)	Potassium/K (%)
Sapi	1,0	0,4	0,5
Unggas (pakan ruah)	2,1	1,6	1,0
Unggas (pakan pellet)	5,0	3,3	1,5
Kuda	0,7	0,4	0,5
Babi	1,1	0,7	0,1
Kambing - Domba	1,8	0,4	0,5

Sumber: *Yates Garden Guide, 1990*

Optimasi pada kompos berbasis kotoran kambing dilakukan terhadap parameter operasi laju alir masuk gas N_2O dan penambahan kandungan air, sedangkan seperti telah disebutkan sebelumnya, kedalaman medium filter yang digunakan tetap pada 50 cm.

Selain mengkaji peningkatan RE dari sistem biofilter, juga dilakukan analisis jumlah koloni bakteri dengan metode TPC, serta dilengkapi dengan analisis SEM untuk melihat perubahan morfologi dari permukaan medium kompos. Analisis TPC dilakukan di Lab. Rekayasa Bioproses Departemen Teknik Kimia UI, sedangkan analisis dengan SEM dilakukan di Lab. Material LIPI Serpong. Tahap ini diakhiri dengan pemilihan medium filter yang memberikan kinerja reduksi polutan lebih baik.

Optimasi terhadap medium yang terpilih dilakukan melalui penggunaan *Nitrobacter* sp. dan penambahan nutrisi, variasi kedalaman medium, variasi waktu inkubasi medium, serta variasi dimensi medium filter. Pada tahap ini juga dilakukan proses biofiltrasi secara kontinyu untuk mengamati tingkat stabilitas dan kinerja dari medium filter. Tahap ini dilengkapi dengan karakterisasi kompos sebagai medium setelah proses biofiltrasi, untuk melihat apakah kompos tetap dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik. Dalam optimasi lanjut dilakukan pula studi adsorpsi gas N_2O pada permukaan medium filter kompos untuk mengkaji

kemampuan kompos dalam mengadsorpsi polutan tanpa keberadaan bakteri pendegradasi.

Pengaruh penggunaan *Nitrobacter* sp. dan penambahan nutrisi hanya dilakukan untuk medium kompos yang diperkirakan masih dapat dimaksimalkan kinerjanya dalam mereduksi polutan gas N_2O . Bakteri *Nitrobacter* sp. diperoleh dari Laboratorium Institut Pertanian Bogor (IPB). Nutrisi yang ditambahkan dapat berupa nutrisi alami ataupun sintetik. Nutrisi alami yang ditambahkan berupa limbah cair dari peternakan sapi di Kelurahan Kukusan - Depok, sedangkan nutrisi sintetik yang diberikan terdiri dari larutan nutrisi dan *trace element*. Larutan nutrisi yang diberikan sebanyak 40 ml ditambah dengan larutan *trace element* sebagai *micronutrient* sebanyak 2 ml. Nutrisi ditambahkan sedemikian rupa sehingga volumenya sama dengan penambahan kandungan air yang optimum.

Komposisi nutrisi yang diberikan terdiri dari (dalam 1 L H_2O) K_2HPO_4 (0,4 g), KH_2PO_4 (0,15 g), NH_4Cl (0,3 g), $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (0,4 g), CH_3COONa (2,93 g). Larutan *trace element* terdiri dari (dalam 1 L H_2O) EDTA (50,0 g), $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ (2,2 g), $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ (5,5 g), $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ (5,06 g), $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (5,0 g), $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 2H_2O$ (1,1 g), $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (1,57 g), $CoCl_2 \cdot H_2O$ (1,61 g). Senyawa-senyawa tersebut dipilih karena telah digunakan sebelumnya untuk menumbuhkan bakteri nitrifikasi aerobik berdasarkan Yang, *et al* (2007). Data yang diperoleh digunakan dalam penyusunan model biosorpsi dan biodegradasi dari medium kompos dalam mereduksi N_2O .

3.7. Analisis

3.7.1. Analisis Konsentrasi Gas dengan Kromatografi

Konsentrasi efluen gas N_2O diukur dengan menggunakan *Gas Chromatograph* (GC) jenis TCD. Spesifikasi GC yang digunakan dapat dilihat dalam Tabel 3.3. berikut ini.

Tabel 3.3. Spesifikasi Kromatografi Gas Jenis TCD

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

3.7.2. Enumerasi Jumlah Koloni Bakteri dengan Metode *Total Plate Count*

Total Plate Count (TPC) dilakukan sebelum dan sesudah proses biofiltrasi untuk mengetahui perubahan jumlah koloni bakteri aerob yang ada di dalam medium kompos. Hal ini akan menentukan seberapa besar pengaruh bakteri tersebut dalam mendegradasi polutan gas. Faktor pengenceran yang digunakan agar keakuratan penghitungan jumlah koloni bakteri dapat terjaga adalah 10^{-6} sampai dengan 10^{-12} .

Analisis TPC yang dilakukan oleh Lab. Mikrobiologi – LIPI menggunakan metode Tuang Permukaan (*Surface Plate Method*), hanya untuk menghitung mikroorganisme aerob. Medium-medium yang digunakan untuk menghitung bakteri : *Nutrient Agar* (NA); aktinomisetes : *Yeast Extract Salts Agar* (YSA); *Yeast* : *Yeast Extract Malt Agar* (YMA); Jamur : *Potato Dextrose Agar* (PDA).

BAB 4

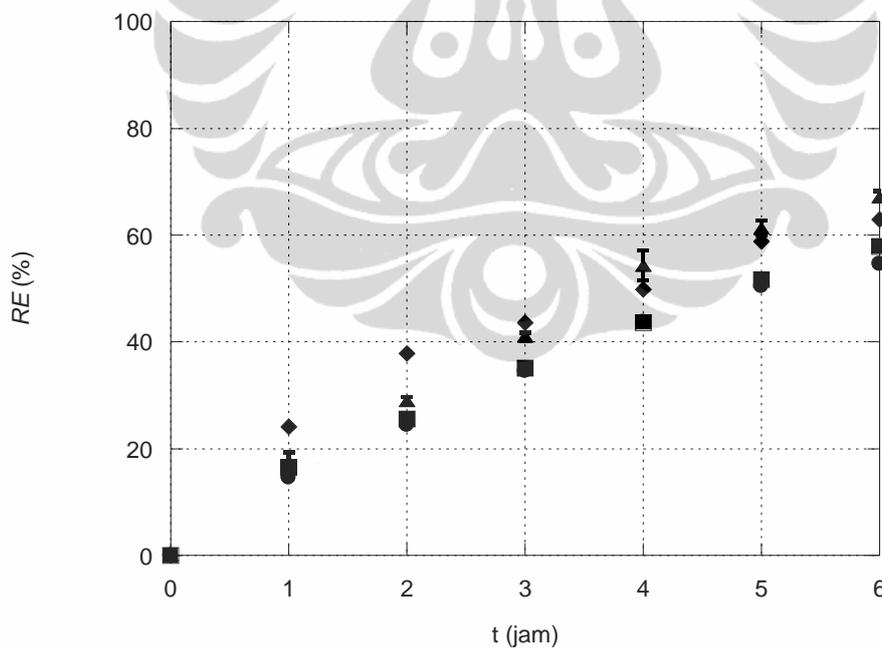
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut akan disampaikan hasil penelitian yang diperoleh. Hasil penelitian tersebut disusun berdasarkan kerangka penelitian (Gambar 3.1.) selama 3 (tiga) tahun yang telah dilaksanakan.

4.1. Hasil Penelitian Awal

4.1.1. Pengaruh Kedalaman Medium Filter Pupuk Kandang

Pengaruh kedalaman medium pupuk kandang terhadap efisiensi penghilangan (*Removal Efficiency / RE*) gas N_2O selama 6 jam proses biofiltrasi dengan sistem aliran sirkulasi dapat dilihat pada Gambar 4.1.

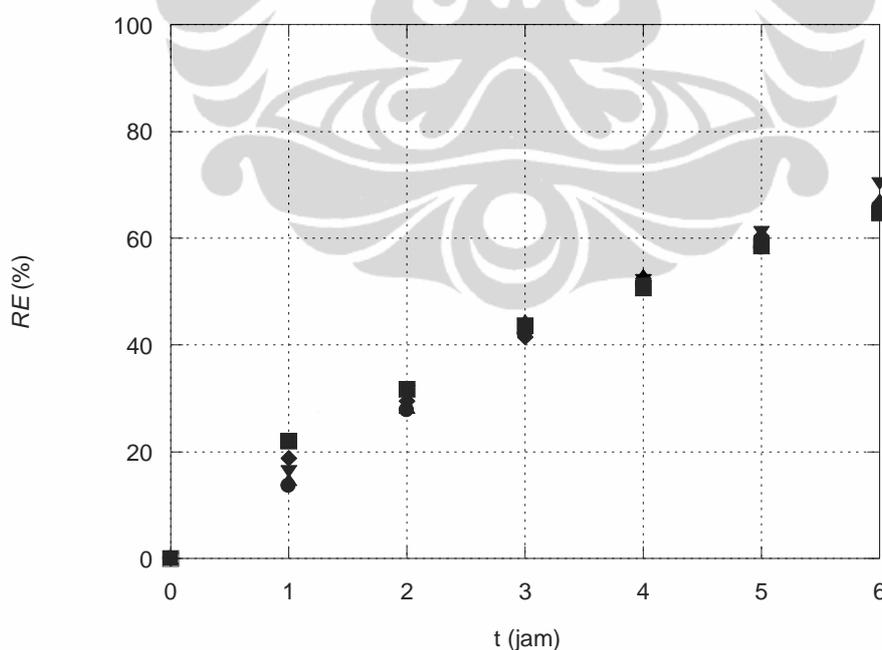


Gambar 4.1. RE pada Variasi Kedalaman Medium (h) Pupuk Kandang (medium kering pupuk kandang, laju alir (Q) sirkulasi = $50 \text{ cm}^3/\text{menit}$
● h = 10 cm; ■ h = 15 cm; ◆ h = 25 cm; ▲ h = 50 cm)

Gambar 4.1 di atas memperlihatkan perubahan nilai RE selama 6 jam sistem biofilter beroperasi dengan aliran sirkulasi, terhadap perubahan kedalaman medium (h) pupuk kandang. Terlihat jelas bahwa kedalaman medium 50 cm memberikan nilai RE yang lebih besar, jika dibandingkan dengan kedalaman medium yang lebih kecil. Jumlah adsorben yang besar pada kedalaman medium yang lebih besar, akan meningkatkan jumlah adsorbat yang dapat diadsorb oleh medium, sehingga menurunkan konsentrasi gas N_2O yang meninggalkan kolom dan memperbesar nilai RE dari sistem biofilter setelah 6 jam operasi, hingga 66,52%.

4.1.2. Pengaruh Laju Alir Sirkulasi Gas N_2O

Pengaruh laju alir sirkulasi gas N_2O terhadap RE selama 6 jam proses biofiltrasi dengan medium pupuk kandang, dapat dilihat pada Gambar 4.2 di bawah ini.

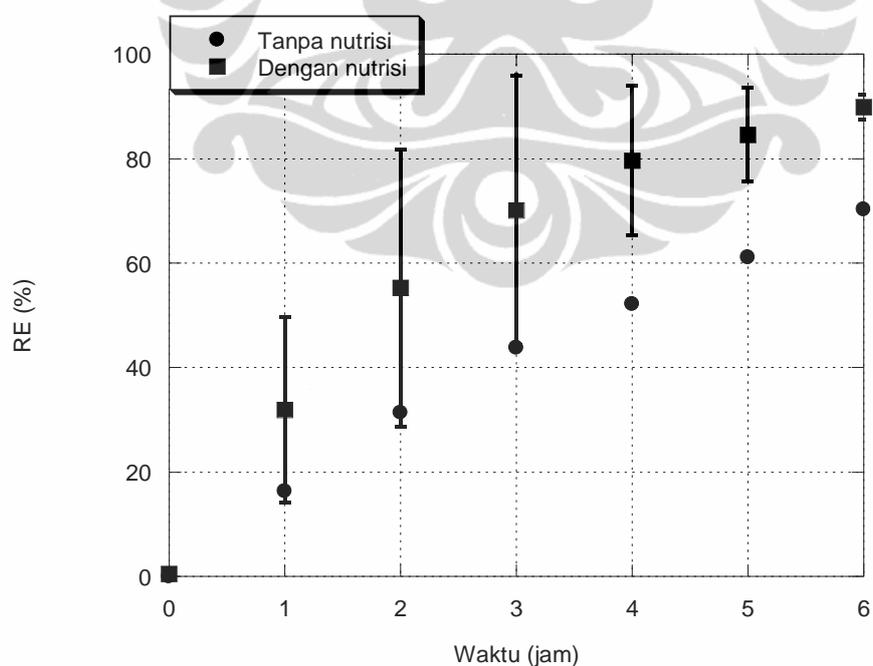


Gambar 4.2. RE pada Variasi Laju Alir (Q) Sirkulasi Gas N_2O (medium kering pupuk kandang, kedalaman medium (h) = 50 cm
 ● Q = 25 cm³/menit; ■ Q = 32 cm³/menit; ◆ Q = 50 cm³/menit;
 ▲ Q = 100 cm³/menit; ▼ Q = 200 cm³/menit)

Dalam Gambar 4.2 terlihat bahwa pada laju alir (Q) sirkulasi gas N_2O yang lebih besar, diperoleh RE yang lebih besar pula mencapai 70,22% pada Q sirkulasi 200 cm^3 /menit, setelah beroperasi selama 6 jam (Utami, *et al.*, 2009). Laju alir sirkulasi yang lebih besar menghasilkan volum gas N_2O di dalam sistem lebih banyak, dan frekuensi gas yang bersirkulasi di dalam kolom biofilter lebih tinggi. Kedua hal ini berdampak pada besarnya jumlah adsorbat yang dapat diadsorb oleh medium pupuk kandang, sehingga meningkatkan nilai RE dari sistem biofilter.

4.1.3. Pengaruh Penambahan Nutrisi Sintetik

Pengaruh penambahan nutrisi sintetik pada medium dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut ini. Nilai RE setelah dilakukan penambahan nutrisi sintetik pada medium pupuk kandang, dapat mencapai 91,49% pada $t = 6$ jam. Selain mendukung aktivitas dan pertumbuhan mikroorganisme dalam medium, penambahan nutrisi juga meningkatkan kelembaban, yang pada akhirnya menyediakan kondisi lingkungan yang sesuai untuk mikroorganisme tersebut.



Gambar 4.3. RE pada Penambahan Nutrisi Sintetik (medium filter pupuk kandang, $Q=200\text{ cm}^3$ /menit, $h=50\text{ cm}$
● tanpa nutrisi; ■ dengan nutrisi)

Hasil optimasi yang dilakukan pada medium pupuk kandang menjadi dasar dari optimasi yang dilakukan untuk kedua jenis medium filter lainnya. Pada medium filter yang telah ditambahkan *bulking agent*, optimasi dapat dilakukan pada kedalaman medium yang lebih besar dari 50 cm.

4.1.4. Model Biosorpsi N₂O pada Medium Filter Pupuk Kandang

Proses adsorpsi berlangsung menurut mekanisme berikut:



keterangan:

N₂O : molekul gas

S : situs aktif adsorpsi

k, k₋₁ : konstanta laju

Persamaan model disusun dari kesetimbangan antara situs adsorpsi yang kosong (S), molekul-molekul gas (N₂O), dan situs yang terisi oleh molekul teradsorpsi (SN₂O).

$$r_{\text{ads}} = k_1[S][N_2O] \quad (4.3a)$$

$$r_{\text{des}} = k_{-1}[SN_2O] \quad (4.3b)$$

Jika laju adsorpsi = laju desorpsi:

$$k_1[S][N_2O] = k_{-1}[SN_2O] \quad (4.4)$$

Penyusunan ulang Pers. 4.5:

$$\frac{[S]}{[SN_2O]} = \frac{k_{-1}}{k_1[N_2O]} \quad (4.5)$$

dengan:

$$K = \frac{k_1}{k_{-1}}$$

$$\frac{k_{-1}}{k_1[N_2O]} = \frac{1}{K[N_2O]} \quad (4.6)$$

Jika:

$$x_{\max} = [SN_2O] + [S]$$

dan:

$$\theta = \frac{x}{x_{\max}}$$

Maka:

$$\theta = \frac{[SN_2O]}{[SN_2O] + [S]} \quad (4.7)$$

Penyusunan ulang Pers. 4.7:

$$\theta = \frac{1}{1 + [S]/[SN_2O]} \quad (4.8)$$

Substitusi Pers. 4.6 ke dalam Pers. 4.8:

$$\theta = \frac{1}{1 + 1/K[N_2O]} \quad (4.9)$$

Penyusunan ulang Pers. 4.9:

$$\theta = \frac{K[N_2O]}{1 + K[N_2O]} \quad (4.10)$$

Sehingga diperoleh:

$$\theta = \frac{KC}{KC + 1} \quad (4.11)$$

Pers. 4.11 merupakan persamaan biosorpsi N_2O di permukaan medium filter.

Linierisasi Pers. 4.11 memberikan:

$$\frac{1}{\theta} = \left(\frac{1}{K}\right) \left(\frac{1}{C}\right) + 1 \quad (4.12)$$

dimana:

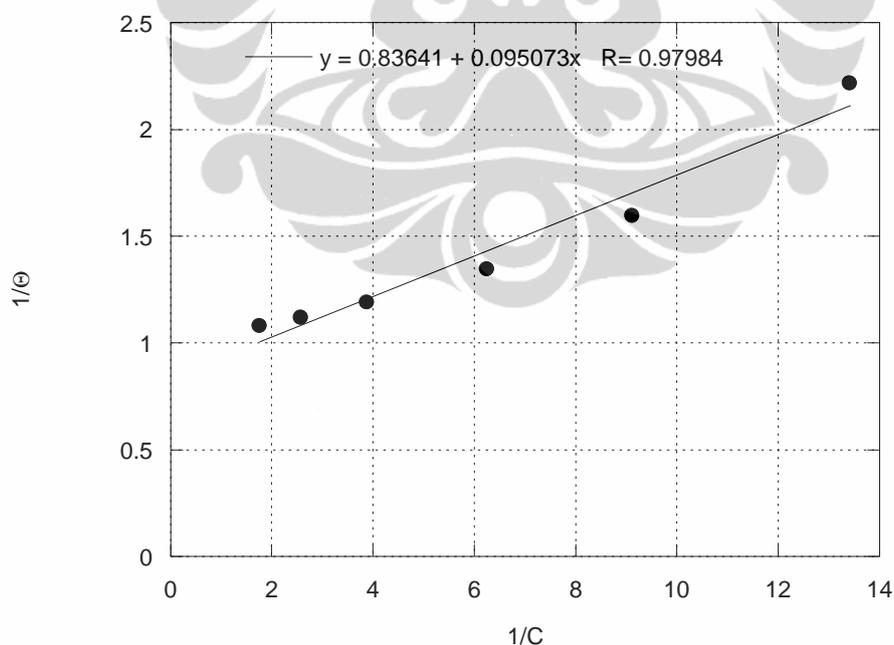
θ : fraksi situs adsorpsi yang tertutupi oleh molekul gas

K : konstanta Langmuir

C : konsentrasi N_2O

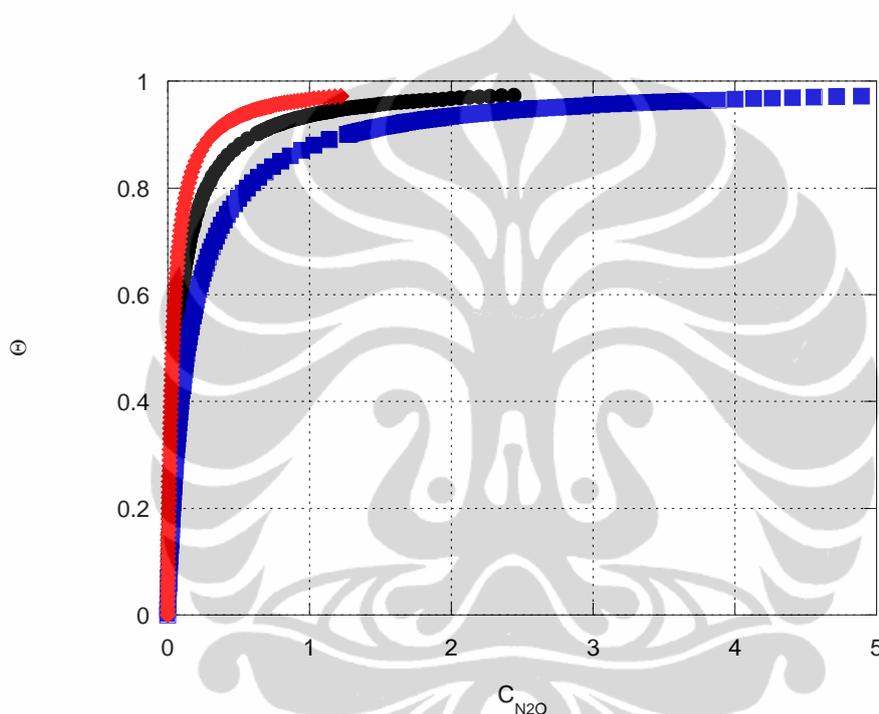
Persamaan Langmuir menghubungkan adsorpsi molekul pada suatu permukaan padatan, dengan konsentrasi atau tekanan gas dari medium yang berada di atas permukaan padatan, pada suhu yang tetap. Konstanta K merupakan konstanta adsorpsi Langmuir, yang umumnya akan meningkat dengan adanya kenaikan dari energi ikatan adsorpsi.

Curve fitting data penelitian biofiltrasi N_2O dengan medium pupuk kandang ke dalam Pers. 4.12 telah dilakukan. Hasil *curve fitting* persamaan model biosorpsi dan data penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.4 untuk kedalaman medium filter (h) 50 cm dan laju alir (Q) sirkulasi gas $50 \text{ cm}^3/\text{menit}$.



Gambar 4.4. Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (medium pupuk kandang, h = 50 cm, Q sirkulasi = $50 \text{ cm}^3/\text{menit}$)

Nilai Konstanta Langmuir (K), dapat ditentukan melalui *slope* yang dihasilkan dari persamaan linier pada kurva di atas. Nilai K yang diperoleh sebesar 10,52 L/mol (Utami, *et al.*, 2010). Selanjutnya dilakukan analisis sensitivitas untuk melihat pengaruh perubahan Konstanta Langmuir (K) terhadap daya adsorp dari medium. Hasil analisis sensitivitas ditunjukkan pada Gambar 4.5.



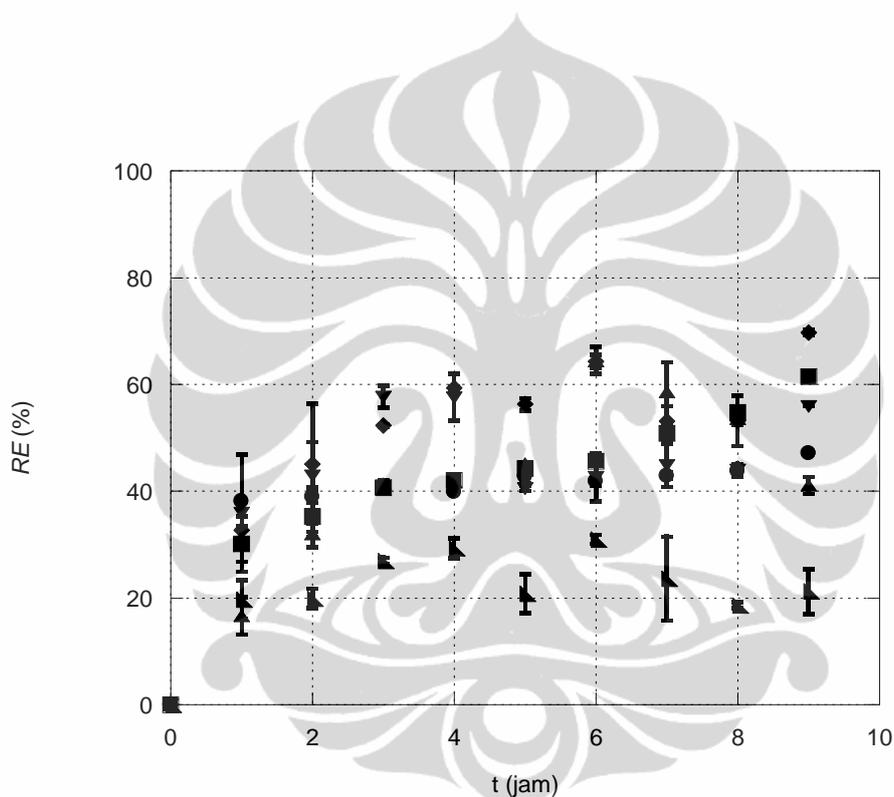
Gambar 4.5. Analisis Sensitivitas Konstanta Langmuir untuk $K = 2K$ (merah) ; K (hitam) ; $0,5K$ (biru)
(medium pupuk kandang, $h = 50$ cm, Q sirkulasi = 50 cm³/menit)

Dari Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa nilai K mempengaruhi jumlah gas N₂O yang teradsorp pada medium filter pupuk kandang (θ). Apabila nilai K ditingkatkan menjadi $2K$, maka jumlah N₂O yang teradsorp oleh medium akan menjadi lebih banyak. Sebaliknya jika nilai K diturunkan menjadi $0,5K$, maka jumlah N₂O yang teradsorp oleh medium menjadi lebih sedikit. Nilai K yang merupakan fungsi dari energi ikatan adsorpsi, mencerminkan karakteristik material adsorben dalam mengadsorpsi adsorbat tertentu.

4.2. Optimasi Proses Biofiltrasi dengan Medium Filter Kompos Berbasis Kotoran Sapi

4.2.1. Pengaruh Laju Alir Gas N₂O

Pengaruh laju alir gas N₂O terhadap RE selama 9 jam proses biofiltrasi menggunakan medium kompos berbasis kotoran sapi, dapat dilihat pada Gambar 4.6 di bawah ini. Proses biofiltrasi dilakukan dengan waktu yang lebih panjang daripada sebelumnya mengingat sistem aliran yang digunakan adalah aliran kontinyu.



Gambar 4.6. RE pada Variasi Laju Alir (Q) Gas N₂O (medium kering kompos berbasis kotoran sapi, kedalaman medium (h) = 50 cm, ● Q = 72 cm³/menit; ■ Q = 88 cm³/menit; ◆ Q = 104 cm³/menit; ▲ Q = 128 cm³/menit; ▼ Q = 185 cm³/menit; ▴ Q = 232 cm³/menit)

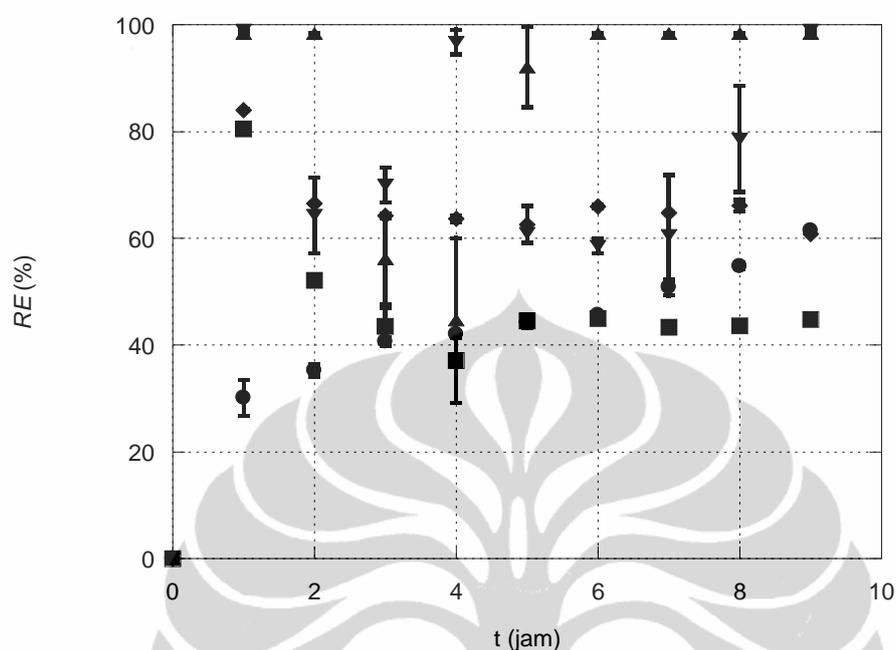
Pada sistem aliran kontinyu, laju alir yang kecil akan memberikan *Empty Bed Residence Time* (EBRT) yang besar, sehingga dapat meningkatkan waktu kontak antara gas N₂O dengan medium filter. Lamanya waktu kontak akan meningkatkan jumlah N₂O yang diadsorp oleh medium, dan membuat konsentrasi N₂O yang

keluar dari kolom biofilter semakin berkurang. Hal ini mengakibatkan nilai RE semakin besar pada laju alir yang lebih kecil.

Dalam Gambar 4.6 juga terlihat bahwa pada laju alir yang lebih besar, dibutuhkan waktu untuk mencapai kondisi stabil pada sistem biofilter, yang ditandai dengan berfluktuasinya nilai RE pada jam-jam awal dari proses biofiltrasi. Kondisi seperti ini tidak terlihat terjadi pada laju alir yang lebih kecil. Diputuskan untuk memilih laju alir $88 \text{ cm}^3/\text{menit}$, dengan RE mencapai 61,35%, sebagai laju alir terbaik selama 9 jam proses biofiltrasi dengan medium kompos berbasis kotoran sapi, hal ini disebabkan karena sulitnya menjaga kestabilan laju alir pada nilai yang lebih rendah. Shareefdeen dan Baltzis (1994), menyatakan bahwa gas polutan dengan emisi yang tidak stabil dapat menyebabkan kerusakan pada populasi mikroorganisme dalam medium filter, dan dapat mempengaruhi kinerja sistem biofilter secara keseluruhan.

4.2.2. Pengaruh Penambahan Kandungan Air dalam Medium Filter

Parameter operasi yang berikutnya dikaji adalah penambahan kandungan air (*water content/wc*) dalam medium filter pada laju alir yang dianggap optimum. Gambar 4.7 berikut menunjukkan pengaruh penambahan kandungan air dalam medium kompos berbasis kotoran sapi terhadap RE yang dihasilkan.



Gambar 4.7. RE pada Variasi Kandungan Air (wc) dalam Medium (medium kompos berbasis kotoran sapi, $Q=88 \text{ cm}^3/\text{menit}$, $h=50 \text{ cm}$,
 ● wc = 0%; ■ wc = 30%; ◆ wc = 50%; ▲ wc = 60%; ▼ wc = 70%)

Pada Gambar 4.7 terlihat penambahan kandungan air pada medium sebanyak 60 dan 70% dari berat medium kompos, memberikan nilai RE yang mendekati angka 100% karena tidak terdeteksinya gas N_2O di keluaran kolom biofilter. Ditunjukkan pula bahwa pada kondisi medium yang lebih basah dibutuhkan waktu yang lebih lama, sekitar 5-6 jam untuk mencapai kondisi stabil. Bahkan pada kandungan air yang lebih besar dari 50%, selama 9 jam beroperasi kestabilan sistem belum tercapai.

Penambahan kandungan air bertujuan untuk memberikan kondisi yang mendukung dalam aktivitas dan pertumbuhan mikroorganisme dalam medium filter kompos. Namun demikian, kandungan air yang lebih besar membuat medium filter menjadi lebih padat dan kompak, sehingga mempersulit tercapainya kondisi stabil. Hal tersebut ditandai pula dengan perubahan kedalaman medium kompos berbasis kotoran sapi ini, selama sistem biofilter beroperasi. Semakin

besar kandungan air yang ditambahkan, semakin besar pula penurunan kedalaman medium yang terjadi, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4.1.

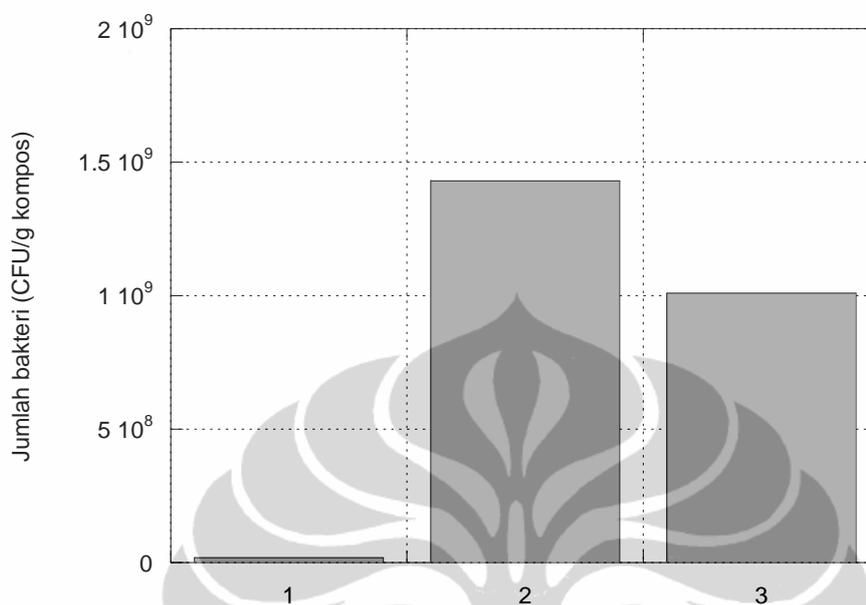
Tabel 4.1. Kedalaman Medium Filter Setelah 9 jam Proses Biofiltrasi

Kandungan air dalam medium (%)	Kedalaman medium dalam kolom (cm) pada akhir proses biofiltrasi (t = 9 jam)
0	49,7
30	57,0
50	54,0
60	50,0
70	47,0

Kepadatan dan kompaksi dalam medium kompos berbasis kotoran sapi yang terjadi pada kandungan air lebih dari 50%, membuat tekanan yang terjadi di sepanjang kolom tidak dapat diukur oleh manometer yang ada. Walaupun kandungan air yang ditambahkan ke dalam medium kompos masih berada dalam rentang yang direkomendasikan, namun kandungan air yang relatif tinggi pada kotoran sapi sebagai bahan baku utama kompos, memberikan dampak yang tidak diharapkan. Tingginya kandungan air bahkan membuat air mengalir keluar dari bagian bawah kolom, ketika proses biofiltrasi berlangsung. Sistem biofiltrasi beroperasi efisien pada kandungan air 50 – 70% dan suhu 15 – 35 °C (Nicolai dan Janni, 2001).

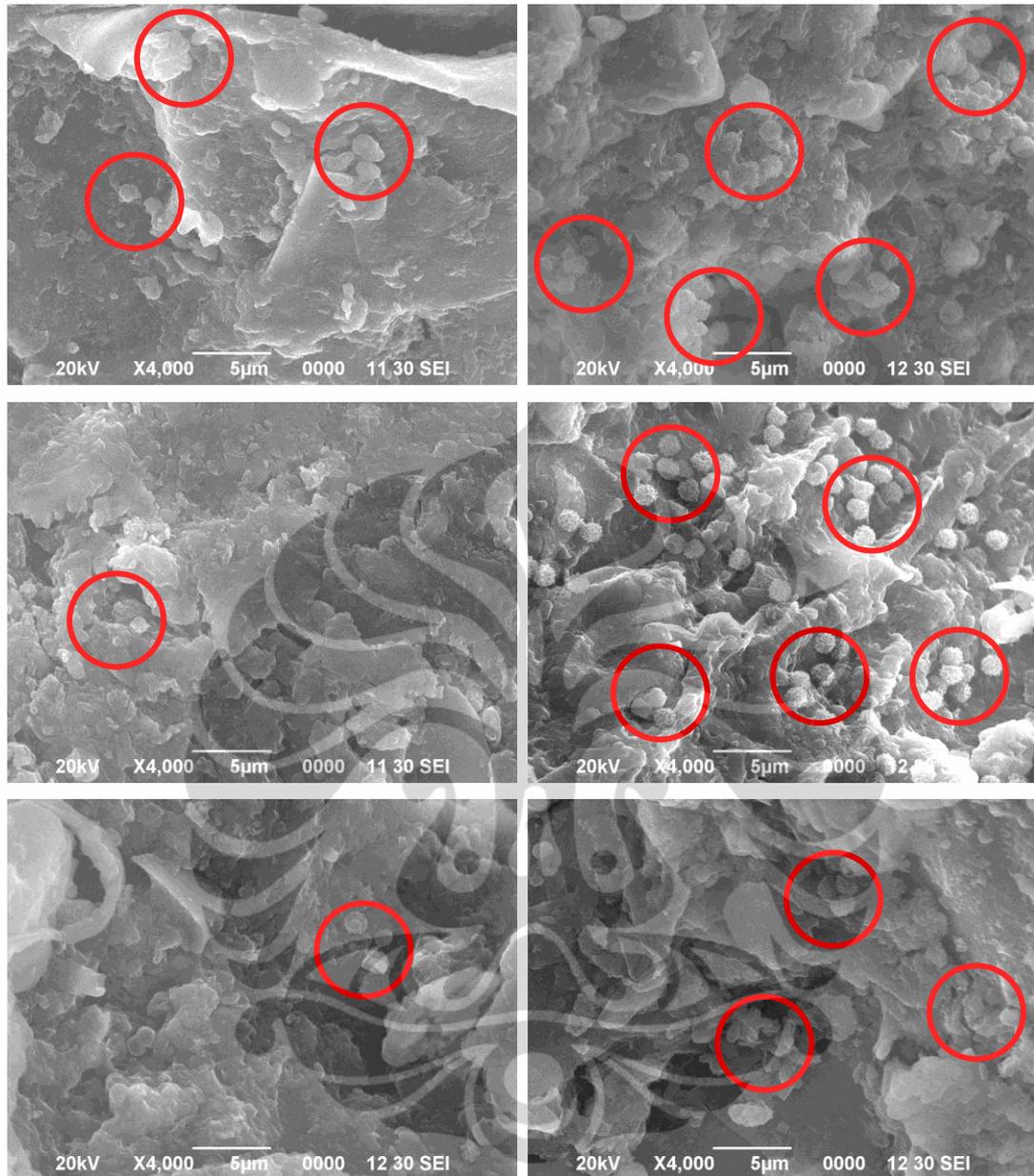
4.2.3. Analisis Perubahan Jumlah Bakteri pada Permukaan Medium

Histogram pada Gambar 4.8 memperlihatkan terjadi perubahan jumlah koloni bakteri (CFU/g) pada medium kompos berbasis kotoran sapi setelah 9 jam biofiltrasi, hasil analisis dengan metode *Total Plate Count* (TPC). Dapat disimpulkan bahwa proses biofiltrasi gas N₂O tidak memberikan pengaruh negatif kepada aktivitas dan pertumbuhan bakteri, yang ditandai dengan tidak berkurangnya jumlah koloni bakteri yang ada dalam kompos.



Gambar 4.8. Jumlah Koloni Bakteri Sebelum dan Setelah Biofiltrasi dengan TPC (kompos berbasis kotoran sapi, $t = 9$ jam, 1 = medium sebelum biofiltrasi; 2 = medium setelah biofiltrasi (kering); 3 = medium setelah biofiltrasi (basah))

Hasil analisis TPC diperkuat dengan hasil analisis *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada permukaan medium kompos berbasis kotoran sapi. Gambar 4.9 adalah hasil analisis SEM untuk kompos sebelum dan setelah digunakan sebagai medium dalam proses biofiltrasi N_2O . Dapat dilihat adanya perubahan pada morfologi dari medium kompos, seperti yang ditunjukkan oleh lingkaran-lingkaran merah pada gambar. Populasi bakteri pada permukaan medium kompos setelah 9 jam biofiltrasi terlihat lebih banyak dan lebih padat.

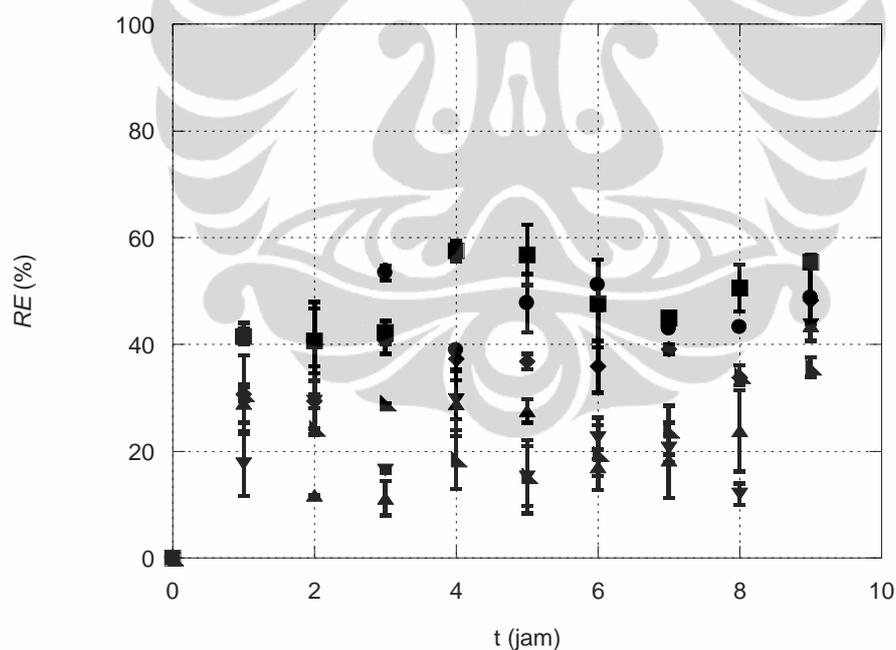
(a). sebelum biofiltrasi N_2O (b). setelah biofiltrasi N_2O **Gambar 4.9.** Hasil Analisis SEM pada Kompos Berbasis Kotoran Sapi

Dari penjelasan di atas, untuk kompos berbasis kotoran sapi, dalam penelitian ini didapatkan kondisi optimum untuk proses biofiltrasi N_2O selama 9 jam adalah pada laju alir $88 \text{ cm}^3/\text{menit}$, dan penambahan kandungan air dalam medium filter 50%.

4.3. Optimasi Proses Biofiltrasi dengan Medium Filter Kompos Berbasis Kotoran Kambing

4.3.1. Pengaruh Laju Alir Gas N_2O

Pengaruh laju alir (Q) gas N_2O terhadap RE selama 9 jam biofiltrasi dengan medium kompos berbasis kotoran kambing, dapat dilihat pada Gambar 4.10 di bawah ini.



Gambar 4.10. RE pada Variasi Laju Alir (Q) gas N_2O (medium kering kompos berbasis kotoran kambing, $h=50 \text{ cm}$,
 ● $Q = 72 \text{ cm}^3/\text{menit}$; ■ $Q = 88 \text{ cm}^3/\text{menit}$; ◆ $Q = 105 \text{ cm}^3/\text{menit}$;
 ▲ $Q = 127 \text{ cm}^3/\text{menit}$; ▼ $Q = 186 \text{ cm}^3/\text{menit}$; ▴ $Q = 233 \text{ cm}^3/\text{menit}$)

Seperti halnya medium kompos berbasis kotoran sapi, dalam Gambar 4.10 juga terlihat bahwa pada laju alir yang lebih besar, dibutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai kondisi stabil pada sistem biofilter. Perbedaan terjadi pada laju alir paling kecil yaitu $72 \text{ cm}^3/\text{menit}$, tidak terjadi ketidakstabilan aliran pada penggunaan medium kompos berbasis kotoran kambing. Ini dapat disebabkan karena karakteristik dari kedua medium yang berbeda, salah satunya adalah kandungan air (kelembaban), yang akan mempengaruhi kepadatan ataupun kompaksi medium. Medium kompos berbasis kotoran kambing memiliki kandungan air yang relatif lebih rendah, akibat dari rendahnya kandungan air pada kotoran kambing, jika dibandingkan dengan kotoran sapi, seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Kandungan Air pada Beberapa Jenis Kotoran Ternak

Ternak dan jenis kotoran	Kandungan air (%)
Kuda, padat	75
cair	90
Sapi – Kerbau, padat	85
cair	92
Kambing - Domba, padat	60
cair	85
Babi, padat	80
cair	87
Ayam, padat dan cair	55

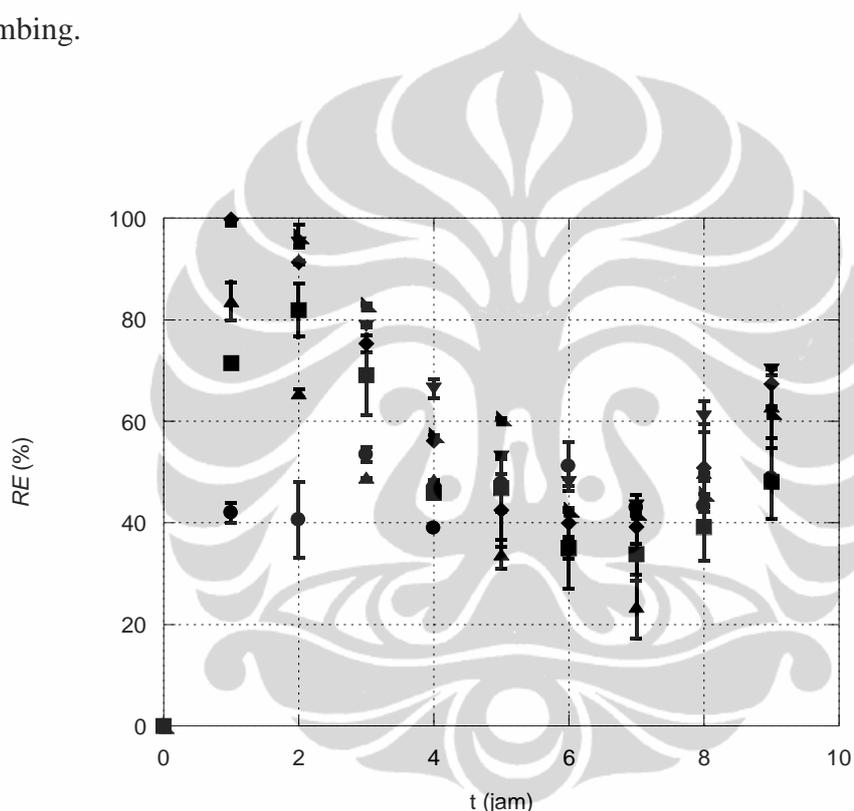
Sumber: Lingga, 1991

Untuk medium kompos berbasis kotoran kambing, laju alir $72 \text{ cm}^3/\text{menit}$ dapat diterima sebagai laju alir terbaik selama 9 jam biofiltrasi, dengan RE mencapai 56,74% (Utami, *et al.*, 2010). Seperti telah dijelaskan sebelumnya, laju alir yang kecil akan meningkatkan waktu kontak antara gas N_2O dengan medium filter kompos. Lamanya waktu kontak akan memperbesar jumlah N_2O yang diadsorp oleh medium filter, dan membuat konsentrasi N_2O yang keluar dari kolom biofilter semakin berkurang, sehingga mengakibatkan nilai RE bertambah besar. Namun patut dicatat bahwa tidak ada perbedaan yang cukup signifikan

pada nilai RE untuk laju alir 72 dan 88 cm³/menit, dalam proses biofiltrasi dengan jenis medium ini.

4.3.2. Pengaruh Penambahan Kandungan Air dalam Medium Filter

Kandungan air (wc) dalam medium filter dievaluasi pada kedalaman medium (h) 50 cm dan laju alir (Q) 72 cm³/menit. Gambar 4.11 berikut menunjukkan pengaruh penambahan kandungan air dalam medium filter terhadap RE yang dihasilkan oleh sistem biofilter dengan medium kompos berbasis kotoran kambing.



Gambar 4.11. RE pada Variasi Kandungan Air (wc) dalam Medium (medium kompos berbasis kotoran kambing, $Q=72$ cm³/menit, $h=50$ cm, ● wc = 0%; ■ wc = 30%; ◆ wc = 40%; ▲ wc = 50%; ▼ wc = 60%; ▴ wc = 70%)

Dari Gambar 4.11 diperoleh informasi bahwa waktu yang dibutuhkan oleh sistem biofilter dengan penambahan kandungan air pada medium kompos berbasis kotoran kambing untuk mencapai kondisi stabil cukup lama, yaitu sekitar 5-6 jam. Namun ketidakstabilan hingga akhir waktu operasi (9 jam), dan peristiwa keluarnya air dari bagian bawah kolom, seperti yang terjadi pada kompos berbasis kotoran sapi, tidak terlihat. Hal ini disebabkan oleh kandungan air pada kotoran

kambing yang relatif lebih rendah, seperti yang telah diperlihatkan oleh Tabel 4.2 di atas, sehingga tambahan air yang diberikan kepada medium masih dalam taraf yang wajar.

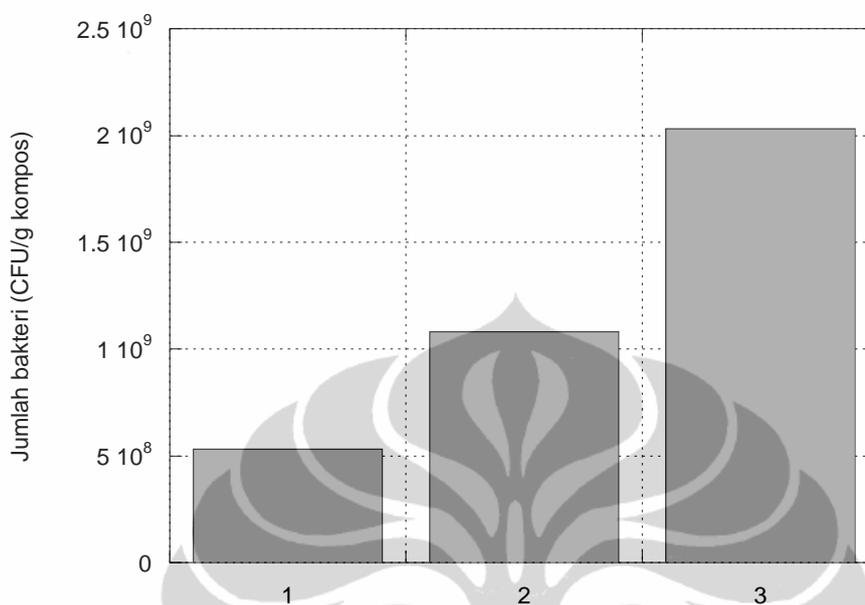
Efisiensi penghilangan (*Removal Efficiency/RE*) gas N_2O cenderung meningkat pada kandungan air yang lebih besar. Kondisi medium kompos yang lebih lembab akan menyebabkan porositas medium berkurang, dan waktu kontak N_2O dengan medium kompos menjadi lebih lama. Akibatnya, proses adsorpsi dapat terjadi dengan lebih maksimal, sehingga nilai RE semakin besar. Ini akan terjadi hingga kondisi optimal tercapai. Gambar 4.11 juga menunjukkan bahwa pada kandungan air yang lebih besar dari 60%, RE akan mengalami penurunan akibat efek kompaksi dari medium filter yang lembab.

Salah satu faktor yang harus diperhatikan pada pemilihan medium filter adalah kemampuan medium dalam menyimpan kelembaban untuk mendukung kondisi lapisan *biofilm* (Shareefdeen dan Singh, 2005). Kelembaban yang direkomendasikan untuk medium filter organik berkisar 40-60% (berdasarkan berat) (Van Lith, *et al.*, 1997). Biofiltrasi beroperasi paling efisien pada kandungan kelembaban 50-70% dan suhu antara 15 dan 35°C (Nicolai dan Janni, 2001).

Kandungan air dalam medium filter penting bagi kelangsungan hidup dan metabolisme mikroorganisme, dan turut memberikan kontribusi pada kapasitas *buffer* medium (Van Lith, *et al.*, 1997). Kandungan air pada medium filter kompos merupakan penentu stabilitas partikel kompos, karena kompos merupakan material yang hidrofilik dan air merupakan senyawa yang bersifat adhesif (Govind, 2010). Semakin banyak kandungan air, partikel kompos akan semakin lengket satu sama lain, sehingga mempertinggi kestabilan partikel. Kandungan air juga membantu mempertahankan agar *biofilm* tidak mengering dan tetap menempel pada permukaan medium filter.

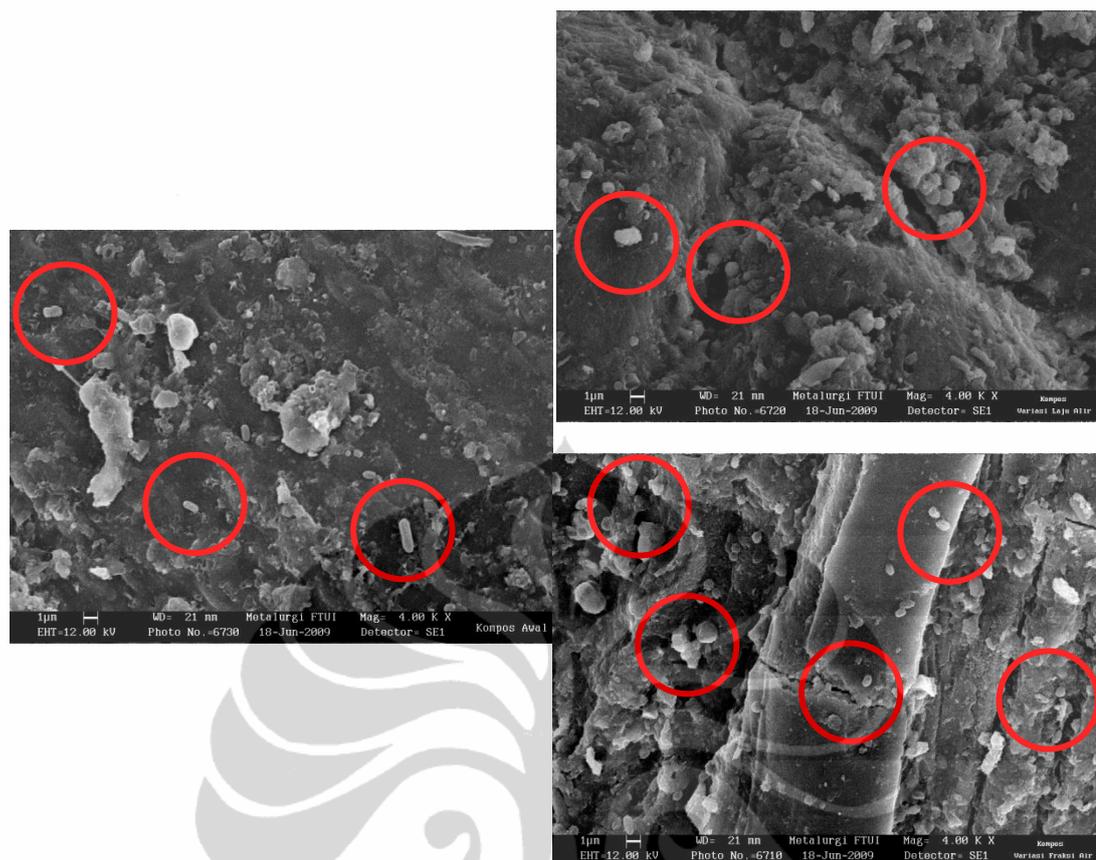
4.3.3. Analisis Perubahan Jumlah Bakteri pada Permukaan Medium

Pengaruh proses biofiltrasi terhadap perubahan jumlah koloni bakteri dalam medium kompos berbasis kotoran kambing, hasil analisis dengan metode TPC, dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12. Jumlah Koloni Bakteri Sebelum/Setelah Biofiltrasi dengan TPC (kompos berbasis kotoran kambing, $t = 9$ jam, 1 = medium sebelum biofiltrasi; 2 = medium setelah biofiltrasi (kering); 3 = medium setelah biofiltrasi (basah))

Ada beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari Gambar 4.12 di atas, yaitu bahwa proses biofiltrasi gas N_2O mengakibatkan perubahan pada jumlah koloni bakteri dalam medium kompos, dan bahwa kelembaban atau kondisi lingkungan medium dapat mempengaruhi pertumbuhan dan aktivitas bakteri di dalamnya. Hasil analisis TPC dilengkapi juga dengan hasil analisis SEM pada Gambar 4.13, untuk melihat perubahan pada morfologi permukaan dari medium kompos sebelum dan setelah biofilter beroperasi selama 9 jam. Hasil analisis SEM ini semakin memperkuat kesimpulan yang telah disebutkan sebelumnya.

(a). Sebelum biofiltrasi N_2O (b). Setelah biofiltrasi N_2O **Gambar 4.13.** Hasil Analisis SEM pada Kompos Berbasis Kotoran Kambing

Pada medium kompos berbasis kotoran kambing, kondisi optimum yang dapat diperoleh dalam penelitian proses biofiltrasi N_2O selama 9 jam adalah pada laju alir $72 \text{ cm}^3/\text{menit}$, dan penambahan kandungan air dalam medium filter 60%. Selanjutnya dilakukan komparasi terhadap kinerja biofiltrasi pada kedua jenis medium kompos, agar dapat ditentukan jenis medium kompos yang lebih baik.

4.4. Pemilihan Material Kompos sebagai Medium dalam Biofiltrasi Gas Dinitrogen Monoksida

Pemilihan material kompos dilakukan dengan membandingkan dua jenis medium filter, yaitu kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing, melalui pengkajian aspek karakteristik medium dan kinerja medium sebagai filter dalam proses biofiltrasi gas N_2O .

4.4.1. Karakteristik Medium Kompos

Hasil karakterisasi kandungan kompos untuk kedua jenis kompos yang digunakan dalam tahap optimasi, yaitu kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing ditampilkan pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3. Hasil Karakterisasi Kandungan Kompos

Kompos berbasis kotoran sapi			
Parameter	Satuan	Hasil	Metoda
Kandungan Nitrogen (N)	%	1,19	SNI 02-2803-2000
Kandungan P ₂ O ₅	%	1,70	957.02 958.01 (AOAC 17ed 2000)
Kandungan K ₂ O	%	0,59	956.09 (AOAC 17ed 2000)
Kandungan Sulfur (S)	%	0,18	973.57 (AOAC 17ed 2000)
Kandungan Karbon organik (C)	%	15,39	Kurmies
Rasio C/N		12,93	
Kompos berbasis kotoran kambing			
Parameter	Satuan	Hasil	Metoda
Kandungan Nitrogen (N)	%	1,73	SNI 02-2803-2000
Kandungan P ₂ O ₅	%	2,57	957.02 958.01 (AOAC 17ed 2000)
Kandungan K ₂ O	%	1,56	956.09 (AOAC 17ed 2000)
Kandungan Sulfur (S)	%	0,34	973.57 (AOAC 17ed 2000)
Kandungan Karbon organik (C)	%	30,17	Kurmies
Rasio C/N		17,44	

Sumber: Laboratorium Sucofindo, Cibitung

Dari Tabel 4.3 terlihat bahwa kompos berbasis kotoran kambing memiliki nilai rasio C/N serta kandungan senyawa P, K, dan S, yang lebih besar daripada kompos berbasis kotoran sapi. Hasil karakterisasi kandungan kompos ini akan membantu dalam analisis terhadap kinerja sistem biofilter dengan medium kompos yang digunakan dalam mereduksi gas N₂O.

Hasil karakterisasi permukaan dan pori kompos dengan metode BET dapat dilihat pada Tabel 4.4. Hasil BET menunjukkan bahwa radius pori dari kedua jenis kompos < 20 Å, menjadikan pori-pori dari medium kompos ini

sebagai mikropori. Ukuran pori yang kecil menyebabkan permukaan kompos yang dapat dijadikan substrat bagi aktivitas mikroorganisme lebih luas, sehingga dapat mendorong pertumbuhan mikroorganisme di permukaan medium kompos.

Tabel 4.4. Hasil Karakterisasi Permukaan dan Pori Kompos

Karakteristik	Kompos berbasis kotoran sapi	Kompos berbasis kotoran kambing
Luas permukaan (m ² /g)	3,975	5,691
Diameter pori (Å)	18,0	18,4

Sumber: Lab. RPKA – DTK UI

Diameter pori medium yang lebih kecil dan homogen, menyebabkan permukaan medium yang dapat dijadikan substrat bagi aktivitas mikroorganisme lebih luas (Suriawira, 2006). Area permukaan spesifik yang besar merupakan karakteristik favorit untuk aplikasi biofiltrasi (Zilli, *et al.*, 1993). Area permukaan spesifik medium filter berpengaruh pada kinerja biofiltrasi. Area permukaan yang lebih besar, lebih baik untuk penempatan mikroorganisme dan pertukaran/difusi antara fasa gas dan lapisan *biofilm*, sehingga meningkatkan aktivitas degradasi oleh mikroorganisme (Kent, *et al.*, 2000). Tingkat biodegradasi berhubungan dengan aktivitas mikroorganisme, yang dipengaruhi oleh luas permukaan yang tersedia untuk pertukaran gas pada *biofilm* (Ravi, *et al.*, 2009).

Karakterisasi komposisi mikroorganisme dalam medium kompos dilakukan dengan enumerasi kelimpahan mikroorganisme aerob yang ada pada kompos dengan Metode Tuang Permukaan (*Surface Plate Method*). Hasil enumerasi mikroorganisme pada kedua jenis medium kompos sebelum proses biofiltrasi, disajikan dalam Tabel 4.5. Hasil enumerasi pada Tabel 4.5 memperlihatkan bahwa kedua jenis medium kompos mengandung jumlah bakteri aerob lebih banyak dibandingkan *yeast* dan jamur. Menurut Batzing (2002), sistem pencernaan sapi dan kambing didominasi oleh bakteri, kemudian mikroorganisme lain seperti *fungi*.

Tabel 4.5. Hasil Enumerasi Mikroorganisme dalam Kompos

Jumlah mikroorganisme (CFU/g kompos)	Kompos berbasis kotoran sapi	Kompos berbasis kotoran kambing
Bakteri	$1,8 \times 10^6$	$7,1 \times 10^6$
Aktinomisetes	$3,9 \times 10^6$	$1,0 \times 10^6$
<i>Yeast</i>	$1,3 \times 10^5$	$0,4 \times 10^5$
Jamur	$1,3 \times 10^5$	$8,9 \times 10^5$

Sumber: Lab. Mikrobiologi – LIPI

Selain karakterisasi medium kompos, juga dilakukan pengukuran sifat-sifat (*properties*) fisika dan kimia dari kompos yaitu: densitas, porositas, kelembaban, dan pH medium. Pengukuran dilakukan sebelum dan setelah proses biofiltrasi, untuk melihat perubahan dari sifat kompos setelah digunakan sebagai medium filter. Tabel 4.6. menampilkan sifat-sifat kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing sebelum digunakan dalam proses biofiltrasi N₂O. Perubahan sifat-sifat kompos setelah digunakan sebagai medium filter dilakukan untuk memperjelas fenomena yang menjadi penyebab atau diakibatkan oleh proses biofiltrasi itu sendiri.

Tabel 4.6. Sifat Fisika dan Kimia Kompos Sebelum Biofiltrasi

Sifat (Fisika/Kimia)	Kompos berbasis kotoran sapi	Kompos berbasis kotoran kambing
Densitas (g/mL)	0,5554	0,4940
Porositas (%)	83,21	78,00
Kelembaban (%)	57,72	31,32
pH	8,10	6,73

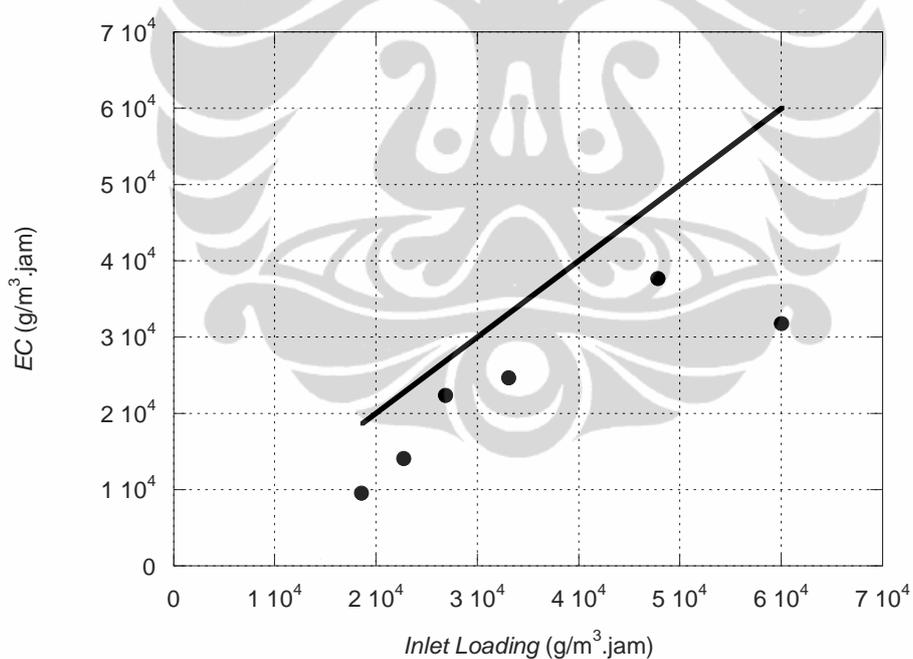
4.4.2. Hasil Uji Kinerja Medium Kompos

Sebelum lebih jauh melakukan komparasi antara kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing, Tabel 4.7 di bawah ini telah menunjukkan hasil perbandingan nilai RE antara kedua jenis kompos pada kondisi operasi yang sama.

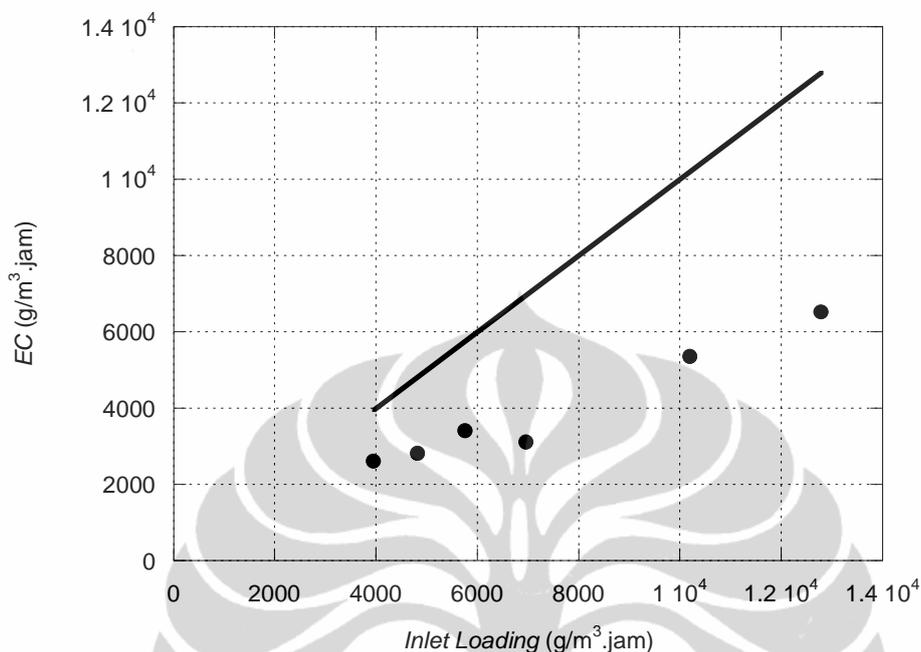
Tabel 4.7. Perbandingan RE untuk Kedua Jenis Medium Kompos

Basis medium kompos	RE (%) pada t = 9 jam	
	Laju alir 72 cm ³ /menit	Kandungan air 50%
Kotoran sapi	47,10	61,00
Kotoran kambing	56,74	62,95

Untuk mengevaluasi dan membandingkan kinerja dari kedua jenis medium kompos dalam proses biofiltrasi N₂O, selain parameter RE juga digunakan parameter EC (*Elimination Capacity*), yang menunjukkan besarnya polutan yang dapat dihilangkan dalam proses biofiltrasi. Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 berturut-turut adalah profil EC pada biofiltrasi gas N₂O dengan medium kompos berbasis kotoran sapi dan kotoran kambing.



Gambar 4.14. Profil EC Biofiltrasi N₂O ; Kompos Berbasis Kotoran Sapi
(— RE 100% ; ● data eksperimen)



Gambar 4.15. Profil EC Biofiltrasi N₂O ; Kompos Berbasis Kotoran Kambing (— RE 100% ; ● data eksperimen)

Elimination Capacity (EC) merupakan kapasitas penghilangan aktual dari sistem biofilter terhadap suatu jenis polutan. Nilai EC umumnya lebih rendah daripada *inlet loading* (IL), dan akan bernilai sama jika kondisi 100% RE dapat dicapai. Garis linier pada kedua grafik di atas merupakan kondisi RE 100%. Dapat dilihat bahwa pada proses biofiltrasi dengan kondisi parameter operasi yang dilakukan, baik menggunakan medium kompos berbasis kotoran sapi maupun kotoran kambing, belum mencapai RE 100%.

Jika profil EC dari kedua jenis medium ini dibandingkan, terlihat bahwa EC dari medium kompos berbasis kotoran kambing masih dapat ditingkatkan, namun tidak demikian halnya dengan kompos berbasis kotoran sapi yang telah mengalami penurunan nilai EC pada IL di atas 50.000 g/m³.jam. Kinerja medium kompos berbasis kotoran kambing yang lebih baik daripada medium kompos berbasis kotoran sapi dalam mereduksi polutan gas N₂O, disebabkan oleh karakteristik medium jenis ini yang memiliki nilai rasio C/N yang lebih tinggi dan

kondisi kelembaban serta porositas yang lebih sesuai, yang akan mempengaruhi kinerja sistem dalam biofiltrasi N_2O . Dasar pemilihan medium kompos berbasis kotoran kambing juga didukung oleh hasil TPC untuk jumlah bakteri yang dilakukan sebelum dan setelah proses biofiltrasi selama 9 jam, seperti yang dapat dilihat pada Tabel 4.8.

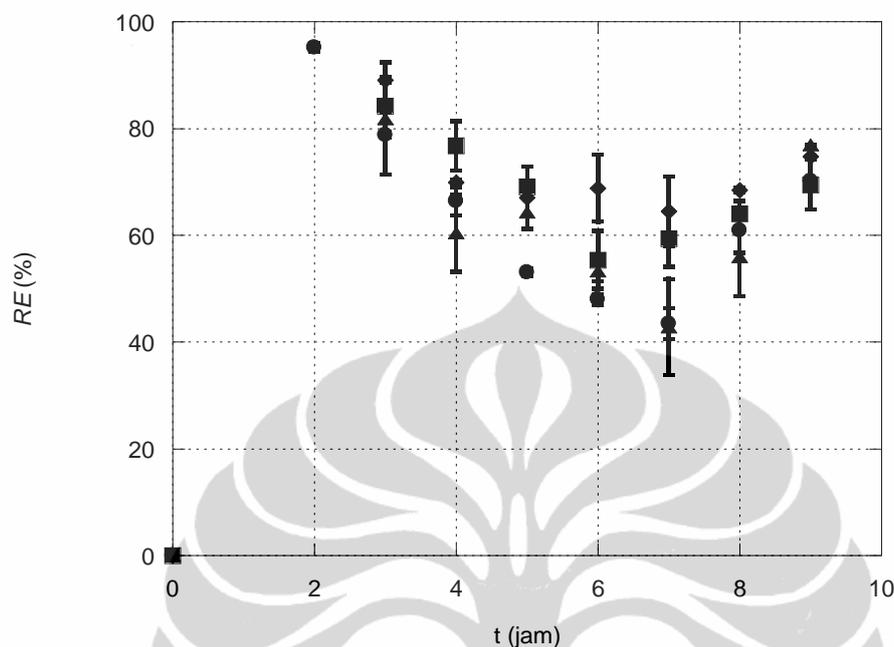
Tabel 4.8. Hasil TPC untuk Kedua Jenis Medium Kompos

Basis medium kompos	Kompos awal (CFU/g) (sebelum biofiltrasi)	Setelah biofiltrasi pada WC optimum (CFU/g)
Kotoran sapi	$1,85 \times 10^7$	$1,63 \times 10^9$
Kotoran kambing	$5,32 \times 10^8$	$2,03 \times 10^9$

Peningkatan efisiensi reduksi disebabkan adanya kinerja mikroorganisme yang semakin baik karena mendapat nutrisi dari gas N_2O yang mengalir dalam sistem. Pertumbuhan populasi mikroorganisme didukung oleh energi (ATP) dari transformasi polutan udara pada sistem biofilter (Shuler dan Kargi, 1992).

4.4.3. Penggunaan *Nitrobacter* sp. dan Penambahan Nutrisi

Peningkatan nilai EC untuk proses biofiltrasi N_2O dengan medium kompos berbasis kotoran kambing dilakukan dengan cara penambahan Bakteri ke dalam medium filter. Bakteri yang digunakan adalah *Nitrobacter* sp. sebagai bakteri nitrifikasi penambat N dari N_2O . Pada medium filter juga ditambahkan nutrisi yang diharapkan dapat meningkatkan kinerja bakteri menjadi lebih baik dalam mereduksi N_2O . Kandungan nutrisi yang cukup harus tersedia, agar diperoleh performansi yang baik dari sistem biofilter. Hasil penambahan *Nitrobacter* sp. baik tanpa atau dengan penambahan nutrisi terhadap nilai RE dapat dilihat pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16. RE pada Penggunaan *Nitrobacter* sp. dan Penambahan Nutrisi (kompos berbasis kotoran kambing, $Q=72 \text{ cm}^3/\text{menit}$, $h=50 \text{ cm}$, $wc=60\%$, ● tanpa *Nitrobacter* sp.; ■ dengan *Nitrobacter* sp. tanpa nutrisi; ◆ dengan *Nitrobacter* sp. dan nutrisi alami; ▲ dengan *Nitrobacter* sp. dan nutrisi sintetik)

Dari Gambar 4.16 terlihat bahwa, walaupun kondisi stabil baru tercapai setelah 5-6 jam kolom biofilter beroperasi, namun penggunaan *Nitrobacter* sp. yang disertai dengan penambahan nutrisi, dapat meningkatkan nilai RE hingga 76,90% setelah 9 jam beroperasi (Utami, *et al.*, 2011). Perubahan jumlah koloni bakteri hasil analisis dengan metode TPC dalam medium kompos berbasis kotoran kambing dengan adanya penambahan *Nitrobacter* sp. dan nutrisi, disajikan pada Tabel 4.9.

Nutrisi dan *trace element* yang digunakan dalam penambahan nutrisi sintetik mengandung unsur-unsur N, S, P, Ca, K, Na, Mg, Fe, Co, dan Zn. Menurut Shuler dan Kargi (1992), mineral yang dibutuhkan oleh mikroorganisme mengandung S, P, Ca, K, Na, Mg, Fe, Co, dan Zn. Hal tersebut menyebabkan hasil dari penambahan nutrisi sintetik lebih baik dibandingkan nutrisi alami. Namun demikian, suplai nutrisi yang berlebih dapat menyebabkan pertumbuhan

mikroorganisme yang berlebih (*over growth*), yang dapat menyebabkan *clogging* pada biofilter, dan menghasilkan penurunan efisiensi reduksi polutan (Gribbins dan Loehr, 1998). Konsumsi nutrisi yang terlalu cepat akan mengakibatkan laju reduksi polutan menurun, sehingga penambahan nutrisi harus dilakukan agar kinerja sistem biofilter membaik (Morgenroth, *et al.*, 1995).

Tabel 4.9. Perubahan Jumlah Koloni Bakteri, Kompos Kotoran Kambing

Perlakuan	Jumlah bakteri (CFU/g kompos)	
	Sebelum	Setelah
	Biofiltrasi	
Tanpa penggunaan <i>Nitrobacter</i> sp.	$5,32 \times 10^8$	$2,03 \times 10^9$
Dengan penggunaan <i>Nitrobacter</i> sp., tanpa nutrisi	$2,63 \times 10^9$	$3,97 \times 10^9$
Dengan penggunaan <i>Nitrobacter</i> sp., dengan nutrisi alami	$3,36 \times 10^9$	$4,90 \times 10^9$
Dengan penggunaan <i>Nitrobacter</i> sp., dengan nutrisi sintetik	$2,99 \times 10^9$	$4,77 \times 10^9$

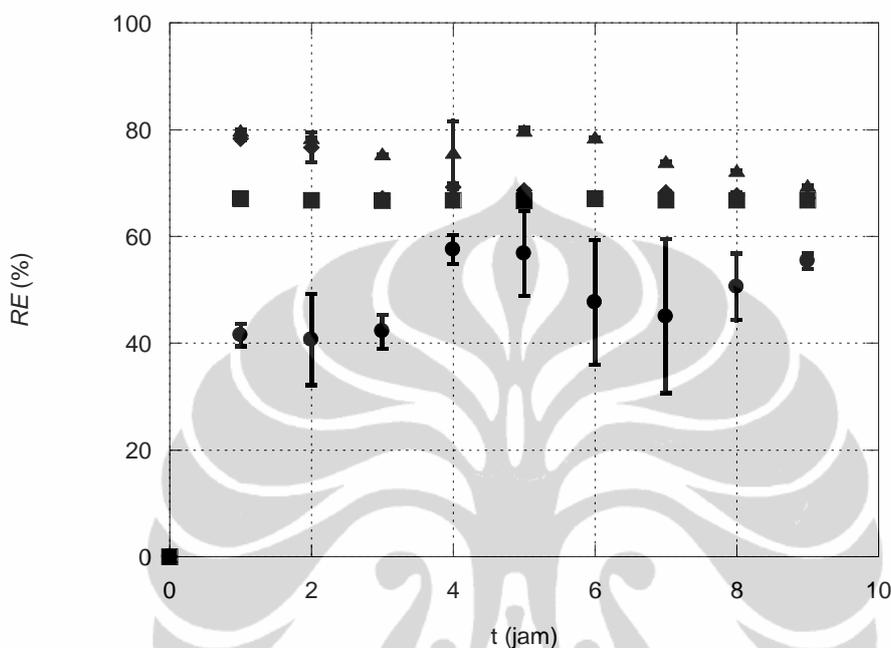
Dari hasil TPC pada Tabel 4.9 dapat disimpulkan bahwa penambahan *Nitrobacter* sp. tidak memberikan pengaruh yang cukup signifikan pada jumlah koloni bakteri di dalam kompos. Hasil analisis terhadap medium kompos berbasis kotoran kambing seperti yang diperlihatkan oleh Tabel 4.5, memastikan bahwa penambahan bakteri ke dalam medium kompos tidak cukup layak untuk dilakukan, mengingat kompos sendiri telah begitu kaya dengan komunitas mikroorganisme yang kompleks.

4.5. Optimasi Lanjut Biofiltrasi Dinitrogen Monoksida dengan Medium Kompos Berbasis Kotoran Kambing

4.5.1. Pengaruh Kedalaman Medium Filter

Optimasi lanjut dari sistem biofilter dengan medium kompos berbasis kotoran kambing, dilakukan dengan mengkaji pengaruh kedalaman medium filter. Kedalaman medium filter divariasikan pada rentang 50 – 100 cm, dengan basis massa dari medium kompos, yaitu 945 g kompos berbasis kotoran kambing untuk

kedalaman medium 50 cm. Basis massa digunakan untuk mengantisipasi penggunaan medium kompos jenis lain.



Gambar 4.17. RE pada Variasi Kedalaman (h) Medium Kompos (medium kering kompos berbasis kotoran kambing, $Q=88 \text{ cm}^3/\text{menit}$,
 ● h = 50 cm; ■ h = 60 cm; ◆ h = 80 cm; ▲ h = 100 cm)

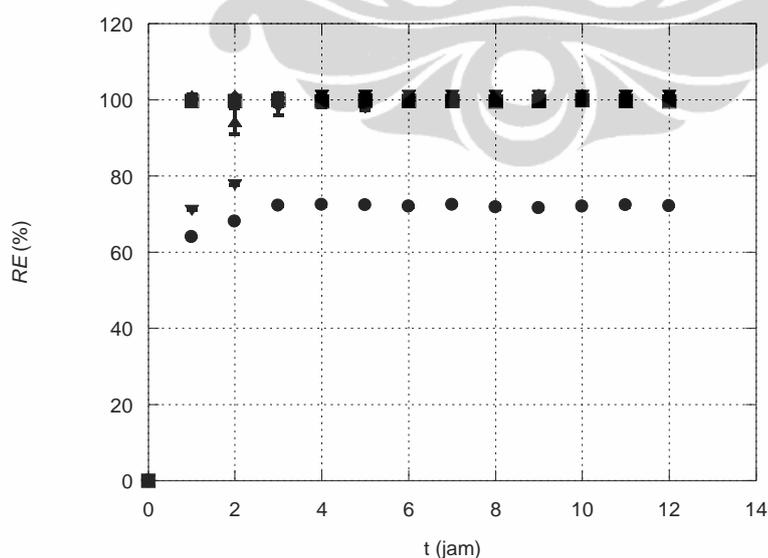
Gambar 4.17 di atas memperlihatkan perubahan nilai RE selama 9 jam sistem biofilter beroperasi, terhadap perubahan kedalaman medium. Terlihat jelas bahwa kedalaman medium 100 cm memberikan nilai RE yang lebih besar hingga mencapai 70%. Pada kedalaman yang lebih besar, jumlah massa medium kompos yang digunakan sebagai filter akan semakin besar pula. Jumlah adsorben yang besar akan meningkatkan jumlah adsorbat yang dapat diadsorb oleh medium, dalam hal ini gas N_2O , sehingga menurunkan konsentrasi gas N_2O yang meninggalkan kolom, serta memperbesar nilai RE dari sistem biofilter. Hingga kedalaman medium 100 cm, tidak terjadi penurunan tekanan yang signifikan di dalam kolom biofilter.

Hasil penelitian Yang, *et al.* (2007) menyatakan bahwa kedalaman medium yang besar dapat menghasilkan performansi reduksi yang lebih baik. Hal

ini disebabkan oleh semakin banyaknya gas polutan yang mengalami kontak dengan medium dan mikroorganisme, sehingga semakin banyak pula gas yang dapat direduksi. Menurut Shareefdeen dan Singh (2005), kedalaman medium 1 m adalah kedalaman yang umum digunakan untuk sistem biofilter, karena memberikan waktu tinggal yang cukup dan meminimisasi area yang dibutuhkan. Penggunaan kedalaman yang lebih besar untuk menghasilkan laju *loading* yang tinggi, akan meningkatkan *headloss* pada sistem. Peningkatan kedalaman medium juga berpotensi membuat medium filter pada bagian bawah menjadi padat, sehingga mengakibatkan timbulnya penurunan tekanan yang tinggi dan *channeling*.

4.5.2. Pengaruh Waktu Inkubasi Medium

Optimasi lanjut dilakukan pula dengan mengkaji pengaruh waktu inkubasi pada medium kompos berbasis kotoran kambing. Waktu inkubasi merupakan periode atau masa setelah pemberian larutan nutrisi sintetik 60% berat pada medium hingga sebelum medium tersebut digunakan dalam proses biofiltrasi. Hasil dari variasi waktu inkubasi ini ditunjukkan oleh Gambar 4.18.



Gambar 4.18. RE pada Variasi Waktu Inkubasi (t_i) Medium Kompos (medium kompos berbasis kotoran kambing, $h=100\text{cm}$, $Q=88\text{ cm}^3/\text{menit}$,
 ● $t_i = 21\text{ jam}$; ■ $t_i = 24\text{ jam}$; ◆ $t_i = 27\text{ jam}$; ▲ $t_i = 131\text{ jam}$; ▼ $t_i = 167\text{ jam}$)

Dari Gambar 4.18, terlihat bahwa pada masa inkubasi 24 jam atau lebih diperoleh efisiensi penghilangan polutan mencapai 100%. Menurut Gaudin, *et al.*, (2008) laju pelepasan nitrogen dan fosfor dari larutan nutrisi sintetis cukup rendah selama 24 jam pertama, di mana jangka waktu tersebut disebut sebagai *minimum dissolution level*. Setelah melewati 24 jam, kestabilan laju kelarutan baru tercapai, dan pelepasan nitrogen dan fosfor dari nutrisi sintetis akan mencapai homogenitas. Hal ini didukung pula oleh hasil perhitungan jumlah koloni bakteri dalam medium filter setelah masa inkubasi, dengan analisis TPC yang mencapai $1,23 \times 10^{13}$ CFU/g.

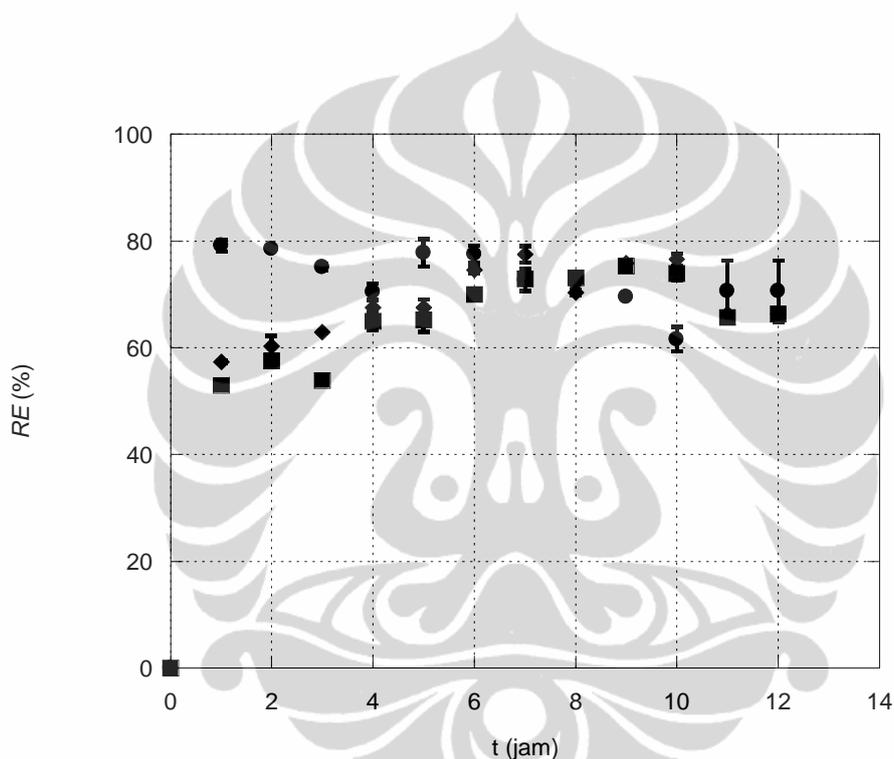
4.5.3. Pengaruh Dimensi Medium Filter

Pengaruh dimensi medium filter turut dikaji dalam tahap optimasi lanjut ini. Adu dan Otten (1996) telah melaporkan bahwa ukuran partikel merupakan parameter yang lebih berpengaruh terhadap kinerja biofilter dibandingkan laju aliran gas. Untuk itu, dimensi medium filter kompos divariasikan dalam bentuk pelet dengan ukuran 5x5 mm dan 5x8 mm. Ukuran ini sesuai dengan yang diusulkan oleh Eitner dan Gethke (1987) serta Lesson dan Winer (1991) bahwa ukuran minimal pelet adalah sebesar 4 mm untuk meminimalkan penurunan tekanan dalam sistem biofilter.

Ukuran pelet yang besar baik untuk aliran gas, namun akan mengurangi jumlah situs aktif bagi aktivitas mikrobial di permukaan medium (Delhomenie, *et al.*, 2002). Luas area permukaan spesifik merupakan batas substansial pada proses biodegradasi. Kinerja reduksi sistem biofilter meningkat saat luas permukaan spesifik meningkat atau ukuran pelet berkurang (Delhomenie, *et al.*, 2002).

Allen dan Yang (1991) telah mengamati bahwa medium filter yang berukuran kurang dari 1 mm akan menyebabkan penurunan tekanan yang signifikan. Kent, *et al.* (2000) melaporkan bahwa penyumbatan pada medium terjadi lebih dengan cepat pada dimensi pelet yang lebih kecil (2 – 4 mm). Lesson (1998) mengobservasi bahwa partikel yang berukuran kurang dari 3 mm, cenderung mengalami penyumbatan (*clogging*). Untuk mengurangi penurunan tekanan, Ottengraf, *et al.* (1986) mengusulkan penambahan polistirena berukuran

3 – 5 mm pada medium. Williams dan Miller (1992) menyebutkan medium filter harus mengandung sedikitnya 60% partikel berukuran lebih besar dari 4 mm. Karakteristik medium filter seperti susunan partikel dalam bioreaktor, area yang tersedia untuk pertukaran gas/mikroorganisme, aliran gas, dan lain sebagainya, secara langsung berhubungan dengan parameter granulometrik partikel medium (ukuran, densitas, dan porositas), serta mendukung fenomena perpindahan dalam medium.



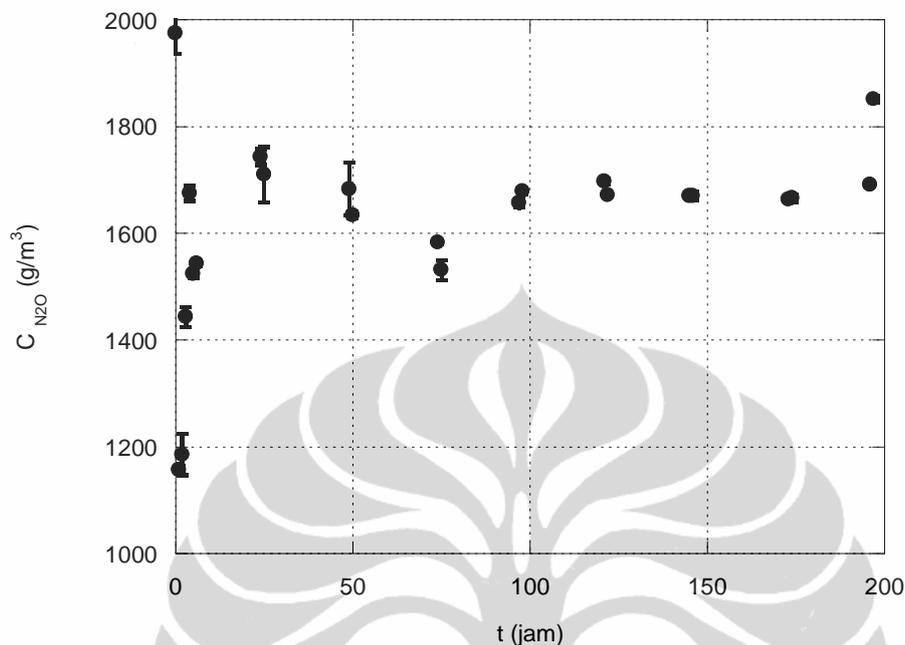
Gambar 4.19. RE pada Variasi Dimensi Medium Kompos (medium kering kompos berbasis kotoran kambing, $h=100\text{cm}$, $Q=88\text{ cm}^3/\text{menit}$, ● kompos curah; ■ pellet kompos (5x8) mm; ◆ pellet kompos (5x5) mm)

Pada Gambar 4.19 dapat diketahui bahwa pelet kompos ukuran 5x5 mm memberikan kondisi sistem biofilter yang lebih stabil dibandingkan pelet kompos ukuran 5x8 mm. Hal ini dikarenakan pada laju alir yang sama dengan diameter yang berbeda maka profil aliran secara mikroskopis pada *biofilm* juga berbeda. Ketika kontaminan telah mencapai daerah *biofilm* pada permukaan medium filter, maka akan terjadi proses biodegradasi terhadap polutan. Proses biodegradasi tersebut berada dalam daerah laminar (Devinny, *et al.*, 1999). Pada ukuran

medium filter yang lebih besar akan terjadi aliran yang lebih turbulen akibat porositas medium yang besar, sehingga mempengaruhi daerah laminar pada *biofilm*. Pada penggunaan medium filter kompos curah, reduksi polutan lebih tinggi karena permukaan *biofilm* yang lebih luas. Namun ketidakstabilan sistem yang terjadi di awal proses biofiltrasi tidak diharapkan dan sebaiknya dihindari.

4.5.4. Biofiltrasi N₂O secara Kontinyu dengan Medium Filter Pelet Kompos

Untuk mengamati tingkat stabilitas dan kinerja dari medium filter, proses biofiltrasi gas N₂O dilakukan secara kontinyu hingga daya reduksi medium filter kompos terhadap polutan mengalami penurunan. Proses biofiltrasi berlangsung pada kondisi laju alir gas N₂O 88 cm³/menit, kedalaman medium 100 cm, dengan medium filter berupa pelet kompos berbasis kotoran kambing berdimensi 5x5 mm. Penambahan larutan nutrisi sintetik sebanyak 60% berat kepada medium dilakukan untuk mempertahankan stabilitas dan meningkatkan kinerja dari medium filter kompos. Gambar 4.20 di bawah ini memperlihatkan perubahan konsentrasi gas N₂O yang meninggalkan kolom biofilter selama proses biofiltrasi berlangsung.



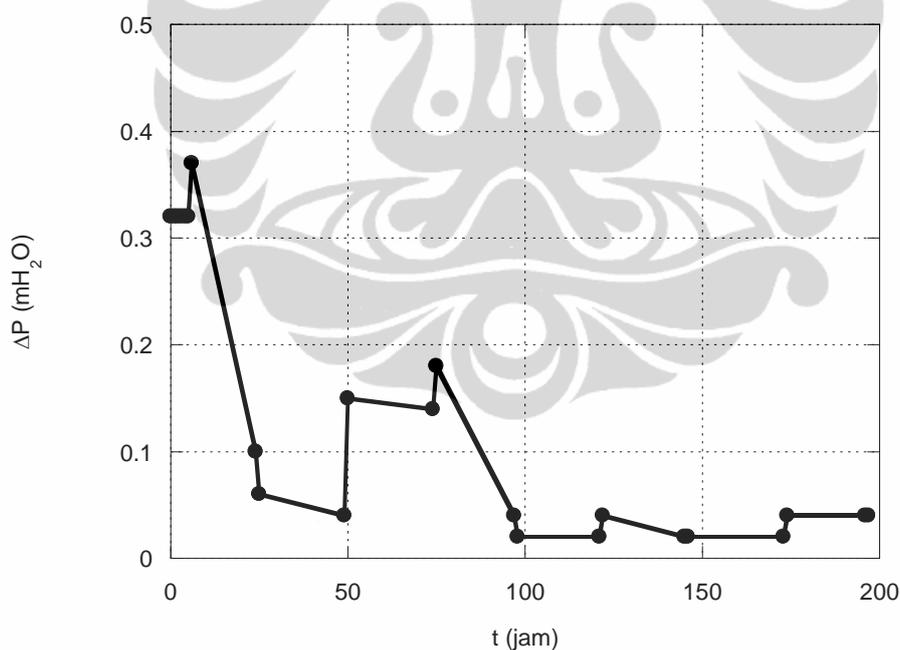
Gambar 4.20. Konsentrasi Keluaran Gas N₂O pada Uji Stabilitas Medium (medium pelet kompos kotoran kambing, h=100 cm, Q=88 cm³/menit, wc=60%)

Pengujian ini memberikan hasil bahwa daya reduksi medium pelet kompos berbasis kotoran kambing terhadap polutan gas N₂O dapat stabil hingga jam ke-200, dengan RE rata-rata mencapai 65%. Hasil ini cukup baik mengingat proses berlangsung aerob dan tidak dilakukannya pemberian nutrisi secara periodik seperti yang dilakukan oleh Yang, *et al.* (2007) pada biofiltrasi NO dengan nilai RE melebihi 90%.

Gilbert (2008) menyatakan penurunan konsentrasi gas N₂O terjadi karena penyerapan oleh adsorben hingga waktu tertentu, sebelum mencapai kesetimbangan adsorpsi. Selanjutnya reduksi gas N₂O akan sepenuhnya ditentukan oleh aktivitas biodegradasi mikroorganisme hingga aktivitas biodegradasi tersebut menurun akibat pembusukan medium sebagai tanda telah habisnya sumber karbon di dalam medium filter. Menurut Schroeder (2002), reduksi polutan merupakan proses dengan banyak tahap, dalam proses tersebut terjadi penyekatan (*partitioning*) ke fasa cair/*liquid*, transpor ke sel bakteri pada

biofilm, dan diikuti dengan transpor melalui membran sel untuk proses metabolisme.

Dalam pengujian ini, pengamatan juga dilakukan pada penurunan tekanan (*pressure drop*) yang dapat terjadi dalam proses biofiltrasi secara kontinyu. Dapat dilihat pada Gambar 4.21, penurunan tekanan di sepanjang kolom biofilter yang cukup signifikan, hanya terjadi pada jam-jam awal sistem biofilter beroperasi. Kinney, *et al.* (1996) dan Mohsen, *et al.* (1998) meyakini bahwa penurunan tekanan berhubungan dengan adanya resistansi aliran gas yang melewati medium filter. Penurunan tekanan dapat juga terjadi akibat adanya akumulasi pertumbuhan mikroorganisme pada medium (Schroeder, 2002). Penurunan tekanan yang besar dapat menghambat kinerja reduksi biofilter terhadap polutan gas.



Gambar 4.21. Penurunan Tekanan pada Uji Stabilitas Medium (medium pelet kompos kotoran kambing, $h=100$ cm, $Q=88$ cm³/menit, $w_c=60\%$)

Akumulasi mikroorganisme yang terlokalisasi pada medium filter merupakan salah satu penyebab utama peningkatan penurunan tekanan. Penurunan tekanan tidak bernilai linier terhadap akumulasi mikroorganisme dan jumlah polutan yang tereduksi (Fernando, *et al.*, 2001). Pertumbuhan mikroorganisme pada permukaan medium filter dapat mengakibatkan semakin kecilnya rongga antar partikel medium, sehingga gas akan semakin sulit melewati celah antar partikel untuk keluar dari sistem biofiltrasi (Gabriel, 2007).

Beberapa penelitian menyebutkan bahwa terdapat hubungan antara penurunan tekanan dengan pertumbuhan mikroorganisme dan *clogging* yang disebabkan (Hodge, *et al.*, 1992). Peningkatan penurunan tekanan diakibatkan adanya penurunan ruang kosong antar partikel atau porositas efektif medium (Sorral, *et al.*, 1995). Penurunan tekanan yang tinggi tidak diharapkan terjadi dalam sistem biofilter karena akan memperbesar biaya operasional (Kibazohi, *et al.*, 2004). Untuk mencegah peningkatan penurunan tekanan yang diakibatkan oleh akumulasi pertumbuhan mikroorganisme, dilakukan penambahan nutrisi dalam jumlah yang rendah. Hal ini bertujuan untuk mengurangi akumulasi mikroorganisme pada sistem biofilter. Biofilter dapat beroperasi pada penambahan nutrisi yang tinggi jika pengurangan akumulasi mikroorganisme dilakukan secara periodik.

4.5.5. Karakteristik Medium Filter Pelet Kompos Setelah Biofiltrasi

Karakterisasi yang meliputi analisis terhadap perubahan kandungan kompos, enumerasi kelimpahan mikroorganisme, dan identifikasi molekular bakteri dilakukan pada kompos kotoran kambing yang telah digunakan sebagai medium filter dalam biofiltrasi N₂O selama 12 jam. Analisis serta pengukuran sifat-sifat fisik dan kimia dari kompos setelah biofiltrasi bertujuan untuk mengkaji sejauh mana pengaruh proses biofiltrasi terhadap karakteristik kompos berbasis kotoran kambing, agar pemanfaatan kompos sebagai pupuk organik tetap dapat dilakukan.

Tabel 4.10. Perubahan Kandungan Kompos Setelah Proses Biofiltrasi

Parameter	Sebelum biofiltrasi	Setelah biofiltrasi
Kandungan Nitrogen (N), %	1,73	1,72
Kandungan Karbon organik (C), %	30,17	33,77
Rasio C/N	17,44	19,63
Perubahan N, %	1,00	

Sumber: Lab. Sucofindo – Cibitung

Tabel 4.11. Enumerasi Mikroorganisme dalam Kompos Setelah Proses Biofiltrasi

Jumlah mikroorganisme (CFU/g kompos)	Sebelum biofiltrasi	Setelah biofiltrasi
Bakteri	$7,1 \times 10^6$	$37,5 \times 10^6$
Aktinomisetes	$1,0 \times 10^6$	$29,5 \times 10^6$
<i>Yeast</i>	$4,0 \times 10^4$	$47,0 \times 10^4$
Jamur	$8,9 \times 10^5$	$5,4 \times 10^5$

Sumber: Lab. Mikrobiologi – LIPI

Tabel 4.10 dan 4.11 di atas memperlihatkan bahwa setelah 12 jam digunakan sebagai medium dalam proses biofiltrasi N₂O, tidak terjadi perubahan yang cukup signifikan, baik pada kandungan karbon dan nitrogen organik maupun kelimpahan mikroorganisme aerob yang ada di dalam kompos. Setelah digunakan sebagai medium dalam proses biofiltrasi polutan gas N₂O selama 12 jam, kompos berbasis kotoran kambing ini tetap dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik, sesuai dengan fungsi awalnya.

Identifikasi bakteri aerob yang dominan dilakukan secara molekuler berdasarkan analisis genetik secara parsial pada 16S ribosomal DNA oleh Lab. Mikrobiologi LIPI, Cibinong. Hasil analisis molekuler menyimpulkan bahwa takson bakteri sampel lebih memiliki kedekatan ciri genetik dengan *Bacillus cereus* dengan derajat kesamaan/homologi sebesar 98%. *Bacillus cereus* merupakan bakteri yang dapat membentuk spora, dan banyak ditemukan di alam termasuk pada tanah dan perairan. *Bacillus cereus* memiliki ketahanan terhadap perubahan kondisi fisik dan kimia yang terjadi pada lingkungannya. Spesies dari genus *Bacillus* merupakan salah satu kelompok bakteri yang terkandung dalam kompos, yang memiliki kemampuan mereduksi polutan (Kennes dan Veiga,

2001). Kemampuan *B. cereus* dalam mendegradasi kontaminan berupa N_2O menjadi N_2 telah dibuktikan oleh Verbaendert, *et al* (2011) melalui pengujian menggunakan *Acetylene Inhibition Method* (AIM). Degradasi nitrogen dalam biofilter dapat terjadi pada proses respirasi mikroorganisme ataupun melalui penggunaan senyawa nitrogen sebagai sumber energi.

Perubahan sifat-sifat fisik dan kimia dari medium kompos berbasis kotoran kambing setelah 12 jam biofiltrasi ditunjukkan oleh Tabel 4.12. Jika dibandingkan dengan sifat-sifat fisik dan kimia kompos sebelum biofiltrasi (Tabel 4.6), maka terlihat bahwa densitas dan porositas kompos mengalami perubahan. Perubahan ini disebabkan oleh peningkatan kandungan air dalam kompos, yang ditandai dengan terjadinya kenaikan kelembaban dari medium kompos sebesar 34,42%. Kenaikan kelembaban dapat terjadi karena peningkatan kandungan air dalam medium kompos akibat adanya adsorpsi *moisture* dari gas polutan (Pagans, *et al.*, 2005), ataupun sebagai produk samping dari aktivitas mikroorganisme (Nicolai dan Janni, 2001).

Dari Tabel 4.12 juga terlihat perubahan pH dari 6,73 menjadi 7,06. Perubahan pH menunjukkan adanya perubahan komposisi komunitas mikroorganisme pada medium kompos. Mikroorganisme tertentu dapat menjadi lebih dominan, sehingga berpengaruh pada kemampuan degradasi biofilter dan sifat-sifat fisik dan kimia medium kompos. Mikroorganisme memiliki kisaran pH optimum untuk dapat melakukan aktivitasnya, misalnya pH 5-9 untuk bakteri, dan pH 2-7 untuk fungi (Shareefdeen dan Singh, 2005). Banyak bakteri memiliki pH optimum antara 6 dan 8 (Lesson dan Winer, 1991; Ottengraf, 1983), tetapi mikroorganisme seperti *Thiobacillus* tetap dapat mengoksidasi H_2S pada pH asam (Chung, *et al.*, 2000).

Sumber gas polutan pada penelitian ini adalah campuran gas N_2O dalam udara. Udara atmosferik terdiri dari 20% oksigen, 2 ppmv CH_4 , 370 ppmv CO_2 , dan sisanya (80% - 372 ppmv) N_2 (Abichou, *et al.*, 2009). Adanya kandungan gas asam dari udara berupa CO_2 , CH_4 , dan hasil metabolisme mikroorganisme, dapat menjadi faktor penyebab menurunnya pH biofilter setelah sekian lama beroperasi. Meskipun demikian, pengasaman dari medium tidak berpengaruh pada efisiensi reduksi yang dihasilkan (Dumont, *et al.*, 2008).

Tabel 4.12. Sifat Fisika dan Kimia Kompos Setelah Proses Biofiltrasi

Sifat (Fisika/Kimia)	Kompos berbasis kotoran kambing
Densitas (g/mL)	0,5788
Porositas (%)	80,54
Kelembaban (%)	42,10
pH	7,06

4.5.6. Studi Adsorpsi N₂O di Permukaan Kompos

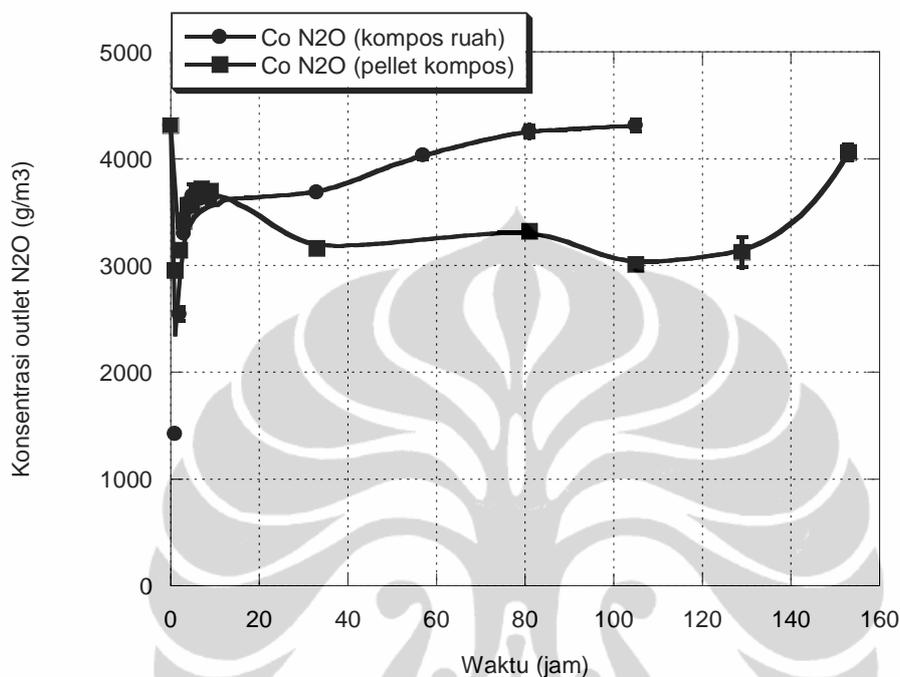
Pada sistem biofilter, proses adsorpsi dan biodegradasi terjadi secara simultan. Fenomena adsorpsi gas N₂O pada permukaan medium filter kompos dikaji untuk melihat kemampuan kompos dalam mengadsorp polutan tanpa keberadaan mikroorganisme pendeградasi. Daya adsorp kompos merupakan salah satu faktor yang dapat berpengaruh pada kinerja sistem biofilter yang menggunakan kompos sebagai medium filter.

Proses peniadaan bakteri dan mikroorganisme pendeградasi yang ada pada kompos, dilakukan dengan pemanasan pada suhu 120°C selama 1 jam, pemberian larutan *poisoning* (larutan CuSO₄), dan inkubasi selama 3 (tiga) hari (Delhomenie, *et al.*, 2002). Proses adsorpsi gas N₂O berlangsung di dalam rangkaian sistem biofilter yang sama. Pengambilan data berupa konsentrasi keluaran gas N₂O dilakukan hingga nilai konsentrasi keluaran mendekati atau mencapai nilai konsentrasi N₂O yang masuk ke dalam sistem, atau dengan kata lain kompos sebagai adsorben telah mengalami kejenuhan.

4.5.6.1. Kurva Terobosan

Studi fenomena adsorpsi yang terjadi pada permukaan kompos dilakukan dengan menganalisis kurva terobosan (*breakthrough curve*) yang diperoleh, mengkaji parameter adsorpsi isotermis yang dihasilkan berdasarkan model adsorpsi Langmuir, serta membandingkan kemampuan kompos sebagai adsorben tanpa dan dengan keberadaan mikroorganisme pendeградasi di dalamnya. Proses adsorpsi dilakukan dengan menggunakan medium filter kompos dalam bentuk ruah (*bulk*) dan pelet berukuran 5x5 mm.

Gambar 4.22 di bawah ini memperlihatkan perubahan konsentrasi keluaran gas N_2O , selama proses adsorpsi pada permukaan kompos berlangsung.



Gambar 4.22. Kurva Terobosan pada Adsorpsi N_2O di Permukaan Kompos (medium kering kompos kotoran kambing, $h=100$ cm, $Q=88$ cm³/menit)

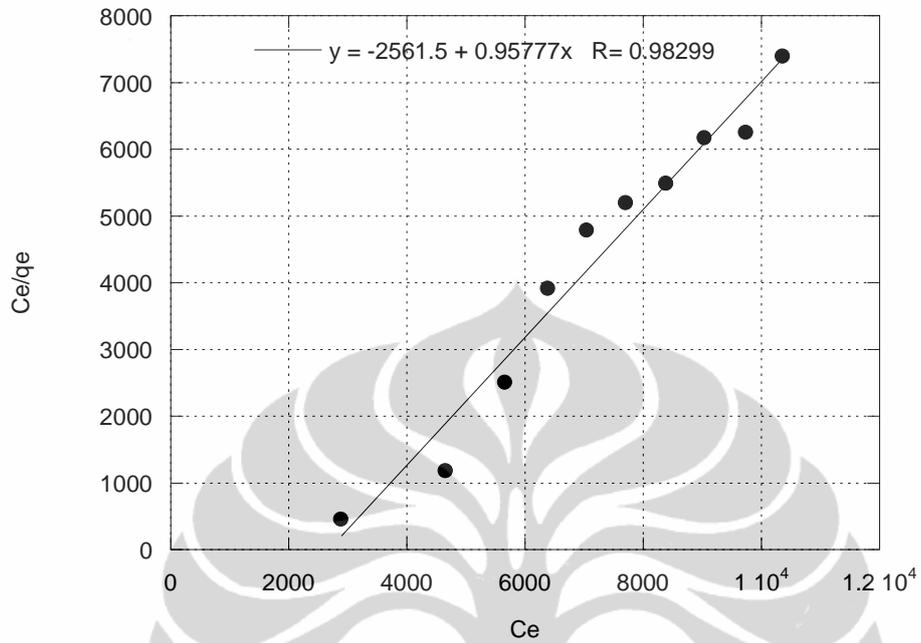
Pada periode awal proses adsorpsi, energi adsorpsi yang tinggi berhubungan dengan permukaan yang memiliki tingkat saturasi rendah. Setelah beberapa lama, laju adsorpsi yang lambat merupakan akibat dari menurunnya energi adsorpsi (Elkhatib, *et al.*, 1984). Laju adsorpsi juga dipengaruhi oleh konsentrasi adsorbat pada waktu tertentu (Barrachina, *et al.*, 1996).

Berdasarkan kelima jenis tipe kurva yang dikemukakan oleh Brunauer, kurva di atas merupakan kurva tipe pertama, sehingga dapat disimpulkan bahwa adsorpsi yang terjadi pada permukaan medium kompos membentuk lapisan tunggal (*monolayer*). Dari kurva terobosan dapat diketahui adsorben kompos ruah mulai mengalami kejenuhan pada jam ke-80, sedangkan kompos berbentuk pelet mencapai kondisi jenuh pada jam ke-150.

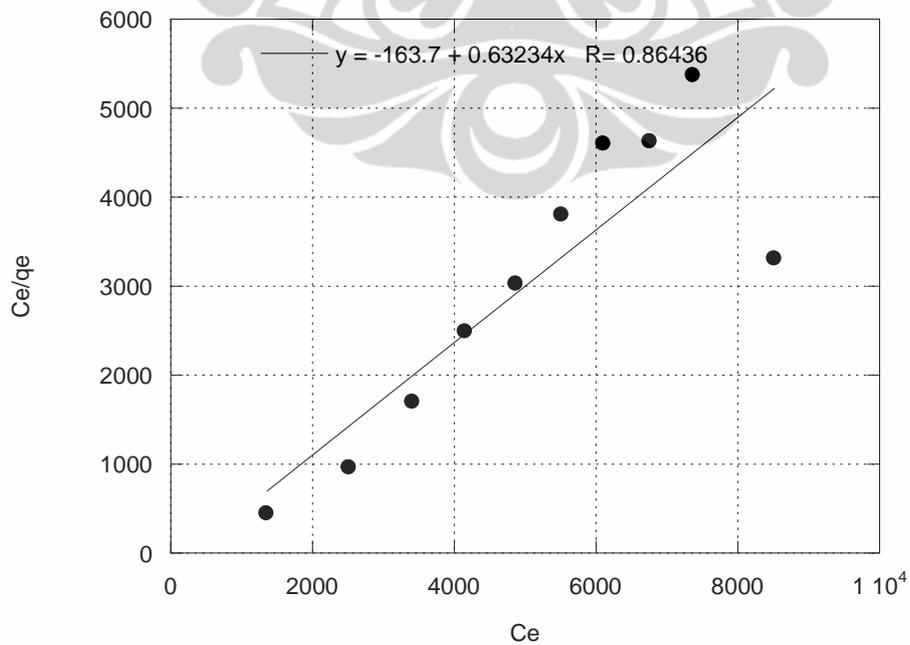
Pada medium kompos ruah (berbentuk serbuk), dapat terjadi pemadatan medium sehingga tidak semua permukaan medium kompos dapat mengadsorp gas N_2O dengan baik. Daya adsorpsi pada medium kompos berbentuk pelet lebih baik dibandingkan dengan kompos berbentuk serbuk, karena porositas dari medium kompos yang mendukung terjadinya proses adsorpsi gas N_2O pada permukaan kompos menjadi lebih maksimal.

4.5.6.2. Model Adsorpsi Isotermis

Model adsorpsi isotermis digunakan untuk menjelaskan interaksi antara gas N_2O dengan kompos sebagai adsorben dan memberikan gambaran representatif terhadap hasil pengujian yang dilakukan. Adsorpsi isotermis dibuat berdasarkan persamaan Langmuir. Beberapa peneliti telah menggunakan persamaan Langmuir untuk mengkaji fenomena adsorpsi pada permukaan tanah. (Pierce dan Moore, 1980; Sakata, 1987). Adsorpsi yang terjadi pada permukaan medium kompos dapat dikategorikan sebagai adsorpsi fisika karena proses adsorpsi terjadi pada suhu ruang dan tekanan atmosferik, serta tidak adanya reaksi kimia yang terlibat. Linierisasi kurva adsorpsi isotermis Langmuir untuk medium kompos ruah dan pelet kompos berturut-turut ditunjukkan oleh Gambar 4.23 dan Gambar 4.24. Pers. 4.18 yang dijabarkan pada sub bab selanjutnya, digunakan dalam pembuatan kedua kurva adsorpsi isotermis ini.



Gambar 4.23. Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir untuk Medium Kompos Ruah



Gambar 4.24. Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir untuk Medium Pelet Kompos

Dua (2) parameter penting yang dapat diketahui dari hasil linierisasi kurva adsorpsi isothermis adalah q_m yang merupakan kapasitas adsorpsi, dan K_L yang menunjukkan kemampuan adsorben kompos dalam mengikat adsorbat N_2O . Nilai kedua parameter tersebut untuk medium kompos ruah dan pelet kompos dapat dilihat pada Tabel 4.13. Nilai K_L yang negatif mengindikasikan bahwa gas N_2O yang diadsorp semakin lama semakin berkurang akibat laju desorpsi yang lebih besar daripada adsorpsi. Nilai q_m dan K_L pelet kompos yang sedikit lebih besar dari pada kompos ruah menandakan bahwa gas N_2O yang teradsorp pada permukaan pelet kompos lebih banyak dan kemampuan adsorben pelet kompos dalam mengikat adsorbat (gas N_2O) lebih baik.

Tabel 4.13. Parameter Adsorpsi Isothermis Langmuir

Parameter	Kompos Ruah	Pelet Kompos
q_m (g/kg)	1,04	1,58
K_L (m ³ /g)	$-3,74 \times 10^{-4}$	$-38,63 \times 10^{-4}$

Perbandingan kemampuan kompos sebagai adsorben tanpa dan dengan keberadaan mikroorganisme pendegradasi di dalamnya, dilakukan dengan membandingkan nilai konstanta q_m dan K_L dari medium pelet kompos berbasis kotoran kambing, seperti yang diperlihatkan pada Tabel 4.14 berikut.

Tabel 4.14. q_m dan K_L pada Medium Pelet Kompos Kotoran Kambing

Parameter	Tanpa mikroorganisme (proses adsorpsi)	Dengan mikroorganisme (proses biosorpsi)
q_m (g/kg)	1,58	7,28
K_L (m ³ /g)	$-38,63 \times 10^{-4}$	$4,04 \times 10^{-3}$

Biosorpsi merupakan proses adsorpsi polutan gas pada lapisan *biofilm* di permukaan adsorben. Lapisan *biofilm* ini terbentuk karena keberadaan mikroorganisme pendegradasi pada adsorben. Prinsip dan mekanisme biosorpsi tidak berbeda dengan adsorpsi. Tabel 4.14 menunjukkan bahwa mikroorganisme yang ada dalam medium kompos, dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi dari

medium, serta memperbaiki kemampuan kompos dalam mengikat polutan gas N_2O .

Pada lapisan *biofilm*, proses biosorpsi akan terjadi simultan dengan proses degradasi polutan oleh mikroorganisme. Mikroorganisme menggunakan polutan sebagai salah satu sumber energi dan nutrisi untuk mendukung pertumbuhannya. Keberadaan mikroorganisme sangat berpengaruh pada kinerja dan stabilitas medium kompos dalam mereduksi polutan gas N_2O . Kombinasi aktivitas biologis dari mikroorganisme dengan kapasitas adsorpsi medium filter, dapat meningkatkan kinerja reduksi terhadap polutan (Devinny, *et al.*, 1999; Janni, *et al.*, 2001). Beberapa jenis mikroorganisme yang memiliki kemampuan mereduksi nitrogen baik melalui mekanisme nitrifikasi maupun denitrifikasi adalah *Nitrosomonas* sp., *Nitrobacter* sp., *Bacillus* sp., *Geobacillus* sp., *Streptomyces* sp. (Verbaendert, *et al.*, 2011).

4.6. Penyusunan Model Biosorpsi - Biodegradasi

4.6.1. Model Biosorpsi N_2O pada Medium Pelet Kompos

Reaksi adsorpsi yang terjadi dituliskan kembali sebagai berikut:



dimana:

N_2O : molekul gas

S : situs aktif adsorpsi

k, k_{-1} : konstanta laju

Dengan konsentrasi adsorben (N_2O) dapat dituliskan ke dalam bentuk berikut (Lin, *et al.*, 2009):

$$q_e = (C_0 - C_t) \frac{V}{m} \quad (4.13)$$

dimana:

q_e , setara dengan C_{S,N_2O}	= konsentrasi kesetimbangan pada adsorben (g/kg)
C_0	= konsentrasi gas N_2O masuk (g/m^3)
C_t	= konsentrasi gas N_2O pada waktu t (g/m^3)
V	= volume teoritis medium filter dalam kolom (m^3)
m	= massa adsorben yang digunakan (kg)

Persamaan laju adsorpsi dan desorpsi untuk reaksi adsorpsi N_2O pada *biofilm* di permukaan medium, dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\text{laju desorpsi: } N_2O = k_{-1}C_{SN_2O} = k_{-1}q_e \quad (4.14a)$$

$$\text{laju adsorpsi: } N_2O = k_1C_vP_{N_2O} = k_1C_vC_e \quad (4.14b)$$

dengan C_v merupakan total massa *biofilm* yang masih dapat mengadsorp.

Sehingga persamaan laju reaksi pada *biofilm* adalah:

$$\begin{aligned} r_{AD} &= \text{laju adsorpsi } N_2O - \text{laju desorpsi } N_2O \\ r_{AD} &= k_1C_vC_e - k_{-1}q_e \\ r_{AD} &= k_1\left(C_vC_e - \frac{k_{-1}}{k_1}q_e\right) \end{aligned} \quad (4.15)$$

Jika $K_L = \frac{k_1}{k_{-1}}$, maka:

$$r_{AD} = k_1\left(C_vC_e - \frac{q_e}{K_L}\right) \quad (4.16)$$

Dimana K_L merupakan konstanta Langmuir (m^3/g).

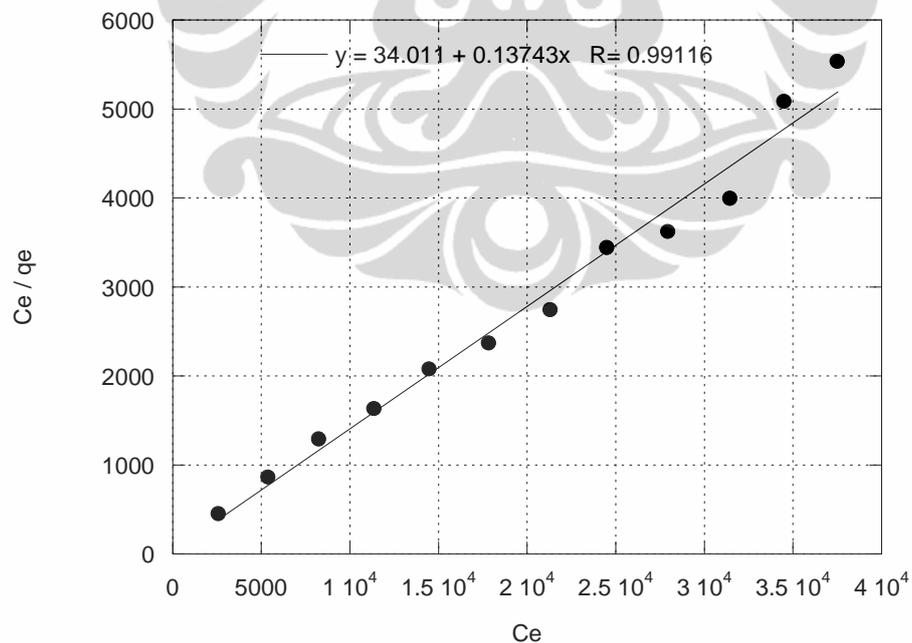
Pada kondisi kesetimbangan adsorpsi dan desorpsi N_2O , laju kesetimbangan adalah sama ($r_{AD} = 0$), sehingga Pers. 4.16 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$0 = k_1\left(C_vC_e - \frac{q_e}{K_L}\right) \quad (4.17)$$

Dengan mengasumsikan bahwa N_2O merupakan satu-satunya gas yang diadsorpsi *biofilm* pada permukaan medium, dapat dituliskan bahwa $q_m = q_e + C_v$, dimana q_m merupakan kapasitas adsorpsi *biofilm*. Sehingga Pers. 4.17 menjadi:

$$\begin{aligned}\frac{q_e}{K_L} &= (q_m - q_e)C_e \\ q_e &= \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \\ \frac{C_e}{q_e} &= \frac{C_e}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L}\end{aligned}\quad (4.18)$$

Data selanjutnya diplot antara C_e vs C_e/q_e , sesuai dengan persamaan adsorpsi Langmuir yang terlinierisasi (Pers. 4.18). Hasil linierisasi model biosorpsi N_2O berdasarkan persamaan Langmuir untuk data yang diperoleh dari proses biofiltrasi dengan medium pelet kompos berbasis kotoran kambing dapat dilihat pada Gambar 4.25.



Gambar 4.25. Linierisasi Model Biosorpsi Langmuir (medium pelet kompos kotoran kambing, $h=100$ cm, $Q=88$ cm³/menit)

Konstanta q_m pada Pers. 4.18 yang merupakan kapasitas adsorpsi *biofilm*, dapat diperoleh dari nilai kemiringan persamaan linier yang didapat. Sedangkan konstanta Langmuir (K_L) dapat dicari dari nilai intersep persamaan linier yang sama. Nilai q_m dan K_L yang diperoleh berturut-turut adalah 7,28 g/kg dan $4,04 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{g}$. Jelas terlihat bahwa model Langmuir dapat menggambarkan dengan baik proses biosorpsi N_2O yang terjadi pada sistem biofilter dengan medium pelet kompos berbasis kotoran kambing, ditandai dengan nilai koefisien korelasi (R) yang mendekati 1.

4.6.2. Model Biodegradasi N_2O pada Medium Pelet Kompos

Proses biofiltrasi dapat dimodelkan menggunakan persamaan kinetika Michaelis-Menten (Chiu, *et al.*, 2006; Kim, *et al.*, 2000). Nilai laju reduksi dari sistem biofilter ditentukan dengan Pers. 4.19.:

$$R = \frac{C_{in} - C_{out}}{t} = \frac{SV}{\alpha} (C_o - C_e) \quad (4.19)$$

$$R = \frac{V_m \times \frac{C_{in} - C_{out}}{\ln\left(\frac{C_{in}}{C_{out}}\right)}}{K_s + \frac{C_{in} - C_{out}}{\ln\left(\frac{C_{in}}{C_{out}}\right)}} \quad (4.20)$$

dengan:

R = laju reduksi ($\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$)

V_m = laju degradasi maksimum ($\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$)

K_s = konstanta saturasi (g/m^3)

$C_{in} = C_o$ = konsentrasi N_2O terukur pada *inlet* biofilter (g/m^3)

$C_{out} = C_e$ = konsentrasi N_2O terukur pada *outlet* biofilter (g/m^3)

t = waktu pada rentang pengambilan C_{in} dan C_{out} (jam)

S_a = *cross sectional area* (m^2)

F = laju alir gas (m^3/jam)

L = tinggi kolom (m)

$SV = F/S_a L = \text{space velocity}$ (jam^{-1})

α = koefisien konversi

Perubahan konsentrasi gas polutan terhadap perubahan kedalaman medium filter secara matematis digambarkan dalam persamaan berikut:

$$\frac{-dC}{dL} = \frac{V_m C}{K_s + C} \left(\frac{S_a}{F} \right) \alpha \quad (4.21)$$

$$-dC = \frac{V_m C}{K_s + C} \left(\frac{S_a}{F} \right) \alpha dL$$

$$\frac{-\frac{dC}{V_m C}}{K_s + C} = \left(\frac{S_a}{F} \right) \alpha dL$$

$$-\frac{(K_s + C)dC}{V_m C} = \left(\frac{S_a}{F} \right) \alpha dL \quad (4.22)$$

Integrasi Pers. 4.22 pada $C = C_o$ dan $C = C_e$, dengan $L = 0$ dan $L = L$ menghasilkan:

$$\int_{C=C_o}^{C=C_e} -\left(\frac{K_s}{V_m C} + \frac{1}{V_m} \right) dC = \left(\frac{S_a \alpha}{F} \right) \int_{L=0}^{L=L} dL$$

$$-\frac{K_s}{V_m} \left(\ln \frac{C_e}{C_o} \right) - \frac{1}{V_m} (C_e - C_o) = \left(\frac{S_a L \alpha}{F} \right) \quad (4.23)$$

Jika $SV = \frac{F}{S_a L}$, maka:

$$\frac{K_s}{V_m} \left(\ln \frac{C_o}{C_e} \right) + \frac{1}{V_m} (C_o - C_e) = \left(\frac{\alpha}{SV} \right) \quad (4.24)$$

Dengan mengalikan $\left(\frac{1}{C_o - C_e} \right)$ pada kedua ruas dari Pers. 4.24, diperoleh:

$$\frac{K_s}{V_m} \left(\frac{\ln \frac{C_o}{C_e}}{C_o - C_e} \right) + \frac{1}{V_m} = \left(\frac{\alpha}{SV(C_o - C_e)} \right) \quad (4.25)$$

Dengan $\frac{\ln \frac{C_o}{C_e}}{C_o - C_e} = \frac{1}{\left(\frac{C_o - C_e}{\ln \frac{C_o}{C_e}} \right)}$, sehingga:

$$\frac{K_s}{V_m} \left(\frac{1}{\left(\frac{C_o - C_e}{\ln \frac{C_o}{C_e}} \right)} \right) + \frac{1}{V_m} = \left(\frac{\alpha}{SV(C_o - C_e)} \right) \quad (4.26)$$

Substitusi Pers. 4.19 dan dengan mengubah $\frac{C_0 - C_e}{\ln \frac{C_0}{C_e}}$ menjadi C_{ln} , Pers. 4.26 dapat

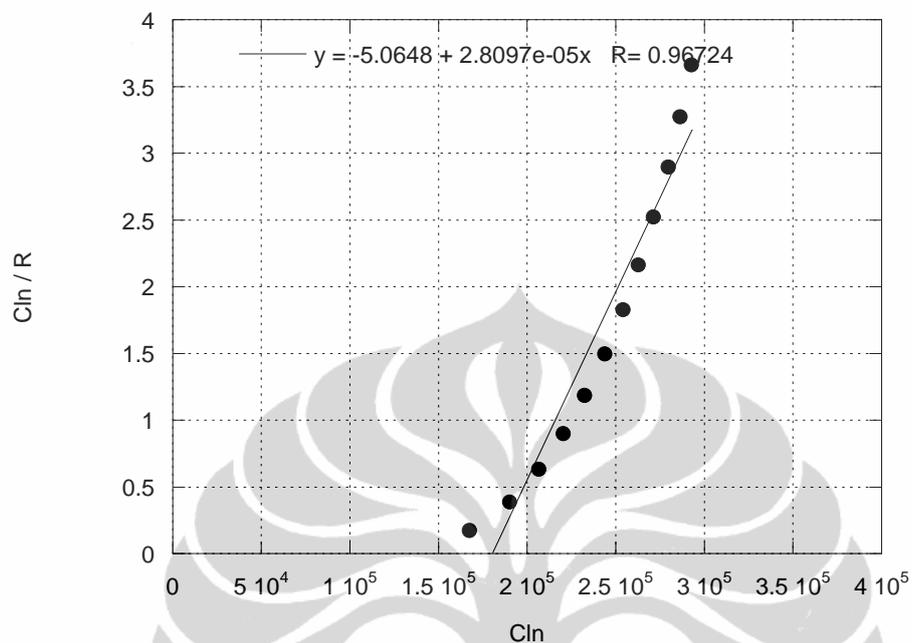
disederhanakan menjadi:

$$\frac{K_S}{V_m} \left(\frac{1}{C_{ln}} \right) + \frac{1}{V_m} = \left(\frac{1}{R} \right) \quad (4.27)$$

Kalikan kedua ruas pada Pers. 4.27 dengan C_{ln} , diperoleh:

$$\begin{aligned} \frac{K_S}{V_m} + \frac{C_{ln}}{V_m} &= \left(\frac{C_{ln}}{R} \right) \\ \frac{C_{ln}}{R} &= \frac{K_S}{V_m} + \frac{1}{V_m} C_{ln} \end{aligned} \quad (4.28)$$

Pers. 4.28 di atas merupakan persamaan Michaelis-Menten yang terlinearisasi. Dari plot data C_{ln} vs $\left(\frac{C_{ln}}{R} \right)$ didapatkan hasil linierisasi berdasarkan persamaan biodegradasi Michaelis-Menten yang dapat digunakan untuk menggambarkan kinetika degradasi yang berlangsung dalam sistem biofilter dengan medium pelet kompos berbasis kotoran kambing, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.26.



Gambar 4.26. Linierisasi Model Biodegradasi Michaelis-Menten (medium pelet kompos kotoran kambing, $h=100$ cm, $Q=88$ cm³/menit)

Nilai parameter yang penting untuk diketahui dalam mengevaluasi efektivitas degradasi N₂O oleh mikroorganisme dalam medium kompos adalah V_m dan K_s . V_m merupakan laju degradasi maksimum yang dapat dicapai oleh mikroorganisme di permukaan medium kompos dalam mereduksi polutan gas N₂O, dan K_s menunjukkan ukuran kemampuan (derajat afinitas) mikroorganisme dalam mendegradasi substrat polutan. Semakin kecil nilai K_s , maka akan semakin tinggi derajat afinitas mikroorganisme terhadap penggunaan substrat dalam proses biodegradasi.

Nilai parameter V_m dan K_s dapat dicari dari nilai intersep dan kemiringan persamaan garis linier yang terbentuk, masing-masing sebesar 35,591 g/m³.jam dan -180,261 g/m³. Dari nilai koefisien korelasi yang mendekati 1 dapat disimpulkan, bahwa model Michaelis-Menten baik dalam menggambarkan

kinetika biodegradasi yang terjadi dalam sistem biofilter dengan medium berupa pelet kompos berbasis kotoran kambing.

4.6.3. Model Kinetika Berbasis Mekanisme Michaelis-Menten untuk Biofiltrasi Dinitrogen Monoksida

Penyusunan model kinetika untuk proses biofiltrasi N_2O dengan medium filter kompos bertujuan untuk mengetahui perilaku polutan gas N_2O dalam sistem biofilter, serta mendapatkan informasi yang tidak dapat diperoleh dari eksperimen di Lab. Model kinetika disusun berdasarkan mekanisme Michaelis-Menten, dan simulasi dilakukan terhadap data yang telah diperoleh sebelumnya.

Tahapan-tahapan penting yang harus dilakukan dalam penyusunan model kinetika ini adalah sebagai berikut:

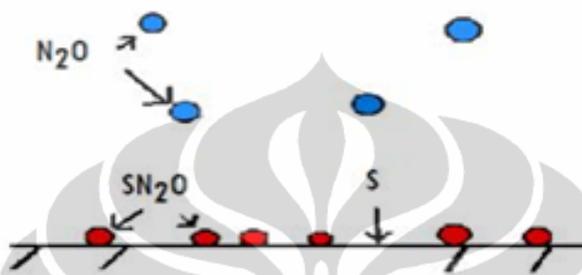
1. Persiapan data kinetika, yaitu data berupa profil konsentrasi N_2O selama proses biofiltrasi dengan menggunakan medium filter berupa kompos ruah dan pelet kompos berbasis kotoran kambing, pada kondisi operasi optimum yang telah diperoleh.
2. Penyusunan model kinetika dengan penurunan persamaan laju biodegradasi berdasarkan mekanisme substrat tunggal Michaelis-Menten.
3. Validasi model dan estimasi parameter, dilakukan dengan metode *fitting* kurva berdasarkan model kinetika yang disusun dan simulasi data dari hasil eksperimen, untuk memperoleh parameter-parameter kinetika.
4. Simulasi dengan menguji sensitifitas dan kelayakan terhadap parameter-parameter yang diperoleh melalui *fitting* antara hasil perhitungan dengan hasil eksperimen, untuk menilai *reability* dari model yang digunakan.

4.6.3.1. Penurunan Model Kinetika Berbasis Michaelis-Menten

Mekanisme substrat tunggal Michaelis-Menten:



dimana S merupakan situs aktif pada *biofilm* di permukaan kompos yang terbentuk karena keberadaan mikroorganisme, SN_2O adalah kompleks antara situs aktif dan polutan N_2O , dan P berupa produk hasil dari aktivitas mikroorganisme yaitu air, CO_2 , garam mineral, beberapa senyawa organik volatil, dan biomassa. Ilustrasi proses adsorpsi yang terjadi pada *biofilm* dapat dilihat pada Gambar 4.27 di bawah ini.



Gambar 4.27. Ilustrasi Proses Adsorpsi pada *Biofilm*

Model Penguraian N_2O

Laju reaksi untuk masing-masing komponen adalah:

$$v_S = \frac{dc_S}{dt} = -k_1 C_S C_{N_2O} + k_{-1} C_{SN_2O} + k_2 C_{SN_2O} \quad (4.30)$$

$$v_{N_2O} = \frac{dc_{N_2O}}{dt} = -k_1 C_S C_{N_2O} + k_{-1} C_{SN_2O} \quad (4.31)$$

$$v_{SN_2O} = \frac{dc_{SN_2O}}{dt} = k_1 C_S C_{N_2O} - k_{-1} C_{SN_2O} - k_2 C_{SN_2O} \quad (4.32)$$

Dengan asumsi *pseudo-steady state* $\frac{dc_{SN_2O}}{dt} = 0$, maka:

$$k_1 C_S C_{N_2O} - k_{-1} C_{SN_2O} - k_2 C_{SN_2O} = 0$$

$$k_1 C_S C_{N_2O} = C_{SN_2O} (k_{-1} + k_2)$$

$$C_{SN_2O} = \frac{k_1 C_S C_{N_2O}}{k_{-1} + k_2} \quad (4.33)$$

Substitusi Pers. 4.33 ke dalam Pers. 4.31, maka diperoleh:

$$\begin{aligned}
\frac{dC_{N_2O}}{dt} &= -k_1 C_S C_{N_2O} + k_{-1} \left(\frac{k_1 C_S C_{N_2O}}{k_{-1} + k_2} \right) \\
\frac{dC_{N_2O}}{dt} &= C_S C_{N_2O} \left(-k_1 + \frac{k_{-1} k_1}{k_{-1} + k_2} \right) \\
\frac{dC_{N_2O}}{dt} &= -C_S C_{N_2O} \left(\frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right)
\end{aligned} \tag{4.34}$$

Jika konsentrasi total dari situs aktif pada *biofilm* adalah:

$$\begin{aligned}
C_{Stot} &= C_S + C_{SN_2O} \\
C_{Stot} &= C_S + \frac{k_1 C_S C_{N_2O}}{k_{-1} + k_2} \\
C_{Stot} &= C_S \left(1 + \frac{C_{N_2O} k_1}{k_{-1} + k_2} \right) \\
C_S &= \frac{C_{Stot}}{1 + C_{N_2O} \frac{k_1}{k_{-1} + k_2}}
\end{aligned} \tag{4.35}$$

Substitusi Pers. 4.35 ke dalam Pers. 4.34, maka diperoleh:

$$\begin{aligned}
\frac{dC_{N_2O}}{dt} &= \frac{-C_{Stot}}{1 + C_{N_2O} \frac{k_1}{k_{-1} + k_2}} C_{N_2O} \left(\frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right) \\
\frac{dC_{N_2O}}{dt} &= - \frac{C_{Stot} C_{N_2O} \left(\frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right)}{1 + C_{N_2O} \frac{k_1}{k_{-1} + k_2}}
\end{aligned} \tag{4.36}$$

Jika $\frac{k_1}{k_{-1} + k_2} = K_M$, dan $k_2 K_M C_{Stot} = V_{Max}$, maka:

$$\begin{aligned}
v_{N_2O} &= \frac{dC_{N_2O}}{dt} = - \frac{k_2 K_M C_{Stot} C_{N_2O}}{1 + K_M C_{N_2O}} \\
v_{N_2O} &= \frac{dC_{N_2O}}{dt} = - \frac{V_{Max} C_{N_2O}}{1 + K_M C_{N_2O}}
\end{aligned} \tag{4.37}$$

Model Adsorpsi dan Penguraian

Jika pada mekanisme Michaelis-Menten di atas, komponen yang terlibat berada pada kondisi teradsorpsi di permukaan kompos, maka persamaan laju transfer massa pada adsorpsi isoteremis perlu diperhitungkan, yaitu:

$$q_i = K_i C_i \quad (4.38)$$

Sehingga laju reaksi tiap komponen adalah:

$$v_S = \frac{dq_S}{dt} = -k_1 q_S q_{N_2O} + k_{-1} q_{SN_2O} + k_2 q_{SN_2O} \quad (4.39)$$

$$v_{N_2O} = \frac{dq_{N_2O}}{dt} = -k_1 q_S q_{N_2O} + k_{-1} q_{SN_2O} \quad (4.40)$$

$$v_{SN_2O} = \frac{dq_{SN_2O}}{dt} = k_1 q_S q_{N_2O} - k_{-1} q_{SN_2O} - k_2 q_{SN_2O} \quad (4.41)$$

Dengan asumsi *pseudo-steady state* $\frac{dq_{SN_2O}}{dt} = 0$, maka:

$$\begin{aligned} k_1 q_S q_{N_2O} - k_{-1} q_{SN_2O} - k_2 q_{SN_2O} &= 0 \\ k_1 q_S q_{N_2O} &= q_{SN_2O} (k_{-1} + k_2) \\ q_{SN_2O} &= \frac{k_1 q_S q_{N_2O}}{k_{-1} + k_2} \end{aligned} \quad (4.42)$$

Substitusi Pers. 4.42 ke dalam Pers. 4.40, maka diperoleh:

$$\begin{aligned} \frac{dq_{N_2O}}{dt} &= -k_1 q_S q_{N_2O} + k_{-1} \left(\frac{k_1 q_S q_{N_2O}}{k_{-1} + k_2} \right) \\ \frac{dq_{N_2O}}{dt} &= q_S q_{N_2O} \left(-k_1 + \frac{k_{-1} k_1}{k_{-1} + k_2} \right) \\ \frac{dq_{N_2O}}{dt} &= -q_S q_{N_2O} \left(\frac{k_1 k_2}{k_{-1} + k_2} \right) \end{aligned} \quad (4.43)$$

Jika konsentrasi total dari situs aktif pada *biofilm* adalah:

$$\begin{aligned} q_{Stot} &= q_S + q_{SN_2O} \\ q_{Stot} &= q_S + \frac{k_1 q_S q_{N_2O}}{k_{-1} + k_2} \\ q_{Stot} &= q_S \left(1 + \frac{q_{N_2O} k_1}{k_{-1} + k_2} \right) \\ q_S &= \frac{q_{Stot}}{1 + q_{N_2O} \frac{k_1}{k_{-1} + k_2}} \end{aligned} \quad (4.44)$$

Substitusi Pers. 4.44 ke dalam Pers. 4.43, maka diperoleh:

$$\frac{dq_{N_2O}}{dt} = \frac{-q_{Stot}}{1+q_{N_2O} \frac{k_1}{k_{-1}+k_2}} q_{N_2O} \left(\frac{k_1 k_2}{k_{-1}+k_2} \right)$$

$$\frac{dq_{N_2O}}{dt} = - \frac{q_{Stot} q_{N_2O} \left(\frac{k_1 k_2}{k_{-1}+k_2} \right)}{1+q_{N_2O} \frac{k_1}{k_{-1}+k_2}} \quad (4.45)$$

Jika $\frac{k_1}{k_{-1}+k_2} = K_M$, dan $k_2 K_M q_{Stot} = V_{Max}$, maka:

$$v_{N_2O} = \frac{dq_{N_2O}}{dt} = - \frac{V_{Max} q_{N_2O}}{1+K_M q_{N_2O}} \quad (4.46)$$

Total laju reaksi polutan N_2O dalam fasa ruah dan yang teradsorp adalah:

$$v_{N_2O} = \frac{dC_{N_2O}}{dt} + \frac{dq_{N_2O}}{dt} \quad (4.47)$$

Substitusi Pers. 4.47 ke dalam Pers. 4.38, diperoleh:

$$v_{N_2O} = \frac{dC_{N_2O}}{dt} + \frac{dC_{N_2O} K_{N_2O}}{dt} \quad (4.48)$$

$$v_{N_2O} = \frac{dC_{N_2O}}{dt} (1 + K_{N_2O})$$

$$\frac{dC_{N_2O}}{dt} = \frac{v_{N_2O}}{(1+K_{N_2O})} \quad (4.49)$$

Substitusi Pers. 4.38 dan Pers. 4.46 ke dalam Pers. 4.49, diperoleh:

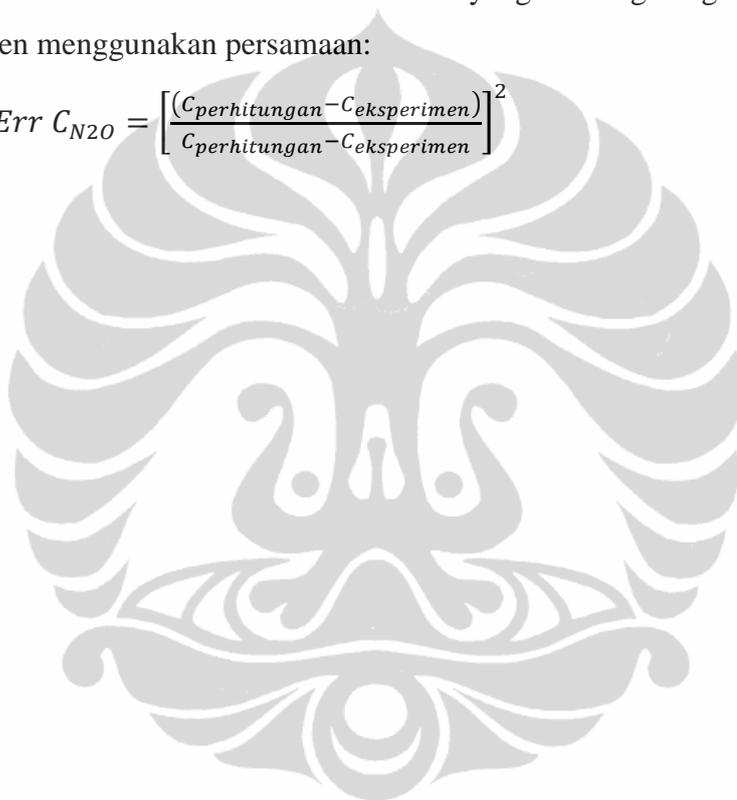
$$\frac{dC_{N_2O}}{dt} = \frac{-V_{Max} K_{N_2O} C_{N_2O}}{(1+K_M K_{N_2O} C_{N_2O})(1+K_{N_2O})} \quad (4.50)$$

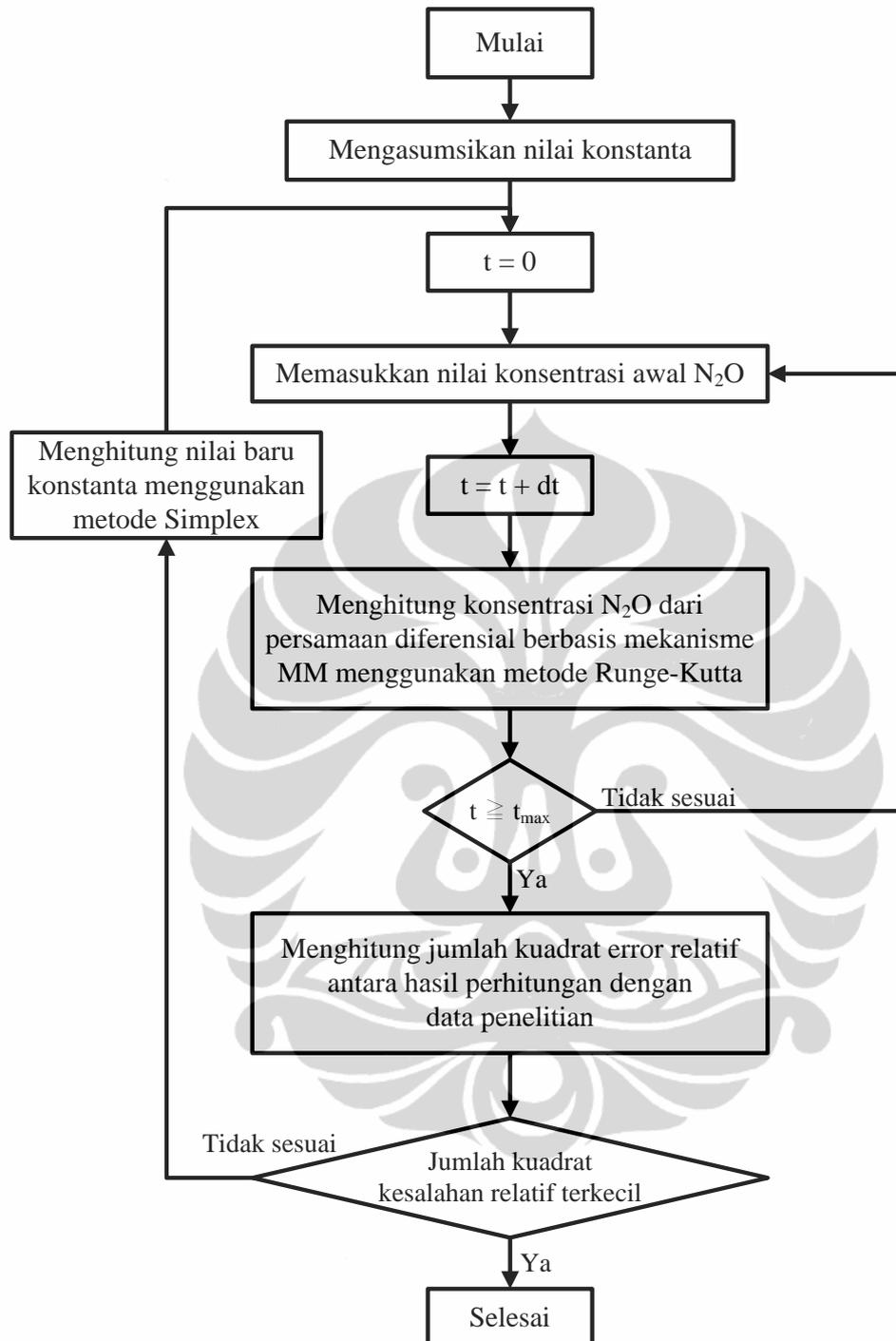
4.6.3.2. Validasi Model dan Estimasi Parameter

Setelah mendapatkan model kinetika yang mampu menggambarkan keadaan sebenarnya dari proses biofiltrasi yang berlangsung, maka selanjutnya dibutuhkan data hasil eksperimen, agar simulasi dapat dilakukan. Data yang disimulasikan berupa konsentrasi gas N_2O keluaran kolom selama proses biofiltrasi berlangsung, dengan menggunakan medium filter berbasis kotoran kambing pada kondisi operasi yang optimum.

Estimasi parameter kinetika dilakukan dengan mengolah data hasil penelitian menggunakan program Fortran, melalui *fitting* terhadap model kinetika. Diagram alir untuk melakukan *fitting* ditunjukkan oleh Gambar 4.28. Prosedur diawali dengan mengasumsikan nilai konstanta, kemudian menyelesaikan persamaan diferensial (Pers. 4.37 dan Pers. 4.50) secara numerik dengan metode Runge-Kutta, dimana perubahan waktu ditentukan sebesar 0,1 jam. Nilai estimasi parameter ditentukan menggunakan metode Simplex dengan meminimalisasi jumlah kuadrat *error* dari *error* relatif antara nilai yang dihitung dengan nilai pada data eksperimen menggunakan persamaan:

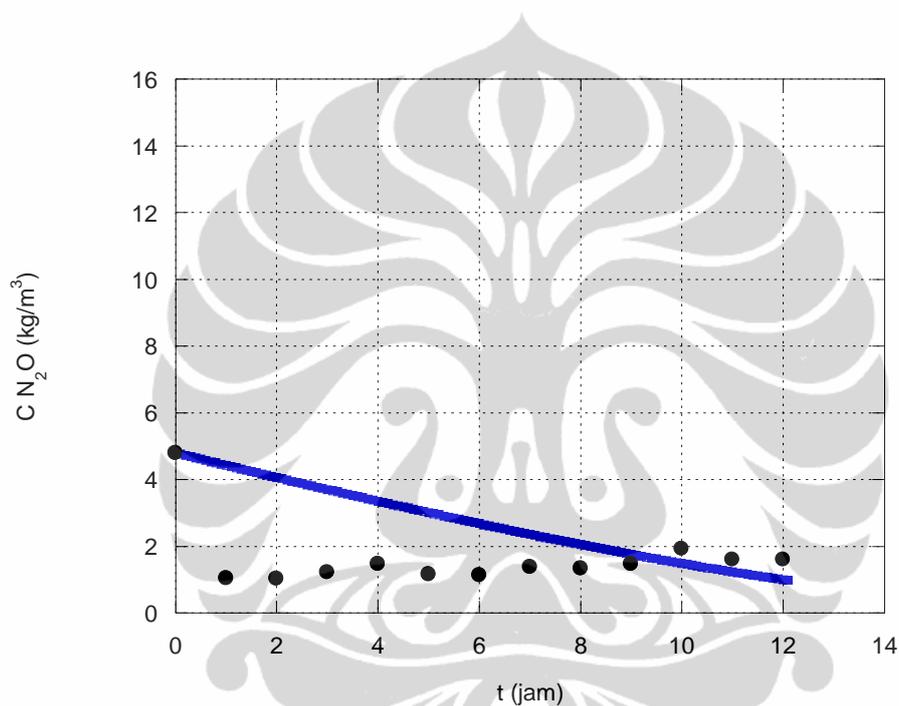
$$S = Err C_{N_2O} = \left[\frac{(C_{perhitungan} - C_{eksperimen})}{C_{perhitungan} - C_{eksperimen}} \right]^2 \quad (4.51)$$



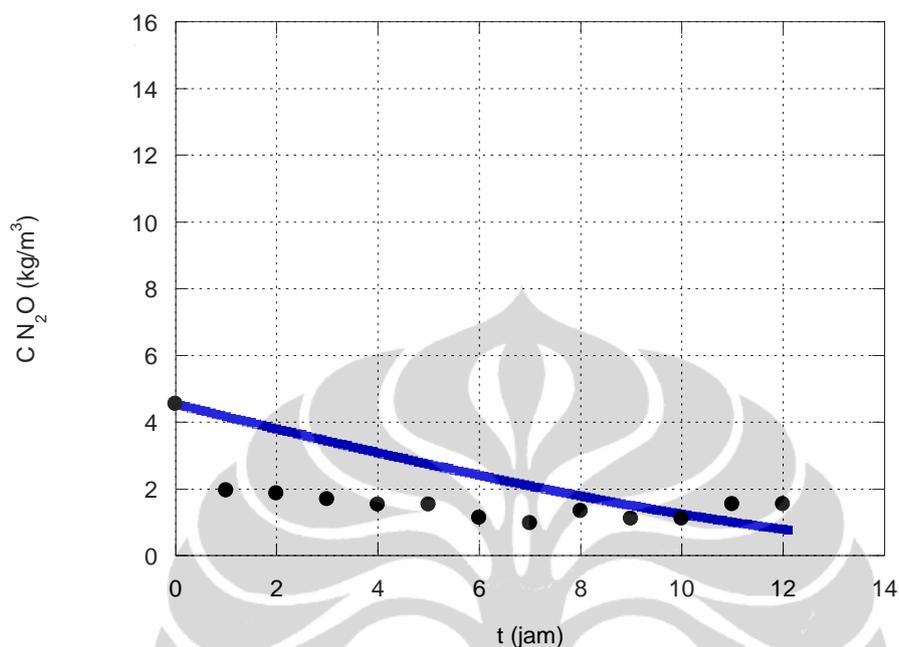


Gambar 4.28. Prosedur Estimasi Parameter Kinetika

Fitting terhadap data hasil eksperimen dengan menggunakan model kinetika Michaelis-Menten (MM) dapat dilihat pada Gambar 4.29 untuk medium kompos ruah dan Gambar 4.30 untuk medium pelet kompos. Gambar 4.31 dan 4.32 mengikutsertakan hasil *fitting* untuk model kinetika Michaelis-Menten yang memperhitungkan aspek adsorpsi (MM-Ads), masing-masing untuk medium kompos ruah dan medium pelet kompos.



Gambar 4.29. Hasil *Fitting* Model Kinetika Michaelis-Menten (MM) (medium kering kompos ruah kotoran kambing, $Q=88 \text{ cm}^3/\text{menit}$, $h=100 \text{ cm}$,
 ■ model MM ; ● data eksperimen)

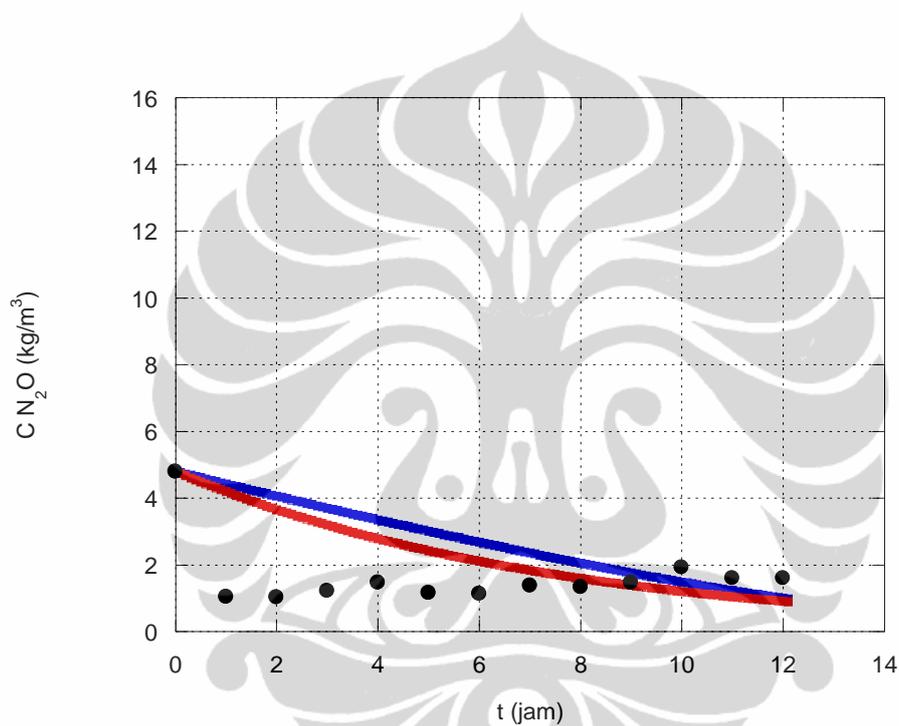


Gambar 4.30. Hasil *Fitting* Model Kinetika Michaelis-Menten (MM) (medium kering pelet kompos kotoran kambing, $Q=88 \text{ cm}^3/\text{menit}$, $h=100 \text{ cm}$,
 ■ model MM ; ● data eksperimen)

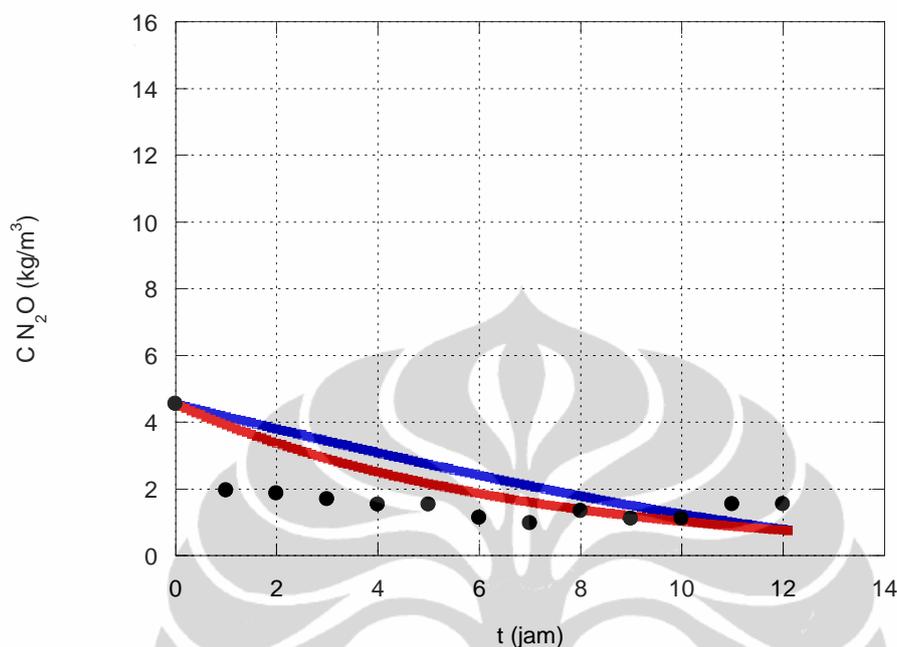
Pada persamaan model kinetika Michaelis-Menten, terdapat 2 (dua) parameter yang tidak diketahui yaitu V_{Max} dan K_M . V_{Max} merupakan konstanta yang menyatakan laju degradasi maksimum dari polutan gas N_2O yang berlangsung dalam sistem biofilter dengan medium kompos. K_M adalah konstanta yang menunjukkan kemampuan mikroorganisme yang ada pada medium kompos, dalam mendegradasi N_2O . Hasil estimasi parameter yang diperoleh melalui *fitting* terhadap model kinetika Michaelis-Menten (MM) diperlihatkan dalam Tabel 4.15.

Tabel 4.15. Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika MM

Parameter	Nilai	Error
<i>Medium kompos ruah</i>		
V_{Max} (g/m ³ .jam)	0,46	Min
K_M (g/m ³)	1,10	Min
<i>Medium pelet kompos</i>		
V_{Max} (g/m ³ .jam)	0,47	Min
K_M (g/m ³)	1,08	Min



Gambar 4.31. Hasil *Fitting* Model Kinetika MM dan MM-Adsorpsi (medium kering kompos ruah kotoran kambing, $Q=88$ cm³/menit, $h=100$ cm, ■ model MM ; ■ model MM-Adsorpsi ; ● data eksperimen)



Gambar 4.32. Hasil *Fitting* Model Kinetika MM dan MM-Adsorpsi (medium kering pelet kompos kotoran kambing, $Q=88 \text{ cm}^3/\text{menit}$, $h=100 \text{ cm}$,
 ■ model MM ; ■ model MM-Adsorpsi ; ● data eksperimen)

Fitting juga dilakukan untuk model kinetika Michaelis-Menten dengan aspek adsorpsi (MM-Adsorpsi), dimana semua komponen yang terlibat diasumsikan teradsorpsi pada lapisan *biofilm* di permukaan kompos. Pada Gambar 4.31 dan 4.32 dapat dibandingkan hasil *fitting* antara kedua model tersebut. Data eksperimen biofiltrasi N_2O dengan medium filter baik berupa kompos ruah maupun berupa pelet kompos, terlihat memberikan hasil yang lebih mendekati model kinetika MM-Adsorpsi.

Pada persamaan model kinetika MM-Adsorpsi, terdapat 1 (satu) lagi parameter yang tidak diketahui, selain 2 (dua) parameter yang ada pada model kinetika MM, yaitu $K_{\text{N}_2\text{O}}$. $K_{\text{N}_2\text{O}}$ merupakan konstanta yang menunjukkan kemampuan kompos sebagai adsorben dalam mengikat polutan gas. Tabel 4.16 memperlihatkan hasil estimasi parameter yang diperoleh melalui *fitting* terhadap model kinetika MM-Adsorpsi.

Tabel 4.16. Parameter Hasil Estimasi Menggunakan Model Kinetika MM-Ads

Parameter	Nilai	Error
<i>Medium kompos ruah</i>		
V_{Max} (g/m ³ .jam)	10,65	5,579
K_M (g/m ³)	0,43	
K_{N_2O} (m ³ /g)	$5,92 \times 10^{-3}$	
<i>Medium pelet kompos</i>		
V_{Max} (g/m ³ .jam)	461	2,667
K_M (g/m ³)	558	
K_{N_2O} (m ³ /g)	0,22	

4.6.3.3. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh perubahan nilai parameter kinetika yang diperoleh terhadap perubahan konsentrasi N₂O. Analisis ini dilakukan dengan mengubah nilai salah satu konstanta sebesar 2 kali dan ½ kali dari nilai estimasi tanpa mengubah nilai konstanta yang lain, dan membandingkan nilai jumlah kuadrat *error* relatif (S) dari ketiga nilai konstanta yang telah diubah. Nilai konstanta yang diperoleh dianggap tepat jika nilai S yang dihasilkan cukup kecil.

Hasil analisis sensitivitas akan membantu menunjukkan tingkat kebenaran (*reability*) dari hasil estimasi. Hasil tersebut juga akan menjadi bahan dalam menyimpulkan apakah model yang digunakan telah cukup baik dalam menggambarkan proses biofiltrasi yang terjadi. Analisis sensitivitas hanya dilakukan untuk parameter yang diperoleh dari model kinetika MM-Adsorpsi, karena model ini memberikan hasil *fitting* yang lebih baik terhadap data eksperimen. Tabel 4.17 menunjukkan hasil analisis sensitivitas untuk model MM-Adsorpsi.

Tabel 4.17. Analisis Sensitivitas untuk Parameter Model Kinetika MM-Adsorpsi

Parameter	Nilai	S	Deviasi (%)
<i>Medium kompos ruah</i>			
V_{Max} (g/m ³ .jam)	21,30	$7,77 \times 10^{-4}$	100,00
	10,65	$8,38 \times 10^{-4}$	min
	5,33	$7,66 \times 10^{-4}$	50,00
K_M (g/m ³)	0,86	$7,69 \times 10^{-4}$	0,26
	0,43	$8,38 \times 10^{-4}$	min
	0,22	$9,52 \times 10^{-4}$	0,13
K_{N_2O} (m ³ /g)	$1,18 \times 10^{-2}$	$5,56 \times 10^{-4}$	98,31
	$5,92 \times 10^{-3}$	$8,38 \times 10^{-4}$	min
	$2,96 \times 10^{-3}$	$8,00 \times 10^{-4}$	49,79
<i>Medium pelet kompos</i>			
V_{Max} (g/m ³ .jam)	922	$6,57 \times 10^{-4}$	100,00
	461	$4,15 \times 10^{-4}$	min
	231	$9,52 \times 10^{-4}$	50,00
K_M (g/m ³)	1116	$8,74 \times 10^{-4}$	49,90
	558	$4,15 \times 10^{-4}$	min
	279	$6,67 \times 10^{-4}$	99,17
K_{N_2O} (m ³ /g)	0,44	$8,96 \times 10^{-4}$	15,10
	0,22	$4,15 \times 10^{-4}$	min
	0,11	$7,38 \times 10^{-4}$	9,45

Pada Tabel 4.17 terlihat bahwa hampir seluruh nilai S (jumlah kuadrat kesalahan relatif) dari konstanta yang diubah, memberikan nilai yang tidak jauh berbeda atau lebih besar daripada nilai yang diperoleh berdasarkan konstanta dari hasil *fitting*. Nilai deviasi pada tabel di atas merupakan besar penyimpangan hasil simulasi terhadap hasil yang diperoleh dengan menggunakan nilai konstanta yang diperoleh dari *fitting* model. Dari besarnya nilai deviasi, dapat disimpulkan bahwa ketiga parameter V_{Max} , K_M , dan K_{N_2O} sensitif, dan perubahan pada nilai parameter ini akan memberikan perubahan hasil simulasi yang cukup signifikan. Jika dihubungkan dengan proses reduksi polutan gas N_2O di dalam kolom biofilter dengan medium kompos, maka nilai laju degradasi maksimum, kemampuan mikroorganisme yang ada pada medium kompos dalam mendegradasi polutan, serta kemampuan kompos sebagai adsorben, merupakan faktor yang mempengaruhi kinerja dari sistem biofilter ini.

BAB 5

KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan karakteristik medium dan kinerja medium sebagai filter dalam mengurangi polutan gas N_2O , medium kompos berbasis kotoran kambing lebih baik daripada medium kompos berbasis kotoran sapi, dengan rata-rata efisiensi reduksi mencapai 65% dan stabil hingga 200 jam pada kedalaman medium 100 cm, laju alir gas N_2O 88 cm^3 /menit, dan kandungan air 60%.
2. Keberadaan mikroorganisme dalam medium kompos, dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi dari medium, serta memperbaiki kemampuan kompos dalam mengikat polutan gas N_2O , ditunjukkan dari nilai kapasitas adsorpsi medium (q_m) yang meningkat dari 1,58 g/kg menjadi 7,28 g/kg.
3. Proses biofiltrasi gas N_2O dengan medium kompos dapat dimodelkan dengan baik oleh model kinetika berbasis mekanisme Michaelis-Menten Adsorpsi, dengan parameter kinetika V_{Max} , K_M , dan K_{N_2O} berturut-turut adalah 10,65 $g/m^3 \cdot jam$; 0,43 g/m^3 ; $5,92 \times 10^{-3} m^3/g$ untuk medium kompos ruah, dan 461 $g/m^3 \cdot jam$; 558 g/m^3 ; 0,22 m^3/g untuk medium pelet kompos.
4. Hasil analisis sensitivitas terhadap parameter model kinetika yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai laju degradasi maksimum, kemampuan mikroorganisme yang ada pada medium kompos dalam mendegradasi polutan, serta kemampuan kompos sebagai adsorben, merupakan faktor yang dominan mempengaruhi kinerja dari sistem biofilter dengan kompos sebagai medium.

DAFTAR REFERENSI

- Abichou, T., Mahieu, K., Lei Yuan, Chanton J., and Hater, G. (2009). Effect of compost biocovers on gas flow and methane oxidation in a landfill cover. *Waste Management*. 29. 1595–1601.
- Acuna, M. E., Perez, F., Auria, R., and Revah, S. (1999). Microbiological and kinetic aspects of a biofilter for the removal of toluene from waste gases. *Biotechnology and Bioengineering*. 63. 175–184.
- Adu, B., and Otten, L. (1996). Modelling the biotration characteristics of volatile compounds. *Proceedings of the 89th annual meeting and exhibition of the air & waste management association*. Pittsburgh.
- Aizpuru, A., Malhautier, L., Roux, J. C., and Fanlo, J. L. (2001). Biofiltration of a mixture of volatile organic emissions. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 51. 1662–1670.
- Allen, E. R., and Yang, Y. (1991). Biofiltration control of hydrogen sulfide emissions. *Proceedings of the 84th annual meeting and exhibition of the air & waste management association*. Canada.
- Andrès, Y., Dumont, E., Le Cloirec, P., and Ramirez-Lopez, E. (2006). Wood bark as packing material in a biofilter used in air treatment. *Environ. Technol.* 27. 1297–1302.
- Arcangeli, J. P., and Arvin, E. (1999). Modeling the growth of a methanotrophic biofilm: estimation of parameters and variability. *Biodegradation*. 10. 177–191.
- Auria, R., Aycaguer, A. C., and Devigny, J. S. (1998). Influence of water concentration on degradation rates for ethanol in biofiltration. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 48. 65–70.
- Auria, R., Frere, G., Morales, M., Acuña, M. E., and Revah, S. (2000). Influence of mixing and water addition on the removal rate of toluene vapors in a biofilter. *Biotechnol. Bioeng.* 68. 448–455.

- Baltzis, B. C., Wojdyla, S. M., and Shareefdeen, M. Z. (1997). Modeling biofiltration of VOC mixtures under steady-state conditions. *Journal of Environmental Engineering*. 123. 599–605.
- Baltzis, B. C., Mpanias, C. J., and Shattacharya, S. (2001). Modeling the removal of VOCs mixtures in biotrickling filters. *Biotechnol. Bioeng.* 72. 389–401.
- Barnes, J.M., Apel, W.A., and Barrett, K.B. (1995). Removal of nitrogen oxides from gas stream using biofiltration. *J. Hazard. Matter.* 41: 2-3. 315-326.
- Baquerizo, G., et.al. (2004). A detailed model of a biofilter for ammonia removal: model parameters analysis and model validation. in: Devinny, J. S. (Ed.). *Proceedings of the 2004 conference on biofiltration for air pollution control*. Redondo Beach.
- Barrachina, A. C., Carbonell, F. B., and Beneyto, J. M. (1996). Kinetics of arsenite sorption and desorption in spanish soils. *Commun. Soil Sci. Plant Ana.* 27. 3101–3117.
- Barton, J. W., Davison, B. H., Klasson, K. T., and Gable, C. C. (1999). Estimation of mass transfer and kinetics in operating trickle bed bioreactors for removal of VOCs. *Environmental Progress.* 18. 87–92.
- Batzing, B. L. (2002). *Microbiology : an introduction*. Thomson Learning, Inc. USA. 692-697.
- Bohn, H. L. (1996). Biofilter media, *Proceedings of the air & waste management association of the 89th annual meeting & exhibition*. Pittsburgh.
- Carlson, D. A., and Leiser, C. P. (1981). Soil beds for control of sewage odors. *J. Water Pollut. Control Fed.* 38. 829–840.
- Chen, Jianmeng, Wu, Chengqiang, Wang, Jiade, and Ma, Jianfeng. (2006). Performance evaluation of biofilters packed with carbon foam and lava for nitric oxide removal. *Journal of Hazardous Materials.* 137. 172–177.
- Chen, Lide, et.al. (2008). Performance evaluation of a wood-chip based biofilter using solid-phase microextraction and gas chromatography–mass spectroscopy–olfactometry. *Bioresource Technology.* 99. 7767–7780.

- Chiu, Yi-Cheng, Lin, Chi-Wen, Kao, Tsang-Chih, and Tang, Xiao-Yan. (2006). Biodegradation kinetics and effects of operating parameters on the performance of a methyl tert-butyl ether degrading biofilter. *Water, Air, and Soil Pollution*. 177. 399–410.
- 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.
- Chung, Y. C., Lin, Y. Y., and Tseng, C. P. (2004). Operational characteristics of effective removal of H₂S and NH₃ waste gases by activated carbon biofilter. *J. Air Waste Manage.* 54. 450–458.
- Chung, Ying-Chien. (2007). Evaluation of gas removal and bacterial community diversity in a biofilter developed to treat composting exhaust gases. *Journal of Hazardous Materials*. 144. 377–385.
- Cox, H. H. J., and Deshusses, M. A. (1998). Biological waste air treatment in biotrickling filters. *Current Opinion in Biotechnology*. 9. 256–262.
- Dammann, B., Streese, J., and Stegmann, R. (1999). Microbial oxidation of methane from landfills in biofilters. *Proceedings of sardinia 99, 7th international waste management and landfill symposium*. Italy. 517–524.
- Dastous, P. A., Soreanu, G., Nikiema, J., and Heitz, M. (2005). Biofiltration of the alcohols on a mature bed compost. *Proceedings of the annual air & waste management association*. Pittsburgh.
- Dehghanzadeh, R., Torkian, A., Bina, B., Poormogaddas, H., and Kalantary, A. (2005). Biodegradation of styrene laden waste gas stream using compost-based biofilter. *Chemosphere*. 60. 434–439.
- Delhoménie, M. C., Bibeau, L., Gendron, J., Brzezinski, R., and Heitz, M. (2001). Toluene removal by biofiltration: influence of the nitrogen concentration on operational parameters. *Ind. Eng. Chem. Res.* 40. 5405–5414.
- Delhomenie, et.al. (2002). A study of the impact of particle size and adsorption phenomena in a compost-based biological filter. *Chemical Engineering Science*. 57. 4999 – 5010.

- Delhom´enie, M. C., Bibeau, L., Gendron, J., Brzezinski, R., and Heitz, M. (2003). A study of clogging in a biofilter treating toluene vapors. *Chem. Eng. J.* 94. 211–222.
- Delhom´enie, M. C., Nikiema, J., Bibeau, L., Heitz, M. (2008). A new method to determine themicrobial kinetic parameters in biological air filters. *Chemical Engineering Science.* 63. 4126 – 4134.
- Demeestere, K., Langenhove, H. V., and Smet, E. (2002). Regeneration of a compost biofilter degrading high loads of ammonia by addition of gaseous of methanol. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 52. 796–804.
- Den, W., Pirbazari, M., Huang, C. C., and Shen, K. P. (1998). Technology review for vapor phase biofiltration. Part I. Technological development and applications. *J. Chin. Inst. Environ. Eng.* 8. 159–179.
- Deshusses, M. A., Hamer, G., and Dunn, I. J. (1995). Behavior of biofilters for waste air biotreatment. 1. Dynamic model development. *Environ. Sci. Technol.* 29. 1408–1458.
- Deviny, J. S., Deshusses, M. A., and Webster, T. S. (1999). *Biofiltration for air pollution control*. Lewis Publishers. Boca Raton. 5–16.
- Diks, R. M., and Ottengraph, S. P. P. (1991). Process engineering aspects of biological waste gas purification. *Proceedings of the International Symposium on Enviromental Biotechnology*. Belgium. 353–368.
- Dumont, E., Andrès, Y., Le Cloirec, P., and Gaudin, F. (2008). Evaluation of a new packing material for H₂S removed by biofiltration. *Biochemical Engineering Journal.* 42. 120–127.
- Eitner, D., and Gethke, H. G. (1987). Design, construction and operation of biofilters for odor control in sewage treatment plants. *Proceedings of the 80th annual meeting of APCA*. NewYork.
- Elias, A., et.al. (2002). Evaluation of a packing material for the biodegradation of H₂S and product analysis. *Process Biochem.* 37. 813–820.
- Elkhatib, E. A., Bennett, O. L., and Wright, R. J. (1984). Arsenite sorption and desorption in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48. 1025–1030.

- Fernando, Morgan-Sagastume, Sleep, B. E., and Allen, D. G. (2001). Effects of biomass growth on gas pressure drop in biofilters. *Journal of Environmental Engineering*. 127. 5.
- Gabriel, D., Maestre, J. P., Martí'n, L., Gamisans, X., Lafuentea, J. (2007). Characterisation and performance of coconut fibre as packing material in the removal of ammonia in gas-phase biofilters, *Biosystems Engineering*. 97. 481–490.
- Gabriel, D., and Deshusses, M. A. (2003). Performance of a full scale biotrickling filter treating H₂S at a gas contact time of 1.6–2.2 s, *Environ. Prog.* 22. 111–118.
- Garlinski, E. M., and Mann, D. D. (2003). Design and evaluation of horizontal air flow biofilter on a swine facility. *ASAE Annual International Meeting*. 034051.
- Gaudin, F., Andrès, Y., and Le Cloirec, P. (2008). Packing material formulation for odorous emission biofiltration. *Chemosphere*. 70. 958–966.
- Gebert, J., Groengroeft, A., and Miehlich, G. (2003). Kinetics of microbial landfill methane oxidation in biofilters. *Waste Management*. 23. 609–619.
- Gilbert, Y., et.al. (2008). Microbiological and molecular characterization of denitrification in biofilters treating pig manure. *Bioresource Technology*. 99. 4495 – 4502.
- Gostomski, P. A., Sisson, J. B., and Cherry, T. S. (1997). Water content dynamics in biofiltration: the role of humidity and microbial heat generation. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 47. 936–994.
- Govind, R. (2010). *Biofiltration: an innovative technology for the future*. University of Cincinnati. Cincinnati-US.
- Gribbins, M. J., and Loehr, R. C. (1998). Effect of media nitrogen concentration on biofilter performance. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 48. 216–226.
- Hartikainen, T., Ruuskanen, J., Vanhatalo, M., and Martikainen, P. J. (1996). Removal of ammonia from air by a peat biofilter. *Environ. Technol.* 17. 45–53.

- Hirai, M., Kamamoto, M., Yani M., and Shoda, M. (2001). Comparison of the biological NH₃ removal characteristics among four inorganic packing materials. *J. Biosci. Bioeng.* 91. 428–430.
- Hodge, D. S., Medina, V. F., Islander, R. L., and Deviny, J. S. (1992). Treatment of hydrocarbon fuel vapors in biofilters. *Environ. Technol.* 12. 655–662.
- Hong, J. H., and Park, K. J. (2004). Wood chip biofilter performance of ammonia gas from composting manure. *Compost Sci. Util.* 12. 25–30.
- Hong, J. H., and Park, K. J. (2005). Compost biofiltration of ammonia gas from bin composting. *Bioresource Technol.* 96. 741–745.
- Hudepohl, Nate J. (1999). *Biofilter Technology for NO_x Control*. University of California. US.
- Hunt, A. L., Hughes, D. E., and Lowenstein, J. M. (1958). The hydroxylation of nicotinic acid by *Pseudomonas fluorescens*. *Biochem. J.* 69. 170–177.
- Hwang, S. J., Lee, C. M., Lee, H. C., and Pua, H. F. (2003). Biofiltration of waste gases containing both ethyl acetate and toluene using different combinations of bacterial cultures. *J. Biotechnol.* 105. 83–94.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2001) *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability*. Summary for policymakers and technical summary of the working group II report WMO-UNDP.
- Janni, K. A., et.al. (2001). Evaluation of biotration of air—an innovative air pollution control technology. *ASHRAE Transactions.* 107. 198–214.
- Jorio, H., Brzezinski, R., and Heitz, M. (2005). A novel procedure for the measurement of the kinetics of styrene biodegradation in a biofilter. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology.* 80. 796–804.
- Kan, E., and Deshusses, M. A. (2006). Cometabolic degradation of TCE vapor in a foamed emulsion bioreactor. *Environmental Science & Technology.* 40. 1022–1028.
- Kardono, K., and Allen, E. R. (1995). Elimination of benzene using a compost biofilter. *88th Annual AWMA Meeting & Exhibition.*
- Kementerian Lingkungan Hidup Indonesia. (1990). *Indonesia: The first national communication under the united nations framework convention on climate change.*

- Kennes, C., Cox, H. H. J., Doddema, H. J., and Harder, W. (1996). Design and performance of biofilters for the removal of alkylbenzene vapors. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 66. 300–304.
- Kennes, C., and Thalasso, F. (1998). Waste gas biotreatment technology. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 72. 303–319.
- Kennes, C., and Veiga, M. C. (2001). Bioreactors for waste gas treatment. In: Kennes, C., Veiga, M. C. (Eds.). *Conventional Biofilters*. vol. 3: 47. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
- Kennes, C., and Veiga, M. C. (2004). Fungal biocatalysts in the biofiltration of VOC-polluted air. *Journal of Biotechnology*. 113. 305–319.
- Kent, T. D., Williams, S. C., and Fitzpatrick, C. S. B. (2000). Ammoniacal nitrogen removal in biological aerated filters: the effect of media size. *Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management*. 14. 409–414.
- Kibazohi, O., Yun, Soon-Il, and Anderson, W. A. (2004). Removal of hexane in biofilters packed with perlite and a peat–perlite mixture. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*. 20. 337–343.
- Kim, J. H., Rene, E. R., and Park, H. S. (2007). Performance of an immobilized cell biofilter for ammonia removal from contaminated air stream. *Chemosphere*. 68. 274–280.
- Kim, N. J., Sugano, Y., Hirai, M., and Shoda, M. (2000). Removal of a high load of ammonia gas by a marine bacterium *Vibrio alginolyticus*. *J. Biosci. Bioeng.* 90. 410–415.
- Kim, S., and Deshusses, M. A. (2003). Development and experimental validation of a conceptual model for biotrickling filtration of H₂S. *Environmental Progress*. 22. 119–128.
- Kim, S., and Deshusses, M. A. (2005). Understanding the limit of H₂S degrading biotrickling filters using a differential biotrickling filter. *Chemical Engineering Journal*. 113. 119–126.

- Kim, S., and Deshusses, M. A. (2008). Determination of mass transfer coefficients for packing materials used in biofilters and biotrickling filters for air pollution control—1: Experimental results. *Chemical Engineering Science*. 63. 841–855.
- Kim, S., and Deshusses, M. A. (2008). Determination of mass transfer coefficients for packing materials used in biofilters and biotrickling filters for air pollution control—2: Development of mass transfer coefficients correlations. *Chemical Engineering Science*. 63. 856 – 861.
- Kinney, K. A., Chang, D. P. Y., Schroeder, E., and Scow, K. M. (1996). Performance of a directionally-switching biofilter treating toluene contaminated air. *Proceeding 89th Annual Meeting Exhibition Air and Waste Management Association*. Nashville.
- Kirchner, K., Wagner, S., and Rehm, H. J. (1992). Exhaust gas purification using biocatalysts (fixed bacteria monocultures)—the influence of biofilm diffusion rate (O_2) on the overall reaction rate. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 37. 277–279.
- Kurita, M., and Kamata, O. (1990). Deodorization systems used at sewage treatment plants in nagoya city. *Sewage Works Japan*. 114–119.
- Lackey, L. W., and Holt, M. T. (1996). Not for the birds. *WEF Industrial Wastewater*. 4. 31–33.
- Lackey, L. W., Gamble, J. R., and Holt, M. T. (1998). Feasibility testing of biofiltration technology for remediating air contaminated by a boat manufacturing facility. *J. Air Waste Manage.* 48. 527–536.
- Lang, M. E., and Lager, R. A. (1992). Odor control for municipal sludge composting. *Biocycle*. 33. 76–85.
- Langenhove, H. V., Bendinger, B., Oberthur, R., and Schamp, N. (1992). *Biotechniques for air pollution abatement and odour control policies*. Elsevier Science Publishers. Amsterdam. 177–182.
- Lee, B. D., Apel, W. A., and Smith, W. A. (2001). Oxygen effects on thermophilic microbial populations in biofilters treating nitric oxide containing off-gas streams. *Environ. Prog.* 20. 157–166.

- Lee, E. Y., Cho, K. S., Han, H. D., and Ryu, H. W. (2002). Hydrogen sulfide effects on ammonia removal by a biofilter seeded with earthworm casts. *J. Environ. Qual.* 31. 1782–1788.
- Lesson, G. (1998). Biofilters in practice. In Sidkar, S. K., and Irvine, R. L. (Eds.). *Bioremediation*. 3: 601–632. Technomic Publishing Co. Lancaster.
- Lesson, G., and Smith, B. J. (1997). Petroleum environmental research forum field study on biofilters for control of volatile hydrocarbons. *J. Environ. Eng.* 123. 556–564.
- Lesson, G., and Winer A. M. (1991). Biofiltration: an innovative air pollution control technology for VOC emission. *J. Air Waste Manage.* 41. 1045–1054.
- Liang, Y., et.al. (2000). Long-term results of ammonia removal and transformation by biofiltration. *J. Hazard. Mater.* 80. 259–269.
- Lim, K. H. (2001). Waste air treatment with a biofilter: for the case of excess adsorption capacity. *Journal of Chemical Engineering of Japan.* 34. 766–775.
- Lin, C. W., and Cheng, Y. W. (2007). Biodegradation kinetics of benzene, methyl tert-butyl ether, and toluene as a substrate under various substrate concentrations. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology.* 82. 51–57.
- Lin, K. L., Pan, J. Y., Chen, Y. W., Cheng, R. M., and Xu, X. C. (2009). Study the adsorption of phenol from aqueous solution on hydroxyapatite nanopowders. *Journal of Hazardous Materials.* 161. 231–240.
- Liu, Y. H., Quan, X., Zhao, Y., Chen, S., and Zhao, H. (2005). Removal of ternary VOCs in air streams at high loads using a compost-based biofilter. *Biochemical Engineering Journal.* 23. 85–95.
- Lu, C., Lin, M. R., and Lin, J. (2001). Treatment of methylacetate waste gas using a trickle-bed air biofilter. *Waste Manage.* 21. 489–598.
- Mendoza, J., Veiga, M., and Kennes, C. (2003). Biofiltration of waste gases. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 78. 703–708.
- Moe, W. M., and Irvine, R. L. (2001). Effect of nitrogen limitation on performance of toluene degrading biofilters. *Water Res.* 35. 1407–1414.

- Mohsen M. I., Allen, D.G., and Nichols, K. M. (1998). Biofiltration of α -pinene and its application to the treatment of pulp and paper air emissions. *TAPPI*. 81. 205–211.
- Mohsen, M. I., and Allen, D.G. (2000). Biofiltration of mixtures of hydrophilic and hydrophobic volatile organic compounds. *Chem. Eng. Sci.* 55. 1545–1558.
- Morales, M., Hern´andez, S., Cornab´e, T., Revah, S., and Auria, R. (2003). Effect of drying on biofilter performance: modeling and experimental approach. *Environ. Sci. Technol.* 37. 985–992.
- Morgenroth, E., Schroeder, E. D., Chang, D. P. Y., and Scow, K. M. (1995). Nutrient limitation in a compost biofilter degrading hexane. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 46. 300–308.
- Nicolai, R. E., and Janni, K. A. (2001). Biofilter media mixture ratio of wood chips and compost treating swine odors. *Water Sci. Technol.* 44. 261–267.
- Oh, Y. S., Shareefdeen, Z., Baltzis, B. C., and Bartha, R. (1994). Interactions between benzene, toluene and p-xylene (BTX) during their biodegradation. *Biotechnology and Bioengineering.* 44. 533–538.
- Olgun, A., and Atar, N. (2009). Equilibrium and kinetic adsorption study of Basic Yellow 28 and Basic Red 46 by a boron industry waste. *Journal of Hazardous Materials.* 161. 148–156.
- Onde Lttighus, H. H. F. (1997). A new generation of packing materials for biofilters in biological waste gas cleaning. *Proceedings of an International Symposium VDI Verlag Gmbh Duesseldorf.* Germany. 123–131.
- Ottengraph, S. P. P. (1977). Theoretical model for a submerged biological filtration. *Biotechnol. Bioeng.* 19. 1411–1418.
- Ottengraph, S. P. P., and Van den Oever, A. H. C. (1983). Kinetics of organic compound removal from waste gases with a biological filter. *Biotechnology and Bioengineering.* 25. 3089–3102.
- Ottengraph, S. P. P., Meesters, J. J. P., Van den Oever, A. H. C., and Rezema, H. R. (1986). Biological elimination of volatile xenobiotic compounds in biolters. *Bioprocess Engineering.* 1. 61–69.

- Pagans, E., Font, X., and S´anchez, A. (2005). Biofiltration for ammonia removal from composting exhaust gases. *Chemical Engineering Journal*. 113. 105–110.
- Pagans, E., Barrena, R., Font, X., and Sanchez, A. (2006). Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. *Chemosphere*. 62. 1534–1542.
- Pandey, R. A., et al. (2007). Biotreatment of waste gas containing pyridine in a biofilter. *Bioresource Technology*. 98. 2258–2267.
- Piciooreanu, C., van Loosdrecht, M. C. M., and Heijnen, J. J. (2000). Effect of diffusive and convective substrate transport on biofilm structure formation: a two-dimensional modeling study. *Biotechnology and Bioengineering*. 69. 504–515.
- Pierce, M. L., and Moore, C. B. (1980). Adsorption of arsenite on amorphous iron hydroxide from dilute aqueous solution. *Environ. Sci. Technol.* 14. 214–216.
- Prado, O. J., Veiga, M. C., and Kennes, C. (2005). Treatment of gas-phase methanol in conventional biofilters packed with lava rock. *Water Res.* 39. 2385–2393.
- Ramirez-Lopez, E., Corone-Hernandez, J., Dendooven, L., Range, P., and Thalasso, F. (2003). Characterization of five agricultural by-products as potential biofilter carriers. *Bioresour. Technol.* 88. 259–263.
- Rappert, S., and Muller, R. (2005). Microbial degradation of selected odorous substances. *Waste Management*. 25. 940–954.
- Ravi, R., Philip, L., and Swaminathan, T. (2009). Performance evaluation of a compost biofilter treating dichloromethane vapors. *International Journal of Chemical Engineering Research*. 1. 2: 63–76.
- Rene, E. R., Murthy, D. V. S., and Swaminathan, T. (2005). Performance evaluation of a compost biofilter treating toluene vapours. *Process Biochem.* 40. 2771–2779.
- Sakata, M. (1987). Relationship between adsorption of arsenic(III) and boron by soil and soil properties. *Environ. Sci. Technol.* 21. 1126–1130.

- Schirmer, M., Butler, B. J., Roy, J. W., Frind, E. O., and Barker, J. F. (1999). A relative leastsquares technique to determine unique Monod kinetic parameters of BTEX compounds using batch experiments. *Journal of Contaminant Hydrology*. 37. 69–86.
- Schroeder, E. D. (2002). Trends in application of gas-phase bioreactors. *Environmental Science & Biotechnology*. 1. 65–74.
- Schwartz, B. C. E., Devinny, J. S., and Tsotsis, T. T. (2001). A biofilter network model importance of the pore structure and other large-scale heterogeneities. *Chemical Engineering Science*. 56. 475–483.
- Sæbø, A., and Ferrini F. (2006). The use of compost in urban green areas—a review for practical application. *Urban For. Urban Greening*. 4. 159–169.
- Sene, L., Converti, A., Felipe, M. G. A., and Zilli, M. (2002). Sugarcane bagasse as alternative packing material for biofiltration of benzene polluted gaseous streams: a preliminary study. *Bioresour. Technol.* 83. 153–157.
- Shareefdeen, Z., and Singh, A. (2005). *Biotechnology for odor and air pollution control*. Verlag Berlin Heidelberg. Springer.
- Shareefdeen, Z., and Baltzis, B. C. (1994). Biofiltration of toluene vapor under steadystate and transient conditions: theory and experimental results. *Chemical Engineering Science*. 49. 4347–4360.
- Sheridan, B. A., Curran, T. P., and Dodd, V. A. (2002). Assessment of the influence of media particle size on the biofiltration of odorous exhaust ventilation air from a piggery facility. *Bioresour. Technol.* 84. 129–143.
- Shinabe, K., Oketani, S., Kanchanatawee, S., and Matsumura, M. (2000). Characteristics of hydrogen sulphide removal in a carrier-packed biological deodorization system. *Biochem. Eng. J.* 5. 209–217.
- Shoda, M. (1991). Methods for the biological treatment of exhaust gases. In: *Biological degradation of wastes*. 1–30. Elsevier Applied Science. London.
- Shuler, M. L., and Kargi, F. (1992). *Bioprocess engineering—basic concepts*. Prentice Hall. Englewood Cliffs.
- Sims, G. K., and Sommers, L. E. (1986). Biodegradation of pyridine derivatives in soil suspensions. *Environ. Toxicol. Chem.* 5. 503–510.

- Smet, E., Van Langenhove, H., and Maes, K. (2000). Abatement of high concentrated ammonia loaded waste gases in compost biofilters. *Water Air Soil Pollut.* 119. 177–190.
- Smith, L. H., and McCarty, P. L. (1997). Laboratory evaluation of a two-stage treatment system for TCE cometabolism by a methane-oxidizing mixed culture. *Biotechnology and Bioengineering.* 55. 650–659.
- Sorial, G. A., Smith, F. L., Suidan, M. T., Biswas, P., and Brenner, R. C. (1995). Evaluation of trickle bed biofilter media for toluene removal. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 45. 801–810.
- Sun, Y. M., et.al. (2002). Effect of initial moisture content of packing material on the biofiltration of gaseous ethyl acetate. *Acta Scientiae Circumstantiae.* 22. 576–580.
- Sun, Y. M., et.al. (2002). Toluene vapour degradation and microbial community in biofilter at various moisture content. *Pro. Biochem.* 38. 109–113.
- Suriawiria, H. U. (2006). *Pupuk organik kompos dari sampah.* Humaniora Utama Press. Bandung.
- Suzuki, T., et.al. (2004). Aerobic composting of chips from clear-cut trees with various co-materials. *Bioresour. Technol.* 95. 121–128.
- Taghipour, H., Shahmansoury, M. R., Bina, B., and Movahdian, H. (2007). Operational parameters in biofiltration of ammonia-contaminated air streams using compost–pieces of hard plastics filter media. *Chemical Engineering Journal.* 5234.
- Tang, H. M., and Hwang, S. J. (1997). Transient behavior of the biofilters for toluene removal. *Journal of the Air and Waste Management Association.* 47. 1142–1151.
- Tang, H. M., Hwang, S. J., and Wang, W. C. (1997). Degradation of acetone in a biofilter. *Environmental Engineering Science.* 14. 219–226.
- Togashi, I., Suzuki, M., and Hirai, M. (1986). Removal of NH₃ by a peat biofilter without and with nitrifier. *J. Ferment. Technol.* 64. 425–432.
- Turan, N. G., Akdemir, A., Ergun, O. N. (2009). Removal of volatile organic compounds by natural materials during composting of poultry litter. *Bioresource Technology.* 100. 798–803.

- Utami, T. S., Hermansyah, H., Nasikin, M. (2009). Aplikasi biofilter berbasis medium kompos sebagai alternatif pengelolaan polutan gas. *Jurnal Teknologi FTUI*, 1. XXIII: 89-99.
- Utami, T. S., Simanjuntak, J., Hermansyah, H., Slamet, Nasikin, M. (2009). Nitrous oxide gas removal using compost biofilter: effect of circulated gas flowrate. *Journal of Applied and Industrial Biotechnology in Tropical Region*. 2: 1 (Special Edition).
- Utami, T. S., Adriaty, L., Hermansyah, H., Nasikin, M. (2010). Biofiltrasi N₂O dengan medium filter berbasis kompos: evaluasi parameter operasi. *Jurnal Purifikasi Teknik Lingkungan ITS*. 11. 1: 71-76.
- Utami, T. S., Simanjuntak, J., Hermansyah, H., Nasikin, M. (2010). Nitrous oxide gas removal by using compost-based biofilter medium. *Journal of Safety and Environment*. 10. 61-64.
- Utami, T. S., Adriaty, L., Hermansyah, H., Nasikin, M. (2011). Reducing nitrous oxide emission using goat manure-compost based biofilter. *World Applied Science Journal*. 13 (2) : 226-232.
- Van Lith, C., David, S. L., and Marsh, R. (1997). Design criteria for biofilters. In: Van Lith, C, David, S. L., and Marsh, R. (Eds.). *Effluent treatment and waste disposal*. ClairTech, Utrecht. Netherlands Institution of Chemical Engineers Symp Ser 116. 127–132.
- Verbaendert, I., De Vos, P., Boon, N., and Kim, H. (2011). Denitrification in Gram-positive bacteria: an underexplored trait. *Biochemical Society Transactions*. 39:1. 254-258.
- Wang, J., Wu, C., Chen, J., and Zhang, H. (2006). Denitrification removal of nitric oxide in a rotating drum biofilter. *Chem. Eng. J*. 121. 45–49.
- Wang, Q., et.al. (2002). Effects of anaerobic/aerobic incubation and storage temperature on preservation and deodorization of kitchen garbage. *Bioresour. Technol*. 84. 213–220.
- Wani, A. H., Lau, A. K., and Branion, R. M. R. (1999) Biofiltration control of pulping odors hydrogen sulfide: performance, macrokinetics and coexistence effects of organosulfur species. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 74. 9–16.

- Watson, G. K., and Cain, R. B. (1975). Microbial metabolism of the pyridine ring metabolic pathways of pyridine biodegradation by soil bacteria. *Biochem. J.* 146. 157–165.
- Webe, F. J., and Hartmans, S. (1996). Prevention of clogging in a biological trickle-bed removing toluene from contaminated air. *Biotechnol. Bioeng.* 50. 91–97.
- Williams, T. O., and Miller, F. C. (1992). Biofilters and facility operations—Part II. *Biocycle.* 33. 75–79.
- Wright, W. F., Schroeder, E. D., Chang, D. P. Y., and Romstad, K. (1997). Performance of a pilot scale compost biofilter treating gasoline vapour. *J. Environ. Eng.* 123. 547–555.
- Yang, C., Suidan, M. T., Zhu, X., Kim, B. J., and Zeng, G. (2008). Effect of gas empty bed contact time on performances of various types of rotating drum biofilters for removal of VOCs. *Water Research.* 42. 3641-3650.
- Yang, W. F., Hsing, H. J., Yang, Y. C., and Shyng, J. Y. (2007). The effects of selected parameters on the nitric oxide removal by biofilter. *Journal of Hazardous Materials.* 6624.
- Yun, Y. S., Park, J. I., Suh, M. S., and Park, J. M. (2000). Treatment of food wastes using slurry-phase decomposition. *Bioresour. Technol.* 73. 21–27.
- Zilli, M., Converti, A., Lodi, A., Borghi, D. M., and Ferraiolo, G. (1993). Phenol removal from waste gases with a biological filter by *Pseudomonas putida*. *Biotechnol. Bioeng.* 41. 693–699.
- Zilli, M., Palazzi, E., Sene, L., Converti, A., and Del Borghi, M. (2001). Toluene and styrene removal from air in biofilter. *Process Biochem.* 37. 423–429.

Lampiran 1 : Data Biofiltrasi

Medium Kering Pupuk Kandang ($Q = 50 \text{ cm}^3/\text{menit}$)

h = 10 cm

Pengambilan data Waktu (jam)	Keluaran GC Luas area N2O	Hasil kalibrasi Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Dalam volum syringe Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	256369	1.24821E-06	0.0022617	2261.74900	0.00
1	219087	1.06669E-06	0.0019328	1932.83823	14.54
2	193639	9.42787E-07	0.0017083	1708.32985	24.47
3	167725	8.16617E-07	0.0014797	1479.71031	34.58
4	144228	7.02215E-07	0.0012724	1272.41412	43.74
5	126998	6.18326E-07	0.0011204	1120.40691	50.46
6	116376	5.6661E-07	0.0010267	1026.69707	54.61

h = 15 cm

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	254883	1.24097E-06	0.0022486	2248.63915	0.00
1	212795	1.03605E-06	0.0018773	1877.32869	16.51
2	189776	9.23979E-07	0.0016742	1674.24954	25.54
3	165385	8.05224E-07	0.0014591	1459.06626	35.11
4	143746	6.99869E-07	0.0012682	1268.16180	43.60
5	123318	6.00409E-07	0.0010879	1087.94107	51.62
6	107323	5.22533E-07	0.0009468	946.82933	57.89

h = 25 cm

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	255741	1.24515E-06	0.0022562	2256.20864	0.00
1	194133	9.45192E-07	0.0017127	1712.68804	24.09
2	158914	7.73718E-07	0.0014020	1401.97755	37.86
3	144119	7.01685E-07	0.0012715	1271.45250	43.65
4	128328	6.24802E-07	0.0011321	1132.14049	49.82
5	105407	5.13204E-07	0.0009299	929.92592	58.78
6	94894	4.62019E-07	0.0008372	837.17770	62.89

h = 50 cm (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	264231	1.28648E-06	0.0023311	2331.10946	0.00
1	214676	1.04521E-06	0.0018939	1893.92333	18.75
2	186256	9.06841E-07	0.0016432	1643.19525	29.51
3	154435	7.51911E-07	0.0013625	1362.46273	41.55
4	125907	6.13014E-07	0.0011108	1110.78185	52.35
5	104716	5.0984E-07	0.0009238	923.82975	60.37
6	88458	4.30683E-07	0.0007804	780.39776	66.52

h = 50 cm (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	260310	1.26739E-06	0.0022965	2296.51745	0.00
1	217332	1.05814E-06	0.0019174	1917.35520	16.51
2	186256	9.06841E-07	0.0016432	1643.19525	28.45
3	154983	7.54579E-07	0.0013673	1367.29732	40.46
4	113884	5.54477E-07	0.0010047	1004.71205	56.25
5	98332	4.78757E-07	0.0008675	867.50856	62.23
6	83652	4.07284E-07	0.0007380	737.99807	67.86

(lanjutan)

Medium Kering Pupuk Kandang (h = 50 cm)

Q = 25 cc/menit

Pengambilan data Waktu (jam)	Keluaran GC Luas area N2O	Hasil kalibrasi Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Dalam volum syringe Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	207730	1.01139E-06	0.0018326	1832.64404	0.00
1	179555	8.74215E-07	0.0015841	1584.07741	13.56
2	150130	7.30951E-07	0.0013245	1324.48298	27.73
3	120603	5.8719E-07	0.0010640	1063.98868	41.94
4	101217	4.92804E-07	0.0008930	892.96073	51.27
5	87022	4.23692E-07	0.0007677	767.72902	58.11
6	71366	3.47466E-07	0.0006296	629.60802	65.64

Q = 32 cc/menit

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	227818	1.1092E-06	0.0020099	2009.86521	0.00
1	177788	8.65612E-07	0.0015685	1568.48851	21.96
2	155563	7.57403E-07	0.0013724	1372.41422	31.72
3	128474	6.25512E-07	0.0011334	1133.42854	43.61
4	112463	5.47558E-07	0.0009922	992.17565	50.63
5	94414	4.59682E-07	0.0008329	832.94303	58.56
6	80539	3.92127E-07	0.0007105	710.53444	64.65

Q = 50 cc/menit

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	264231	1.28648E-06	0.0023311	2331.10946	0.00
1	214676	1.04521E-06	0.0018939	1893.92333	18.75
2	186256	9.06841E-07	0.0016432	1643.19525	29.51
3	154435	7.51911E-07	0.0013625	1362.46273	41.55
4	125907	6.13014E-07	0.0011108	1110.78185	52.35
5	104716	5.0984E-07	0.0009238	923.82975	60.37
6	88458	4.30683E-07	0.0007804	780.39776	66.52

Q = 100 cc/menit

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	267044	1.30018E-06	0.0023559	2355.92642	0.00
1	227713	1.10869E-06	0.0020089	2008.93888	14.73
2	191274	9.31272E-07	0.0016875	1687.46525	28.37
3	148007	7.20614E-07	0.0013058	1305.75337	44.58
4	125550	6.11276E-07	0.0011076	1107.63231	52.99
5	108181	5.2671E-07	0.0009544	954.39881	59.49
6	87519	4.26111E-07	0.0007721	772.11368	67.23

Q = 200 cc/menit

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	282056	1.37327E-06	0.0024884	2488.36590	0.00
1	236075	1.1494E-06	0.0020827	2082.71045	16.30
2	193682	9.42996E-07	0.0017087	1708.70921	31.33
3	158496	7.71683E-07	0.0013983	1398.28985	43.81
4	135091	6.57729E-07	0.0011918	1191.80531	52.10
5	109729	5.34247E-07	0.0009681	968.05564	61.10
6	84006	4.09007E-07	0.0007411	741.12115	70.22

(lanjutan)

Medium Pupuk Kandang ($Q = 200 \text{ cm}^3/\text{menit}$; $h = 50 \text{ cm}$)

Dengan penambahan nutrisi sintetis (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	281408	1.37012E-06	0.0024826	2482.64909	0.00
1	227026	1.10534E-06	0.0020029	2002.87800	19.32
2	178613	8.69629E-07	0.0015758	1575.76686	36.53
3	135392	6.59195E-07	0.0011945	1194.46080	51.89
4	85895	4.18204E-07	0.0007578	757.78636	69.48
5	61358	2.98739E-07	0.0005413	541.31504	78.20
6	33231	1.61795E-07	0.0002932	293.17188	88.19

Dengan penambahan nutrisi sintetis (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	278707	1.35696E-06	0.0024588	2458.82022	0.96
1	156371	7.61337E-07	0.0013795	1379.54259	44.43
2	73287	3.56819E-07	0.0006466	646.55555	73.96
3	32779	1.59594E-07	0.0002892	289.18423	88.35
4	28867	1.40547E-07	0.0002547	254.67162	89.74
5	25684	1.2505E-07	0.0002266	226.59043	90.87
6	23728	1.15527E-07	0.0002093	209.33413	91.57

Tanpa penambahan nutrisi

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	282056	1.37327E-06	0.0024884	2488.36590	0.00
1	236075	1.1494E-06	0.0020827	2082.71045	16.30
2	193682	9.42996E-07	0.0017087	1708.70921	31.33
3	158496	7.71683E-07	0.0013983	1398.28985	43.81
4	135091	6.57729E-07	0.0011918	1191.80531	52.10
5	109729	5.34247E-07	0.0009681	968.05564	61.10
6	84006	4.09007E-07	0.0007411	741.12115	70.22

Medium Kering Kompos Kotoran Sapi ($h = 50 \text{ cm}$) $Q = 72 \text{ cc}/\text{menit}$ (data1)

Pengambilan data Waktu (jam)	Keluaran GC Luas area N2O	Hasil kalibrasi Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Dalam volum syringe Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	140673	4.72947E-06	0.0085698	8569.79360	0.00
1	86626	2.9279E-06	0.0053054	5305.35480	38.09
2	84260	2.84903E-06	0.0051624	5162.44840	39.76
3	82768	2.7993E-06	0.0050723	5072.33160	40.81
4	84131	2.84473E-06	0.0051547	5154.65680	39.85
5	81303	2.75047E-06	0.0049838	4983.84560	41.84
6	82128	2.77797E-06	0.0050337	5033.67560	41.26
7	79255	2.6822E-06	0.0048601	4860.14640	43.29
8	78072	2.64277E-06	0.0047887	4788.69320	44.12
9	73851	2.50207E-06	0.0045337	4533.74480	47.10

(lanjutan)

Q = 72 cc/menit (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	140673	4.72947E-06	0.0085698	8569.79360	0.00
1	86469	2.92267E-06	0.0052959	5295.87200	38.20
2	86462	2.92243E-06	0.0052954	5295.44920	38.21
3	82403	2.78713E-06	0.0050503	5050.28560	41.07
4	84066	2.84257E-06	0.0051507	5150.73080	39.90
5	78651	2.66207E-06	0.0048237	4823.66480	43.71
6	80527	2.7246E-06	0.0049370	4936.97520	42.39
7	80356	2.7189E-06	0.0049266	4926.64680	42.51
8	79046	2.67523E-06	0.0048475	4847.52280	43.43
9	73851	2.50207E-06	0.0045337	4533.74480	47.10

Q = 88 cc/menit (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	150450	5.05537E-06	0.0091603	9160.32440	0.00
1	101180	3.41303E-06	0.0061844	6184.41640	32.49
2	98204	3.31383E-06	0.0060047	6004.66600	34.45
3	89658	3.02897E-06	0.0054885	5488.48760	40.08
4	87357	2.95227E-06	0.0053495	5349.50720	41.60
5	84523	2.8578E-06	0.0051783	5178.33360	43.47
6	80957	2.73893E-06	0.0049629	4962.94720	45.82
7	71897	2.43693E-06	0.0044157	4415.72320	51.80
8	67908	2.30397E-06	0.0041748	4174.78760	54.43
9	57410	1.95403E-06	0.0035407	3540.70840	61.35

Q = 88 cc/menit (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	150450	5.05537E-06	0.0091603	9160.32440	0.00
1	108366	3.65257E-06	0.0066185	6618.45080	27.75
2	95780	3.23303E-06	0.0058583	5858.25640	36.05
3	87996	2.97357E-06	0.0053881	5388.10280	41.18
4	86032	2.9081E-06	0.0052695	5269.47720	42.47
5	82293	2.78347E-06	0.0050436	5043.64160	44.94
6	81562	2.7591E-06	0.0049995	4999.48920	45.42
7	74952	2.53877E-06	0.0046002	4600.24520	49.78
8	66772	2.2661E-06	0.0041062	4106.17320	55.17
9	56954	1.93883E-06	0.0035132	3513.16600	61.65

Q = 104 cc/menit (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	86748	2.93197E-06	0.0053127	5312.72360	0.00
1	59571	2.02607E-06	0.0036712	3671.23280	30.90
2	49802	1.70043E-06	0.0030812	3081.18520	42.00
3	40887	1.40327E-06	0.0025427	2542.71920	52.14
4	34396	1.1869E-06	0.0021507	2150.66280	59.52
5	37930	1.3047E-06	0.0023641	2364.11640	55.50
6	30956	1.07223E-06	0.0019429	1942.88680	63.43
7	41718	1.43097E-06	0.0025929	2592.91160	51.19
8	42888	1.46997E-06	0.0026636	2663.57960	49.86
9	25088	8.76633E-07	0.0015885	1588.45960	70.10

(lanjutan)

Q = 104 cc/menit (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	86748	2.93197E-06	0.0053127	5312.72360	0.00
1	56384	1.91983E-06	0.0034787	3478.73800	34.52
2	44484	1.52317E-06	0.0027600	2759.97800	48.05
3	40634	1.39483E-06	0.0025274	2527.43800	52.43
4	34751	1.19873E-06	0.0021721	2172.10480	59.12
5	36534	1.25817E-06	0.0022798	2279.79800	57.09
6	29475	1.02287E-06	0.0018534	1853.43440	65.11
7	38253	1.31547E-06	0.0023836	2383.62560	55.13
8	37009	0.000001274	0.0023085	2308.48800	56.55
9	25693	8.968E-07	0.0016250	1625.00160	69.41

Q = 128 cc/menit (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	66567	2.25927E-06	0.0040938	4093.79120	0.00
1	56917	1.9376E-06	0.0035109	3510.93120	14.24
2	45093	1.54347E-06	0.0027968	2796.76160	31.68
3	38849	1.33533E-06	0.0024196	2419.62400	40.90
4	38042	1.30843E-06	0.0023709	2370.88120	42.09
5	35995	1.2402E-06	0.0022472	2247.24240	45.11
6	24084	8.43167E-07	0.0015278	1527.81800	62.68
7	24148	8.453E-07	0.0015317	1531.68360	62.59
8	29688	1.02997E-06	0.0018663	1866.29960	54.41
9	37986	1.30657E-06	0.0023675	2367.49880	42.17

Q = 128 cc/menit (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	66567	2.25927E-06	0.0040938	4093.79120	0.00
1	53567	1.82593E-06	0.0033086	3308.59120	19.18
2	44698	1.5303E-06	0.0027729	2772.90360	32.27
3	38152	1.3121E-06	0.0023775	2377.52520	41.92
4	38428	1.3213E-06	0.0023942	2394.19560	41.52
5	35897	1.23693E-06	0.0022413	2241.32320	45.25
6	21718	7.643E-07	0.0013849	1384.91160	66.17
7	29488	1.0233E-06	0.0018542	1854.21960	54.71
8	30805	1.0672E-06	0.0019338	1933.76640	52.76
9	39418	1.3543E-06	0.0024540	2453.99160	40.06

Q = 185 cc/menit (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	72890	2.47003E-06	0.0044757	4475.70040	0.00
1	40519	0.000001391	0.0025205	2520.49200	43.68
2	34088	1.17663E-06	0.0021321	2132.05960	52.36
3	29077	1.0096E-06	0.0018294	1829.39520	59.13
4	27955	9.722E-07	0.0017616	1761.62640	60.64
5	42658	1.4623E-06	0.0026497	2649.68760	40.80
6	39004	1.3405E-06	0.0024290	2428.98600	45.73
7	37614	1.29417E-06	0.0023450	2345.03000	47.61
8	39690	1.36337E-06	0.0024704	2470.42040	44.80
9	31485	1.08987E-06	0.0019748	1974.83840	55.88

(lanjutan)

Q = 185 cc/menit (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	72890	2.47003E-06	0.0044757	4475.70040	0.00
1	52022	1.77443E-06	0.0032153	3215.27320	28.16
2	48133	1.6448E-06	0.0029804	2980.37760	33.41
3	31242	1.08177E-06	0.0019602	1960.16120	56.20
4	32507	1.12393E-06	0.0020366	2036.56720	54.50
5	43133	1.47813E-06	0.0026784	2678.37760	40.16
6	43708	1.4973E-06	0.0027131	2713.10760	39.38
7	41749	0.000001432	0.0025948	2594.78400	42.03
8	40946	1.40523E-06	0.0025463	2546.28280	43.11
9	31485	1.08987E-06	0.0019748	1974.83840	55.88

Q = 232 cc/menit (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	93303	3.15047E-06	0.0057086	5708.64560	0.00
1	72310	2.4507E-06	0.0044407	4440.66840	22.21
2	75695	2.56353E-06	0.0046451	4645.12240	18.63
3	67421	2.28773E-06	0.0041454	4145.37280	27.38
4	66801	2.26707E-06	0.0041079	4107.92480	28.04
5	71205	2.41387E-06	0.0043739	4373.92640	23.38
6	63523	2.1578E-06	0.0039099	3909.93360	31.51
7	65682	2.22977E-06	0.0040403	4040.33720	29.22
8	76012	2.5741E-06	0.0046643	4664.26920	18.29
9	70464	2.38917E-06	0.0043292	4329.17000	24.16

Q = 232 cc/menit (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	93303	3.15047E-06	0.0057086	5708.64560	0.00
1	77128	2.6113E-06	0.0047317	4731.67560	17.11
2	73267	2.4826E-06	0.0044985	4498.47120	21.20
3	68241	2.31507E-06	0.0041949	4194.90080	26.52
4	64376	2.18623E-06	0.0039615	3961.45480	30.61
5	76094	2.57683E-06	0.0046692	4669.22200	18.21
6	64605	2.19387E-06	0.0039753	3975.28640	30.36
7	76177	2.5796E-06	0.0046742	4674.23520	18.12
8	75365	2.55253E-06	0.0046252	4625.19040	18.98
9	76012	2.5741E-06	0.0046643	4664.26920	18.29

Medium Kompos Kotoran Sapi (h = 50 cm; Q = 88 cm³/menit)

WC = 30% (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	129292	4.3501E-06	0.0078824	7882.38120	0.00
1	23407	8.206E-07	0.0014869	1486.92720	81.14
2	61105	2.0772E-06	0.0037639	3763.88640	52.25
3	69203	2.34713E-06	0.0042530	4253.00560	46.04
4	79724	2.69783E-06	0.0048885	4888.47400	37.98
5	71124	2.41117E-06	0.0043690	4369.03400	44.57
6	70372	2.3861E-06	0.0043236	4323.61320	45.15
7	72284	2.44983E-06	0.0044391	4439.09800	43.68
8	72586	2.4599E-06	0.0044573	4457.33880	43.45
9	70296	2.38357E-06	0.0043190	4319.02280	45.21

(lanjutan)

WC = 30% (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	129292	4.3501E-06	0.0078824	7882.38120	0.00
1	25131	8.78067E-07	0.0015911	1591.05680	79.82
2	61370	2.08603E-06	0.0037799	3779.89240	52.05
3	75717	2.56427E-06	0.0046465	4646.45120	41.05
4	81930	2.77137E-06	0.0050217	5021.71640	36.29
5	71256	2.41557E-06	0.0043770	4377.00680	44.47
6	70853	2.40213E-06	0.0043527	4352.66560	44.78
7	73102	2.4771E-06	0.0044885	4488.50520	43.06
8	72306	2.45057E-06	0.0044404	4440.42680	43.67
9	71325	2.41787E-06	0.0043812	4381.17440	44.42

WC = 50% (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	205631	6.89473E-06	0.0124933	12493.25680	0.00
1	31508	1.09063E-06	0.0019762	1976.22760	84.18
2	67860	2.30237E-06	0.0041719	4171.88840	66.61
3	72251	2.44873E-06	0.0044371	4437.10480	64.48
4	72964	2.4725E-06	0.0044802	4480.17000	64.14
5	71061	2.40907E-06	0.0043652	4365.22880	65.06
6	69632	2.36143E-06	0.0042789	4278.91720	65.75
7	71725	2.4312E-06	0.0044053	4405.33440	64.74
8	70281	2.38307E-06	0.0043181	4318.11680	65.44
9	79458	2.68897E-06	0.0048724	4872.40760	61.00

WC = 50% (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	205631	6.89473E-06	0.0124933	12493.25680	0.00
1	32124	1.11117E-06	0.0020134	2013.43400	83.88
2	68315	2.31753E-06	0.0041994	4199.37040	66.39
3	73558	2.4923E-06	0.0045160	4516.04760	63.85
4	74832	2.53477E-06	0.0045930	4592.99720	63.24
5	81324	2.75117E-06	0.0049851	4985.11400	60.10
6	68651	2.32873E-06	0.0042197	4219.66480	66.22
7	71729	2.43133E-06	0.0044056	4405.57600	64.74
8	67392	2.28677E-06	0.0041436	4143.62120	66.83
9	80021	2.70773E-06	0.0049064	4906.41280	60.73

WC = 60% (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	73145	2.47853E-06	0.0044911	4491.10240	0.00
1	0	4.03667E-08	0.0000731	73.14440	98.37
2	0	4.03667E-08	0.0000731	73.14440	98.37
3	26965	9.392E-07	0.0017018	1701.83040	62.11
4	31819	0.000001101	0.0019950	1995.01200	55.58
5	8646	3.28567E-07	0.0005954	595.36280	86.74
6	0	4.03667E-08	0.0000731	73.14440	98.37
7	0	4.03667E-08	0.0000731	73.14440	98.37
8	0	4.03667E-08	0.0000731	73.14440	98.37
9	0	4.03667E-08	0.0000731	73.14440	98.37

(lanjutan)

WC = 60% (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	73145	2.47853E-06	0.0044911	4491.10240	0.00
1	0	4.03667E-08	0.0000731	73.14440	98.37
2	0	4.03667E-08	0.0000731	73.14440	98.37
3	35853	1.23547E-06	0.0022387	2238.66560	50.15
4	48022	1.6411E-06	0.0029737	2973.67320	33.79
5	691	6.34E-08	0.0001149	114.88080	97.44
6	0	4.03667E-08	0.0000731	73.14440	98.37
7	0	4.03667E-08	0.0000731	73.14440	98.37
8	0	4.03667E-08	0.0000731	73.14440	98.37
9	0	4.03667E-08	0.0000731	73.14440	98.37

WC = 70% (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	128027	4.30793E-06	0.0078060	7805.97520	0.00
1	0	4.03667E-08	0.0000731	73.14440	99.06
2	51339	1.75167E-06	0.0031740	3174.02000	59.34
3	34654	1.1955E-06	0.0021662	2166.24600	72.25
4	5126	2.11233E-07	0.0003828	382.75480	95.10
5	50753	1.73213E-06	0.0031386	3138.62560	59.79
6	53632	1.8281E-06	0.0033125	3312.51720	57.56
7	39442	1.3551E-06	0.0024554	2455.44120	68.54
8	35511	1.22407E-06	0.0022180	2218.00880	71.59
9	0	4.03667E-08	0.0000731	73.14440	99.06

WC = 70% (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	128027	4.30793E-06	0.0078060	7805.97520	0.00
1	0	4.03667E-08	0.0000731	73.14440	99.06
2	38518	1.3243E-06	0.0023996	2399.63160	69.26
3	40457	1.38893E-06	0.0025167	2516.74720	67.76
4	817	6.76E-08	0.0001225	122.49120	98.43
5	47708	1.63063E-06	0.0029547	2954.70760	62.15
6	51092	1.74343E-06	0.0031591	3159.10120	59.53
7	60081	2.04307E-06	0.0037020	3702.03680	52.57
8	17404	6.205E-07	0.0011243	1124.34600	85.60
9	0	4.03667E-08	0.0000731	73.14440	99.06

Elimination Capacity Medium Kompos Kotoran Sapi

Q (cc/menit)	Q (m3/jam)	Pada t = 9 jam Cout (g/m3)	(Q* <i>C_{in}</i>)/V IL (g/m3.jam)	(Q*(<i>C_{in}</i> - <i>C_{out}</i>))/V EC (g/m3.jam)
232	0.01392	4329.170	60081.499	31686.98
185	0.01110	1974.838	47909.816	37581.13
128	0.00768	2367.499	33148.413	24581.16
104	0.00624	1588.460	26933.086	22262.71
88	0.00528	3540.708	22789.534	13980.77
72	0.00432	4533.745	18645.982	9417.47

(lanjutan)

Medium Kering Kompos Kotoran Kambing (h = 50 cm)

Q = 72 cc/menit (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	24201	8.533E-07	0.0015462	1546.17960	0.00
1	12942	0.000000478	0.0008661	866.13600	43.98
2	11908	4.43533E-07	0.0008037	803.68240	48.02
3	10154	3.85067E-07	0.0006977	697.74080	54.87
4	10165	3.85433E-07	0.0006984	698.40520	54.83
5	10595	3.99767E-07	0.0007244	724.37720	53.15
6	9881	3.75967E-07	0.0006813	681.25160	55.94
7	9536	3.64467E-07	0.0006604	660.41360	57.29
8	9779	3.72567E-07	0.0006751	675.09080	56.34
9	9676	3.69133E-07	0.0006689	668.86960	56.74

Q = 72 cc/menit (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	24201	8.533E-07	0.0015462	1546.17960	0.00
1	24201	8.533E-07	0.0015462	1546.17960	0.00
2	15701	5.69967E-07	0.0010328	1032.77960	33.20
3	10900	4.09933E-07	0.0007428	742.79920	51.96
4	18277	6.55833E-07	0.0011884	1188.37000	23.14
5	13374	4.924E-07	0.0008922	892.22880	42.29
6	12339	4.579E-07	0.0008297	829.71480	46.34
7	16880	6.09267E-07	0.0011040	1103.99120	28.60
8	16460	5.95267E-07	0.0010786	1078.62320	30.24
9	13757	5.05167E-07	0.0009154	915.36200	40.80

Q = 88 cc/menit (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	29653	1.03503E-06	0.0018755	1875.48040	0.00
1	16303	5.90033E-07	0.0010691	1069.14040	42.99
2	15152	5.51667E-07	0.0009996	999.62000	46.70
3	15850	5.74933E-07	0.0010418	1041.77920	44.45
4	12385	4.59433E-07	0.0008325	832.49320	55.61
5	13766	5.05467E-07	0.0009159	915.90560	51.16
6	12301	4.56633E-07	0.0008274	827.41960	55.88
7	12501	4.633E-07	0.0008395	839.49960	55.24
8	12598	4.66533E-07	0.0008454	845.35840	54.93
9	12120	4.506E-07	0.0008165	816.48720	56.47

Q = 88 cc/menit (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	29653	1.03503E-06	0.0018755	1875.48040	0.00
1	29653	1.03503E-06	0.0018755	1875.48040	0.00
2	18903	6.767E-07	0.0012262	1226.18040	34.62
3	17238	6.212E-07	0.0011256	1125.61440	39.98
4	11200	4.19933E-07	0.0007609	760.91920	59.43
5	10270	3.88933E-07	0.0007047	704.74720	62.42
6	17403	6.267E-07	0.0011356	1135.58040	39.45
7	18845	6.74767E-07	0.0012227	1222.67720	34.81
8	15324	5.574E-07	0.0010100	1010.00880	46.15
9	12769	4.72233E-07	0.0008557	855.68680	54.38

(lanjutan)

Q = 105 cc/menit (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	24201	8.533E-07	0.0015462	1546.17960	0.00
1	18227	6.54167E-07	0.0011854	1185.35000	23.34
2	15045	5.481E-07	0.0009932	993.15720	35.77
3	14416	5.27133E-07	0.0009552	955.16560	38.22
4	14200	5.19933E-07	0.0009421	942.11920	39.07
5	14427	5.275E-07	0.0009558	955.83000	38.18
6	13772	5.05667E-07	0.0009163	916.26800	40.74
7	13976	5.12467E-07	0.0009286	928.58960	39.94
8	12927	4.775E-07	0.0008652	865.23000	44.04
9	11848	4.41533E-07	0.0008001	800.05840	48.26

Q = 105 cc/menit (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	24201	8.533E-07	0.0015462	1546.17960	0.00
1	14490	5.296E-07	0.0009596	959.63520	37.94
2	18276	6.558E-07	0.0011883	1188.30960	23.15
3	13172	4.85667E-07	0.0008800	880.02800	43.08
4	15119	5.50567E-07	0.0009976	997.62680	35.48
5	15119	5.50567E-07	0.0009976	997.62680	35.48
6	16251	5.883E-07	0.0010660	1065.99960	31.06
7	14406	5.268E-07	0.0009546	954.56160	38.26
8	18137	6.51167E-07	0.0011799	1179.91400	23.69
9	11848	4.41533E-07	0.0008001	800.05840	48.26

Q = 127 cc/menit (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	109522	1.07187E-06	0.0019422	1942.22844	0.00
1	74713	7.2378E-07	0.0013115	1311.48936	32.48
2	96855	9.452E-07	0.0017127	1712.70240	11.82
3	94080	9.1745E-07	0.0016624	1662.41940	14.41
4	85000	8.2665E-07	0.0014979	1497.88980	22.88
5	82355	8.002E-07	0.0014500	1449.96240	25.35
6	89543	8.7208E-07	0.0015802	1580.20896	18.64
7	82299	7.9964E-07	0.0014489	1448.94768	25.40
8	75856	7.3521E-07	0.0013322	1332.20052	31.41
9	62025	5.969E-07	0.0010816	1081.58280	44.31

Q = 127 cc/menit (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	109522	1.07187E-06	0.0019422	1942.22844	0.00
1	82250	7.9915E-07	0.0014481	1448.05980	25.44
2	97063	9.4728E-07	0.0017165	1716.47136	11.62
3	100969	9.8634E-07	0.0017872	1787.24808	7.98
4	72111	6.9776E-07	0.0012643	1264.34112	34.90
5	77611	7.5276E-07	0.0013640	1364.00112	29.77
6	92988	9.0653E-07	0.0016426	1642.63236	15.43
7	97468	9.5133E-07	0.0017238	1723.80996	11.25
8	92188	8.9853E-07	0.0016281	1628.13636	16.17
9	63670	6.1335E-07	0.0011114	1111.39020	42.78

(lanjutan)

Q = 186 cc/menit (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	93317	9.0982E-07	0.0016486	1648.59384	0.00
1	71747	6.9412E-07	0.0012577	1257.74544	23.71
2	67737	6.5402E-07	0.0011851	1185.08424	28.12
3	77773	7.5438E-07	0.0013669	1366.93656	17.08
4	69604	6.7269E-07	0.0012189	1218.91428	26.06
5	73262	7.0927E-07	0.0012852	1285.19724	22.04
6	70734	6.8399E-07	0.0012394	1239.38988	24.82
7	72203	6.9868E-07	0.0012660	1266.00816	23.21
8	80683	7.8348E-07	0.0014197	1419.66576	13.89
9	53527	5.1192E-07	0.0009276	927.59904	43.73

Q = 186 cc/menit (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	93317	9.0982E-07	0.0016486	1648.59384	0.00
1	82716	8.0381E-07	0.0014565	1456.50372	11.65
2	65397	6.3062E-07	0.0011427	1142.68344	30.69
3	78759	7.6424E-07	0.0013848	1384.80288	16.00
4	63058	6.0723E-07	0.0011003	1100.30076	33.26
5	85731	8.3396E-07	0.0015111	1511.13552	8.34
6	74912	7.2577E-07	0.0013151	1315.09524	20.23
7	76952	7.4617E-07	0.0013521	1352.06004	17.99
8	84189	8.1854E-07	0.0014832	1483.19448	10.03
9	53527	5.1192E-07	0.0009276	927.59904	43.73

Q = 233 cc/menit (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	86633	8.4298E-07	0.0015275	1527.47976	0.00
1	59520	5.7185E-07	0.0010362	1036.19220	32.16
2	78872	7.6537E-07	0.0013869	1386.85044	9.21
3	76800	7.4465E-07	0.0013493	1349.30580	11.66
4	75680	7.3345E-07	0.0013290	1329.01140	12.99
5	78444	7.6109E-07	0.0013791	1379.09508	9.71
6	75818	7.3483E-07	0.0013315	1331.51196	12.83
7	70337	6.8002E-07	0.0012322	1232.19624	19.33
8	59386	5.7051E-07	0.0010338	1033.76412	32.32
9	54999	5.2664E-07	0.0009543	954.27168	37.53

Q = 233 cc/menit (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	86633	8.4298E-07	0.0015275	1527.47976	0.00
1	61885	5.955E-07	0.0010790	1079.04600	29.36
2	53366	5.1031E-07	0.0009247	924.68172	39.46
3	47563	4.5228E-07	0.0008195	819.53136	46.35
4	66405	6.407E-07	0.0011609	1160.94840	24.00
5	68907	6.6572E-07	0.0012063	1206.28464	21.03
6	64483	6.2148E-07	0.0011261	1126.12176	26.28
7	62571	6.0236E-07	0.0010915	1091.47632	28.54
8	56234	5.3899E-07	0.0009766	976.64988	36.06
9	57984	5.5649E-07	0.0010084	1008.35988	33.99

(lanjutan)

Medium Kompos Kotoran Kambing ($h = 50 \text{ cm}$; $Q = 72 \text{ cm}^3/\text{menit}$)

WC = 30% (data1)

Pengambilan data Waktu (jam)	Keluaran GC Luas area N2O	Hasil kalibrasi Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Dalam volum syringe Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	116892	1.14557E-06	0.0020758	2075.77284	0.00
1	22142	1.9807E-07	0.0003589	358.90284	82.71
2	29092	2.6757E-07	0.0004848	484.83684	76.64
3	46717	4.4382E-07	0.0008042	804.20184	61.26
4	62943	6.0608E-07	0.0010982	1098.21696	47.09
5	75095	7.276E-07	0.0013184	1318.41120	36.49
6	79126	7.6791E-07	0.0013915	1391.45292	32.97
7	72126	6.9791E-07	0.0012646	1264.61292	39.08
8	64586	6.2251E-07	0.0011280	1127.98812	45.66
9	61791	5.9456E-07	0.0010773	1077.34272	48.10

WC = 30% (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	116892	1.14557E-06	0.0020758	2075.77284	0.00
1	48058	4.5723E-07	0.0008285	828.50076	60.09
2	17019	1.4684E-07	0.0002661	266.07408	87.18
3	28870	2.6535E-07	0.0004808	480.81420	76.84
4	65605	6.327E-07	0.0011465	1146.45240	44.77
5	51490	4.9155E-07	0.0008907	890.68860	57.09
6	74400	7.2065E-07	0.0013058	1305.81780	37.09
7	84130	8.1795E-07	0.0014821	1482.12540	28.60
8	79685	7.735E-07	0.0014016	1401.58200	32.48
9	61719	5.9384E-07	0.0010760	1076.03808	48.16

WC = 40% (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	117545	1.1521E-06	0.0020876	2087.60520	0.00
1	3350	1.015E-08	0.0000184	18.39180	99.12
2	12768	1.0433E-07	0.0001890	189.04596	90.94
3	32667	3.0332E-07	0.0005496	549.61584	73.67
4	64799	6.2464E-07	0.0011318	1131.84768	45.78
5	76825	7.449E-07	0.0013498	1349.75880	35.34
6	74638	7.2303E-07	0.0013101	1310.13036	37.24
7	76238	7.3903E-07	0.0013391	1339.12236	35.85
8	68957	6.6622E-07	0.0012072	1207.19064	42.17
9	40039	3.7704E-07	0.0006832	683.19648	67.27

WC = 40% (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	117545	1.1521E-06	0.0020876	2087.60520	0.00
1	1776	-5.59E-09	-0.0000101	-10.12908	100.49
2	11887	9.552E-08	0.0001731	173.08224	91.71
3	28889	2.6554E-07	0.0004812	481.15848	76.95
4	40945	3.861E-07	0.0006996	699.61320	66.49
5	60433	5.8098E-07	0.0010527	1052.73576	49.57
6	68358	6.6023E-07	0.0011963	1196.33676	42.69
7	68537	6.6202E-07	0.0011996	1199.58024	42.54
8	49064	4.6729E-07	0.0008467	846.72948	59.44
9	40039	3.7704E-07	0.0006832	683.19648	67.27

(lanjutan)

WC = 50% (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	110046	1.07711E-06	0.0019517	1951.72332	0.00
1	15961	1.3626E-07	0.0002469	246.90312	87.35
2	38704	3.6369E-07	0.0006590	659.00628	66.23
3	44402	4.2067E-07	0.0007623	762.25404	60.94
4	73368	7.1033E-07	0.0012871	1287.11796	34.05
5	76685	7.435E-07	0.0013472	1347.22200	30.97
6	81069	7.8734E-07	0.0014267	1426.66008	26.90
7	78081	7.5746E-07	0.0013725	1372.51752	29.68
8	68660	6.6325E-07	0.0012018	1201.80900	38.42
9	42240	3.9905E-07	0.0007231	723.07860	62.95

WC = 50% (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	110046	1.07711E-06	0.0019517	1951.72332	0.00
1	24046	2.1711E-07	0.0003934	393.40332	79.84
2	40254	3.7919E-07	0.0006871	687.09228	64.80
3	70311	6.7976E-07	0.0012317	1231.72512	36.89
4	42308	3.9973E-07	0.0007243	724.31076	62.89
5	70609	6.8274E-07	0.0012371	1237.12488	36.61
6	64473	6.2138E-07	0.0011259	1125.94056	42.31
7	91533	8.9198E-07	0.0016163	1616.26776	17.19
8	44048	4.1713E-07	0.0007558	755.83956	61.27
9	42240	3.9905E-07	0.0007231	723.07860	62.95

WC = 60% (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	116887	1.14552E-06	0.0020757	2075.68224	0.00
1	1402	-9.33E-09	-0.0000169	-16.90596	100.81
2	7268	4.933E-08	0.0000894	89.38596	95.69
3	26185	2.385E-07	0.0004322	432.16200	79.18
4	38714	3.6379E-07	0.0006592	659.18748	68.24
5	55551	5.3216E-07	0.0009643	964.27392	53.54
6	61148	5.8813E-07	0.0010657	1065.69156	48.66
7	64719	6.2384E-07	0.0011304	1130.39808	45.54
8	43693	4.1358E-07	0.0007494	749.40696	63.90
9	36547	3.4212E-07	0.0006199	619.92144	70.13

WC = 60% (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	116887	1.14552E-06	0.0020757	2075.68224	0.00
1	1538	-7.97E-09	-0.0000144	-14.44164	100.70
2	8442	6.107E-08	0.0001107	110.65884	94.67
3	27042	2.4707E-07	0.0004477	447.69084	78.43
4	42929	4.0594E-07	0.0007356	735.56328	64.56
5	56784	5.4449E-07	0.0009866	986.61588	52.47
6	62712	6.0377E-07	0.0010940	1094.03124	47.29
7	69523	6.7188E-07	0.0012174	1217.44656	41.35
8	50534	4.8199E-07	0.0008734	873.36588	57.92
9	36547	3.4212E-07	0.0006199	619.92144	70.13

(lanjutan)

WC = 70%

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	119319	1.16984E-06	0.0021198	2119.75008	0.00
1	4124	1.789E-08	0.0000324	32.41668	98.47
2	9007	6.672E-08	0.0001209	120.89664	94.30
3	22343	2.0008E-07	0.0003625	362.54496	82.90
4	37956	3.5621E-07	0.0006455	645.45252	69.55
5	48554	4.6219E-07	0.0008375	837.48828	60.49
6	69068	6.6733E-07	0.0012092	1209.20196	42.96
7	69982	6.7647E-07	0.0012258	1225.76364	42.17
8	62875	6.054E-07	0.0010970	1096.98480	48.25
9	38624	3.6289E-07	0.0006576	657.55668	68.98

WC = 70%

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	119319	1.16984E-06	0.0021198	2119.75008	0.00
1	0	-2.335E-08	-0.0000423	-42.31020	102.00
2	3957	1.622E-08	0.0000294	29.39064	98.61
3	22074	1.9739E-07	0.0003577	357.67068	83.13
4	66628	6.4293E-07	0.0011650	1164.98916	45.04
5	48486	4.6151E-07	0.0008363	836.25612	60.55
6	69980	6.7645E-07	0.0012257	1225.72740	42.18
7	70504	6.8169E-07	0.0012352	1235.22228	41.73
8	68754	6.6419E-07	0.0012035	1203.51228	43.22
9	55302	5.2967E-07	0.0009598	959.76204	54.72

Elimination Capacity Medium Kompos Kotoran Kambing

Q (cc/menit)	Q (m3/jam)	Pada t = 9 jam Cout (g/m3)	(Q*Cin)/V IL (g/m3.jam)	(Q*(Cin-Cout))/V EC (g/m3.jam)
233	0.01398	954.272	12793.759	6507.82
186	0.01116	927.599	10213.043	5335.34
127	0.00762	1081.583	6973.422	3090.08
105	0.00630	800.058	5765.428	3390.49
88	0.00528	816.487	4831.977	2800.68
72	0.00432	668.870	3953.436	2591.94

(lanjutan)

Penggunaan *Nitrobacter*, sp. dan Penambahan Nutrisi pada Medium Kompos Kotoran Kambing ($h = 50$ cm; $Q = 72$ cm³/menit)

Penggunaan *Nitrobacter*, sp. tanpa penambahan nutrisi (data1)

Pengambilan data Waktu (jam)	Keluaran GC Luas area N2O	Hasil kalibrasi Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Dalam volum syringe Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	113399	1.11064E-06	0.0020125	2012.47968	0.00
1	0	-2.335E-08	-0.0000423	-42.31020	102.10
2	1522	-8.13E-09	-0.0000147	-14.73156	100.73
3	20812	1.8477E-07	0.0003348	334.80324	83.36
4	31722	2.9387E-07	0.0005325	532.49244	73.54
5	36722	3.4387E-07	0.0006231	623.09244	69.04
6	56180	5.3845E-07	0.0009757	975.67140	51.52
7	51559	4.9224E-07	0.0008919	891.93888	55.68
8	40313	3.7978E-07	0.0006882	688.16136	65.81
9	32620	3.0285E-07	0.0005488	548.76420	72.73

Penggunaan *Nitrobacter*, sp. tanpa penambahan nutrisi (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	113399	1.11064E-06	0.0020125	2012.47968	0.00
1	0	-2.335E-08	-0.0000423	-42.31020	102.10
2	1642	-6.93E-09	-0.0000126	-12.55716	100.62
3	19053	1.6718E-07	0.0003029	302.93016	84.95
4	24579	2.2244E-07	0.0004031	403.06128	79.97
5	36713	3.4378E-07	0.0006229	622.92936	69.05
6	47634	4.5299E-07	0.0008208	820.81788	59.21
7	43292	4.0957E-07	0.0007421	742.14084	63.12
8	44210	4.1875E-07	0.0007588	758.77500	62.30
9	39957	3.7622E-07	0.0006817	681.71064	66.13

Penggunaan *Nitrobacter*, sp. dengan penambahan nutrisi alami (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	110185	1.0785E-06	0.0019542	1954.24200	0.00
1	0	-2.335E-08	-0.0000423	-42.31020	102.17
2	0	-2.335E-08	-0.0000423	-42.31020	102.17
3	14579	1.2244E-07	0.0002219	221.86128	88.65
4	35240	3.2905E-07	0.0005962	596.23860	69.49
5	42434	4.0099E-07	0.0007266	726.59388	62.82
6	40771	3.8436E-07	0.0006965	696.46032	64.36
7	45592	4.3257E-07	0.0007838	783.81684	59.89
8	36021	3.3686E-07	0.0006104	610.39032	68.77
9	29595	2.726E-07	0.0004940	493.95120	74.72

Penggunaan *Nitrobacter*, sp. dengan penambahan nutrisi alami (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	110185	1.0785E-06	0.0019542	1954.24200	0.00
1	0	-2.335E-08	-0.0000423	-42.31020	102.17
2	0	-2.335E-08	-0.0000423	-42.31020	102.17
3	13768	1.1433E-07	0.0002072	207.16596	89.40
4	34430	3.2095E-07	0.0005816	581.56140	70.24
5	33390	3.1055E-07	0.0005627	562.71660	71.21
6	31181	2.8846E-07	0.0005227	522.68952	73.25
7	35694	3.3359E-07	0.0006045	604.46508	69.07
8	36717	3.4382E-07	0.0006230	623.00184	68.12
9	29595	2.726E-07	0.0004940	493.95120	74.72

(lanjutan)

Pergunaan Nitrobacter, sp. dengan penambahan nutrisi sintetik (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	116553	1.14218E-06	0.0020696	2069.63016	0.00
1	0	-2.335E-08	-0.0000423	-42.31020	102.04
2	0	-2.335E-08	-0.0000423	-42.31020	102.04
3	14620	1.2285E-07	0.0002226	222.60420	89.24
4	41665	3.933E-07	0.0007127	712.65960	65.57
5	40723	3.8388E-07	0.0006956	695.59056	66.39
6	54148	5.1813E-07	0.0009389	938.85156	54.64
7	60355	5.802E-07	0.0010513	1051.32240	49.20
8	46587	4.4252E-07	0.0008018	801.84624	61.26
9	28717	2.6382E-07	0.0004780	478.04184	76.90

Pergunaan Nitrobacter, sp. dengan penambahan nutrisi sintetik (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	116553	1.14218E-06	0.0020696	2069.63016	0.00
1	0	-2.335E-08	-0.0000423	-42.31020	102.04
2	0	-2.335E-08	-0.0000423	-42.31020	102.04
3	31602	2.9267E-07	0.0005303	530.31804	74.38
4	53316	5.0981E-07	0.0009238	923.77572	55.37
5	45530	4.3195E-07	0.0007827	782.69340	62.18
6	57218	5.4883E-07	0.0009945	994.47996	51.95
7	74947	7.2612E-07	0.0013157	1315.72944	36.43
8	58582	5.6247E-07	0.0010192	1019.19564	50.75
9	28718	2.6383E-07	0.0004781	478.05996	76.90

Medium Kering Kompos Kotoran Kambing ($Q = 88 \text{ cm}^3/\text{menit}$)

h = 50 cm

Pengambilan data Waktu (jam)	Keluaran GC Luas area N2O	Hasil kalibrasi Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Dalam volum syringe Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	29653	1.03503E-06	0.0018755	1875.48040	0.00
1	16303	5.90033E-07	0.0010691	1069.14040	42.99
2	15152	5.51667E-07	0.0009996	999.62000	46.70
3	15850	5.74933E-07	0.0010418	1041.77920	44.45
4	12385	4.59433E-07	0.0008325	832.49320	55.61
5	13766	5.05467E-07	0.0009159	915.90560	51.16
6	12301	4.56633E-07	0.0008274	827.41960	55.88
7	12501	4.633E-07	0.0008395	839.49960	55.24
8	12598	4.66533E-07	0.0008454	845.35840	54.93
9	12120	4.506E-07	0.0008165	816.48720	56.47

h = 50 cm (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	29653	1.03503E-06	0.0018755	1875.48040	0.00
1	29653	1.03503E-06	0.0018755	1875.48040	0.00
2	18903	6.767E-07	0.0012262	1226.18040	34.62
3	17238	6.212E-07	0.0011256	1125.61440	39.98
4	11200	4.19933E-07	0.0007609	760.91920	59.43
5	10270	3.88933E-07	0.0007047	704.74720	62.42
6	17403	6.267E-07	0.0011356	1135.58040	39.45
7	18845	6.74767E-07	0.0012227	1222.67720	34.81
8	15324	5.574E-07	0.0010100	1010.00880	46.15
9	12769	4.72233E-07	0.0008557	855.68680	54.38

(lanjutan)

h = 60 cm

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	272611	4.52407E-06	0.0081976	8197.60880	0.00
1	90417	1.4875E-06	0.0026954	2695.35000	67.12
2	91299	1.5022E-06	0.0027220	2721.98640	66.80
3	91551	1.5064E-06	0.0027296	2729.59680	66.70
4	90986	1.49698E-06	0.0027125	2712.53380	66.91
5	91579	1.50687E-06	0.0027304	2730.44240	66.69
6	90441	1.4879E-06	0.0026961	2696.07480	67.11
7	91175	1.50013E-06	0.0027182	2718.24160	66.84
8	91102	1.49892E-06	0.0027160	2716.03700	66.87
9	91128	1.49935E-06	0.0027168	2716.82220	66.86

h = 60 cm (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	272611	4.52407E-06	0.0081976	8197.60880	0.00
1	90900	1.49555E-06	0.0027099	2709.93660	66.94
2	91536	1.50615E-06	0.0027291	2729.14380	66.71
3	91881	1.5119E-06	0.0027396	2739.56280	66.58
4	91500	1.50555E-06	0.0027281	2728.05660	66.72
5	91656	1.50815E-06	0.0027328	2732.76780	66.66
6	90613	1.49077E-06	0.0027013	2701.26920	67.05
7	91224	1.50095E-06	0.0027197	2719.72140	66.82
8	91415	1.50413E-06	0.0027255	2725.48960	66.75
9	91460	1.50488E-06	0.0027268	2726.84860	66.74

h = 80 cm

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	272611	4.52407E-06	0.0081976	8197.60880	0.00
1	60513	9.891E-07	0.0017922	1792.24920	78.14
2	69688	1.14202E-06	0.0020693	2069.33420	74.76
3	91279	1.50187E-06	0.0027214	2721.38240	66.80
4	85545	1.4063E-06	0.0025482	2548.21560	68.92
5	86122	1.41592E-06	0.0025656	2565.64100	68.70
6	89018	1.46418E-06	0.0026531	2653.10020	67.64
7	87057	1.4315E-06	0.0025939	2593.87800	68.36
8	87789	1.4437E-06	0.0026160	2615.98440	68.09
9	89783	1.47693E-06	0.0026762	2676.20320	67.35

h = 80 cm (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	272611	4.52407E-06	0.0081976	8197.60880	0.00
1	59603	9.73933E-07	0.0017648	1764.76720	78.47
2	59077	9.65167E-07	0.0017489	1748.88200	78.67
3	89458	1.47152E-06	0.0026664	2666.38820	67.47
4	83908	1.37902E-06	0.0024988	2498.77820	69.52
5	86536	1.42282E-06	0.0025781	2578.14380	68.55
6	91348	1.50302E-06	0.0027235	2723.46620	66.78
7	87460	1.43822E-06	0.0026060	2606.04860	68.21
8	89708	1.47568E-06	0.0026739	2673.93820	67.38
9	90475	1.48847E-06	0.0026971	2697.10160	67.10

(lanjutan)

h = 100 cm

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	160000	2.64722E-06	0.0047968	4796.75660	0.00
1	33094	5.32117E-07	0.0009642	964.19540	79.90
2	35347	5.69667E-07	0.0010322	1032.23600	78.48
3	40049	6.48033E-07	0.0011742	1174.23640	75.52
4	33079	5.31867E-07	0.0009637	963.74240	79.91
5	32654	5.24783E-07	0.0009509	950.90740	80.18
6	35160	5.6655E-07	0.0010266	1026.58860	78.60
7	42411	6.874E-07	0.0012456	1245.56880	74.03
8	45050	7.31383E-07	0.0013253	1325.26660	72.37
9	49631	8.07733E-07	0.0014636	1463.61280	69.49

h = 100 cm (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	160000	2.64722E-06	0.0047968	4796.75660	0.00
1	33094	5.32117E-07	0.0009642	964.19540	79.90
2	35347	5.69667E-07	0.0010322	1032.23600	78.48
3	40049	6.48033E-07	0.0011742	1174.23640	75.52
4	46287	0.000000752	0.0013626	1362.62400	71.59
5	33520	5.39217E-07	0.0009771	977.06060	79.63
6	35160	5.6655E-07	0.0010266	1026.58860	78.60
7	42411	6.874E-07	0.0012456	1245.56880	74.03
8	45050	7.31383E-07	0.0013253	1325.26660	72.37
9	49631	8.07733E-07	0.0014636	1463.61280	69.49

Medium Kompos Kotoran Kambing ($Q = 88 \text{ cm}^3/\text{menit}$; nutrisi 60%wt)

ti = 21 jam (data1)

Pengambilan data Waktu (jam)	Keluaran GC Luas area N2O	Hasil kalibrasi Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Dalam volum syringe Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	272611	4.52407E-06	0.0081976	8197.60880	0.00
1	98925	1.6293E-06	0.0029523	2952.29160	63.99
2	87546	1.43965E-06	0.0026086	2608.64580	68.18
3	76644	1.25795E-06	0.0022794	2279.40540	72.19
4	76438	1.25452E-06	0.0022732	2273.18420	72.27
5	76061	1.24823E-06	0.0022618	2261.79880	72.41
6	77360	1.26988E-06	0.0023010	2301.02860	71.93
7	76226	1.25098E-06	0.0022668	2266.78180	72.35
8	76586	1.25698E-06	0.0022777	2277.65380	72.22
9	77808	1.27735E-06	0.0023146	2314.55820	71.77
10	77180	1.26688E-06	0.0022956	2295.59260	72.00
11	75137	1.23283E-06	0.0022339	2233.89400	72.75
12	76794	1.26045E-06	0.0022839	2283.93540	72.14

(lanjutan)

ti = 21 jam (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	272611	4.52407E-06	0.0081976	8197.60880	0.00
1	98925	1.6293E-06	0.0029523	2952.29160	63.99
2	88262	1.45158E-06	0.0026303	2630.26900	67.91
3	76550	1.25638E-06	0.0022766	2276.56660	72.23
4	75905	1.24563E-06	0.0022571	2257.08760	72.47
5	76516	1.25582E-06	0.0022755	2275.53980	72.24
6	76983	1.2636E-06	0.0022896	2289.64320	72.07
7	75999	1.2472E-06	0.0022599	2259.92640	72.43
8	78876	1.29515E-06	0.0023468	2346.81180	71.37
9	78857	1.29483E-06	0.0023462	2346.23800	71.38
10	77181	1.2669E-06	0.0022956	2295.62280	72.00
11	77314	1.26912E-06	0.0022996	2299.63940	71.95
12	76854	1.26145E-06	0.0022857	2285.74740	72.12

ti = 27 jam (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	97891	1.61207E-06	0.0029211	2921.06480	0.00
1	1053	-1.9E-09	-0.0000034	-3.44280	100.12
2	530	-1.06167E-08	-0.0000192	-19.23740	100.66
3	693	-7.9E-09	-0.0000143	-14.31480	100.49
4	534	-1.055E-08	-0.0000191	-19.11660	100.65
5	3441	3.79E-08	0.0000687	68.67480	97.65
6	664	-8.38333E-09	-0.0000152	-15.19060	100.52
7	551	-1.02667E-08	-0.0000186	-18.60320	100.64
8	674	-8.21667E-09	-0.0000149	-14.88860	100.51
9	155	-1.68667E-08	-0.0000306	-30.56240	101.05
10	376	-1.31833E-08	-0.0000239	-23.88820	100.82
11	496	-1.11833E-08	-0.0000203	-20.26420	100.69
12	670	-8.28333E-09	-0.0000150	-15.00940	100.51

ti = 27 jam (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	97891	1.61207E-06	0.0029211	2921.06480	0.00
1	600	-9.45E-09	-0.0000171	-17.12340	100.59
2	534	-1.055E-08	-0.0000191	-19.11660	100.65
3	486	-1.135E-08	-0.0000206	-20.56620	100.70
4	413	-1.25667E-08	-0.0000228	-22.77080	100.78
5	2287	1.86667E-08	0.0000338	33.82400	98.84
6	419	-1.24667E-08	-0.0000226	-22.58960	100.77
7	551	-1.02667E-08	-0.0000186	-18.60320	100.64
8	561	-1.01E-08	-0.0000183	-18.30120	100.63
9	139	-1.71333E-08	-0.0000310	-31.04560	101.06
10	280	-1.47833E-08	-0.0000268	-26.78740	100.92
11	326	-1.40167E-08	-0.0000254	-25.39820	100.87
12	416	-1.25167E-08	-0.0000227	-22.68020	100.78

(lanjutan)

ti = 131 jam

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	94477	1.55517E-06	0.0028180	2817.96200	0.00
1	293	-1.45667E-08	-0.0000264	-26.39480	100.94
2	8758	1.26517E-07	0.0002292	229.24820	91.86
3	2262	1.825E-08	0.0000331	33.06900	98.83
4	2420	2.08833E-08	0.0000378	37.84060	98.66
5	249	-1.53E-08	-0.0000277	-27.72360	100.98
6	258	-1.515E-08	-0.0000275	-27.45180	100.97
7	200	-1.61167E-08	-0.0000292	-29.20340	101.04
8	248	-1.53167E-08	-0.0000278	-27.75380	100.98
9	117	-1.75E-08	-0.0000317	-31.71000	101.13
10	254	-1.52167E-08	-0.0000276	-27.57260	100.98
11	180	-1.645E-08	-0.0000298	-29.80740	101.06
12	312	-1.425E-08	-0.0000258	-25.82100	100.92

ti = 131 jam

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	94477	1.55517E-06	0.0028180	2817.96200	0.00
1	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.25
2	4237	5.11667E-08	0.0000927	92.71400	96.71
3	45	-1.87E-08	-0.0000339	-33.88440	101.20
4	157	-1.68333E-08	-0.0000305	-30.50200	101.08
5	120	-1.745E-08	-0.0000316	-31.61940	101.12
6	135	-1.72E-08	-0.0000312	-31.16640	101.11
7	166	-1.66833E-08	-0.0000302	-30.23020	101.07
8	139	-1.71333E-08	-0.0000310	-31.04560	101.10
9	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.25
10	194	-1.62167E-08	-0.0000294	-29.38460	101.04
11	163	-1.67333E-08	-0.0000303	-30.32080	101.08
12	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.25

ti = 167 jam

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	97926	1.61265E-06	0.0029221	2922.12180	0.00
1	29243	4.67933E-07	0.0008479	847.89520	70.98
2	22797	3.605E-07	0.0006532	653.22600	77.65
3	4507	5.56667E-08	0.0001009	100.86800	96.55
4	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21
5	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21
6	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21
7	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21
8	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21
9	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21
10	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21
11	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21
12	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21

(lanjutan)

ti = 167 jam

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	97926	1.61265E-06	0.0029221	2922.12180	0.00
1	29202	4.6725E-07	0.0008467	846.65700	71.03
2	22797	3.605E-07	0.0006532	653.22600	77.65
3	1787	1.03333E-08	0.0000187	18.72400	99.36
4	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21
5	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21
6	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21
7	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21
8	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21
9	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21
10	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21
11	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21
12	0	-1.945E-08	-0.0000352	-35.24340	101.21

Medium Kering Kompos Kotoran Kambing ($Q = 88 \text{ cm}^3/\text{menit}$; $h = 100 \text{ cm}$)

kompos curah (data1)

Pengambilan data Waktu (jam)	Keluaran GC Luas area N2O	Hasil kalibrasi Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Dalam volum syringe Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	160000	2.64722E-06	0.0047968	4796.75660	0.00
1	33094	5.32117E-07	0.0009642	964.19540	79.90
2	35347	5.69667E-07	0.0010322	1032.23600	78.48
3	40049	6.48033E-07	0.0011742	1174.23640	75.52
4	46287	0.000000752	0.0013626	1362.62400	71.59
5	33520	5.39217E-07	0.0009771	977.06060	79.63
6	35160	5.6655E-07	0.0010266	1026.58860	78.60
7	42411	6.874E-07	0.0012456	1245.56880	74.03
8	45050	7.31383E-07	0.0013253	1325.26660	72.37
9	49631	8.07733E-07	0.0014636	1463.61280	69.49
10	59524	9.72617E-07	0.0017624	1762.38140	63.26
11	41414	6.70783E-07	0.0012155	1215.45940	74.66
12	41414	6.70783E-07	0.0012155	1215.45940	74.66

kompos curah (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	160000	2.64722E-06	0.0047968	4796.75660	0.00
1	35521	5.72567E-07	0.0010375	1037.49080	78.37
2	35129	5.66033E-07	0.0010257	1025.65240	78.62
3	41515	6.72467E-07	0.0012185	1218.50960	74.60
4	49885	8.11967E-07	0.0014713	1471.28360	69.33
5	39354	6.3645E-07	0.0011532	1153.24740	75.96
6	38625	6.243E-07	0.0011312	1131.23160	76.42
7	46765	7.59967E-07	0.0013771	1377.05960	71.29
8	45342	7.3625E-07	0.0013341	1334.08500	72.19
9	49518	8.0585E-07	0.0014602	1460.20020	69.56
10	64839	1.0612E-06	0.0019229	1922.89440	59.91
11	54288	8.8535E-07	0.0016043	1604.25420	66.56
12	54288	8.8535E-07	0.0016043	1604.25420	66.56

(lanjutan)

pellet kompos (5 x 8) mm (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	240000	2.5074E-06	0.0045434	4543.40880	0.00
1	106050	1.1679E-06	0.0021162	2116.23480	53.42
2	95670	1.0641E-06	0.0019281	1928.14920	57.56
3	106171	1.16911E-06	0.0021184	2118.42732	53.37
4	80137	9.0877E-07	0.0016467	1646.69124	63.76
5	80433	9.1173E-07	0.0016521	1652.05476	63.64
6	66244	7.6984E-07	0.0013950	1394.95008	69.30
7	56886	6.7626E-07	0.0012254	1225.38312	73.03
8	54907	6.5647E-07	0.0011895	1189.52364	73.82
9	49303	6.0043E-07	0.0010880	1087.97916	76.05
10	52576	6.3316E-07	0.0011473	1147.28592	74.75
11	74270	8.501E-07	0.0015404	1540.38120	66.10
12	73076	8.3816E-07	0.0015187	1518.74592	66.57

pellet kompos (5 x 8) mm (data2)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	240000	2.5074E-06	0.0045434	4543.40880	0.00
1	108368	1.19108E-06	0.0021582	2158.23696	52.50
2	95990	1.0673E-06	0.0019339	1933.94760	57.43
3	103601	1.14341E-06	0.0020719	2071.85892	54.40
4	74359	8.5099E-07	0.0015420	1541.99388	66.06
5	72465	8.3205E-07	0.0015077	1507.67460	66.82
6	62857	7.3597E-07	0.0013336	1333.57764	70.65
7	57707	6.8447E-07	0.0012403	1240.25964	72.70
8	58511	6.9251E-07	0.0012548	1254.82812	72.38
9	53234	6.3974E-07	0.0011592	1159.20888	74.49
10	56963	6.7703E-07	0.0012268	1226.77836	73.00
11	76126	8.6866E-07	0.0015740	1574.01192	65.36
12	74274	8.5014E-07	0.0015405	1540.45368	66.09

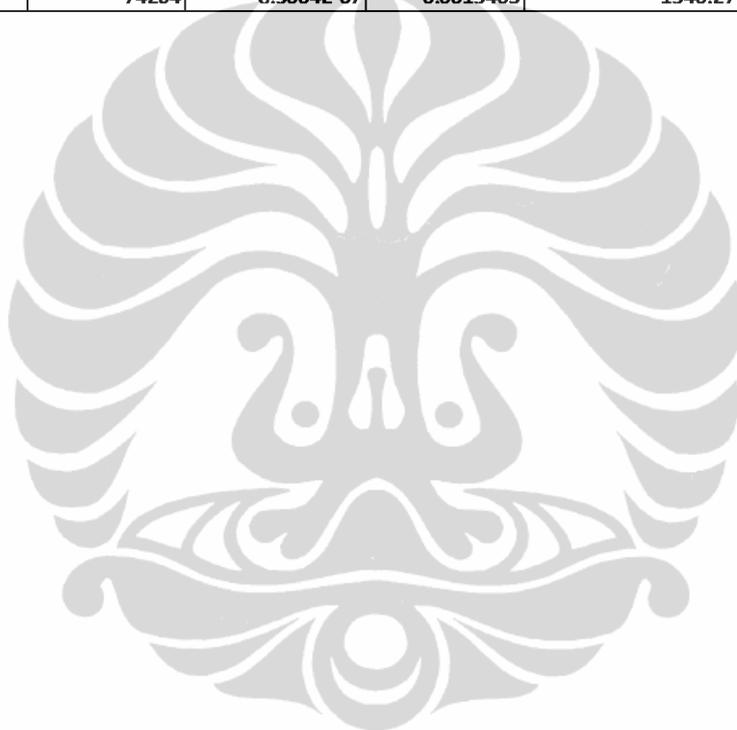
pellet kompos (5 x 5) mm (data1)

Waktu (jam)	Luas area N2O	Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)
0	240000	2.5074E-06	0.0045434	4543.40880	0.00
1	95726	1.06466E-06	0.0019292	1929.16392	57.54
2	85326	9.6066E-07	0.0017407	1740.71592	61.69
3	81851	9.2591E-07	0.0016777	1677.74892	63.07
4	68147	7.8887E-07	0.0014294	1429.43244	68.54
5	68147	7.8887E-07	0.0014294	1429.43244	68.54
6	54243	6.4983E-07	0.0011775	1177.49196	74.08
7	48270	5.901E-07	0.0010693	1069.26120	76.47
8	64575	7.5315E-07	0.0013647	1364.70780	69.96
9	49897	6.0637E-07	0.0010987	1098.74244	75.82
10	45973	5.6713E-07	0.0010276	1027.63956	77.38
11	72891	8.3631E-07	0.0015154	1515.39372	66.65
12	73159	8.3899E-07	0.0015202	1520.24988	66.54

(lanjutan)

pellet kompos (5 x 5) mm (data2)

Waktu (jam)	Luas area N ₂ O	Volum N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (g)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	RE (%)
0	240000	2.5074E-06	0.0045434	4543.40880	0.00
1	96652	1.07392E-06	0.0019459	1945.94304	57.17
2	92324	1.03064E-06	0.0018675	1867.51968	58.90
3	82596	9.3336E-07	0.0016912	1691.24832	62.78
4	73133	8.3873E-07	0.0015198	1519.77876	66.55
5	73133	8.3873E-07	0.0015198	1519.77876	66.55
6	51879	6.2619E-07	0.0011347	1134.65628	75.03
7	43070	5.381E-07	0.0009750	975.03720	78.54
8	62625	7.3365E-07	0.0013294	1329.37380	70.74
9	49706	6.0446E-07	0.0010953	1095.28152	75.89
10	49821	6.0561E-07	0.0010974	1097.36532	75.85
11	74751	8.5491E-07	0.0015491	1549.09692	65.90
12	74264	8.5004E-07	0.0015403	1540.27248	66.10



(lanjutan)

Medium Pelet (5x5 mm) Kompos Kotoran Kambing (Q = 88 cm³/menit; h = 100 cm; penambahan nutrisi sintetik)

Biofiltrasi kontinyu pada kondisi hasil optimasi

Waktu (jam)	Luas area N2O (GC)		Vol N2O (m3); hasil kalibrasi		Massa N2O (g); densitas = 1812		Konsentrasi N2O (g/m3); dalam syringe		Kons rata2	Kons dev	delta P (mH2O)	RE (%)
	data 1	data 2	data 1	data 2	data 1	data 2	data 1	data 2				
0	109893	106462	1.10504E-06	1.07416E-06	0.00200	0.00195	4543.409	4543.409	4543.409	0.000	0.32	0.00
1	58360	57772	6.4124E-07	6.35948E-07	0.00116	0.00115	1161.927	1152.338	1157.132	6.781	0.32	74.53
2	61491	58110	6.69419E-07	6.3899E-07	0.00121	0.00116	1212.987	1157.850	1185.419	38.988	0.32	73.91
3	76435	74815	8.03915E-07	7.89335E-07	0.00146	0.00143	1456.694	1430.275	1443.485	18.681	0.32	68.23
4	90430	89237	9.2987E-07	9.19133E-07	0.00168	0.00167	1684.924	1665.469	1675.197	13.757	0.32	63.13
5	80905	80258	8.44145E-07	8.38322E-07	0.00153	0.00152	1529.591	1519.039	1524.315	7.461	0.32	66.45
6	81967	81521	8.53703E-07	8.49689E-07	0.00155	0.00154	1546.910	1539.636	1543.273	5.143	0.37	66.03
24	94608	93337	9.67472E-07	9.56033E-07	0.00175	0.00173	1753.059	1732.332	1742.696	14.657	0.1	61.64
25	94218	89699	9.63962E-07	9.23291E-07	0.00175	0.00167	1746.699	1673.003	1709.851	52.111	0.06	62.37
49	92465	88130	9.48185E-07	9.0917E-07	0.00172	0.00165	1718.111	1647.416	1682.764	49.989	0.04	62.96
50	87532	87047	9.03788E-07	8.99423E-07	0.00164	0.00163	1637.664	1629.754	1633.709	5.593	0.15	64.04
74	84059	84271	8.72531E-07	8.74439E-07	0.00158	0.00158	1581.026	1584.483	1582.755	2.445	0.14	65.16
75	81810	80212	8.5229E-07	8.37908E-07	0.00154	0.00152	1544.349	1518.289	1531.319	18.427	0.18	66.30
97	88279	89094	9.10511E-07	9.17846E-07	0.00165	0.00166	1649.846	1663.137	1656.491	9.398	0.04	63.54
98	90270	89869	9.2843E-07	9.24821E-07	0.00168	0.00168	1682.315	1675.776	1679.045	4.624	0.02	63.04
121	91394	90907	9.38546E-07	9.34163E-07	0.00170	0.00169	1700.645	1692.703	1696.674	5.616	0.02	62.66
122	89700	89529	9.233E-07	9.21761E-07	0.00167	0.00167	1673.020	1670.231	1671.625	1.972	0.04	63.21
145	89395	89623	9.20555E-07	9.22607E-07	0.00167	0.00167	1668.046	1671.764	1669.905	2.629	0.02	63.25
146	89831	89169	9.24479E-07	9.18521E-07	0.00168	0.00166	1675.156	1664.360	1669.758	7.634	0.02	63.25
173	89171	88963	9.18539E-07	9.16667E-07	0.00166	0.00166	1664.393	1661.001	1662.697	2.399	0.02	63.40
174	89595	88909	9.22355E-07	9.16181E-07	0.00167	0.00166	1671.307	1660.120	1665.714	7.911	0.04	63.34
196	90650	90946	9.3185E-07	9.34514E-07	0.00169	0.00169	1688.512	1693.339	1690.926	3.413	0.04	62.78
197	100862	100403	1.02376E-06	1.01963E-06	0.00186	0.00185	1855.049	1847.564	1851.307	5.293	0.04	59.25

Lampiran 2 : Perhitungan Model Matematis

Perhitungan Model Adsorpsi Langmuir untuk Medium Pupuk Kandang ($Q = 50 \text{ cm}^3/\text{menit}$; $h = 50 \text{ cm}$)

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	10141	264231	10901	0.035548	0.926239	0.038213	0.001285	0.001190	0.002141	0.000000	0.040886	0.000000	24.458032
1	113578	214676	15180	0.330713	0.625087	0.044201	0.001044	0.000653	0.001174	0.451528	0.074546	2.214700	13.414536
2	177770	186256	16271	0.46745	0.489765	0.042785	0.000906	0.000444	0.000799	0.627059	0.109632	1.594746	9.121396
3	210215	154435	16863	0.551004	0.404796	0.0442	0.000752	0.000304	0.000547	0.744319	0.159912	1.343510	6.253448
4	265307	125907	17931	0.648442	0.307732	0.043826	0.000613	0.000189	0.000340	0.841449	0.257875	1.188426	3.877844
5	306866	104716	14657	0.719939	0.245674	0.034387	0.000510	0.000125	0.000226	0.894665	0.388157	1.117736	2.576279
6	323701	88458	32518	0.727946	0.198926	0.073127	0.000431	0.000086	0.000154	0.927905	0.567120	1.077696	1.763295

(lanjutan)

Perhitungan Sensitivitas Konstanta Langmuir untuk Medium Pupuk Kandang

(Q = 50 cm³/menit; h = 50 cm)

Teta	K	0.5 K	2 K
	N2O calc	N2O calc	N2O calc
0.00	0	0	0
0.01	0.000712085	0.001424171	0.000356043
0.02	0.001438703	0.002877406	0.000719352
0.03	0.002180303	0.004360605	0.001090151
0.04	0.002937352	0.005874704	0.001468676
0.05	0.00371034	0.007420679	0.00185517
0.06	0.004499774	0.008999547	0.002249887
0.07	0.005306185	0.010612369	0.002653092
0.08	0.006130126	0.012260253	0.003065063
0.09	0.006972177	0.013944354	0.003486088
0.10	0.007832939	0.015665879	0.00391647
0.11	0.008713045	0.01742609	0.004356522
0.12	0.009613153	0.019226306	0.004806576
0.13	0.010533953	0.021067906	0.005266976
0.14	0.011476167	0.022952334	0.005738083
0.15	0.012440551	0.024881101	0.006220275
0.16	0.013427896	0.026855792	0.006713948
0.17	0.014439033	0.028878065	0.007219516
0.18	0.015474831	0.030949663	0.007737416
0.19	0.016536205	0.03307241	0.008268103
0.20	0.017624113	0.035248227	0.008812057
0.21	0.018739564	0.037479127	0.009369782
0.22	0.019883615	0.03976723	0.009941808
0.23	0.021057382	0.042114765	0.010528691
0.24	0.022262038	0.044524076	0.011131019
0.25	0.023498818	0.046997636	0.011749409
0.26	0.024769024	0.049538049	0.012384512
0.27	0.026074031	0.052148062	0.013037015
0.28	0.027415288	0.054830575	0.013707644
0.29	0.028794326	0.057588652	0.014397163
0.30	0.030212766	0.060425532	0.015106383
0.31	0.03167232	0.06334464	0.01583616
0.32	0.033174802	0.066349604	0.016587401
0.33	0.034722134	0.069444268	0.017361067
0.34	0.036316355	0.07263271	0.018158178
0.35	0.037959629	0.075919258	0.018979815
0.36	0.039654255	0.079308511	0.019827128
0.37	0.041402679	0.082805359	0.02070134
0.38	0.043207504	0.086415008	0.021603752
0.39	0.045071503	0.090143007	0.022535752
0.40	0.046997636	0.093995272	0.023498818
0.41	0.048989061	0.097978122	0.024494531
0.42	0.051049156	0.102098313	0.025524578
0.43	0.053181535	0.106363071	0.026590768
0.44	0.055390071	0.110780142	0.027695035
0.45	0.057678917	0.115357834	0.028839458
0.46	0.060052535	0.12010507	0.030026267
0.47	0.062515723	0.125031447	0.031257862
0.48	0.06507365	0.1301473	0.032536825
0.49	0.067731887	0.135463774	0.033865944
0.50	0.070496454	0.140992908	0.035248227

(lanjutan)

Perhitungan Sensitivitas Konstanta Langmuir untuk Medium Pupuk Kandang

(Q = 50 cm³/menit; h = 50 cm)

Teta	K	0.5 K	2 K
	N2O calc	N2O calc	N2O calc
0.51	0.07337386	0.14674772	0.03668693
0.52	0.076371158	0.152742317	0.038185579
0.53	0.079496001	0.158992002	0.039748001
0.54	0.082756707	0.165513414	0.041378353
0.55	0.086162333	0.172324665	0.043081166
0.56	0.08972276	0.179445519	0.04486138
0.57	0.093448788	0.186897575	0.046724394
0.58	0.097352246	0.194704492	0.048676123
0.59	0.101446117	0.202892233	0.050723058
0.60	0.105744681	0.211489362	0.05287234
0.61	0.110263684	0.220527369	0.055131842
0.62	0.11502053	0.23004106	0.057510265
0.63	0.120034503	0.240069005	0.060017251
0.64	0.125327029	0.250654058	0.062663515
0.65	0.130921986	0.261843972	0.065460993
0.66	0.136846058	0.273692115	0.068423029
0.67	0.143129164	0.286258328	0.071564582
0.68	0.149804965	0.299609929	0.074902482
0.69	0.156911462	0.313822924	0.078455731
0.70	0.164491726	0.328983452	0.082245863
0.71	0.172594766	0.345189533	0.086297383
0.72	0.181276596	0.362553191	0.090638298
0.73	0.190601524	0.381203047	0.095300762
0.74	0.200643753	0.401287507	0.100321877
0.75	0.211489362	0.422978723	0.105744681
0.76	0.223238771	0.446477541	0.111619385
0.77	0.236009867	0.472019735	0.118004934
0.78	0.249941973	0.499883946	0.124970986
0.79	0.265200946	0.530401891	0.132600473
0.80	0.281985816	0.563971631	0.140992908
0.81	0.300537514	0.601075028	0.150268757
0.82	0.321150512	0.642301024	0.160575256
0.83	0.344188569	0.688377138	0.172094285
0.84	0.370106383	0.740212766	0.185053191
0.85	0.399479905	0.798959811	0.199739953
0.86	0.433049645	0.866099291	0.216524823
0.87	0.471783961	0.943567921	0.23589198
0.88	0.516973995	1.033947991	0.258486998
0.89	0.5703804	1.140760799	0.2851902
0.90	0.634468085	1.26893617	0.317234043
0.90	0.641588939	1.283177878	0.32079447
0.902	0.648855117	1.297710233	0.324427558
0.903	0.656271112	1.312542224	0.328135556
0.904	0.663841608	1.327683215	0.331920804
0.905	0.671571482	1.343142964	0.335785741
0.906	0.679465822	1.358931643	0.339732911
0.907	0.687529932	1.375059864	0.343764966
0.908	0.695769349	1.391538699	0.347884675
0.909	0.704189853	1.408379705	0.352094926
0.910	0.712797478	1.425594957	0.356398739

(lanjutan)

Perhitungan Sensitivitas Konstanta Langmuir untuk Medium Pupuk Kandang

(Q = 50 cm³/menit; h = 50 cm)

Teta	K	0.5 K	2 K
	N2O calc	N2O calc	N2O calc
0.911	0.721598534	1.443197067	0.360799267
0.912	0.730599613	1.461199226	0.365299807
0.913	0.739807614	1.479615228	0.369903807
0.914	0.749229754	1.498459508	0.374614877
0.915	0.758873592	1.517747184	0.379436796
0.916	0.768747045	1.53749409	0.384373522
0.917	0.778858412	1.557716825	0.389429206
0.918	0.789216399	1.578432797	0.394608199
0.919	0.799830137	1.599660275	0.399915069
0.920	0.81070922	1.62141844	0.40535461
0.921	0.821863722	1.643727444	0.410931861
0.922	0.833304237	1.666608474	0.416652119
0.923	0.845041908	1.690083817	0.422520954
0.924	0.857088466	1.714176932	0.428544233
0.925	0.869456265	1.73891253	0.434728132
0.926	0.882158329	1.764316657	0.441079164
0.927	0.895208394	1.790416788	0.447604197
0.928	0.908620961	1.817241923	0.454310481
0.929	0.922411348	1.844822695	0.461205674
0.930	0.936595745	1.873191489	0.468297872
0.931	0.951191284	1.902382568	0.475595642
0.932	0.966216103	1.932432207	0.483108052
0.933	0.981689425	1.96337885	0.490844713
0.934	0.997631636	1.995263271	0.498815818
0.935	1.014064375	2.028128751	0.507032188
0.936	1.031010638	2.062021277	0.515505319
0.937	1.048494878	2.096989756	0.524247439
0.938	1.066543125	2.13308625	0.533271563
0.939	1.085183118	2.170366236	0.542591559
0.940	1.104444444	2.208888889	0.552222222
0.941	1.124358697	2.248717394	0.562179348
0.942	1.144959648	2.289919296	0.572479824
0.943	1.166283439	2.332566878	0.58314172
0.944	1.188368794	2.376737589	0.594184397
0.945	1.211257253	2.422514507	0.605628627
0.946	1.234993433	2.469986866	0.617496717
0.947	1.259625318	2.519250636	0.629812659
0.948	1.285204583	2.570409165	0.642602291
0.949	1.311786956	2.623573912	0.655893478
0.950	1.339432624	2.678865248	0.669716312
0.951	1.368206687	2.736413374	0.684103343
0.952	1.398179669	2.796359338	0.699089835
0.953	1.429428097	2.858856194	0.714714049
0.954	1.462035153	2.924070305	0.731017576
0.955	1.496091411	2.992182821	0.748045705
0.956	1.53169568	3.06339136	0.76584784
0.957	1.568955962	3.137911925	0.784477981
0.958	1.607990544	3.215981087	0.803995272
0.959	1.648929251	3.297858502	0.824464625

(lanjutan)

Perhitungan Sensitivitas Konstanta Langmuir untuk Medium Pupuk Kandang

(Q = 50 cm³/menit; h = 50 cm)

Teta	K	0.5 K	2 K
	N2O calc	N2O calc	N2O calc
0.960	1.691914894	3.383829787	0.845957447
0.961	1.737104928	3.474209856	0.868552464
0.962	1.784673386	3.569346771	0.892336693
0.963	1.834813111	3.669626222	0.917406555
0.964	1.887738377	3.775476753	0.943869188
0.965	1.943687943	3.887375887	0.971843972
0.966	2.002928661	4.005857322	1.00146433
0.967	2.065759725	4.13151945	1.032879862
0.968	2.13251773	4.265035461	1.066258865
0.969	2.203582704	4.407165408	1.101791352
0.970	2.279385343	4.558770686	1.139692671
0.971	2.36041575	4.720831499	1.180207875
0.972	2.447234043	4.894468085	1.223617021
0.973	2.54048332	5.08096664	1.27024166
0.974	2.640905619	5.281811238	1.32045281
0.975	2.749361702	5.498723404	1.374680851
0.976	2.866855792	5.733711584	1.433427896
0.977	2.994566759	5.989133518	1.49728338
0.978	3.133887814	6.267775629	1.566943907
0.979	3.286477541	6.572955083	1.643238771
0.980	3.454326241	6.908652482	1.727163121
0.981	3.639843225	7.27968645	1.819921613
0.982	3.845973207	7.691946414	1.922986604
0.983	4.076353776	8.152707551	2.038176888
0.984	4.335531915	8.67106383	2.167765957
0.985	4.629267139	9.258534279	2.31463357
0.986	4.964964539	9.929929078	2.48248227
0.987	5.352307692	10.70461538	2.676153846
0.988	5.804208038	11.60841608	2.902104019
0.989	6.338272083	12.67654417	3.169136041
0.990	6.979148936	13.95829787	3.489574468
0.991	7.762442868	15.52488574	3.881221434
0.992	8.741560284	17.48312057	4.370780142
0.993	10.00042553	20.00085106	5.000212766
0.994	11.67891253	23.35782506	5.839456265
0.995	14.02879433	28.05758865	7.014397163
0.996	17.55361702	35.10723404	8.776808511
0.997	23.42832151	46.85664303	11.71416076
0.998	35.1777305	70.35546099	17.58886525
0.999	70.42595745	140.8519149	35.21297872

(lanjutan)

Perhitungan Model Langmuir untuk Biosorpsi N₂O pada Medium Pelet Kompos Kotoran Kambing (Q = 88 cm³/menit; h = 100 cm)

pellet kompos (5 x 5) mm

Pengambilan data Waktu (jam)	Keluaran GC Luas area N ₂ O	Hasil kalibrasi Volum N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (g)	Dalam volum syringe Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	RE (%)	q _e	C _e	C _e /q _e
0	240000	2.5074E-06	0.0045434	4543.40880	0.00			
1	95726	1.06466E-06	0.0019292	1929.16392	57.54	5.870	2614.245	445.335
2	85326	9.6066E-07	0.0017407	1740.71592	61.69	6.293	5416.938	860.726
3	81851	9.2591E-07	0.0016777	1677.74892	63.07	6.435	8282.598	1287.148
4	68147	7.8887E-07	0.0014294	1429.43244	68.54	6.992	11396.574	1629.842
5	68147	7.8887E-07	0.0014294	1429.43244	68.54	6.992	14510.550	2075.176
6	54243	6.4983E-07	0.0011775	1177.49196	74.08	7.558	17876.467	2365.183
7	48270	5.901E-07	0.0010693	1069.26120	76.47	7.801	21350.615	2736.835
8	64575	7.5315E-07	0.0013647	1364.70780	69.96	7.138	24529.316	3436.546
9	49897	6.0637E-07	0.0010987	1098.74244	75.82	7.735	27973.982	3616.542
10	45973	5.6713E-07	0.0010276	1027.63956	77.38	7.895	31489.751	3988.736
11	72891	8.3631E-07	0.0015154	1515.39372	66.65	6.799	34517.766	5076.578
12	73159	8.3899E-07	0.0015202	1520.24988	66.54	6.789	37540.925	5530.067

(lanjutan)

Perhitungan Model Michaelis-Menten untuk Biodegradasi N₂O dengan Medium Pelet Kompos Kotoran Kambing

(Q = 88 cm³/menit; h = 100 cm)

pellet kompos (5 x 5) mm

Pengambilan data Waktu (jam)	Keluaran GC Luas area N2O	Hasil kalibrasi Volum N2O (m3)	Massa N2O (g)	Dalam volum syringe Konsentrasi N2O (g/m3)	RE (%)	Cln	Cln/R
0	240000	2.5074E-06	0.0045434	4543.40880	0.00		
1	95726	1.06466E-06	0.0019292	1929.16392	57.54	167718.62	0.16816
2	85326	9.6066E-07	0.0017407	1740.71592	61.69	190597.98	0.38327
3	81851	9.2591E-07	0.0016777	1677.74892	63.07	206883.70	0.62583
4	68147	7.8887E-07	0.0014294	1429.43244	68.54	220944.49	0.89397
5	68147	7.8887E-07	0.0014294	1429.43244	68.54	232817.75	1.18123
6	54243	6.4983E-07	0.0011775	1177.49196	74.08	244050.10	1.49095
7	48270	5.901E-07	0.0010693	1069.26120	76.47	254414.38	1.81975
8	64575	7.5315E-07	0.0013647	1364.70780	69.96	263079.99	2.15756
9	49897	6.0637E-07	0.0010987	1098.74244	75.82	271782.84	2.51644
10	45973	5.6713E-07	0.0010276	1027.63956	77.38	280070.61	2.89177
11	72891	8.3631E-07	0.0015154	1515.39372	66.65	286809.75	3.26770
12	73159	8.3899E-07	0.0015202	1520.24988	66.54	293224.92	3.65595

Lampiran 3 : Data Studi Adsorpsi

Adsorpsi N₂O dengan Medium Kompos Ruah (Q = 88 cm³/menit; h = 100 cm)

Waktu (jam)	Luas area N ₂ O (GC)		Vol N ₂ O (m ³); hasil kalibrasi		Massa N ₂ O (g); densitas = 1812		Konsentrasi N ₂ O (g/m ³); dalam syringe		Kons rata2	Kons dev
	data 1	data 2	data 1	data 2	data 1	data 2	data 1	data 2		
0	142987	142290	2.38312E-06	2.3715E-06	0.00432	0.00430	4318.207	4297.158	4307.683	14.884
1	46972	46989	7.82867E-07	7.8315E-07	0.00142	0.00142	1418.554	1419.068	1418.811	0.363
2	85627	82659	1.42712E-06	1.37765E-06	0.00259	0.00250	2585.935	2496.302	2541.119	63.381
3	109298	109191	1.82163E-06	1.81985E-06	0.00330	0.00330	3300.800	3297.568	3299.184	2.285
4	119265	117749	1.98775E-06	1.96248E-06	0.00360	0.00356	3601.803	3556.020	3578.911	32.374
5	123465	118304	2.05775E-06	1.97173E-06	0.00373	0.00357	3728.643	3572.781	3650.712	110.211
6	121144	120298	2.01907E-06	2.00497E-06	0.00366	0.00363	3658.549	3633.000	3645.774	18.066
7	120769	119342	2.01282E-06	1.98903E-06	0.00365	0.00360	3647.224	3604.128	3625.676	30.473
8	120483	121483	2.00805E-06	2.02472E-06	0.00364	0.00367	3638.587	3668.787	3653.687	21.355
9	119482	119769	1.99137E-06	1.99615E-06	0.00361	0.00362	3608.356	3617.024	3612.690	6.129
33	121724	122141	2.02873E-06	2.03568E-06	0.00368	0.00369	3676.065	3688.658	3682.362	8.905
57	134184	132675	2.2364E-06	2.21125E-06	0.00405	0.00401	4052.357	4006.785	4029.571	32.224
81	139545	142290	2.32575E-06	2.3715E-06	0.00421	0.00430	4214.259	4297.158	4255.709	58.618
105	143936	141382	2.39893E-06	2.35637E-06	0.00435	0.00427	4346.867	4269.736	4308.302	54.540

(lanjutan)

Adsorpsi N₂O dengan Medium Pelet Kompos (Q = 88 cm³/menit; h = 100 cm)

Waktu (jam)	Luas area N ₂ O (GC)		Vol N ₂ O (m ³); hasil kalibrasi		Massa N ₂ O (g); densitas = 1812		Konsentrasi N ₂ O (g/m ³); dalam syringe		Kons rata2	Kons dev
	data 1	data 2	data 1	data 2	data 1	data 2	data 1	data 2		
0	142987	142290	2.38312E-06	2.3715E-06	0.00432	0.00430	4318.207	4297.158	4307.683	14.884
1	98136	97570	1.6356E-06	1.62617E-06	0.00296	0.00295	2963.707	2946.614	2955.161	12.087
2	104642	103502	1.74403E-06	1.72503E-06	0.00316	0.00313	3160.188	3125.760	3142.974	24.344
3	114495	111594	1.90825E-06	1.8599E-06	0.00346	0.00337	3457.749	3370.139	3413.944	61.950
4	118907	117149	1.98178E-06	1.95248E-06	0.00359	0.00354	3590.991	3537.900	3564.446	37.541
5	120085	117744	2.00142E-06	1.9624E-06	0.00363	0.00356	3626.567	3555.869	3591.218	49.991
6	121921	120610	2.03202E-06	2.01017E-06	0.00368	0.00364	3682.014	3642.422	3662.218	27.996
7	122512	123617	2.04187E-06	2.06028E-06	0.00370	0.00373	3699.862	3733.233	3716.548	23.597
8	121617	120608	2.02695E-06	2.01013E-06	0.00367	0.00364	3672.833	3642.362	3657.598	21.547
9	122460	122370	0.000002041	2.0395E-06	0.00370	0.00370	3698.292	3695.574	3696.933	1.922
33	105438	103918	1.7573E-06	1.73197E-06	0.00318	0.00314	3184.228	3138.324	3161.276	32.459
81	109749	110261	1.82915E-06	1.83768E-06	0.00331	0.00333	3314.420	3329.882	3322.151	10.934
105	99486	99959	1.6581E-06	1.66598E-06	0.00300	0.00302	3004.477	3018.762	3011.620	10.101
129	100101	106697	1.66835E-06	1.77828E-06	0.00302	0.00322	3023.050	3222.249	3122.650	140.855
153	132677	136115	2.21128E-06	2.26858E-06	0.00401	0.00411	4006.845	4110.673	4058.759	73.417

(lanjutan)

Perhitungan Model Langmuir untuk Adsorpsi N₂O

Kompos ruah

Waktu	Konsentrasi	qe	dC	Ce	Ce/qe
0	4307.683				
1	1418.811	6.487	2888.872	2888.872	445.335
2	2541.119	3.967	1766.564	4655.436	1173.593
3	3299.184	2.265	1008.499	5663.935	2501.090
4	3578.911	1.636	728.771	6392.706	3906.429
5	3650.712	1.475	656.971	7049.677	4778.698
6	3645.774	1.486	661.909	7711.585	5188.384
7	3625.676	1.531	682.007	8393.592	5480.822
8	3653.687	1.469	653.996	9047.588	6160.899
9	3612.690	1.561	694.993	9742.580	6242.812
33	3682.362	1.404	625.321	10367.902	7383.702

Pelet kompos

Waktu	Konsentrasi	qe	dC	Ce	Ce/qe
0	4307.683				
1	2955.161	3.037	1352.522	1352.522	445.335
2	3142.974	2.615	1164.708	2517.230	962.481
3	3413.944	2.007	893.739	3410.969	1699.627
4	3564.446	1.669	743.237	4154.206	2489.127
5	3591.218	1.609	716.465	4870.671	3027.474
6	3662.218	1.449	645.465	5516.136	3805.826
7	3716.548	1.327	591.135	6107.271	4600.945
8	3657.598	1.460	650.085	6757.356	4629.061
9	3696.933	1.371	610.750	7368.105	5372.532
33	3161.276	2.574	1146.407	8514.513	3307.557

Lampiran 4 : Listing Program Kinetika MM-Adsorpsi

```

C -----
C Subroutine Calc. for suspended system
C   modified by Tania Surya Utami (2011) MM Adsorption
C -----
SUBROUTINE CALC(NDP,B,SErr)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,K,O-Z)
IMPLICIT INTEGER (I-J,L-N)
PARAMETER (ND=1,ne=20,nn=150000)
DIMENSION DTC(0:nn),DCV(0:nn),B(1:NDP),DBal(0:nn)
COMMON /NUM/Nedata(1:ND),Ncdata(1:ND)
COMMON /caldata/tc(1:ND,0:nn),CVc(1:ND,0:nn),
&      Balc(1:ND,0:nn)
COMMON /expdata/Tmax(1:ND),CT0(1:ND),
&      te(1:nd,0:ne),CVe(1:nd,0:ne)
C -----
C Set Initial Condition
C -----
C   DO 5 II=1,NDP
C     write(*,*)'B('II,')=',B(II)
C   5 CONTINUE
SErr=0.0d0
DO 10 I=1,ND
  CALL Runge(NDP,I,DTC,DCV,B,DBal,SE)
  DO 20 J=0,Ncdata(I)
    TC(I,J)=DTC(J)
    CVc(I,J)=DCV(J)
    Balc(I,J)=DBal(J)
20 CONTINUE
SErr=SErr+SE

```

(lanjutan)

```

C      write(*,*) 'SumErr=' ,SErr
C      PAUSE
C      10 CONTINUE
C-----
C      Ending Procedure
C-----
      RETURN
      END
C-----
C #####
C      Subroutine Runge
C #####
C-----
      SUBROUTINE Runge(NDP,L,TC,CV,B,Bal,SErr)
      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,K,O-Z)
      IMPLICIT INTEGER (I-J,L-N)
      PARAMETER (ND=1,ne=20,nn=150000, EPS=1.0d-6)
      DIMENSION tc(0:nn),CV(0:nn),saV(0:nn),sbV(0:nn),scV(0:nn),
&      B(1:NDP),Bal(0:nn)

      COMMON /const/k(1:3)
      COMMON /NUM/Nedata(1:ND),Ncdata(1:Nd)
      COMMON /expdata/Tmax(1:ND),CT0(1:ND),
&      te(1:nd,0:ne),CVe(1:nd,0:ne)
C-----
C      Set Model Parameters
C-----
C      ---unkown parameter---
C      --Vmax--[
      k(1)=B(1)

```

(lanjutan)

```

C  --KM--[ ]
    k(2)=B(2)
C  --KS--[ ]
    k(3)=B(3)
C  PAUSE
C  -----
C  Time Incrementor
C  -----
C  --tmax-- [h]
    ttxax=Tmax(L)
    n=0
    tc(0)=0d0
    CV(0)=CVe(L,0)
    Bal(0)=(1d0*CV(0))/(1d0*CV(0))
20 n=n+1
    h=0.1d0
    tstep=h
    tc(n)=tc(n-1)+tstep
C #####
C  RUNGE-KUTTA METHOD
C #####
C  -----
C  Assume CV(t+dt)
C  -----
    CVa=CV(n-1)
10 CONTINUE
C  -----
C  Calculation of CV(t+dt) N2O
C  -----
    VA=h*dCVdt(CV(n-1))

```

(lanjutan)

```

C  WRITE(*,*) 'VA=',VA
    VB=h*dCVdt(CV(n-1)+0.5d0*VA)
C  WRITE(*,*) 'VB=',VB
    VC=h*dCVdt(CV(n-1)+0.5d0*VB)
C  WRITE(*,*) 'VC=',VC
    VD=h*dCVdt(CV(n-1)+VC)
C  WRITE(*,*) 'VD=',VD
    CV(n)=CV(n-1)+(VA+2d0*VB+2d0*VC+VD)/6d0
C  WRITE(*,*) 'CV(',n,')=',CV(n)
    IF(CV(n).LE.1d-10) CV(n)=1d-10
C  PAUSE
C-----
C  CONVERSION
C-----
    IF(ABS((CVa-CV(n))/((CVa+CV(n))/2d0)).GT.EPS) THEN
        CVa=CV(n)
        GO TO 10
    END IF
C-----
C  Mass Balance Check
C-----
    Bal(n)=(1d0*CV(n))/(1d0*CV(0))
C-----
C  Output
C-----
    Ncdata(L)=n
    IF (MOD(tc(n),1d0).EQ.0d0) THEN
C      WRITE(*,*) 't = ',tc(n)
C      WRITE(*,*) 'CV = ',CV(n)
C      WRITE(*,*) 'Bal,n', = ',Bal(n)

```

(lanjutan)

```

C    PAUSE
    END IF
C -----
C  Increment Time
C -----
C    WRITE(*,*) 'tc(',n,')=',tc(n), 'tmax=',tmax
    IF (tc(n).LT.tmax) GO TO 20
C -----
c #####
c calculation of Error
c #####
C -----
c CV(J) N2O
C -----
C    WRITE(*,*) 'calculation of CV Error'
    ErrV=0d0
    DO 110 J=1,Nedata(L)
        t=te(L,J)
C        write (*,*) 'L=',L
        CALL Spline(nn,tc,CV,saV,sbV,scV,Ncdata(L))
        CVcal=eoyspl(nn,t,tc,CV,saV,sbV,scV,Ncdata(L))
C        write (*,*) 't=',t
C        write (*,*) 'CVexp=', CVe(L,J), 'CVcal=',CVcal
        ErrV=ErrV+((CVcal-CVe(L,J))/((CVcal+CVe(L,J))/2d0))**2d0
C    PAUSE
    110 CONTINUE
C    WRITE (*,*) 'ErrV= ',ErrV
C    PAUSE

c -----

```

(lanjutan)

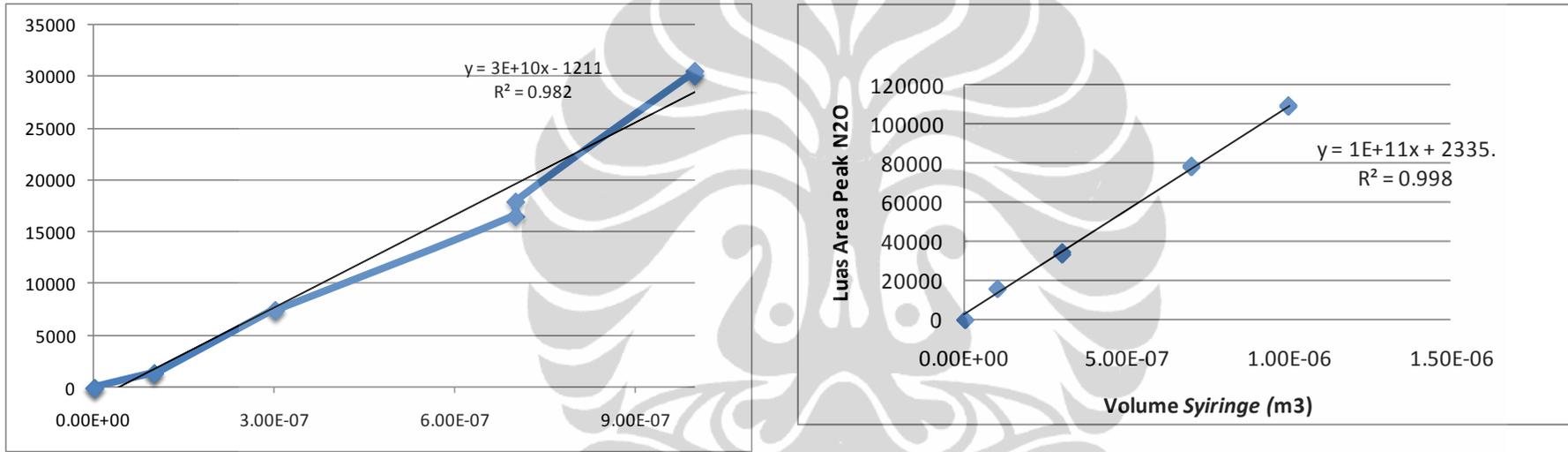
```

c calculate Error
c -----
    SErr=ErrV
    write (*,*) 'SErr=',SErr
C    pause
c -----
C Ending Procedure
C -----
    RETURN
    END
C -----
C Function
C -----
    DOUBLE PRECISION FUNCTION dCVdt(CV)
    IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,K,O-Z)
    IMPLICIT INTEGER (I-J,L-N)
    COMMON /const/k(1:3)
    IF (CV.LE.0d0) CV=0d0
C ---CT---
    AT=k(1)*(k(3)*CV)
    BT=k(2)+(k(3)*CV)
    CT=1/(1+k(3))
    dCVdt=- (AT/BT)*CT
C    WRITE(*,*) 'dCVdt=',dCVdt
C    PAUSE
    RETURN
    END

```

Lampiran 5 : Kurva Kalibrasi

Kurva kalibrasi konsentrasi N₂O



(a). Kompos – kotoran sapi

(b). Kompos – kotoran kambing

Lampiran 6 : Hasil Publikasi

Seminar International

1. **Tania Surya Utami**, Josia Simanjuntak, Heri Hermansyah, Slamet, M. Nasikin, *Nitrous Oxide Gas Removal Using Compost Biofilter: Effect of Circulated Gas Flowrate*, KBI International Seminar, Bogor, Agustus 2008.
2. **Tania Surya Utami**, Josia Simanjuntak, Slamet, Heri Hermansyah, Muhammad Nasikin, *Nitrous Oxide Gas Removal Using Compost Biofilter: Effect of Biofilter Length*, Environmental International Seminar, Surabaya, November 2008.
3. **Tania Surya Utami**, Josia Simanjuntak, Heri Hermansyah, Slamet, Mohammad Nasikin, *Experimental Modelling of Nitrous Oxide Gas Removal Using Compost Biofilter*, International Conference On Green Technology and Engineering, Bandar Lampung, 15 April 2009.
4. **UTAMI Tania Surya**, SLAMET Slamet & NASIKIN Mohammad, HERMANSYAH Heri, *Biosorption Study for The Removal of Nitrous Oxide Gas Using Compost Biofilter*, International Symposium on Environmental Science and Technology, Shanghai, 2-6 Juni 2009.
5. **Tania Surya Utami**, Josia Simanjuntak, Heri Hermansyah, Slamet, Mohammad Nasikin, *Nitrous Oxide Gas Removal Using Compost Biofilter*, Biotechnology International Conference, Bandung, 16 Juni 2009.
6. **Tania Surya Utami**, Lila Adriaty, Heri Hermansyah, M. Nasikin, *Using Compost as Biofilter to Reduce N₂O Emission*, ASEAN-Korea Symposium and Workshop, Jakarta, 18-20 Februari 2010.
7. **Tania Surya Utami**, Cynthia Noviani, Heri Hermansyah, M. Nasikin, *Nitrous Oxide Biosorption in Biofiltration Process using Cow-Manure Compost Based Medium*, ASEAN-Korea Symposium and Workshop, Jakarta, 18-20 Februari 2010. **(poster)**
8. **Tania Surya Utami**, Shilfa Filayuri, Heri Hermansyah, M. Nasikin, *Performance Evaluation of Cow Manure Compost Based Medium as Filter on Nitrous Oxide Biofiltration*, ASEAN-Korea Symposium and Workshop, Jakarta, 18-20 Februari 2010. **(poster)**

(lanjutan)

9. **Tania Surya Utami**, Irwan Warta, Heri Hermansyah, M. Nasikin, *Comparison of Two types Compost Based Filter Medium on Nitrous Oxide Biofiltration*, International Biotechnology Seminar, Malang, 28-29 Juli 2010. (poster)
10. **Tania Surya Utami**, Heri Hermansyah, and M. Nasikin, *N₂O Biofiltration using Cow-manure Compost Based Medium*, International Seminar on Fundamental and Application of Chemical Engineering, Denpasar, 3-4 November 2010.

Seminar Nasional

1. **Tania S. Utami**, Josia Simanjuntak, Heri Hermansyah, Slamet, M. Nasikin, *Pengaruh Ketinggian Filter dan Penambahan Nutrisi pada Proses Biofiltrasi N₂O dengan Medium Berbasis Kompos*, Seminar Teknologi Pengelolaan Limbah, Serpong, Juni 2009. (poster)
2. **Tania S. Utami**, Josia Simanjuntak, Heri Hermansyah, Slamet, M. Nasikin, *Effect of Circulated Gas Flowrate and Additional Nutrition in Nitrous Oxide Gas Removal Using Compost Based Biofilter*, Seminar Nasional Soebardjo Brotohardjono, Surabaya, 18 Juni 2009.
3. **Tania Surya Utami**, Lila Adriaty, Heri Hermansyah, M. Nasikin, *Pengaruh Parameter Operasi dalam Proses Biofiltrasi N₂O dengan Medium Filter Berbasis Kompos*, Seminar Nasional Tjipto Utomo, Bandung, 13 Agustus 2009.
4. **Tania S. Utami**, Josia Simanjuntak, Heri Hermansyah, dan M. Nasikin, *Reduksi Gas Dinitrogen Monoksida dengan Sistem Biofilter Berbasis Medium Kompos*, Seminar on Application and Research in Industrial Technology, Yogyakarta, 22 Juli 2009.
5. **Tania Surya Utami**, Cynthia Noviani, Heri Hermansyah, dan M. Nasikin, *Pengaruh Laju Alir dan Kedalaman Medium pada Proses Biofiltrasi Dinitrogen Monoksida dengan Medium Kompos Berbasis Kotoran Sapi*, Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses, Semarang, 4-5 Agustus 2010.

Universitas Indonesia

(lanjutan)

6. **Tania Surya Utami**, Shilfa Filayuri, Heri Hermansyah & M. Nasikin, *Biofiltrasi Gas Dinitrogen Monoksida Menggunakan Medium Berbasis Kompos Kotoran Sapi: Efek Kedalaman dan Penambahan Air pada Medium*, Seminar Teknik Kimia Soehadi Reksowardjojo, Bandung, 25-26 Oktober 2010.

Jurnal Internasional

1. **Tania Surya Utami**, Josia Simanjuntak, Heri Hermansyah, Slamet, Mohamad Nasikin, *Nitrous Oxide Gas Removal Using Compost Biofilter: Effect of Circulated Gas Flowrate*, Journal of Applied and Industrial Biotechnology in Tropical Region, Vol. 2, No. 1, April 2009 (Special Edition).
2. **Tania Surya Utami**, Josia Simanjuntak, Heri Hermansyah, M. Nasikin, *Nitrous oxide gas removal by using compost-based biofilter medium*, Journal of Safety and Environment, Vol. 10, pp. 61-64, October 2010.
3. **Tania Surya Utami**, Lila Adriaty, Heri Hermansyah, M. Nasikin, *Reducing Nitrous Oxide Emission Using Goat Manure-Compost Based Biofilter*, World Applied Science Journal, 13 (2) : 226-232, 2011.
4. **Tania Surya Utami**, Irwan Warta, Heri Hermansyah, Mohamad Nasikin, *Pelletized Compost Filter Medium in Nitrous Oxide Biofiltration Process*, Journal of Advanced Chemical Engineering. **(under reviewed)**
5. **Utami, T. S.**, Heri Hermansyah, M. Nasikin, *Comparison of Two Types Compost Based Medium Filter on N₂O Gas Biofiltration*, International Journal of Environmental Research (IF = 0.787). **(submitted)**

(lanjutan)

Jurnal Nasional

1. **Tania Surya Utami**, Heri Hermansyah, M.Nasikin, *Aplikasi Biofilter Berbasis Medium Kompos sebagai Alternatif Pengelolaan Polutan Gas*, Jurnal Teknologi FTUI, No. 1, Tahun XXIII, hal. 89-99, Maret 2009.
2. **Tania Surya Utami**, Lila Adriaty, Heri Hermansyah, M. Nasikin, *Biofiltrasi N_2O dengan Medium Filter Berbasis Kompos: Evaluasi Parameter Operasi*, Jurnal Purifikasi, Teknik Lingkungan ITS, Vol. 11, No. 1, hal. 71-76, Juli 2010.
3. **Tania Surya Utami**, Josia Simanjuntak, Heri Hermansyah, Mohamad Nasikin, *Model Adsorpsi Langmuir Gas Dinitrogen Monoksida dalam Sistem Biofilter dengan Medium Pupuk Kompos*, Jurnal REAKTOR, Teknik Kimia Univ. Diponegoro. **(second revised)**