



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENGARUH KEDALAMAN DAN WAKTU INKUBASI  
MEDIUM KOMPOS BERBASIS KOTORAN KAMBING  
DALAM BIOFILTRASI GAS N<sub>2</sub>O**

**SKRIPSI**

**MEI LINDA  
0606076601**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JULI 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**HALAMAN JUDUL**

**PENGARUH KEDALAMAN DAN WAKTU INKUBASI  
MEDIUM KOMPOS BERBASIS KOTORAN KAMBING  
DALAM BIOFILTRASI GAS N<sub>2</sub>O**

**SKRIPSI**

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

**MEI LINDA  
0606076601**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JULI 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Mei Linda**

**NPM : 0606076601**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 2 Juli 2010**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Mei Linda  
NPM : 0606076601  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Pengaruh Kedalaman dan Waktu Inkubasi Medium  
Kompos Berbasis Kotoran Kambing Dalam Biofiltrasi Gas  
N<sub>2</sub>O

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Tania Surya Utami, ST., MT ( )

Pembimbing : Dr. Heri Hermansyah, ST., M.Eng ( )

Penguji : Ir. Dianursanti, MT ( )

Penguji : Prof. Dr. Ir. Anondho Wijanarko, M.Eng ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 2 Juli 2010

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Dan juga, saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tania Surya Utami, S.T., M.T. dan Dr. Heri Hermansyah, S.T., M.Eng., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran, serta kesabaran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Ir. Dianursanti, M.T. selaku kepala laboratorium Rekayasa Bioproses dan sebagai dewan penguji saya pada saat sidang skripsi, dan Ir. Rita Arbianti, M.Si. selaku kepala laboratorium DPK, atas izin penggunaan laboratorium;
3. Prof. Dr. Ir. Anondho Wijanarko, M.Eng., sebagai dewan penguji saya yang telah memberikan banyak masukan selama sidang;
4. Kang Jajat, Mba Fita, Mas Ius, Mang Izal, Mba Pratiwi, Pak Masturo, Mas Eko, Mas Heri, Mas Rinan, Mas Mugni, Mas Dimas Sryono, Mba Yanti, Mba Ita, Mas Taufik, dan para satpam FTUI yang telah banyak membantu saya secara administratif maupun teknis;
5. Orang tua dan keluarga saya tercinta yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral;
6. Irwan Warta Arisantoro sebagai teman satu penelitian yang telah sangat banyak membantu saya;
7. Seluruh teman satu riset grup Bioproses dari berbagai angkatan yang telah berjuang bersama selama saya melakukan penelitian, yaitu Angga Dwi Wibowo, Diandra Novita, Muhammad Firdaus Muttaqi, Ponco Widodo, Fadli Yusandi, Trio Hadiwibowo, Dwi Agustino Mardika, Kurniati Fitri, Canggih Reza, Maudhi Septian, dan anak-anak angkatan 2007 riset grup Bioproses;
8. Willy Dozan Wijaya dan Charles Tirta yang telah menyediakan tempat kos, internet, laptop, waktu, dan tenaga untuk membantu menyusun skripsi saya secara langsung maupun tidak langsung dan selalu menyemangati saya;

9. Chandra Rujianto sebagai sesama teman begadang yang juga sedang menyelesaikan tugas akhir berupa tesis S2, dan Humala Paulus Halim sebagai adik asuh saya yang telah meminjamkan internet dan juga sedang berusaha menyelesaikan seminar S1 dan Kerja Praktek;
10. Jepry, Suria, dan Marcel Leonardo sebagai teman seperjuangan les di LBI dan melamar kerja yang selalu membantu, mendukung, dan menyemangati saya serta membeli dan membawakan makanan ke laboratorium saat saya tengah menjalankan penelitian;
11. Cynthia Noviani, Shilfa Filayuri, Lila Adriaty, dan Josia Simanjuntak sebagai pendahulu skripsi biofilter yang selalu membantu dan menyemangati saya, serta Erica Sanjaya, Nova, Arna, dan Lia selaku penerus skripsi biofilter yang telah menyemangati saya dan akan memulai perjuangannya semester depan;
12. Seluruh teman mantan BPH KMBUI XVII 2008/2009 yang juga sedang berjuang menyelesaikan skripsi, yaitu Hermando Fergus, Cindy, Jenny Yeonardy, Cakra Putra, Suria, Wahyudi, Indah Chandra, Ferry Hartanto, Rodri Tanoto, dan Hartono, semoga kita semua lulus bersama;
13. Seluruh teman saya dari berbagai angkatan yang selalu mendukung, menanyakan kabar, dan menyemangati saya mulai dari kuliah hingga selesai menyusun skripsi, dan seluruh sahabat saya yang selalu mendukung dan menyemangati saya hingga saat ini, yaitu Nerissa Arviana, Risiana Limuria, Isti Hartini, Ayu Dahlianti, Witta Kartika Restu, M. Aditya Pratama Putra, Anatta Wahyu Budiman, Ryan Indra Mukti, Jenny Yeonardy, Jepry, Suria, Marcel Leonardo, Iis Sumarni, Murni Hasan, Rudyanto, dan Marcellina Arestia.
14. Semua pihak yang telah membantu saya selama penelitian dan pembuatan skripsi, yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 2 Juli 2010

Penulis

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

---

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

Nama : Mei Linda

NPM : 0606076601

Program Studi : Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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:

“ Pengaruh Kedalaman dan Waktu Inkubasi Medium Kompos Berbasis Kotoran Kambing dalam Biofiltrasi Gas N<sub>2</sub>O”

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 2 Juli 2010  
Yang menyatakan

(Mei Linda)

## ABSTRAK

Nama : Mei Linda  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul : Pengaruh Kedalaman dan Waktu Inkubasi Medium Kompos  
Berbasis Kotoran Kambing dalam Biofiltrasi Gas N<sub>2</sub>O

Biofiltrasi skala laboratorium dilaksanakan dengan tujuan untuk mengevaluasi pengaruh kedalaman medium filter dan waktu inkubasi dengan larutan nutrisi sintetik terhadap efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O dan pertumbuhan mikroorganisme di dalam kompos berbasis kotoran kambing. Selain itu, diteliti juga pengaruh perubahan sifat fisis medium sebelum dan setelah biofiltrasi terhadap profil efisiensi reduksi yang dihasilkan. Penelitian dilakukan pada laju alir konstan sebesar 88 cc/menit dengan sistem aliran *batch* selama 12 jam. Efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O terbaik dicapai sebesar 78,63% oleh kompos kedalaman 100 cm, dan 100% dengan sifat fisis paling stabil untuk kompos yang diinkubasikan selama 131 jam. Hasil kualitatif dan kuantitatif mikroorganisme di dalam kompos dengan uji SEM dan TPC menunjukkan bahwa kompos yang diinkubasi memiliki jumlah mikroorganisme terbanyak, disusul oleh kompos kering yang digunakan untuk biofiltrasi pada variasi kedalaman dan kompos awal.

**Kata kunci:**

Biofiltrasi, kompos kotoran kambing, kedalaman medium, waktu inkubasi, larutan nutrisi sintetik, mikroorganisme, N<sub>2</sub>O

## ABSTRACT

Name : Mei Linda  
Study Programme : Chemical Engineering  
Title : Effect of Depth and Incubation Time of Goat-Manure Compost Filter Media in Nitrous Oxide Biofiltration

A laboratory-scale biofiltration was conducted to evaluate the effects of depth and incubation length by synthetic nutrition of goat-manure base bulk compost on the removal efficiency of  $N_2O$  and the growth of microorganisms in the compost. Change of medium properties before and after biofiltration and the effects to reduction efficiency profile were also examined. Research was carried out at constant flow rate of 88 cc/min using batch flow system for 12 hours. The highest  $N_2O$  removal efficiency is obtained at 78,63% for 100 cm-depth and 100% with the most stable physical properties for 131 hour-incubation time. Qualitative and quantitative observation of microorganisms in the compost observed by SEM and TPC showed the incubated compost had the most quantity of microorganisms, followed by dry compost used in depth variation and the initial compost.

**Key words:**

Biofiltration, goat-manure compost, depth, incubation time, synthetic nutrition, microorganism,  $N_2O$

## DAFTAR ISI

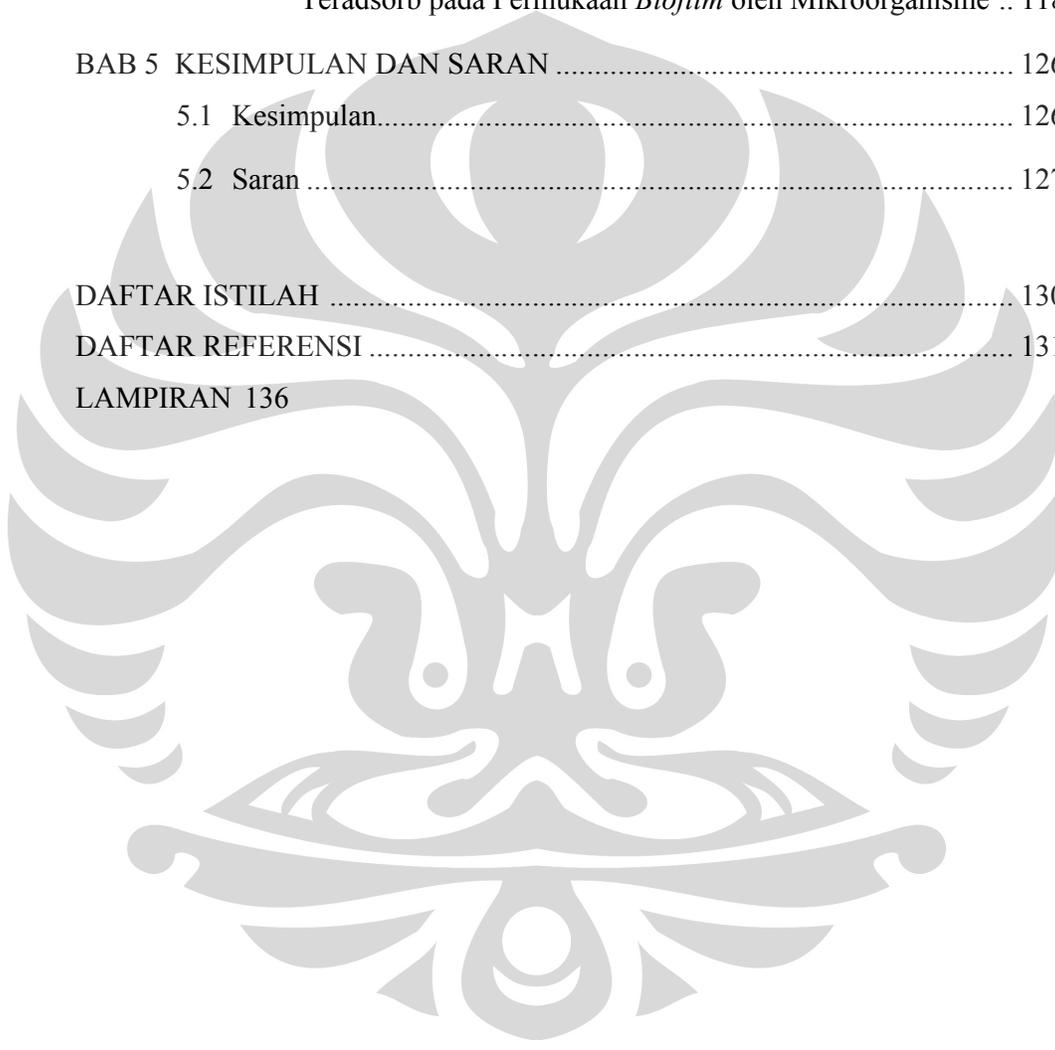
HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN .....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xiv
DAFTAR TABEL .....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xviii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang Masalah .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	5
1.3 Tujuan Penelitian .....	6
1.4 Batasan Masalah .....	6
1.3 Sistematika Penulisan .....	7
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA .....	8
2.1 Dinitrogen Monoksida (N <sub>2</sub> O) .....	8
2.2 Teknologi Reduksi NO <sub>x</sub> .....	9
2.2.1 Teknologi Pra-Pembakaran .....	9
2.2.2 Teknologi Pasca Pembakaran .....	9
2.2.3 Teknologi Reduksi Biologis .....	10
2.2.3.1 Teknologi Biofiltrasi .....	11

2.2.3.2 Terminologi Biofilter .....	14
2.2.3.3 Karakteristik Performa Biofilter .....	15
2.2.3.4 Keefektifan Teknologi Biofiltrasi .....	17
2.2.3.5 Kompos sebagai Pengisi Kolom Biofilter .....	18
2.2.3.5.1 Bahan Organik Pembuat Kompos .....	20
2.2.3.6 Parameter yang Mempengaruhi Biofiltrasi .....	24
2.2.3.6.1 Kelembaban .....	25
2.2.3.6.2 pH .....	25
2.2.3.6.3 Nutrisi .....	26
2.2.3.6.4 Temperatur .....	27
2.2.3.6.5 Kandungan Oksigen .....	27
2.2.3.6.6 <i>Pressure Drop</i> .....	28
2.2.3.6.7 Kedalaman Medium Filter .....	28
2.2.3.7 Mikrobiologi pada Biofilter .....	29
2.3 Metabolisme Nitrogen .....	30
2.3.1 Denitrifikasi .....	31
2.3.2 Nitrifikasi .....	32
2.4 <i>State of The Art</i> Biofiltrasi .....	33
2.4.1 Biofiltrasi dengan Medium Alami .....	33
2.4.1.1 Biofiltrasi NO dengan Medium Kompos dan Serbuk Kayu .....	33
2.4.1.2 Biofiltrasi Amonia dengan Medium Serat Kelapa .....	35
2.4.1.3 Biofiltrasi VOCs dengan Medium Kompos yang Ditambahkan dengan Material Alam sebagai <i>Bulking Agent</i> .....	37
2.4.1.4 Evaluasi Media Berpori Granular sebagai <i>Bulking Agent</i> Pada Proses Pengomposan Kotoran Babi .....	38

2.4.1.5 Biofiltrasi VOCs dengan Medium Kompos, Lava, dan Tanah .....	41
2.4.2 Biofiltrasi dengan Medium Sintetik .....	42
2.4.2.1 Biofiltrasi NO <sub>x</sub> dengan Medium Filter Berupa <i>Carbon-Foam</i> .....	42
2.4.3 Biofiltrasi dengan Campuran Medium Alami serta Sintetik ..	44
2.4.3.1 Biofiltrasi Emisi Gas Berbau menggunakan Medium Filter yang Diformulasikan .....	44
2.4.3.2 Biofiltrasi N <sub>2</sub> O dengan Medium Kompos dan Serpihan Kayu .....	48
2.4.3.3 Biofiltrasi N <sub>2</sub> O dengan Medium Kompos dari Kotoran Kambing .....	49
2.4.3.4 Pengaruh Kedalaman Medium dan Laju Alir Gas pada Biofiltrasi N <sub>2</sub> O dengan Medium Kompos Kotoran Sapi	51
2.4.3.5 Biofiltrasi N <sub>2</sub> O dengan Medium Kompos Kotoran Sapi serta Pengaruh Kelembaban Medium terhadap Kinerja Biofilter .....	52
2.4.4 Ringkasan <i>State of The Art</i> .....	52
<b>BAB 3 METODE PENELITIAN .....</b>	<b>65</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	65
3.2 Peralatan dan Bahan Penelitian .....	67
3.2.1 Bahan .....	67
3.2.2 Peralatan .....	68
3.3 Prosedur Penelitian .....	69
3.3.1 Preparasi Kompos .....	69
3.3.1.1 Proses Pengomposan .....	69
3.3.1.2 Proses Preparasi Kompos menjadi Media Filter .....	70

3.3.2	Eksperimen Biofiltrasi .....	71
3.3.2.1	Variasi Kedalaman Medium Filter Kering .....	71
3.3.2.2	Variasi Masa Inkubasi dengan Nutrisi Sintetik .....	71
3.3.3	Perhitungan Komunitas Mikroorganisme .....	72
3.3.3.1	Sterilisasi Alat dan Bahan .....	73
3.3.3.2	Medium Nutrien Agar .....	75
3.3.4	Teknik Transfer Aseptis.....	75
3.4	Variabel Penelitian .....	76
3.5	Teknik Pengumpulan dan Analisis Data .....	76
BAB 4	ANALISA DAN PEMBAHASAN.....	77
4.1	Modifikasi Sistem Biofilter.....	77
4.2	Preparasi Medium Filter .....	80
4.3	Persiapan Eksperimen.....	84
4.3.1	Uji Kebocoran, Uji Waktu Tinggal, dan Kalibrasi Luas <i>Peak</i> dengan Konsentrasi Gas N <sub>2</sub> O.....	84
4.3.1.1	Uji Kebocoran dan Uji Waktu Tinggal .....	84
4.3.1.2	Kalibrasi Luas <i>Peak</i> dengan Konsentrasi Gas N <sub>2</sub> O ....	87
4.3.2	Uji Karakteristik Kompos .....	89
4.3.2.1	Uji BET.....	89
4.3.2.2	Uji Komposisi Unsur di dalam Kompos.....	90
4.4	Uji Kinerja Biofilter .....	91
4.4.1	Pengaruh Kedalaman Medium Filter di Dalam Kolom Biofilter terhadap Peningkatan Efisiensi Reduksi N <sub>2</sub> O .....	91
4.4.2	Pengaruh Masa Inkubasi Medium Filter dengan Larutan Nutrisi Sintetik terhadap	
4.4.3	Hasil Uji Perkembangan Mikroorganisme pada Kompos.....	104
4.4.3.1	Metode TPC ( <i>Total Plate Count</i> ).....	104

4.4.3.2 Uji SEM ( <i>Scanning Electron Microscope</i> ).....	110
4.5 Pemodelan Hasil Eksperimen .....	112
4.5.1 Pemodelan untuk Proses Biosorpsi Gas N <sub>2</sub> O ke Permukaan <i>Biofilm</i> .....	112
4.5.2 Pemodelan untuk Proses Biodegradasi Gas N <sub>2</sub> O yang Teradsorb pada Permukaan <i>Biofilm</i> oleh Mikroorganisme ..	118
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....	126
5.1 Kesimpulan.....	126
5.2 Saran .....	127
DAFTAR ISTILAH .....	130
DAFTAR REFERENSI .....	131
LAMPIRAN 136	



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Konsentrasi beberapa gas rumah kaca selama 2000 tahun terakhir (IPCC, 2007).....	8
Gambar 2.2	Proses adsorpsi pada biofilter (Devinny et.al, 1999) .....	12
Gambar 2.3	Aliran kontaminan udara dalam biofilter (Devinny et.al, 1999) ....	13
Gambar 2.4	Model gas transfer (Devinny et.al, 1999).....	13
Gambar 2.5	Tipe kurva EC vs <i>Loading</i> (Devinny et al., 1999).....	16
Gambar 2.6	Proses Biofiltrasi dengan Media Kompos (Govind, 1998) .....	19
Gambar 2.7	Jalur metabolisme nitrogen (Hudepohl, 1999) .....	31
Gambar 2.8	<i>Mapping State of The Art</i> biofilter terhadap berbagai emisi gas polutan .....	54
Gambar 2.9	<i>Mapping State of The Art</i> biofilter terhadap gas NO <sub>x</sub> .....	55
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian secara umum .....	65
Gambar 3.2	Diagram Prosedur Pengomposan .....	69
Gambar 3.3	Skema prosedur preparasi kompos sebagai medium filter .....	70
Gambar 3.4	Metode sterilisasi <i>mikrotube</i> dan medium larutan nutrisi agar yang akan digunakan .....	74
Gambar 3.5	Metode sterilisasi cawan petri .....	74
Gambar 4.1	(a) Peralatan biofilter yang digunakan dalam penelitian, dan (b) perangkat GC yang digunakan .....	78
Gambar 4.2	Hasil modifikasi peralatan biofilter dalam bentuk 3 dimensi .....	79
Gambar 4.3	Proses pengeringan kompos dengan kondisi T= 26°C .....	82
Gambar 4.4	Proses pengadukan kompos.....	83
Gambar 4.5	Proses pengayakan kompos.....	83
Gambar 4.6	Kompos sebagai medium filter.....	83
Gambar 4.7	Uji EBRT biofilter .....	85
Gambar 4.8	Sampel grafik yang terdeteksi pada: (a) Gas N <sub>2</sub> O, dan (b) Udara bebas oleh GC .....	87

Gambar 4.9	Grafik hasil kalibrasi volum gas N <sub>2</sub> O di dalam <i>syringe</i> terhadap luas <i>peak</i> N <sub>2</sub> O .....	88
Gambar 4.10	Uji kinerja biofilter kering dalam mereduksi N <sub>2</sub> O (basis massa = 945 g untuk h = 50cm, Q = 88 cc/menit, medium kompos kering berbasis kotoran kambing) .....	92
Gambar 4.11	Perbandingan efisiensi reduksi pada uji variasi kedalaman medium filter (medium kering, t = 11 jam) .....	94
Gambar 4.12	Uji kinerja biofilter yang ditambahkan larutan nutrisi sintetik dalam mereduksi N <sub>2</sub> O (h = 100cm, Q = 88 cc/menit, medium kompos kering berbasis kotoran kambing) .....	97
Gambar 4.13	Grafik %RE hasil duplikasi data untuk validasi data hasil kompos masa inkubasi 26,5 jam .....	98
Gambar 4.14	Jalur Metabolisme Nitrogen (Hudepohl, 1999) .....	102
Gambar 4.15	Sampel TPC yang diinkubasikan di atas 35°C: (a) satu koloni bakteri patogen berwarna kuning di antara koloni bakteri pendenitrifikasi berwarna putih pada sampel yang inkubasi 35,2°C, dan (b) koloni bakteri patogen yang berkembang pesat dan berkompetisi dengan bakteri pendenitrifikasi pada suhu inkubasi 37°C.....	106
Gambar 4.16	Hasil uji blangko pada medium agar .....	106
Gambar 4.17	Hasil uji TPC pada kompos awal sebelum biofiltrasi.....	107
Gambar 4.18	Hasil uji TPC pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi optimum kedalaman medium filter (h = 100 cm).....	107
Gambar 4.19	Hasil uji TPC pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi optimum masa inkubasi medium filter dengan larutan nutrisi sintetik (166,5 jam) .....	107
Gambar 4.20	Sampel hasil TPC yang terkontaminasi oleh jamur; bagian berwarna putih yang berada di dalam garis berwarna merah merupakan jamur yang tumbuh dalam medium agar.....	108
Gambar 4.21	Sampel hasil TPC kompos variasi masa inkubasi 108 .....	109
Gambar 4.22	Hasil Uji SEM pada kompos awal sebelum biofiltrasi.....	111

Gambar 4.23 Hasil Uji SEM pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi optimum kedalaman medium filter (h = 100 cm) .....	111
Gambar 4.24 Hasil Uji SEM pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi masa inkubasi 166,5 jam dengan larutan nutrisi sintetik .....	112
Gambar 4.25 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 50cm, variasi kedalaman kering optimum).....	115
Gambar 4.26 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 60cm, variasi kedalaman kering optimum).....	115
Gambar 4.27 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 80cm, variasi kedalaman kering optimum).....	115
Gambar 4.28 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 100cm, variasi kedalaman kering optimum).....	116
Gambar 4.29 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (masa inkubasi 20,5 jam, h = 100cm).....	116
Gambar 4.30 Kurva Michaelis Menten (kompos kering, h = 50 cm).....	122
Gambar 4.31 Kurva Michaelis Menten (kompos kering, h = 60 cm).....	123
Gambar 4.32 Kurva Michaelis Menten (kompos kering, h = 80 cm).....	123
Gambar 4.33 Kurva Michaelis Menten (kompos kering, h = 100 cm).....	123
Gambar 4.34 Kurva Michaelis Menten (masa inkubasi 20,5 jam, h = 100cm) .	124

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Beberapa Proses Industri yang Menerapkan Biological treatment (Devinny et al., 1999).....	11
Tabel 2.2	Organisme yang terlibat dalam proses pengomposan.....	21
Tabel 2.3	Perkiraan kandungan hara makro dari beberapa jenis kotoran hewan	22
Tabel 2.4	Nilai optimal yang mengontrol proses pengomposan.....	23
Tabel 2.5	Ringkasan berbagai penelitian biofiltrasi .....	56
Tabel 3.1	Rincian peralatan yang digunakan dalam penelitian.....	68
Tabel 4.1	Perbandingan komposisi unsur yang terdapat pada kompos berbasis kotoran kambing dan kompos berbasis kotoran sapi .....	81
Tabel 4.2	Hasil uji BET kompos berbasis kotoran kambing .....	89
Tabel 4.3	Perubahan sifat fisis dari kompos kering sebelum dan setelah biofiltrasi (h dihitung secara teoritis dengan basis 945 g untuk kedalaman 50 cm medium kompos) .....	95
Tabel 4.4	Perubahan densitas dan porositas awal dan akhir pada penelitian variasi kedalaman medium filter.....	95
Tabel 4.5	Perubahan sifat fisis dari kompos 100 cm yang diinkubasikan dengan larutan nutrisi sintetik sebelum dan setelah biofiltrasi .....	97
Tabel 4.6	Perbandingan perubahan densitas, porositas, dan water content awal dan akhir biofiltrasi pada kompos 100 cm yang kering dengan yang diinkubasikan selama 20,5 jam .....	100
Tabel 4.7	Perbandingan perubahan densitas, porositas, water content, dan ketinggian aktual medium filter awal dan akhir biofiltrasi pada kompos yang diinkubasikan selama 26,5 jam, 131 jam, dan 166,5 jam.....	103
Tabel 4.8	Hasil uji TPC (sebelum dan setelah biofiltrasi) dan %RE yang dicapai .....	110
Tabel 4.9	Persamaan, nilai korelasi, dan konstanta Langmuir dari kurva adsorpsi isothermis Langmuir hasil eksperimen biofiltrasi seluruh variasi kedalaman medium filter dan masa inkubasi 20,5 jam dengan larutan sintetik .....	117
Tabel 4.10	Persamaan, nilai korelasi, nilai $V_m$ dan $K_s$ kurva degradasi Michaelis – Menten hasil eksperimen biofiltrasi seluruh variasi kedalaman medium filter dan masa inkubasi 20,5 jam dengan larutan sintetik	124

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Data Hasil Uji EBRT .....	136
Lampiran 2.	Data Hasil Kalibrasi Luas <i>Peak</i> Gas N <sub>2</sub> O terhadap Konsentrasi Gas N <sub>2</sub> O .....	137
Lampiran 3.	Data Hasil Uji Variasi Kedalaman Medium Filter .....	138
Lampiran 4A.	Data Hasil Uji Variasi Masa Inkubasi Medium Filter dengan Larutan Sintetik .....	142
Lampiran 4B.	Data Hasil Validasi Uji Variasi Masa Inkubasi 26,5 Jam Medium Filter dengan Larutan Sintetik .....	146
Lampiran 5.	Pengolahan Data Hasil <i>Total Plate Count</i> .....	149
Lampiran 6.	Data Pemodelan Adsorpsi Langmuir Isotermis Seluruh Variasi Penelitian.....	151
Lampiran 7.	Data Pemodelan Degradasi Michaelis-Menten Seluruh Variasi Penelitian.....	156

## BAB 1

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang Masalah

Polusi udara merupakan masalah lingkungan yang cukup signifikan dalam menyebabkan pemanasan global. Gas polutan yang dapat menyebabkan pemanasan global diantaranya adalah gas CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, VOCs, dan Pb. Senyawa-senyawa kimia tersebut apabila tidak ditangani dapat mengakibatkan berbagai dampak negatif, seperti hujan asam yang dapat berakibat pada perusakan bangunan dan tanaman, smog fotokimia, gangguan kesehatan seperti sesak nafas, batuk-batuk, penurunan penglihatan, peningkatan risiko penyakit jantung, penurunan kualitas keindahan lingkungan, dan pemanasan global (Adriaty, 2009).

Gas-gas ini dapat dihasilkan oleh pembakaran tidak sempurna ataupun produk samping dari pembakaran bahan bakar kendaraan bermotor dan dari proses di industri. Hasil pembakaran tidak sempurna tersebut berupa timbal (Pb), *suspended particulate matter* (SPM), oksida nitrogen (NO<sub>x</sub>), hidrokarbon (HC), karbon monoksida (CO), oksida sulfur (SO<sub>x</sub>), *volatile organic compounds* (VOCs), dan oksida fotokimia (Ox), yang mana kesemuanya merupakan gas rumah kaca. Sekitar 10% pencemar udara setiap tahun adalah nitrogen oksida yang merupakan gas polutan berbahaya yang dapat menyebabkan masalah lingkungan yang serius (Noviani, 2009).

NO<sub>x</sub> terdiri dari 95% nitrogen oksida dan 5% nitrogen dioksida (Yang, 2007). NO<sub>x</sub> tersebut dapat berupa NO, N<sub>2</sub>O, dan NO<sub>2</sub>. Adapun dari ketiga oksida nitrogen tersebut, N<sub>2</sub>O merupakan jumlah oksida nitrogen yang terbanyak di atmosfer (Noviani, 2009), yaitu sekitar 320 ppm pada tahun 2005, yang merupakan gas rumah kaca ketiga terbanyak setelah CO<sub>2</sub> (380 ppm) dan CH<sub>4</sub> (1950 ppm) (IPCC, 2007). Gas N<sub>2</sub>O memiliki kontribusi besar pada efek rumah kaca dan mempunyai efek 310 kali per unit berat lebih besar dari CO<sub>2</sub> ([en.wikipedia.org/wiki/Nitrous\\_oxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Nitrous_oxide), 2009). Meskipun konsentrasinya relatif rendah dibandingkan dengan CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, dan uap air, gas N<sub>2</sub>O sangat sulit terurai di atmosfer dan memiliki waktu retensi di atmosfer sebesar 170 tahun (Adriaty, 2009). Selain sebagai gas rumah kaca, gas N<sub>2</sub>O dapat memberikan dampak tidak

langsung terhadap pemanasan global melalui kontribusi terhadap produksi ozon troposferik pada proses pembentukan *smog*. Dengan meninjau efek negatif yang ditimbulkannya, sangatlah diperlukan adanya penanganan emisi  $N_2O$  di udara. Akan tetapi,  $N_2O$  sangat sulit untuk dikumpulkan jika telah terdispersi di udara, sehingga akan lebih baik jika emisi  $N_2O$  dicegah terlebih dahulu sebelum terdispersi ke udara (Yang,2007).

Ada beberapa teknologi pengendalian  $NO_x$  yang telah diaplikasikan seperti *selective catalytic reduction* (SCR) dan *selective non-catalytic reduction* (SNCR) untuk mengontrol emisi  $NO_x$  dari proses industri. Namun, teknologi-teknologi tersebut membutuhkan suhu yang tinggi, penggunaan katalis, biaya instalasi dan operasi yang tinggi, serta menghasilkan limbah lain yang membutuhkan biaya untuk penanganannya (Jin et.al., 2005) sehingga secara keseluruhan, teknologi-teknologi ini membutuhkan biaya yang tinggi. Adanya kelemahan dari segi ekonomi dan teknik dari metode SCR dan SNCR, memotivasi para peneliti untuk mengembangkan proses baru dengan biaya yang efektif untuk menghilangkan  $NO_x$  dari gas buangan.

Untuk itu, dikembangkanlah suatu teknologi yang mampu mereduksi emisi gas polutan dan bau yang ramah lingkungan (Kim et.al., 2007) dan lebih praktis dari segi biaya maupun operasional (Seagle, 1997), yaitu teknologi biofiltrasi. Teknologi ini menggunakan makhluk hidup yang aktif secara biologis dalam mendegradasi gas polutan, yaitu mikroorganisme. Aliran udara terkontaminasi dilewatkan melalui material isian berpori di mana terdapat mikroorganisme yang dapat mendegradasi polutan secara selektif (sesuai jenis bakteri tersebut) untuk kepentingan metabolismenya. Bakteri sulfur akan mereduksi senyawa sulfur, dan bakteri nitrogen akan mereduksi senyawa nitrogen. Adapun teknologi biofiltrasi ini telah ada sejak tahun 1950 untuk menghilangkan bau, dan pada tahun 1955, biofiltrasi pertama kali digunakan untuk mengurangi emisi berkonsentrasi rendah di Jerman. Pada 1959, biofiltrasi dikembangkan untuk pemakaian skala besar di pabrik pengolahan limbah di Jerman, dan sejak 1960an hingga sekarang, biofiltrasi digunakan untuk menanggulangi gas polutan, gas beracun, dan VOCs di industri.

Keuntungan dari teknologi biofiltrasi adalah beroperasi pada suhu ruang dan lebih aman karena suhu operasional yang rendah dan kelembaban yang tinggi dapat meminimalisir risiko kebakaran, biaya operasional yang rendah karena hanya membutuhkan energi untuk menggerakkan *fan/blower* untuk menarik aliran gas agar mampu melewati peralatan dan pompa untuk *humidifier* dan nutrisi, *pressure drop* yang lebih rendah karena ukuran partikel filter yang relatif kecil, ramah lingkungan karena produk samping yang dihasilkan tetap tersimpan di dalam biofilter tersebut dan hanya sebagian kecil yang lolos ke udara sehingga tidak berbahaya, kolom bioreaktornya tidak sering memerlukan *maintenance*, efisiensi reduksi emisi yang tinggi (Liu et.al., 2004; Gabriel et.al., 2007; Gaudin et.al., 2007; Chang, 2008), dan mengkonversi banyak campuran organik dan inorganik menjadi produk oksidasi yang tak berbahaya (Kim et.al., 2007).

Pemilihan medium filter yang tepat merupakan faktor penting yang memengaruhi kinerja biofilter karena aktivitas dan perkembangan mikroorganisme pendegradasi polutan sangat tergantung pada karakteristik kimia medium filter berupa kemampuannya menyuplai nutrisi bagi mikroorganisme. Salah satu medium filter yang telah digunakan secara luas yaitu kompos karena harganya murah, mengandung nutrisi yang tinggi, dan mudah diperoleh (Liu et.al., 2004). Kompos dapat dicampur dengan *bulking agent* seperti potongan kayu, bulu, atau material sintetik untuk menghindari penurunan tekanan yang tinggi, hambatan dan *channeling*, untuk meningkatkan daya retensi kompos terhadap air dan aliran udara, serta untuk menjamin kelancaran sirkulasi udara di dalam medium filter (Kim et.al., 2007). Yang et.al. (2007) melakukan biofiltrasi NO dengan medium filter kompos dan *bulking agent* serpihan kayu dan mendapatkan efisiensi penghilangan NO lebih besar dari 97,9% pada hari ke-40. Simanjuntak (2008) melakukan biofiltrasi N<sub>2</sub>O dan menghasilkan efisiensi reduksi tertinggi sebesar 91,49% dengan sistem sirkulasi selama 6 jam, pada ketinggian 50 cm dan laju alir 200 cc/menit melalui penambahan nutrisi.

Dari analisa yang dilakukan terhadap komposisi mineral dalam kompos berbasis kotoran kambing dan kompos berbasis kotoran sapi pada penelitian sebelumnya oleh Noviani (2009), diperoleh hasil yang menunjukkan bahwa secara umum, kandungan mineral pada kompos berbasis kotoran kambing lebih tinggi

dibandingkan kompos berbasis kotoran sapi. Sebagaimana diketahui, ketersediaan kandungan mineral yang optimal di dalam kompos akan meningkatkan kinerja mikroorganisme pendegradasi polutan. Oleh karena itu, kompos berbasis kotoran kambing dipilih untuk digunakan dalam penelitian ini, untuk dapat menghasilkan efisiensi reduksi yang lebih tinggi dalam penelitian.

Secara keseluruhan, penghilangan gas buang secara biologis sangat baik diterapkan untuk pengendalian emisi konsentrasi rendah ( $\geq 100$  ppm) dari bau, senyawa organik dan inorganik volatil (Chang et.al., 2006). Namun, dalam penelitian ini, digunakan aliran gas kontaminan berupa  $N_2O$  berkonsentrasi tinggi (15.000 ppm dalam udara).

Penambahan nutrisi penting untuk dilakukan pada pengoperasian biofiltrasi jangka panjang, karena nutrisi alami yang terkandung dalam medium filter alami akan berkurang terus-menerus oleh proses metabolisme mikroorganisme dan dapat menunjang pertumbuhan mikroorganisme dalam medium filter (Abichou, 2009). Nutrisi alami dapat diperoleh dari limbah peternakan dan memiliki cukup kandungan nutrisi yang dibutuhkan untuk mendukung perkembangbiakan mikroorganisme, namun nutrisi sintetik lebih dipilih karena nutrisi sintetik dirancang untuk dapat memenuhi makronutrien dan mikronutrien mikroorganisme (Simanjuntak, 2008), termasuk kandungan *trace element* yang dibutuhkan untuk membantu penyerapan zat/senyawa bebas yang dibutuhkan oleh mikroorganisme. Selain itu, nutrisi sintetik yang akan dipakai di dalam penelitian ini juga dirancang untuk mempertahankan pH medium filter agar tetap stabil (Yang et.al., 2007). Oleh karena itu, untuk meningkatkan efisiensi reduksi media kompos dalam penelitian ini, peneliti akan memodifikasi media kompos dengan menambahkan larutan nutrisi sintetik dengan variasi masa inkubasi.

Selain medium filter, kelembaban juga suatu faktor kritis pada keefektifan biofilter karena air akan membantu proses absorpsi gas ke dalam *biofilm*, dan mikroorganisme membutuhkan air untuk aktivitas metabolis (Gabriel et.al., 2007). Kelembaban optimal akan bervariasi dengan medium filter yang berbeda, tergantung sifat fisis dari medium filter tersebut dan *bulking agent* yang digunakan. Biofiltrasi beroperasi paling efisien pada kandungan kelembaban

antara 50-70% (Gaudin, 2007) dan suhu mesofilik (Turan, 2008). Dengan acuan kandungan air optimum 60% w/w hasil penelitian Adriaty (2009) yang masih berada dalam kisaran kandungan kelembaban optimum ini, penelitian ini akan menggunakan referensi kelembaban 60% sebagai acuan dalam penambahan larutan sintetik dan air untuk media kompos yang telah dikeringkan, dan bioreaktor ini akan dioperasikan dalam suhu ruang.

Pada penelitian ini akan digunakan kompos berbasis kotoran kambing yang dicampur dengan cocopeat dan sekam beras sebagai bulking agent dalam proses biofiltrasi  $N_2O$ , dan akan diteliti kinerja efisiensi reduksi  $N_2O$  kompos tersebut di kedalaman tertentu pada kolom biofiltrasi. Penambahan larutan sintetik beserta air dengan volume tertentu pada medium filter juga dilakukan dengan masa inkubasi yang berbeda-beda dan akan diteliti pengaruhnya terhadap kinerja biofiltrasi  $N_2O$ . Selain itu, dibuat juga suatu model kinetika adsorpsi  $N_2O$  ke permukaan kompos dan model kinetika degradasi  $N_2O$  di permukaan kompos oleh bakteri untuk melengkapi hasil penelitian ini.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan permasalahan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perubahan sifat fisis, mekanis, dan kimia media filter kompos berbasis kotoran kambing (densitas, *water content*, pH, porositas media filter dalam kolom biofilter, *pressure drop* dalam kolom biofilter, ketinggian media filter dalam kolom biofilter) sebelum dan sesudah biofiltrasi, dan pengaruhnya terhadap profil reduksi gas  $N_2O$ ?
2. Bagaimana pengaruh pertumbuhan mikroorganisme sebelum dan sesudah dilakukan biofiltrasi, baik tanpa maupun dengan penambahan larutan nutrisi sintetik?
3. Bagaimana pengaruh variasi kedalaman medium filter kompos berbasis kotoran kambing terhadap efisiensi gas  $N_2O$  berkonsentrasi tinggi?
4. Bagaimana pengaruh masa inkubasi media filter kompos berbasis kotoran kambing yang diinkubasikan dengan larutan sintetik terhadap efisiensi reduksi gas  $N_2O$  berkonsentrasi tinggi?

5. Bagaimana model kinetika biosorpsi  $N_2O$  ke *biofilm* dan model kinetika biodegradasi  $N_2O$  di *biofilm* oleh mikroorganisme pada media filter kompos berbasis kotoran kambing yang ditambahkan larutan nutrisi sintetik?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan umum dari penelitian ini adalah untuk memperoleh efisiensi reduksi  $N_2O$  seoptimal mungkin melalui parameter-parameter yang telah ditentukan. Sementara itu, tujuan khusus yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengevaluasi perubahan sifat fisis, mekanis, dan kimia media filter kompos berbasis kotoran kambing untuk penggunaan dalam jangka waktu singkat terhadap kinerja medium filter dalam mereduksi gas  $N_2O$ .
2. Mengetahui pengaruh aktivitas adsorpsi dan degradasi  $N_2O$  oleh mikroorganisme terhadap pertumbuhan mikroorganisme itu sendiri, baik tanpa maupun dengan penambahan larutan nutrisi sintetik.
3. Menentukan kedalaman optimum media filter kompos berbasis kotoran kambing yang dikeringkan secara alami tanpa penambahan nutrisi sintetik dalam menghasilkan efisiensi reduksi gas  $N_2O$  tertinggi.
4. Mengetahui masa inkubasi optimum dengan larutan nutrisi sintetik yang menghasilkan efisiensi reduksi gas  $N_2O$  tertinggi.
5. Mengetahui kinerja medium filter melalui parameter-parameter yang dapat ditentukan dari model kinetika biosorpsi  $N_2O$  ke permukaan *biofilm* media filter kompos berbasis kotoran kambing dan model kinetika biodegradasi  $N_2O$  dari permukaan media filter kompos berbasis kotoran kambing oleh mikroorganisme.

### 1.4 Batasan Masalah

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

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Rekayasa Bioproses Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, Depok.
2. Peralatan biofilter yang digunakan untuk penelitian merupakan peralatan dalam skala laboratorium.

3. Gas NO<sub>x</sub> yang digunakan adalah gas N<sub>2</sub>O.
4. Konsentrasi gas sampel berupa gas N<sub>2</sub>O adalah 15.000 ppm dalam udara.
5. Tinggi dan diameter luar kolom biofilter berturut-turut adalah 120 cm dan 8 cm.
6. Medium filter yang digunakan adalah kompos berbasis kotoran kambing dan *bulking agent* berupa *cocopeat* dan sekam beras.
7. Waktu pengoperasian dilakukan selama 12 jam.

## 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari makalah ini adalah sebagai berikut:

### **BAB 1. PENDAHULUAN**

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

### **BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisikan studi literatur secara umum dan secara khusus mengenai hal-hal yang berkaitan dengan penelitian seperti gas dinitrogen monoksida, biofiltrasi, serta pembahasan jurnal-jurnal internasional dan nasional yang terkait dengan biofilter.

### **BAB 3. METODE PENELITIAN**

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

### **BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Berisikan hasil dan pembahasan dari uji kebocoran, uji blangko gas N<sub>2</sub>O, uji kemampuan alat biofilter dalam mereduksi gas N<sub>2</sub>O dengan variasi kedalaman medium filter dan variasi masa inkubasi medium filter dengan larutan sintetik, analisa pertumbuhan mikroorganisme di dalam kompos yang diamati melalui uji TPC dan SEM, serta hasil uji sifat fisis, mekanis, dan kimia kompos setiap variasi sebelum dan sesudah biofiltrasi dan pengaruhnya terhadap profil efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O.

### **BAB 5. KESIMPULAN**

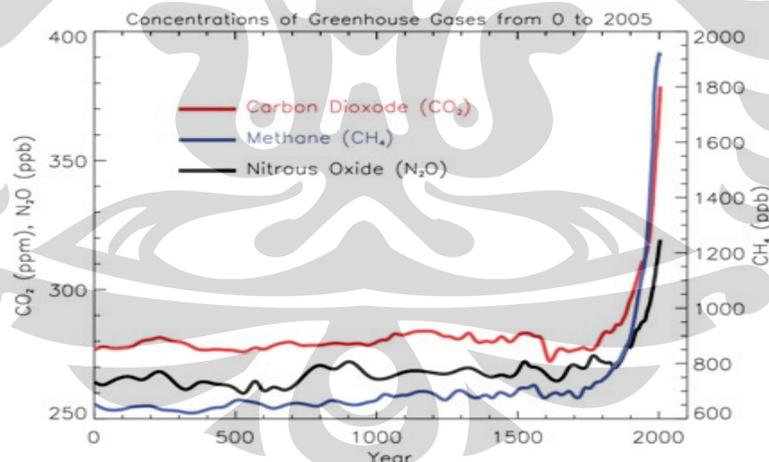
Berisikan kesimpulan dari hasil penelitian.

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Dinitrogen Monoksida (N<sub>2</sub>O)

Dinitrogen Monoksida (N<sub>2</sub>O), yang juga dikenal dengan sebutan gas tawa karena efek euforia yang ditimbulkan ketika menghirupnya, merupakan gas rumah kaca terbanyak keempat di atmosfer setelah CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, dan uap air. Gas N<sub>2</sub>O sangat sulit terurai di atmosfer dan diperkirakan mempunyai waktu tinggal di atmosfer sekitar 170 tahun. Gas N<sub>2</sub>O juga merupakan salah satu gas yang memberi kontribusi terbesar pada pemanasan global. Dampak dari gas N<sub>2</sub>O ini terhadap pemanasan global dapat mencapai 320 kali lebih besar daripada CO<sub>2</sub> meskipun sifat pemanasan radiasinya lebih rendah. Selain N<sub>2</sub>O, gas nitrogen oksida yang lain juga memberikan dampak terhadap pemanasan global secara tidak langsung melalui kontribusi terhadap produksi ozon troposferik pada proses pembentukan smog.

Berikut adalah grafik yang menunjukkan profil jumlah gas rumah kaca di dunia hingga akhir tahun 2000.



**Gambar 2.1** Konsentrasi beberapa gas rumah kaca selama 2000 tahun terakhir (IPCC, 2007).

N<sub>2</sub>O banyak diemisikan oleh bakteri pada tanah. Kegiatan pertanian seperti penanganan limbah binatang dan penyuburan tanah dapat memicu bakteri untuk memproduksi N<sub>2</sub>O lebih banyak. Sektor peternakan diketahui menghasilkan 65% emisi N<sub>2</sub>O, sementara sektor perindustrian menghasilkan 17% emisi N<sub>2</sub>O. Hal ini

dapat pula terlihat pada produksi nilon dan asam nitrat serta pembakaran bahan bakar pada mesin pembakaran internal.

## 2.2 Teknologi Reduksi NOx

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

### 2.2.1 Teknologi Pra-Pembakaran

Pembentukan termal NOx meningkat seiring dengan konsentrasi (jumlah per unit volum) dari nitrogen, oksigen, dan suhu pembakaran. Pada suhu pembakaran di bawah 2.370°F, konsentrasi kecil NOx terbentuk, dan di bawah 1.400°F hampir tidak ada NOx terbentuk. Metode reduksi pembentukan NOx didasarkan pada kontrol suhu atau membatasi salah satu konsentrasi oksigen, nitrogen atau bahan bakar.

### 2.2.2 Teknologi Pasca Pembakaran

Ada teknologi utama yang digunakan untuk mereduksi emisi NOx yakni *Selective Non Catalytic Reduction* (SNCR) dan *Selective Catalytic Reduction* (SCR).

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

Proses non katalitik ini termasuk injeksi nitrogen dalam bentuk senyawa amonia ( $\text{NH}_3$ ) atau urea ( $\text{NH}_2\text{CONH}_2$ ) pada suatu daerah di mana suhu gas berada dalam range 1600°F hingga 2100°F. Suhu window tergantung dari apakah yang digunakan adalah amonia atau urea. Pada rentangan suhu ini, amonia atau urea diionisasi dan bereaksi terhadap NOx untuk membentuk molekular nitrogen, karbon dioksida atau air. Reduksi NOx dengan teknologi ini memiliki efisiensi antara 50% hingga 70% (Holland, 2000).

#### 2. *Selective Catalytic Reduction* (SCR)

Aplikasi dari sistem SCR di Amerika Serikat berkembang pada dekade 1990. SCR telah menjadi metode yang banyak digunakan oleh sistem utilitas dalam reduksi NOx. Proses teknologi ini telah diaplikasikan ke

dalam sistem boiler dan memiliki efisiensi pengurangan NO<sub>x</sub> antara 90% hingga 94%. Teknologi ini dapat beroperasi pada jangkauan suhu yang luas antara 300°F hingga 1100°F (Holland, 2000).

### 2.2.3 Teknologi Reduksi Biologis

Reaktor biologi fasa gas dengan penggunaan reaksi metabolisme digunakan untuk mengatasi udara yang terkontaminasi. Perlakuan secara biologis ini sangat efektif dan ekonomis untuk mengatasi polutan udara yang berkonsentrasi rendah dalam kuantitas yang besar. Penyerapan polutan udara akan dilakukan oleh mikroorganisme yang ada di dalamnya. Udara yang terkontaminasi tersebut mengandung senyawa organik atau inorganik yang digunakan sebagai energi dan sumber karbon untuk menjaga pertumbuhan populasi mikroorganisme. Pada umumnya mikroba yang digunakan untuk teknologi reduksi polutan secara biologis adalah mikroba yang dapat tumbuh secara natural. Populasi mikroba tersebut mungkin didominasi oleh satu spesies mikroba khusus atau banyak spesies yang akan mendegradasi salah satu polutan udara tertentu secara sinergis (Devanny et al., 1999).

Kontaminan udara harus *biodegradable* dan tidak beracun untuk didegradasi secara biologis agar memperoleh hasil yang maksimal. Perlakuan secara biologis dalam menghilangkan udara yang terkontaminasi lebih mudah untuk senyawa yang memiliki berat molekul rendah, dan tingkat kelarutan yang tinggi dalam senyawa organik dengan struktur ikatan yang simpel. Senyawa yang memiliki struktur ikatan yang kompleks umumnya membutuhkan energi yang lebih besar untuk didegradasi dan energi ini tidak selalu dapat disediakan oleh mikroba. Sehingga, degradasi akan sedikit atau tidak sama sekali terjadi pada senyawa tersebut. Senyawa organik seperti alkohol, aldehid, keton, dan beberapa senyawa aromatik sederhana sangat baik untuk dibiodegradasi. Senyawa inorganik seperti H<sub>2</sub>S, Amonia dan NO<sub>x</sub> juga dapat dibiodegradasi dengan baik. Untuk senyawa antropogenik tertentu tidak dapat dibiodegradasi dikarenakan mikroorganisme tidak dapat memproses enzim yang dibutuhkan untuk menghancurkan ikatan struktur pada senyawa secara efektif. Senyawa-senyawa yang dapat diberi perlakuan secara biologis dapat berasal dari berbagai sumber.

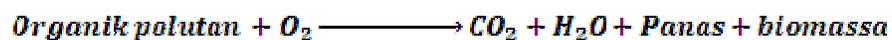
Beberapa proses industri yang dapat menggunakan teknologi mengontrol polusi udara secara biologis dengan efektif dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut:

**Tabel 2.1** Beberapa Proses Industri yang Menerapkan *Biological treatment* (Deviny et al., 1999)

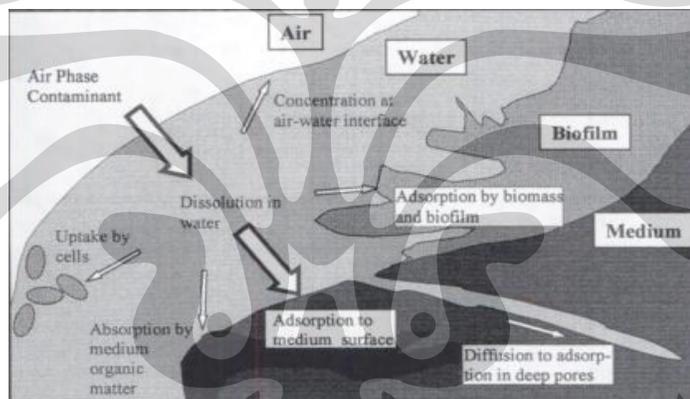
• Produksi bahan perekat	• Proses pembuatan makanan
• Peternakan hewan	• Industri parfum
• Mnfaktur kimia	• Industri furniture
• Penyimpanan bahan kimia	• Pengecoran logam
• Industri coating	• Industri petrokimia
• Pembuatan kompos	• Industri minyak
• Tempat pembakaran mayat	• Pengolahan limbah,dll

### 2.2.3.1 Teknologi Biofiltrasi

Biofiltrasi merupakan teknologi kontrol polusi yang masih relatif baru. Biofiltrasi merupakan teknologi yang cukup menarik untuk penghilangan emisi gas berbau dan senyawa organik yang mudah menguap (volatile organic compounds/VOCs) dalam konsentrasi kecil. Reaktor biofilter yang paling umum ditemukan adalah dalam bentuk kotak besar, yang kadang kala berukuran sebesar lapangan bola basket atau hanya sekecil satu yard kubik. Fungsi utama biofilter adalah untuk mengontakkan mikroorganisme dengan polutan yang terkandung di dalam aliran udara. Reaktor biofilter tersebut berisikan material filter, yang merupakan tempat berkembangbiak bagi mikroorganisme. Mikroorganisme tersebut tinggal di dalam lapisan tipis film (disebut dengan biofilm), yang mengelilingi permukaan media filter. Selama proses biofiltrasi, aliran udara yang terpolusi dipompakan dengan lambat melalui biofilter dan polutan diadsorp ke dalam media filter. Gas kontaminan didifusikan ke dalam biofilter dan diadsorp ke dalam biofilm. Ini memberikan kesempatan bagi mikroorganisme untuk mendegradasi polutan dan menghasilkan energy dan produk sampingan metabolis di dalam bentuk CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>O. Proses degradasi biologis ini terjadi melalui oksidasi, dan dapat dituliskan sebagai berikut:

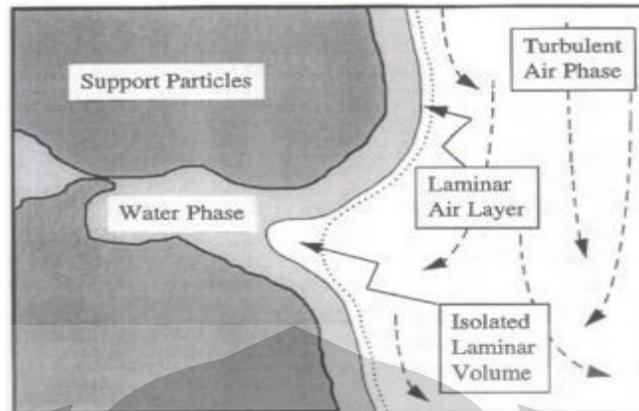


Biofilter dapat didefinisikan sebagai reaktor biokimia *fixed-bed* di mana terdapat mikroorganisme pada lapisan permukaan medium filter untuk mengonsumsi udara yang terserap pada lapisan biofilm tersebut (M. Schlegelmilch, J. Streese, R. Stegmann, 2005). Prinsip dari biofiltrasi relatif sederhana, mula – mula aliran udara yang terkontaminasi dialirkan melalui suatu unggun berpori di mana suatu kultur mikroorganisme pengurai polutan diimobilisasi ataupun terimobilisasi secara alami. Udara berbau dan terkontaminasi kemudian melewati *porous packed bed* (pada aplikasinya di industry, udara kontaminan membutuhkan tambahan kandungan air untuk menjaga kelembaban media filter dan kipas angin untuk membantu menarik udara tersebut melalui media filter. Oleh karena itu, biofilter pada pabrik membutuhkan humidifier dan *fan*), dan zat kontaminan dalam aliran udara diadsorpsi oleh *biofilm*, kemudian zat kontaminan tersebut dioksidasi untuk menghasilkan biomassa,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_3^-$  dan  $\text{SO}_4^{2-}$ .

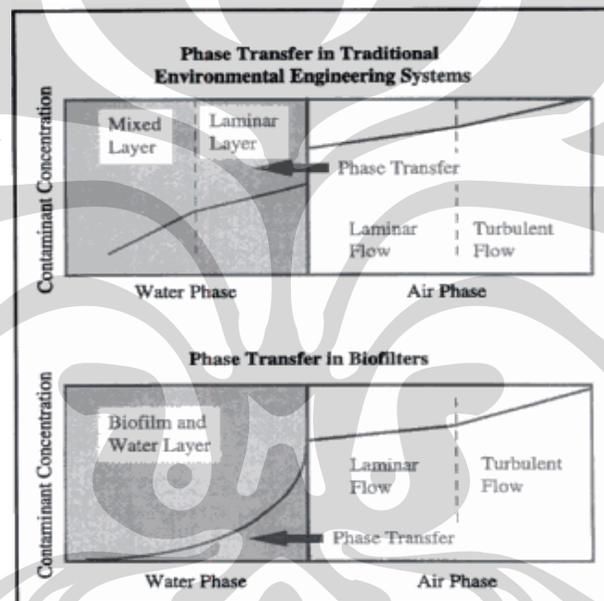


Gambar 2.2 Proses adsorpsi pada biofilter (Deviny et.al, 1999)

Gambar 2.2 di atas menggambarkan proses yang terjadi dalam medium filter ketika dialiri kontaminan. Pada proses ini terjadi kontak yang terjadi antara fasa gas sebagai kontaminan, fasa cair dan biofilm sebagai permukaan medium filter dan fasa padat sebagai partikel padatan medium filter. Transformasi kontaminan dari fasa gas ke cair dan padatan pada partikel kompos adalah langkah dasar dari perlakuan degradasi kontaminan dengan adsorpsi. Bagaimanapun, proses ini merupakan mekanisme yang kompleks. Molekul kontaminan dengan mudah diadsorpsi oleh fasa cair biofilm dan didegradasi oleh mikroba seperti pada Gambar 2.3 berikut. Beberapa kontaminan juga ada yang berdifusi masuk ke pori medium filter untuk diadsorpsi.



Gambar 2.3 Aliran kontaminan udara dalam biofilter (Devinny et.al, 1999)



Gambar 2.4 Model gas transfer (Devinny et.al, 1999)

Pada Gambar 2.3 dapat dilihat di mana aliran kontaminan akan menjadi laminar ketika mendekati permukaan biofilm. Ketika kontaminan telah mencapai daerah *biofilm* pada medium filter yang digunakan, maka akan terjadi proses degradasi secara maksimum dalam mereduksi konsentrasi kontaminan tersebut. Sedangkan Gambar 2.4 menunjukkan hasil perbandingan penggunaan biofilter dan teknologi sistem lingkungan lain terhadap efektivitas penurunan konsentrasi kontaminan. Pada Biofilter dihasilkan penurunan konsentrasi kontaminan secara signifikan terjadi pada lapisan biofilm (Devinny et.al, 1999).

Fenomena adsorpsi pada biofilter merupakan mekanisme yang sulit dipahami tetapi sangat penting untuk aplikasi biofilter. Total jumlah rasio kontaminan pada lapisan air dan padatan medium mempengaruhi waktu tinggal kontaminan dalam biofilter. Jenis kontaminan yang akan direduksi dengan teknologi biofilter juga berpengaruh terhadap efisiensi reduksi. Hal ini dikarenakan daya tarik kontaminan pada air, medium, dan bahan organik pada medium filter sangat beragam sehingga berpengaruh terhadap daya adsorpsi senyawa tersebut dalam medium filter.

### 2.2.3.2 Terminologi Biofilter

Mekanisme biofiltrasi berkaitan dengan beberapa hal, antara lain seperti proses kimia, mikrobiologi, fisika, matematika, dan banyak terminologi lainnya. Berikut adalah beberapa terminologi yang mendeskripsikan biofiltrasi dengan lebih jelas (Indrani Datta, D. Grant Allen).

- **EBRT (*Empty Bed Residence Time*)**

EBRT dapat didefinisikan sebagai volum total kolom biofilter kosong dibagi dengan laju alir udara kontaminan. EBRT merupakan bentuk umum yang digunakan untuk mendeskripsikan biofilter karena dapat digunakan dalam memperkirakan ukuran filter untuk laju alir udara yang diberikan.

$$EBRT = \frac{V_f}{Q} \quad (2.1)$$

dengan:  $V_f$  = volum kolom biofilter kosong ( $m^3$ )

$Q$  = laju alir udara kontaminan ( $m^3/s$ )

Waktu tinggal (*residence time*) sebenarnya, yang merupakan waktu udara berada di dalam kolom biofilter, dapat didefinisikan sebagai volum total kolom biofilter dikalikan dengan porositas medium filter, lalu dibagi dengan laju alir udara:

$$\tau = \frac{V_f \times \theta}{Q} \quad (2.2)$$

dengan:  $\tau$  = waktu tinggal sebenarnya (s)

$\theta$  = porositas = volum ruang kosong/ volum medium filter

- **Loading massa**

Laju *loading* massa (baik permukaan maupun volumetrik) adalah massa udara terkontaminasi yang memasuki biofilter setiap unit area atau volum pada medium filter per satuan waktu. Jika aliran tetap konstan selama berada dalam kolom, *loading* massa sepanjang panjang kolom medium filter akan menurun sebagai penanda udara kontaminan telah tereduksi. *Loading* massa secara menyeluruh pada sebuah sistem dapat dirumuskan pada persamaan berikut:

$$(2.3) \quad \text{Massa loading (permukaan)} = \frac{Q \cdot C}{A}$$

$$\text{Massa loading (Volumetric)} = \frac{Q \cdot C}{V_f} \quad (2.4)$$

dengan: C = konsentrasi inlet ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

### 2.2.3.3 Karakteristik Performa Biofilter

Kinerja biofilter dapat diketahui melalui penentuan karakteristik performa biofilter. Berikut ini adalah parameter untuk menentukan kinerja biofilter (Devanny et al., 1999).

- **Efisiensi Reduksi/ *Removal Efficiency* (RE)**

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

$$\text{Removal Efficiency (RE)} = \left( \frac{C_i - C_o}{C_i} \right) \times 100\% \quad (2.5)$$

dengan:  $C_i$  = konsentrasi kontaminan yang masuk ( $\text{ppmv}$ ,  $\text{g m}^{-3}$ )

$C_o$  = konsentrasi kontaminan yang keluar ( $\text{ppmv}$ ,  $\text{g m}^{-3}$ )

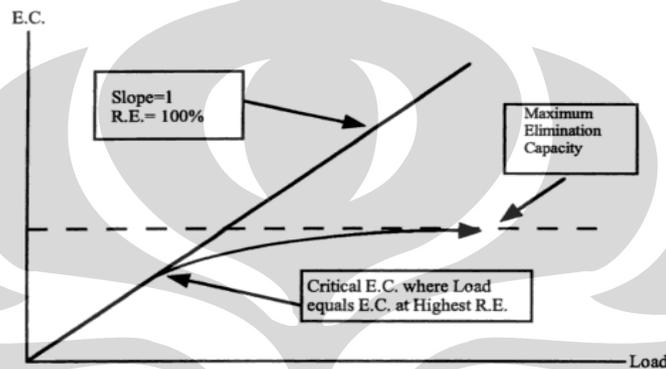
- **Kapasitas eliminasi**

EC (*Elimination Capacity*) adalah massa kontaminan yang terdegradasi per satuan volum medium filter per satuan waktu. Tipe unit untuk kapasitas eliminasi adalah jumlah gram polutan per  $\text{m}^3$  dari medium

filter setiap jam. Secara keseluruhan EC (*Elimination Capacity*) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Elimination capacity} = \frac{(C_i - C_e) \times Q}{V_f} \quad (2.6)$$

Kinerja dari biofilter tidak hanya ditentukan oleh efisiensi reduksi gas polutan karena efisiensi reduksi tersebut juga berkaitan dengan konsentrasi kontaminan, laju alir, serta dimensi biofilter dan kondisi operasi yang digunakan.



Gambar 2.5 Tipe kurva EC vs Loading (Devinny et al., 1999)

Gambar 2.5 di atas menunjukkan bahwa kapasitas eliminasi hanya dapat sama dengan atau lebih rendah dari laju *loading* massa. Pada kondisi *load* rendah, kapasitas eliminasi akan sama dengan *load*, dan sistem diperkirakan mencapai efisiensi reduksi 100%. Dengan meningkatkan *load* pada sistem, suatu titik akan tercapai dimana laju *load* massa keseluruhan akan melebihi kapasitas eliminasi keseluruhan dan menghasilkan efisiensi reduksi lebih rendah dari 100%. Titik ini biasa disebut sebagai *load* kritis atau kapasitas eliminasi kritis. Penurunan efisiensi reduksi dapat dijelaskan secara berbeda tergantung pada parameter yang ditingkatkan untuk meningkatkan laju *loading* massa secara keseluruhan. Berdasarkan Gambar 2.2 di atas, dapat dikatakan bahwa rasio antara EC dan IL adalah RE (*Removal Efficiency*) suatu biofilter.

#### 2.2.3.4 Keefektifan Teknologi

Biofiltrasi memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan metode penghilangan VOCs, yaitu:

1. VOCs teroksidasi pada suhu ruang – suhu oksidasi yang rendah mengeliminasi biaya tinggi yang dihubungkan dengan pembakaran.
2. Aman – suhu oksidasi yang rendah dan tingginya kelembaban mengeliminasi ketakutan yang dihubungkan dengan pembakaran.
3. Rendahnya biaya operasi tahunan – hanya ada dua konsumen energy yang paling besar dalam sistem biofiltrasi: pompa sirkulasi untuk humidifikasi dan sebuah kipas angin untuk menarik aliran gas melalui sistem tersebut.
4. Rendahnya *pressure drop* – jauh lebih rendah dibandingkan dengan teknologi katalitik atau *regenerative thermal oxidizer*, yang mengakibatkan penghematan penggunaan listrik.
5. Teknologi yang terbukti efektif – sistem biofiltrasi sudah teruji dengan pengalaman operasional historisnya.
6. Ramah lingkungan – nol emisi NO<sub>x</sub>, nol emisi SO<sub>x</sub> dan hanya sedikit emisi CO<sub>2</sub>.
7. Rendahnya perawatan – hanya sedikit peralatan yang bergerak sehingga hanya membutuhkan sedikit biaya perawatan.

Di samping kelebihan yang dimilikinya, biofiltrasi juga memiliki keterbatasan/kekurangan, yaitu:

1. Biofiltrasi tidak dapat menghilangkan beberapa senyawa organik yang memiliki laju adsorpsi dan degradasi yang rendah dengan sukses. Ini teruji pada VOCs terklorinasi.
2. Sumber kontaminan dengan emisi kimia yang tinggi memerlukan unit biofilter yang besar atau area terbuka untuk menginstalasi sistem biofiltrasi.
3. Sumber dengan emisi yang sangat fluktuatif dapat berdampak sangat berbahaya kepada populasi mikroba dan kimerja keseluruhan dari biofilter.

4. Periode aklimasi untuk populasi dapat membutuhkan beberapa minggu atau bahkan bulan, terutama untuk penghilangan VOCs.

#### 2.2.3.5 Kompos sebagai Pengisi Kolom Biofilter

Pemilihan bahan pengisi kolom biofilter sebagai substrat untuk hidup dan pertumbuhan mikroba merupakan hal yang sangat penting dalam rangka mendukung kehidupan dari mikroba yang digunakan. Material yang dapat digunakan sebagai bahan pengisi biofilter diantaranya berupa kompos, gambut (*peat*), tanah, karbon aktif, serpihan atau kulit kayu (*bark*), lava, serta *pearlite* dan media sintetik, di mana mikroba akan terimmobilisasi secara alami atau buatan di dalam bahan pengisi dan selanjutnya membentuk lapisan tipis (*biofilm* atau *biolayer*).

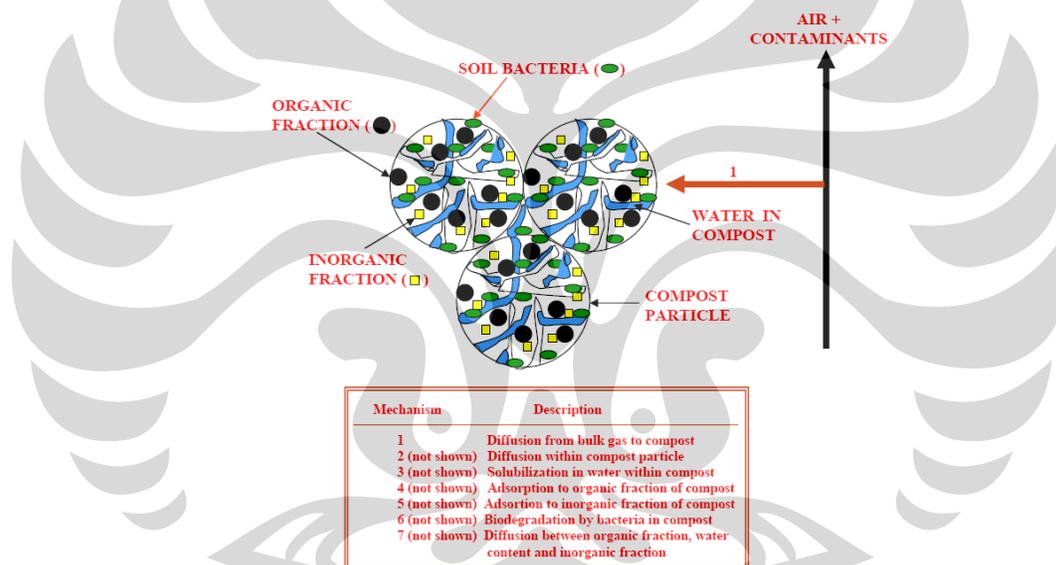
Beberapa hal yang dimiliki kompos yang menjadikannya cocok sebagai medium filter adalah sebagai berikut:

1. Kemampuan menyerap air untuk menjaga kelembaban lapisan *biofilm*.
2. Porositas dan luas permukaan yang besar, baik untuk adsorpsi kontaminan maupun untuk pertumbuhan mikroba.
3. Kemampuan untuk menyerap nutrisi dan menyuplainya ketika dibutuhkan oleh mikroba.
4. Kemampuan menahan aliran udara (*pressure drop* udara dan kekuatan angin yang dikeluarkan blower). *Pressure drop* fasa gas sangatlah penting mengingat biaya operasi sesuai dengan *pressure drop* di sepanjang *bed* biofilter. Pada beberapa jenis *bed* biofilter, penurunan tekanan total gas kurang dari 0,3 inchi air.
5. Perubahan bentuk yang sedikit setelah digunakan untuk waktu tertentu.
6. Material yang digunakan relatif murah.
7. Karakteristik fisik, seperti kestabilan fisik dan kemudahan dalam penanganan.

Pada umumnya, bahan pengisi alami mengandung sejumlah nutrisi yang cukup untuk pertumbuhan mikroorganisme, sehingga penambahan nutrisi dan mineral tidak diperlukan. Demikian pula halnya dengan medium filter berupa kompos, di mana medium ini tidak terlalu membutuhkan nutrisi karena kompos

telah memiliki sejumlah kandungan nutrisi berupa nitrogen organik dan mikroorganik lainnya dalam jumlah yang cukup banyak. Tetapi untuk pemakaian biofilter berbasis kompos dalam waktu yang relatif lama, perlu ditambahkan nutrisi (berupa nitrogen atau fosfor) secara manual untuk mempertahankan kelangsungan hidup mikroorganisme tersebut.

Pada penggunaan biofilter dengan media kompos, kontaminan dari gas akan berdifusi ke dalam pori-pori partikel kompos, terlarut ke dalam larutan *biofilm*, teradsorpsi pada fraksi organik dan inorganik dari kompos tersebut, kemudian terbiodegradasi akibat bakteri kompos aktif di dalamnya, serta terperangkap (teradsorpsi) di dalam partikel-partikel kompos. Hal ini dapat terlihat pada Gambar 2.6 berikut.



**Gambar 2.6** Proses Biofiltrasi dengan Media Kompos (Govind, 1998)

Pengomposan didefinisikan sebagai suatu proses biokimia di mana bahan organik didekomposisi menjadi zat-zat seperti humus (kompos) oleh kelompok mikroorganisme yang berbeda pada kondisi yang dikontrol. Berdasarkan analisis empat eksperimen biofiltrasi dengan menggunakan empat jenis medium filter, yaitu serbuk kayu, *sawdust*, kompos, dan kompos yang dicampurkan dengan serbuk kayu diperoleh hasil bahwa medium filter yang menggunakan kompos memiliki efisiensi reduksi gas polutan lebih tinggi. Hal ini dimungkinkan karena adanya aktivitas mikroba di dalam kompos (Hong, 2003).

Biokonversi terhadap bahan organik pada saat pengomposan dilakukan oleh kelompok mikroorganisme heterofilik berbeda yang meliputi bakteri, kapang, protozoa, dan *actinomycetes*. Mikroorganisme selulolitik dan lignolitik juga sangat berperan mendekomposisi komponen dari bahan organik yang terdegradasi secara lambat.

Ciri-ciri umum kompos didasarkan pada sifat-sifat berikut :

1. Berwarna coklat tua hingga hitam.
2. Tidak larut dalam air, meskipun sebagian dari kompos dapat membentuk suspensi.
3. Sangat larut dalam pelarut alkali, natrium pirofosfat, atau larutan amonium oksalat dengan menghasilkan ekstrak yang berwarna.
4. Memiliki rasio C/N 10-20 (tergantung pada bahan dan derajat humidifikasinya).
5. Secara biokimiawi tidak stabil, tetapi komposisinya berubah melalui aktivitas-aktivitas mikroorganisme sepanjang kondisi lingkungannya sesuai (suhu dan kelembaban), dan selanjutnya dioksidasi menjadi garam-garam anorganik, karbondioksida, dan air.
6. Menunjukkan kapasitas pemindahan kation dan absorpsi zat yang tinggi. Jika digunakan pada tanah, kompos dapat memberikan pengaruh positif bagi tanah dan pertumbuhan tanaman. Komposisi pupuk kompos meliputi N, P, K, Ca dan Mg. Selain itu, kompos mengandung *trace element* untuk pertumbuhan tanaman.

#### **2.2.3.5.1 Bahan Organik Pembuat Kompos**

Bahan organik yang dapat digunakan dalam kompos dapat berasal dari limbah/hasil pertanian dan non-pertanian (limbah kota dan limbah industri. Limbah yang berasal dari hasil pertanian antara lain berupa sisa tanaman (jerami dan brangkas), sisa hasil pertanian (sekam padi, kulit kacang tanah, ampas tebu, dan belotong), pupuk kandang (kotoran sapi, kerbau, ayam, itik, dan kuda), dan pupuk hijau. Sedangkan, limbah kota atau sampah organik kota biasanya dikumpulkan dari pasar-pasar atau sampah rumah tangga dari daerah pemukiman serta taman-taman kota. Limbah industri yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan organik dalam kompos antara lain limbah industri pangan. Berbagai bahan

organik tersebut dapat dijadikan kompos melalui teknologi pengomposan sederhana maupun dengan penambahan mikroba perombak serta pengkayaan dengan hara lain. Pemberian bahan organik dapat memberikan efek positif pada aktivitas berbagai enzim hidrolase yang kemungkinan disebabkan oleh meningkatnya biomassa mikroba (Garcia et al., 1994).

Pengomposan didefinisikan sebagai suatu proses biokimia dimana bahan organik didekomposisi menjadi zat-zat seperti humus (kompos) oleh kelompok mikroorganisme yang berbeda pada kondisi yang dikontrol (Gaur, 1983 dan EPA, 1989). Berdasarkan analisis empat eksperimen biofiltrasi dengan menggunakan empat jenis medium filter, yaitu serbuk kayu, *sawdust*, kompos, dan kompos yang dicampurkan dengan serbuk kayu, diperoleh hasil bahwa medium filter yang menggunakan kompos memiliki efisiensi reduksi gas polutan lebih tinggi. Hal ini dimungkinkan karena adanya aktivitas mikroba di dalam kompos (Hong, 2003). Tabel 2.2 berikut menunjukkan organisme yang terlibat dalam proses pengomposan.

Tabel 2.2 Organisme yang terlibat dalam proses pengomposan

Kelompok Organisme	Organisme	Jumlah/g kompos
Mikroflora	Bakteri Aktinomycetes Kapang	$10^8$ - $10^9$ $10^5$ - $10^8$ $10^4$ - $10^6$
Mikrofauna	Protozoa	$10^4$ - $10^5$
Makroflora	Jamur tingkat tinggi	
Makrofauna	Cacing tanah, Rayap, Semut, Kutu, dll	

Sumber: Balai Penelitian Bioteknologi Perkebunan Indonesia, Bogor; [isroi@ipard.com](mailto:isroi@ipard.com)

Biokonversi terhadap bahan organik pada saat pengomposan dilakukan oleh kelompok mikroorganisme heterofilik berbeda yang meliputi bakteri, kapang, protozoa, dan *actinomycetes*. Mikroorganisme selulolitik dan lignolitik juga sangat berperan dalam mendekomposisi komponen dari bahan organik yang terdegradasi secara lambat (Gaur, 1983).

Tabel 2.3 Perkiraan kandungan hara makro dari beberapa jenis kotoran hewan

Jenis Ternak	Nitrogen (N)	Phosporus (P)	Potassium (K)
Sapi	1	0,4	0,5
Kambing	1,73	2,57	1,56
Unggas (pakan alami)	2,1	1,6	1
Unggas (pakan pellet)	5	3,3	1,5
Kuda	0,7	0,4	0,5
Babi	1,1	0,7	0,1
Domba	1,8	0,4	0,5

Sumber: *Yates Garden Guide- For Australian Gardeners*, dan Lab. Sucofindo, Cibitung, Bekasi.

Dari Tabel 2.3 di atas, terlihat bahwa kotoran kambing diketahui mengandung lebih banyak N dibandingkan dengan kotoran sapi. Untuk mengatur keseimbangan rasio C/N, dapat dilakukan penambahan *bulking agent* seperti serbuk gergaji, serutan kayu atau jerami, *cocopeat*, maupun sekam beras, yang juga dapat membantu penyerapan kelebihan air. Mikroba memanfaatkan unsur N, P, dan K untuk pertumbuhan, metabolisme, dan reproduksinya, dan menggunakan unsur C untuk mendapatkan energi (Biddlestone dkk., 1994).

Kotoran kambing banyak dipilih sebagai bahan organik penyusun kompos karena selain tersedia dalam jumlah banyak pada petani/peternak, juga memiliki kandungan nitrogen dan potassium. Kompos dari kotoran kambing mempunyai kandungan C dan K yang cukup tinggi dibandingkan dengan kompos kotoran sapi (data dapat juga dilihat pada Tabel 4.1 di bab 4), sedangkan kompos kotoran ayam mempunyai kandungan P yang tinggi yang dapat dilihat pada Tabel 2.3 di atas.

Proses dekomposisi alami dapat dipercepat secara buatan dengan cara memperbaiki kondisi proses dekomposisi. Adapun faktor-faktor yang berperan dalam proses dekomposisi memiliki ringkasan kondisi dekomposisi optimum pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Nilai optimal yang mengontrol proses pengomposan

Parameter	Nilai Optimum
Ukuran partikel bahan	25-40 mm 50 mm untuk aerasi alami dan timbunan panjang
Nisbah C/N	20-40
Kandungan lengas	50-60%
pH	5,0-8,0
Suhu	55°C-60°C untuk 4-5 hari
Aerasi	Secara periodik timbunan dibalik
Kehalusan bahan	Makin halus makin cepat terdekomposisi
Ukuran timbunan	Panjang bervariasi, tinggi 1,5m dan lebar 2,5 m
Aktivator	Tahap awal mesofilik (fungi slopati, bakteri penghasil asam), temperatur meningkat >40°C (bakteri termofilik, aktinomycetes dan fungi), suhu >70°C (bakteri termofilik), suhu udara ambien (bakteri mesofilik dan fungi)

Sumber: Sutanto, 2002

Adapun alasan penggunaan pupuk kandang sebagai bahan organik dalam kompos adalah karena jumlah ternak di Indonesia cukup banyak dan volume kotoran ternak juga cukup besar. Selain itu, pupuk kandang secara kualitatif relatif lebih kaya hara dan mikrobial dibandingkan limbah pertanian. Adapun yang dimaksud pupuk kandang adalah kotoran hewan/ternak dan urine (Rosmarkam & Nasih Widya Yuwono, 2002). Secara umum dapat disebutkan bahwa setiap ton pupuk kandang mengandung 5 kg N, 3 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, dan 5 kg K<sub>2</sub>O serta unsur-unsur hara esensial lain dalam jumlah yang relatif kecil (Knuti, Korpi dan Hide, 1970). Sifat-sifat pupuk kandang dari tiap-tiap jenis hewan yang dipelihara menghasilkan pupuk kandang dengan sifat yang berbeda-beda seperti diuraikan berikut:

- Kotoran ayam mengandung unsur N tiga kali lebih besar dari pada pupuk kandang yang lain.

- Kotoran kambing mengandung unsur N dan K masing-masing dua kali lebih besar dari pada kotoran sapi.
- Kotoran babi mengandung unsur P dua kali lebih banyak dari kotoran sapi.
- Pupuk kandang dari kuda atau kambing mengalami fermentasi dan menjadi panas lebih cepat dari pada pupuk kandang sapi dan babi. Oleh karena itu, petani biasanya menyebut pupuk kandang sapi sebagai pupuk dingin (*Cold manures*).
- Dalam semua pupuk kandang unsur P selalu terdapat dalam kotoran padat, sedang sebagian besar unsur K dan N terdapat dalam kotoran cair (urine).
- Kandungan unsur K dalam urine adalah lima kali lebih banyak daripada dalam kotoran padat, sedang kandungan unsur N adalah dua kali lebih banyak.

Komposisi hara pada masing-masing kotoran hewan berbeda tergantung pada jumlah dan jenis makanannya, serta jumlah alasnya (*litter*). Secara umum, kandungan hara dalam kotoran hewan jauh lebih rendah daripada pupuk kimia sehingga takaran penggunaannya juga akan lebih tinggi. Namun demikian, hara dalam kotoran hewan ini tidak mudah hilang. Ketersediaan hara sangat dipengaruhi oleh tingkat dekomposisi/mineralisasi dari bahan-bahan tersebut. Rendahnya ketersediaan hara dari pupuk kandang antara lain disebabkan karena bentuk N, P, serta unsur lain terdapat dalam bentuk senyawa kompleks organo protein atau senyawa asam humat atau lignin yang sulit terdekomposisi. Selain mengandung hara bermanfaat, pupuk kandang juga mengandung bakteri saprofitik, pembawa penyakit, dan parasit mikroorganisme yang dapat membahayakan hewan atau manusia. Contohnya: kotoran ayam mengandung *Salmonella sp.* Oleh karena itu, pengelolaan dan pemanfaatan pupuk kandang harus hati-hati.

#### **2.2.3.6 Parameter yang Mempengaruhi Biofiltrasi**

Parameter yang penting untuk dikontrol dalam proses biofiltrasi antara lain adalah kelembaban, pH, nutrisi, temperatur, dan kandungan oksigen, karena

parameter-parameter inilah yang akan menentukan efisiensi reduksi gas polutan yang dihasilkan oleh proses biofiltrasi.

#### 2.2.3.6.1 Kelembaban

*Moisture*/kelembaban sangat penting untuk kelangsungan hidup dan metabolisme mikroorganisme serta turut memberikan kontribusi pada kapasitas *buffer* filter (Van Lith et al., 1997). Kandungan kelembaban yang kurang dapat mengakibatkan kekeringan dan menimbulkan celah pada material filter, serta dapat menyebabkan terjadinya *channeling*. Selain itu, kelembaban yang kurang juga dapat menyebabkan berkurangnya kadar air bagi mikroorganisme dan mengakibatkan penurunan laju biodegradasi polutan. Sebaliknya, terlalu banyak air atau kelembaban yang tinggi juga dapat menimbulkan beberapa dampak antara lain akan menghalangi transfer oksigen dan polutan hidrofobik ke dalam *biofilm*, munculnya zona anaerobik dalam material filter, menghambat laju reaksi, adanya tekanan balik karena pengurangan volume ruang kosong, dan gas *channeling* dalam material filter.

Kelembaban optimal bervariasi terhadap media filter yang berbeda, tergantung pada area permukaan media dan porositas (Hodge et al., 1991). Kelembaban yang direkomendasikan untuk media filter organik berkisar antara 40-60% (berdasarkan berat) (Ottengraf 1986; Van Lith et al., 1997), namun tidak ada informasi mengenai kandungan kelembaban optimal untuk media sintetis. Tingkat kelembaban dalam biofilter biasanya dijaga melalui pra-humidifikasi aliran gas masuk atau dengan menggunakan *humidifier* agar dapat langsung memberikan air ke dalam material filter.

#### 2.2.3.6.2 pH

Sebagian besar mikroorganisme aktif di rentang pH tertentu, sehingga perubahan pH dapat sangat mempengaruhi aktivitas mereka. Pengasaman medium filter dapat menjadi masalah dalam pengolahan bahan kimia karena biodegradasi akan menghasilkan produk akhir asam, seperti pada H<sub>2</sub>S dan senyawa teroksidasi (Devinny et al., 1999). Banyak bakteri memiliki pH optimum antara 6 dan 8 (Leson and Winer, 1991; Ottengraf, 1986), tetapi H<sub>2</sub>S juga dapat teroksidasi pada

pH asam oleh mikroorganisme seperti *Thiobacillus* (Chung et al., 1998; Kanagawa and Mikami, 1989). Namun demikian, pH dalam biofilter dapat dijaga melalui penambahan *buffer* ke dalam material filter pada saat memulai biofiltrasi, dan ketika *buffer* tersebut telah habis, maka material filter diganti dengan yang baru.

#### 2.2.3.6.3 Nutrisi

Mikroba memerlukan makanan dengan nutrisi seimbang untuk dapat bertahan hidup dan berkembangbiak. Kandungan nutrisi yang cukup harus tersedia, agar diperoleh performansi yang baik dari biofilter. Oleh karena itu selain karbon dan energi dari degradasi kontaminan, mikroba juga memerlukan nutrisi utama untuk memperpanjang hidup. Pembusukan medium filter organik dapat menyediakan nutrisi utama tersebut. Namun, jika medium filter tidak dapat menyediakan beberapa nutrisi dengan baik, maka mikroba akan berhenti tumbuh dan mati, seperti halnya pada medium sintetik *rockwool*. Medium ini tidak mengandung kebutuhan nutrisi yang sesuai, sehingga diperlukan adanya penambahan nutrisi secara terpisah selama operasi.

Nitrogen merupakan nutrisi penting untuk pertumbuhan mikrobial karena nitrogen merupakan unsur pokok protein dan asam nukleat. Mikroba menggunakan nitrogen untuk membangun dinding sel, di mana dinding ini mengandung kurang lebih 15% nitrogen. Mikroba juga mampu menggunakan seluruh bentuk terlarut dari nitrogen, tetapi tidak semua nitrogen dapat digunakan kembali. Beberapa produk nitrogen dari proses pencernaan berupa gas (nitrogen oksida dan amonia) akan keluar dari proses melalui emisi. Namun demikian, kebanyakan nitrogen yang mengandung uap dapat diabsorpsi kembali ke dalam cairan dan dikonsumsi oleh mikroba. Selain itu, beberapa produk nitrogen membentuk senyawa terlarut dalam air dan dilepaskan keluar sistem dengan air pengkondensasi. Nutrisi utama penting lainnya adalah fosfor, potasium, sulfur, magnesium, kalsium, sodium, dan besi. Nitrogen, fosfor, potasium (kode NPK pada label penyubur) dapat ditambahkan melalui penggabungan penyubur agrikultural ke dalam medium filter. Kandungan nutrisi filter juga harus diperiksa

secara periodik dengan mengumpulkan sampel untuk laboratorium tanah dengan tujuan analisis.

#### 2.2.3.6.4 Temperatur

Temperatur merupakan salah satu variabel yang paling penting dalam menentukan laju pertumbuhan mikrobial dan jenis spesies dalam komunitas mikrobial (Wani et al., 1997). Untuk keberhasilan operasi, temperatur sistem dijaga tetap konstan. Temperatur biofilter terutama dipengaruhi oleh temperatur aliran udara masuk dan juga oleh reaksi biologi secara eksotermik di dalam isian (Corsi & Seed, 1995). Seiring meningkatnya temperatur, metabolisme dan laju pertumbuhan sel juga meningkat, akan tetapi kemampuan biosorpsi menurun (McNevin and Barford, 2000). Namun, di atas temperatur kritis tertentu, inaktivasi beberapa protein penting dan penghentian pertumbuhan secara mendadak akan terjadi (Madigan et al., 1997). Temperatur optimum untuk berbagai spesies memiliki jangkauan yang luas, tetapi sebagian besar aplikasi biofilter telah dilakukan pada temperatur dalam rentang *mesophilic* (20-45°C), dengan temperatur 35-37°C dianggap sebagai temperatur optimum (Swanson and Loehr, 1997; Wani et al., 1997). Baru-baru ini, beberapa studi mengenai operasi *thermophilic* (45-75°C) juga telah dilaporkan (Dhamwichukorn et al., 2001; Kong et al., 2001; Van Liere and Van Groenestijn, 2003). Pada penelitian lainnya, Lehtomäki et al. (1992) menyelidiki dampak temperatur dingin (-18°C sampai 8°C) pada biofiltrasi senyawa fenolik dari produksi wol mineral. Sementara itu, Giggey et al. (1994) melaporkan bahwa biofilter yang mereduksi gas-gas belerang dan *terpenes* menunjukkan performa yang baik pada musim dingin dengan temperatur ambient di bawah 0°C bersama dengan salju. Namun, Shareefdeen et al. (2004) mencatat penurunan reduksi H<sub>2</sub>S ketika temperatur turun di bawah 10°C. Oleh karena itu, mereka menyarankan penambahan uap untuk mensuplai panas dan juga untuk menjaga keseimbangan panas dalam biofilter dalam menghadapi gangguan pada iklim dingin. Sayangnya, hal ini akan meningkatkan biaya operasi.

#### 2.2.3.6.5 Kandungan Oksigen

Oksigen juga merupakan suatu parameter operasi yang vital bagi biofiltrasi karena kebanyakan mikroorganisme yang digunakan dalam biofiltrasi bersifat aerobik dan membutuhkan oksigen untuk metabolisme. Bakteri heterotrofik aerobik yang ada dalam medium filter membutuhkan paling sedikit 5-15% oksigen pada aliran gas masukan (Dharmvaram, 1991). Namun, kandungan oksigen biasanya tidak menjadi persoalan karena jumlahnya yang berlimpah pada aliran udara masuk dan relatif sedikit pada *biofilm*.

#### 2.2.3.6.6 Pressure Drop

Pada biofilter, sintesis biomassa memudahkan untuk mengakumulasi pertumbuhan massa mikroba dalam waktu yang lama, dimana hal ini berhubungan dengan peningkatan resistensi aliran pada medium filter (Kinney et al. 1996; Mohseni et al. 1998). Akumulasi biomassa akan lebih besar pada bagian awal biofilter (Corsi dan Seed, 1995; Swanson dan Loehr, 1997) dan menyebabkan terjadinya perubahan karakteristik medium seperti reduksi ruang kosong antar partikel, dan kompaksi medium filter seperti serbuk kayu. Perubahan ini menyebabkan *channeling* dan peningkatan *pressure drop*.

Secara umum, terdapat hubungan yang mendekati linear antara peningkatan *pressure drop* terhadap peningkatan laju alir udara (Yang dan Allen, 1994), yang menjadi eksponensial pada laju alir yang semakin tinggi (Morgan-Sagastume et al., 2001). Sebagai tambahan, pada laju alir udara tertentu, *pressure drop* akan meningkat secara eksponensial terhadap peningkatan biomassa (Morgan-Sagastume et al., 2001) dan terhadap penurunan ukuran partikel, khususnya untuk ukuran partikel yang lebih kecil dari 1 mm. Peningkatan eksponensial terhadap biomassa berarti *pressure drop* keseluruhan yang lebih rendah akan diperoleh jika pertumbuhan biomassa didistribusikan di keseluruhan medium, dan tidak hanya pada daerah tertentu (Morgan-Sagastume et al., 2001). Kompaksi medium filter selama jangka waktu penggunaan yang panjang dan karena kelebihan pemberian air juga akan menyebabkan terjadinya kenaikan *pressure drop* (Pinnette et al., 1994).

#### 2.2.3.6.7 Kedalaman Medium Filter

Kedalaman medium filter mempunyai rentang kurang dari 0,5 sampai 2,5 m. Namun, kedalaman medium filter yang biasanya digunakan adalah sekitar 1 m, untuk menyediakan waktu retensi yang cukup pada saat meminimalkan kebutuhan luas area medium filter. Beberapa manufaktur merekomendasikan untuk menggunakan sistem multilayer pada medium biofilter, karena kebutuhan akan luas area akan menjadi lebih kecil terhadap laju *loading* yang tinggi (Leson and Winter, 1991). Penggunaan kedalaman yang lebih tinggi untuk menghasilkan laju *loading* yang tinggi juga dapat digunakan, namun cara ini akan meningkatkan *headloss* pada sistem. Selain itu, peningkatan kedalaman medium filter juga berpotensi membuat medium filter pada bagian paling bawah menjadi padat (kompaksi) sehingga dapat mengakibatkan timbulnya *pressure drop* yang tinggi.

#### 2.2.3.7 Mikrobiologi pada Biofilter

Bohn (1992) memperkirakan populasi mikrobiologi pada biofilter sekitar 1 milyar mikroorganisme per gram material organik. Beberapa kelompok mikroorganisme tersebut diketahui termasuk mikroorganisme pereduksi polutan udara pada biofilter, termasuk bakteri, *actinomycetes* dan jamur (Ottengraf, 1987). Komposisi kelompok mikroba dan kondisi hidup mikroba tersebut tergantung pada kondisi fisika dan kimia pada medium filter. Keanekaragaman mikroorganisme tersebut adalah suatu fungsi dari komposisi aliran gas yang masuk dan medium filter yang digunakan. Medium filter alami seperti kompos mengandung sejumlah jenis mikroorganisme yang cukup untuk biodegradasi kontaminan. Pada tahap awal, dibutuhkan waktu bagi mikroorganisme untuk beradaptasi yaitu waktu yang dibutuhkan selama periode aklimatisasi pada mikroorganisme tersebut. Efisiensi dalam proses biofilter umumnya ditingkatkan oleh pertumbuhan mikroorganisme yang aktif saat fase adaptasi berlangsung.

Populasi mikroorganisme akan tumbuh dari energi (ATP) yang berasal dari transformasi polutan udara yang mengalir pada biofilter. Dengan kata lain, pertumbuhan mikroorganisme tersebut merupakan hasil dari metabolisme polutan. Adapun mineral yang dibutuhkan oleh mikroorganisme mengandung N, S, P, Ca, K, Na, Mg, Fe, Co, dan Zn (Shuler dan Kargi, 1992), dimana unsur tersebut umumnya terkandung di dalam aliran polutan udara. Pada polutan yang

mengandung sulfur, nitrogen atau halogen, beberapa elemen tersebut akan terakumulasi di dalam sistem dan akan direduksi oleh mikroorganisme autotropi yang menurunkan energi dari oksidasi molekul dan menggunakan CO<sub>2</sub> sebagai sumber karbon.

Kinerja sistem biofilter dapat dinilai berdasarkan beberapa hal berikut (Wahyuni, 2004):

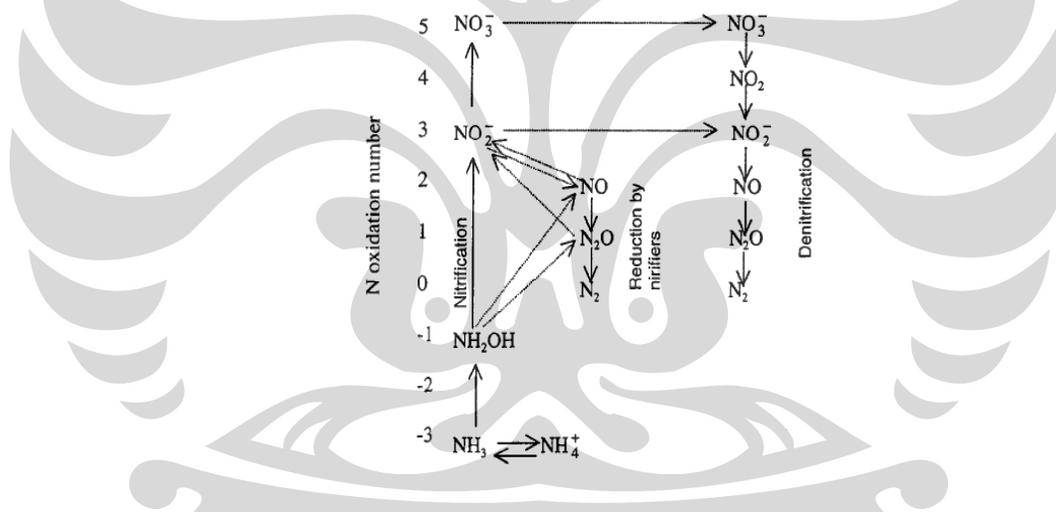
1. Laju atau kapasitas degradasi maksimum (g/kg-medium kering/hari).
2. Kecepatan tercapainya kondisi aklimatisasi mikroba. Parameter ini akan menunjukkan kinerja dari bioavailabilitas konsorsium mikroba yang dikembangkan untuk mendegradasi gas polutan. Semakin cepat masa adaptasi mikroba (*log phase*), maka kinerja biofilter akan semakin baik.
3. Kemampuan mempertahankan rasio degradasi gas (efisiensi degradasi) dalam waktu yang lama. Rasio degradasi polutan gas dari biofilter umumnya di atas 95% dan dapat bertahan dalam jangka waktu yang relatif lama.
4. Kemampuan bahan pengisi dalam mempertahankan kondisi pH, temperatur, dan kadar air. Kemampuan ini menggambarkan kinerja biofilter terhadap fluktuasi *loading* polutan gas yang tinggi, kurangnya humidifikasi dan masa tidak terpakainya biofilter akibat fluktuasi proses produksi pada industri.

### 2.3 Metabolisme Nitrogen

Transformasi mikroba dari nitrogen ada 5 macam, yaitu:

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

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, biasanya antara -3 ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{NH}_4^+$ ) dan +5 ( $\text{NO}_3^-$ ). 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 2.7.



Gambar 2.7 Jalur metabolisme nitrogen (Hudepohl, 1999)

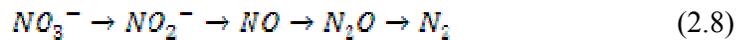
### 2.3.1 Denitrifikasi

Denitrifikasi, tidak seperti reduksi asimilatif nitrogen, dilakukan oleh sejumlah bakteri tertentu. Konsep dari proses ini hampir sama dengan penggunaan oksigen, dan senyawa nitrogen teroksidasi mengambil tempat oksigen pada persamaan berikut:



Reaksi yang terlibat pada proses denitrifikasi masih belum dapat dimengerti sepenuhnya, namun  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , dan  $\text{NO}$  telah diidentifikasi sebagai

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



Bilangan oksidasi nitrogen berubah dari +5 menjadi +3 menjadi +2 menjadi +1 menjadi 0 dalam 4 langkah. Setiap intermediet dapat dilepas pada keadaan tertentu. Misalnya  $NO_2^-$  sering terakumulasi pada hari-hari awal operasi proses denitrifikasi, namun menghilang secara bertahap ketika reaksi menjadi setimbang. NO dan  $N_2O$  dapat dilepaskan sebagai hasil dari kondisi lingkungan yang bervariasi seperti pH rendah atau fluktuasi temperatur secara mendadak.

Penggunaan  $NO_3^-$  sebagai elektron akseptor menghasilkan energi yang lebih sedikit untuk pertumbuhan apabila dibandingkan oksigen. Hasilnya oksigen lebih disukai sebagai elektron akseptor dan senyawa nitrogen teroksidasi tidak digunakan dalam jumlah signifikan jika oksigen tersedia. Kondisi dimana konsentrasi oksigen rendah atau kekurangan oksigen dapat menyebabkan keadaan kompetitif bagi spesies bakteri untuk menggunakan nitrogen teroksidasi sebagai elektron akseptor. Pada keadaan tertentu, bakteri denitrifikasi menghasilkan enzim yang penting untuk melaksanakan proses reduksi.

### 2.3.2 Nitrifikasi

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



Stoikiometri dari transformasi pada persamaan (2.9) dan (2.10) tidak diberikan karena bervariasi terhadap kondisi lingkungan. Akan tetapi, produksi

sel selalu rendah pada kedua reaksi dan pendekatan terbaik diberikan pada persamaan (2.11) dan (2.12).



Nitrifikasi terjadi pada kondisi aerobik, dengan aktivitas optimal pada temperatur mesofilik dan netral terhadap pH alkalin, tanpa pertumbuhan atau aktivitas pada pH asam (Prosser, 1989). Pada kondisi kekurangan oksigen, bakteri nitrifikasi telah diamati dapat melaksanakan reaksi denitrifikasi yang melibatkan NO dan N<sub>2</sub>O pada tanah (Baumgartner dan Conrad, 1992).

## 2.4 *State of The Art* Biofiltrasi

Banyak penelitian telah dilakukan untuk mengkaji proses biofiltrasi dengan menggunakan berbagai jenis medium filter dengan tujuan untuk mereduksi gas polutan yang berbeda-beda. Berbagai jenis medium filter tersebut dapat dikelompokkan menjadi medium alami, medium sintetik, dan campuran antara medium alami serta sintetik. Adanya berbagai penelitian ini dapat menunjukkan penggunaan medium filter yang paling sesuai beserta parameter yang harus diperhatikan untuk mencapai efisiensi reduksi gas polutan tertentu.

### 2.4.1 Biofiltrasi dengan Medium Alami

Beberapa medium alami yang biasa digunakan dalam proses biofiltrasi antara lain adalah kompos, serpihan atau kulit kayu (*bark*), lava, *perlite*, zeolit, atau campuran diantara medium-medium tersebut. Medium alami di atas telah diaplikasikan dalam berbagai proses biofiltrasi, misalnya seperti campuran kompos dan potongan kayu yang telah secara luas digunakan karena bahan-bahan tersebut harganya murah dan banyak tersedia. Beberapa penelitian yang telah mengaplikasikan penggunaan medium alami tersebut sebagai medium filter dalam proses biofiltrasi akan diuraikan di bawah ini.

#### 2.4.1.1 Biofiltrasi NO dengan Medium Kompos dan Serbuk Kayu

Biofiltrasi *bench-scale* kontinu selama 40 hari dilakukan oleh Yang et.al. (2007) dengan memanfaatkan kompos yang ditambahkan *bulking agent*

berupa serpihan kayu Cyatheaceae untuk menurunkan kompaksi, meningkatkan porositas dan ventilasi di dalam medium filter. Gas polutan yang akan dibiofiltrasi berupa gas NO yang dialirkan dari atas kolom biofilter. Variasi yang diteliti oleh Yang et.al. berupa konsentrasi NO, kedalaman medium filter, konsentrasi gas O<sub>2</sub>, dan penambahan nutrisi ke dalam medium filter terhadap efisiensi reduksi gas NO. Adapun nutrisi ditambahkan dengan laju 40mL/hari dari atas kolom biofilter dengan komposisi berupa glukosa (1g/hari) sebagai sumber karbon, nutrisi inorganik yang telah pernah digunakan untuk mengembangkan mikroorganisme nitrifikasi aerobik (pH 8,0), dan kelembaban. Selain itu, untuk menjaga agar pH tetap netral (6,5 – 7,0) dan kelembaban medium filter sebesar 80 ± 10%, dilakukan penambahan buffer ke dalam aliran gas NO masuk ke kolom biofilter.

Pada laju alir gas NO sebesar 30L/jam, konsentrasi NO masukan 200 ppm, dan kandungan oksigen 6%, diperoleh hasil sebagai berikut:

- Jumlah mikroorganisme pada medium filter setelah 6 hari pengoperasian jauh lebih banyak daripada sebelum biofiltrasi. Hal ini mengindikasikan bahwa mikroorganisme dapat memanfaatkan NO sebagai akseptor elektron untuk melakukan metabolisme.
- Kedalaman medium yang lebih tinggi akan menghasilkan reduksi NO yang lebih banyak. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa semakin tinggi medium filter yang digunakan, semakin banyak gas NO yang mengalami kontak dengan mikroorganisme pendennitrifikasi di dalam medium filter, sehingga semakin banyak pula gas NO yang dapat direduksi, ditandai dengan semakin gas polutan menuruni medium filter, konsentrasi gas NO yang terdeteksi semakin berkurang.
- O<sub>2</sub> diindikasikan sebagai inhibitor pada proses reduksi gas NO, di mana pada kondisi anaerobik, efisiensi reduksi gas NO dapat mencapai 99% dibandingkan dengan 55% pada kondisi aerobik.
- Pada kondisi anaerobik dan tanpa pemberian glukosa, kemampuan medium filter dalam mereduksi gas NO semakin berkurang jika konsentrasi gas NO pada aliran masukan biofilter semakin tinggi. Pada kondisi ini, peningkatan konsentrasi gas NO dari 60 hingga 500 ppm

mengakibatkan penurunan efisiensi reduksi dari 88% menjadi 40%. Hal ini mungkin disebabkan oleh jumlah biomassa yang tidak cukup. Penambahan nutrisi untuk biomassa dapat membantu peningkatan efisiensi reduksi gas NO agar sebanding dengan peningkatan konsentrasi NO dalam gas masukan.

- Penambahan sumber karbon eksternal (glukosa) dari atas kolom biofilter dapat mereduksi konsentrasi NO pada kondisi aerobik dan anaerobik secara signifikan. Hal ini diamati berdasarkan sedikitnya jumlah glukosa yang tertinggal dalam medium filter, yang mengindikasikan bahwa materi-materi organik dalam medium filter lebih sulit untuk mengalami degradasi dibandingkan dengan glukosa.

#### 2.4.1.2 Biofiltrasi Amonia dengan Medium Serat Kelapa

Gabriel et al. (2007) melakukan penelitian *full-scale* terhadap karakterisasi dan performa serat kelapa sebagai medium filter dalam reduksi amonia pada pabrik pengolahan limbah. Pemilihan medium filter yang tepat merupakan faktor utama dalam penentuan performansi reaktor karena perkembangan biomassa dan aktivitasnya bergantung pada keadaan dan karakteristik natural dari medium tersebut. Karakteristik utama yang harus diperhatikan dalam memilih medium filter yang sesuai adalah area permukaan spesifiknya, densitas, porositas, pH, kemampuan retensi air, kapasitas *buffer*, dan kandungan medium (Bohn, 1996). Kandungan medium merupakan faktor yang sangat penting sebagai sumber nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan biomassa. Serat kelapa merupakan medium filter yang biasa digunakan di Eropa dalam biofilter *full-scale* untuk penanganan bau karena memiliki kandungan karbon yang cukup tinggi.

Data penelitian diambil selama 10 hari setelah *start-up* biofilter. EBRT dijaga 36 detik pada laju alir gas 10,47 L/menit, dengan adanya penambahan air setiap hari dengan laju alir 0,61 L/hari. Konsentrasi gas amonia yang digunakan adalah 90 ppmv. Air buangan yang dikumpulkan 24 jam setelah pemberian air dianalisa untuk kandungan amonia, nitrit, nitrat, dan pH. Variasi yang diuji adalah konsentrasi gas amonia dan H<sub>2</sub>S masukan (yaitu

pada konsentrasi 45 ppmv, 120 ppmv, dan 240 ppmv) dan EBRT (pada 19 – 36 detik). Data konsentrasi hasil biofiltrasi diambil pada kedalaman 20 cm, 40 cm, 60 cm, dan 80 cm. Kolom biofilter yang digunakan dilengkapi dengan sistem humidifikasi dan pengairan yang telah diatur untuk memberikan kelembaban sebesar 50 – 70%.

Hasil penelitian Gabriel et.al. adalah sebagai berikut:

- Semakin besar luas area permukaan dari medium filter, semakin baik performa medium filter dalam mereduksi gas polutan.
- Kecilnya ukuran pori akan mengakibatkan pertumbuhan biomassa yang semakin tebal, sehingga mengurangi luas permukaan spesifik yang tersedia untuk degradasi polutan.
- Semakin kering medium filter, semakin kecil pula kemampuan retensi airnya, sehingga sangatlah penting untuk menghindari pengeringan dari medium filter agar dapat mempertahankan aktivitas mikroorganisme.
- Akumulasi dari produk samping nitrifikasi dapat menghambat reaksi nitrifikasi, sehingga diperlukan penambahan air secara kontinu untuk membersihkan produk samping agar keluar dari medium filter, selain untuk menjaga kelembaban medium filter.
- Ammonia dengan konsentrasi masukan yang lebih rendah menghasilkan %RE yang lebih rendah. Hal ini disebabkan oleh inhibisi pada nitrifikasi, dibuktikan oleh hasil analisa ammonia, nitrat, dan nitrit pada air buangan kolom biofilter menunjukkan bahwa adanya peningkatan yang signifikan pada konsentrasi nitrit dan terutama ammonia yang bersamaan dengan penurunan nitrat yang dihasilkan setelah eksperimen dengan konsentrasi ammonia 120 ppmv, sama seperti penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Baquerizo pada 2005.
- Peningkatan performansi dapat dicapai dengan meningkatkan laju alir gas polutan dan dengan penambahan nutrisi untuk membantu pertumbuhan mikroorganisme. Namun, risiko *clogging* harus diperhatikan sebagai akibat dari pertumbuhan biomassa dan inhibisi akibat akumulasi produk samping.

- Pada saat penelitian, diketahui bahwa ketinggian medium filter lebih rendah daripada ketinggian total kolom. Hal ini mungkin disebabkan oleh adanya pemadatan serat kelapa.

#### 2.4.1.3 Biofiltrasi VOCs dengan Medium Kompos yang Ditambahkan dengan Material Alam sebagai *Bulking Agent*

Turan et.al. (2008) melakukan biofiltrasi VOCs menggunakan material alam sebagai *bulking agent* untuk mengurangi jumlah VOCs yang dihasilkan selama proses pengomposan kotoran ternak. Material alam yang digunakan adalah zeolit alam, perlite terekspansi, pumice, dan vermiculite terekspansi, yang diisikan sebanyak 10% dari total kotoran ternak tersebut. Semua material alam yang digunakan tersebut dipilih atas dasar sifat fisika dan kimianya yang cocok dan relatif stabil sebagai medium filter, yaitu sebagai adsorben, densitasnya kecil, tidak abrasif, keras, tahan terhadap pembakaran, dan isolator yang baik. Suhu pengomposan dijaga sekitar 45 – 55°C untuk biodegradasi maksimum menggunakan material alam tersebut. Suhu pengomposan maksimum tanpa menggunakan material alam dijaga sebesar 34°C karena kandungan air yang tinggi (di atas 75%) pada kotoran ternak.

Gas polutan yang difiltrasi adalah VOCs berupa senyawa aromatic, alifatik, klorinasi, dan senyawa teroksigenasi. Hasil penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- Pada awal proses pengomposan, yang pertama kali tersaring adalah senyawa teroksigenasi karena senyawa ini mudah didegradasi oleh mikroorganisme. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh adanya peningkatan porositas dari substrat dengan adanya penambahan material alam tersebut. Sebagai hasilnya, peningkatan porositas tersebut meningkatkan proses pengomposan dan kemampuan senyawa organik untuk terbiodegradasi. Senyawa teroksigenasi yang dieliminasi berupa aldehid, keton, ester, dan alkohol. %RE dari senyawa teroksigenasi adalah 78,74% untuk zeolit alam, 62,47% untuk perlite terekspansi, 87,59% untuk pumice, dan 71,30% untuk vermiculite terekspansi.
- Senyawa alifatik meningkat drastis dan menurun dengan drastis pada hari ke-100. Senyawa alifatik hanya akan tereliminasi dengan menggunakan

material alam tersebut. Senyawa alifatik yang dieliminasi berupa heptana, isobutana, pentane, sikloheksana, dan siklopentana. %RE dari senyawa alifatik adalah 81,55% untuk zeolit alam, 56,89% untuk perlite terekspansi, 91,21% untuk pumice, dan 62,10% untuk vermiculite terekspansi.

- Senyawa aromatik yang dieliminasi berupa benzena, toluena, dan pyridine. %RE dari senyawa aromatik adalah 79,93% untuk zeolit alam, 52,77% untuk perlite terekspansi, 84,84% untuk pumice, dan 69,03% untuk vermiculite terekspansi sejak awal proses pengomposan.
- Senyawa terklorinasi hanya tereliminasi di awal proses pengomposan. Senyawa terklorinasi yang dieliminasi adalah 1,1,2-trikloroetana, 1,1,2,2-tetrakloroetana, metil klorida, dan klorobenzena. %RE dari senyawa alifatik adalah 81,55% untuk zeolit alam, 56,89% untuk perlite terekspansi, 91,21% untuk pumice, dan 62,10% untuk vermiculite terekspansi.
- Penghilangan senyawa tersebut merupakan fungsi dari kemampuan terbiodegradasi dari berbagai senyawa yang berbeda dan sifat fisika kimia dari material alam tersebut.
- Potensi penghilangan VOCs oleh material alam memiliki urutan tertinggi ke terendah sebagai berikut: pumice, zeolit alam, vermiculite terekspansi, dan perlite terekspansi.

#### **2.4.1.4 Evaluasi Media Berpori Granular sebagai *Bulking Agent* Pada Proses Pengomposan Kotoran Babi**

Kim et.al. (2007) mengevaluasi visibilitas penggunaan media berpori granular (GPM, *Granular Porous Media*) sebagai *bulking agent* untuk kompos berbasis kotoran babi. Penambahan *bulking agent* dan pengadukan medium filter secara berkala sangatlah penting untuk menjaga pertukaran gas, menjaga homogenitas medium filter, dan menghindari kompaksi. Zat polutan yang akan difiltrasi berupa *Volatile Solid* (VS). Variasi dilakukan pada dua reaktor dengan variasi komposisi *bulking agent* dalam kompos, yaitu reaktor A (kompos dengan *bulking agent* berupa 32,7% GPM) dan reaktor B (kompos

dengan *bulking agent* berupa 17,3% GPM dan 15,4% serbuk gergaji). Adapun serbuk gergaji dipilih sebagai *bulking agent* karena kemampuannya dalam menyerap uap air, kemampuan retensi ammonia yang tinggi, dan kemampuannya dalam mempertahankan porositas. Sedangkan, GPM dipilih karena GPM dapat menyerap uap air sebanyak 1,5 kali beratnya, dan komposisi GPM yang terbuat dari kombinasi Si, Ca, Al, Fe, Mg, dan K yang merupakan nutrisi yang penting bagi perkembangbiakan mikroorganisme, sehingga tidak diperlukan lagi adanya nutrisi tambahan eksternal. Kim et.al. mensintesis GPM dari  $\text{SiO}_2$  (45 – 55%),  $\text{CaO}$  (25 – 35%), dan sedikit  $\text{Al}^{2}\text{O}^3$  (3 – 4%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (1 – 2%),  $\text{MgO}$  (1 – 2%), dan  $\text{K}_2\text{O}$  (0,5 – 1%) pada kondisi hidrotermal 180°C dan 11 atm menggunakan autoklaf dari baja.

Kondisi penelitian Kim et.al. dijaga pada kelembaban 53%, dan pengadukan medium filter dilakukan setiap 15 hari selama pengoperasian 90 hari, dengan sistem tiga kali operasi batch setiap 30 hari. Suhu gas masukan dijaga pada kondisi 60°C untuk menghindari kondisi termofilik ekstrim yang tidak cocok untuk aktivitas mikroorganisme, dan di dasar kolom biofilter dipasang perforated plate untuk memastikan adanya distribusi udara yang merata. Fitotoksisitas sampel akhir ditentukan dengan indeks germinasi (GI, Germination Index) dengan menggunakan sampel kompos tersebut dalam penanaman kubis China (*Brassica campestris subspecies Pekinensis*) dan selada (*Lactuca sativa L.*). Selain itu, dilakukan juga pengujian terhadap parameter fisika dan kimia dari sampel setelah biofiltrasi, dan parameter biologis berupa aktivitas mikroorganisme yang dikaitkan dengan keluaran  $\text{CO}_2$  hasil biofiltrasi per kilogram VS yang ditambahkan setiap harinya.

Hasil penelitian Kim. et.al. adalah sebagai berikut:

- $\text{CO}_2$  total yang dihasilkan pada reaktor A pada selalu lebih besar dari reaktor B pada setiap operasi *batch* yang dilakukan. %RE keseluruhan yang dicapai adalah 38,5% untuk reaktor A dan 29,2% untuk reaktor B. Hal ini dapat dijelaskan sebagai dampak dari perbedaan ukuran partikel GPM (2-4 mm) dengan serbuk gergaji (<2 mm) yang dapat menyebabkan *clogging*. Selain itu, penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Huang et.al. (2004) dan Cegarra et.al. (2006) menunjukkan bahwa pengomposan

selama 60 hari tidak cukup untuk mendegradasi selulosa, hemiselulosa, dan lignin dalam serbuk gergaji, sehingga %RE dan jumlah CO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh reaktor B lebih kecil dibandingkan dengan reaktor A.

- Lebih tingginya %RE dan CO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh reaktor A mengindikasikan keberhasilan GPM dalam meningkatkan efisiensi kelembaban, yang menghasilkan efek katalitik abiotik GPM dan/atau peningkatan aktivitas mikroorganisme.
- Kandungan air pada medium filter yang terukur selama biofiltrasi berada pada jangkauan yang diinginkan (40 – 65%) menjamin visibilitas aktivitas mikroorganisme hingga akhir eksperimen. Hal ini membuktikan keefektifan GPM sebagai *bulking agent*.
- pH yang berkisar antara 7,8 dan 8,6 dalam penelitian ini menunjukkan bahwa kompos ini efektif dalam mendegradasi senyawa asam organik dan terjadi reduksi ammonia dalam sistem aerasi yang dipaksakan. Reduksi ammonia juga dapat diamati dari penurunan kadar nitrogen dari kompos oleh penguapan yang disebabkan adanya aerasi paksa pada pH basa dan suhu termofilik.
- Rasio C/N di akhir *batch* pertama untuk reaktor A dan B berkurang dari 12,6 ke 7,2 dan 16,0 ke 8,4, menghasilkan rasio C/N akhir terhadap rasio C/N awal sebesar 0,79 dan 0,90. Berdasarkan hasil Jimenez dan Garcia (1992), rasio 0,45 hingga 0,85 merupakan indikator kejenuhan kompos, sehingga hasil rasio reaktor B yang lebih tinggi dari reaktor A mengindikasikan bahwa serbuk gergaji lebih lambat mengalami biodegradasi. Sedangkan pada akhir *batch* kedua, rasio reaktor B (0,57) yang hampir sama dengan reaktor A (0,61) mengindikasikan bahwa *bulking agent* pada reaktor B mengalami pengomposan yang lebih cepat dari *bulking agent* pada reaktor A, sehingga dihasilkan kesimpulan bahwa pengomposan *bulking agent* dapat memperpanjang lama waktu pengomposan. Oleh karena itu, GPM memiliki kelebihan dalam mengurangi waktu pengomposan.

- SOC (*Sulphur Organic Compound*) ditentukan sebagai indikator kejenuhan kompos, di mana saat variasi konsentrasi SOC mencapai kestabilan pada pengoperasian, kondisi jenuh pada kompos tercapai.
- Pada evaluasi fitotoksisitas, selada tidak dapat tumbuh berdasarkan hasil perhitungan GI disebabkan adanya inhibisi oleh natrium. Kadar natrium terukur pada reaktor A adalah 408,9 mg/kg di dalam kompos dan pada reaktor B adalah 316,5 mg/kg di dalam kompos, yang mana jauh di atas konsentrasi inhibisi selada sebesar 100 mg/kg. Sementara itu, kubis China menunjukkan nilai GI yang sangat tinggi, jauh di bawah ambang batas resistansinya terhadap natrium (<4000 mg/kg). Namun, hasil pengukuran GI pada akhir *batch* ketiga menunjukkan bahwa nilai GI lebih tinggi dari sebelumnya. Hal ini mengindikasikan bahwa fitotoksisitas dapat berkurang perlahan-lahan. Penurunan pH dan konsentrasi SOC juga sangat berhubungan erat dengan penurunan GI, yang menunjukkan bahwa terjadi degradasi senyawa fitotoksik pada kondisi aerob, sama seperti yang dialami senyawa organik lainnya.

#### **2.4.1.5 Biofiltrasi VOCs dengan Medium Kompos, Lava, dan Tanah**

Liu et al. (2004) melakukan penelitian biofiltrasi *full-scale* terhadap polutan berkonsentrasi tinggi berupa toluene, etil asetat, dan isopropanol yang berasal dari emisi industri percetakan dengan menggunakan medium filter berupa kompos, lava, dan tanah yang mengandung senyawa humus, untuk membandingkan efektivitas kompos sebagai medium filter. Selain itu, efek dari pH, kandungan nitrogen, dan rekonstruksi media filter pada kinerja biofilter juga diteliti untuk mencari nilai optimum media pH dan kandungan nitrogen yang diperlukan pada operasi biofilter.

Pembuatan medium filter berupa campuran kompos yang mengandung 30% pupuk kompos babi, 30% kompos yang diproduksi oleh laboratorium lain dalam tempat penelitian, dan 40% endapan yang kering sekali dari pabrik pengolahan limbah disimpan di dalam tong selama 3 bulan di dalam laboratorium dan disaring untuk memindahkan kotoran dan partikel flok yang besar sebelum digunakan. Medium filter ini diinokulasi dengan campuran cairan endapan teraktivasi dari fasilitas pengolahan air limbah di *Dalian*

*Chemical Industry Corporation* yang telah dikultivasi dengan etil asetat dan toluene selama 20 hari.

Dari hasil yang diperoleh, dapat diketahui bahwa etil asetat dan isopropanol dapat direduksi secara keseluruhan dengan biofilter, namun efisiensi reduksi toluene bervariasi antara 40 dan 100%, walaupun pada kenyataannya konsentrasi inlet toluene relatif rendah. Selain itu, hanya sedikit atau tidak ada reduksi toluene yang terjadi pada lokasi di mana konsentrasi etil asetat dan isopropanol tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa kehadiran konsentrasi tinggi dari etil asetat dan isopropanol menghambat biodegradasi toluene.

Tiga faktor yang diasumsikan menyebabkan penurunan performansi biofilter antara lain adalah pemadatan media/*channeling*, pengasaman, dan pembatasan nutrisi. Setelah beberapa waktu operasi, *clogging/channeling* akan terjadi pada media filter dan biasanya menyebabkan pemadatan media sepanjang aliran udara atau pembentukan biomassa dalam jumlah berlebihan. Proses pencegahan biofilter dari *clogging/channeling* meliputi pendekatan fisik/mekanik, kimia, biologi.

#### **2.4.2 Biofiltrasi dengan Medium Sintetik**

Selain medium alami, beberapa penelitian mengenai proses biofiltrasi juga dilakukan dengan menggunakan medium sintetik. Kelebihan dari penggunaan medium sintetik ini apabila dibandingkan dengan medium alami adalah efisiensi reduksi yang dihasilkan akan lebih tinggi dan juga lebih efisien. Namun, penggunaan medium sintetik ini tergolong mahal.

##### **2.4.2.1 Biofiltrasi NO<sub>x</sub> dengan Medium Filter Berupa *Carbon-Foam***

Chang (2006) menggunakan medium filter berbasis *carbon foam* dengan memvariasikan tiga jenis ukuran diameter porinya untuk mengetahui batas dimensi pori yang cukup besar agar biofilm tidak menghalangi aliran udara kontaminan berupa NO<sub>2</sub> dan NO dengan konsentrasi 100 – 200 ppm yang dicampurkan dengan udara masukan kolom biofilter untuk membentuk nitrit dan nitrat. Variasi ukuran *carbon foam* yang digunakan adalah 20, 45, dan 60 PPI (*pore per inch*). Selain itu, dilakukan pengukuran laju konversi

$\text{NO}^2\text{-N}$  menjadi  $\text{NO}^3\text{-N}$  dengan hasil bahwa pertumbuhan mikroorganisme penitrifikasi dibuktikan oleh terjadinya konversi tersebut. Untuk mengevaluasi kinerja medium filternya, dilakukan pengukuran laju nitrifikasi fasa liquid berdasarkan hasil pengukuran %RE pada laju nitrifikasi fasa gas. Variasi yang diteliti Chang adalah pengaruh EBRT (0,6 menit, 1 menit, dan 1,5 menit) terhadap EC dan %RE pada masing-masing variasi *carbon foam* tersebut. Pada penelitian ini diberikan pospat sebagai *trace nutrient* sekaligus buffer selama 10 jam per hari.

Pada laju alir campuran gas NO dan udara sebesar 40mL/menit, diperoleh hasil sebagai berikut:

- Pada konsentrasi NO dalam gas masukan sebesar 40 ppm, carbon foam 60 PPI memiliki EC tertinggi karena memiliki luas permukaan terbesar untuk tempat menempelnya biofilm.
- Untuk konsentrasi gas masukan  $\leq 100$ ppm, %RE dan EC dari carbon foam 20 PPI adalah yang terbesar, tapi hanya berbeda sedikit saja.
- Untuk konsentrasi gas masukan  $\approx 300$ ppm, EC pada carbon foam 60 PPI merupakan yang terbaik.
- Untuk EBRT mendekati 6 menit, %RE NO tertinggi dicapai oleh carbon foam 20 PPI, yaitu 35%. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi EBRT, %RE yang lebih tinggi dapat dicapai oleh medium dengan jumlah pori yang lebih sedikit akan lebih tinggi karena EBRT yang lebih lama dapat mengakomodasi difusi gas yang lebih tinggi pada medium dengan pori yang lebih kecil. Hal ini disebabkan oleh adanya kemungkinan bahwa untuk medium dengan jumlah pori yang lebih banyak, lebih banyak air yang terperangkap di dalam pori-pori tersebut sehingga mengurangi luas permukaan biofilm.
- Dalam penelitian ini, terdapat inkonsistensi, yaitu dicapainya %RE yang lebih tinggi oleh carbon foam 20 PPI dibandingkan dengan carbon foam 60 PPI pada variasi EBRT. Hal ini dianalisa oleh Chang sebagai adanya kemungkinan bahwa lama waktu direaksikannya (sebanding dengan EBRT) gas oleh bakteri tidak cukup.

- Selain itu, Chang menyimpulkan bahwa untuk EBRT gas biofilter autotrofi yang kecil, bioreactor dengan tipe packed bed tidak ekonomis karena %RE yang dapat dicapai kecil.

### **2.4.3 Biofiltrasi dengan Campuran Medium Alami serta Sintetik**

Campuran medium alami serta sintetik juga telah diaplikasikan dalam penelitian biofiltrasi lainnya. Adapun tujuan dari pencampuran kedua medium ini adalah untuk mencapai efisiensi reduksi yang tinggi, namun medium yang digunakan tidak terlalu mahal. Berikut adalah beberapa penelitian biofiltrasi yang telah dilakukan dengan menggunakan campuran medium alami dan sintetik.

#### **2.4.3.1 Biofiltrasi Emisi Gas Berbau menggunakan Medium Filter yang Diformulasikan dan Pengaruh Sifat Fisis dan Kimianya**

Gaudin et.al. (2007) memformulasikan medium filter yang tidak perlu diberikan nutrisi tambahan dalam mereduksi emisi gas berbau. Medium filter yang baru dengan komposisi utama berupa kalsium karbonat dan dua macam variasi sumber nutrisi (ammonia dipospat dan urea pospat) dan senyawa pengikat organik berupa campuran etilen dan vinyl asetat dibuat berbentuk silinder dengan *mixing* bubuk garam selama 15 menit, kemudian pengikat organik tersebut dimasukkan bersama campuran senyawa yang digunakan ke dalam air sebanyak 66% berat campuran senyawa garam tersebut. Setelah itu, campuran tersebut dicetak berbentuk granul dan dikeringkan pada 50°C selama 20 jam. 8 jenis medium filter dibuat dalam penelitian ini divariasikan berdasarkan komposisi dari ammonia dipospat (Am) dan urea pospat (UP) yang divariasikan sedemikian sehingga rasio molar C:N:P bernilai 100:10:5, dengan hasil medium filter sintesisnya adalah Am, Am 1, Am 5, Am 10, UP 10, UP 15, UP 20, dan UPt 20 (hanya UPt 20 yang ditambahkan dengan buffer pospat). Indeks angka di belakang nama medium filter tersebut menunjukkan %berat dari senyawa pengikat organik yang ditambahkan. Adapun UP, Am, dan senyawa pengikat organik tersebut dipilih karena kapasitas kohesinya dalam air, densitas partikelnya, porositas, kapasitas retensi air,

pelepasan nutrisi, dan pH. Setelah formulasi medium filter, dilakukan pengukuran karakteristik mekanisnya berupa porositas, kohesi mekanis dalam air, kapasitas retensi uap air, dan densitas partikelnya. Medium filter kemudian diinokulasikan dengan biomassa dari lumpur teraktivasi yang berasal dari pabrik pengolahan limbah dan larutan sukrosa selama 1 bulan, dan nantinya dibandingkan dengan medium filter yang tidak diinokulasikan untuk mengevaluasi adsorpsi yang terjadi pada medium filter. Adapun medium filter yang memiliki ketahanan fisika dan kimia terbaik setelah direndam selama 6 bulan akan dibandingkan kinerja biofiltrasinya dengan atau tanpa penambahan medium filter alami berupa kulit pinus, mewakili material organik, dipilih berdasarkan sifat fisisnya yang baik dan pozzolan, mewakili material anorganik, dipilih berdasarkan sifat mekanisnya yang baik. Penambahan medium filter alami tersebut sebesar 50 – 50% berat. Gas polutan yang digunakan dan lama waktu pengoperasiannya adalah H<sub>2</sub>S (selama 93 hari) dan NH<sub>3</sub> (selama 48 hari), dengan konsentrasi masing-masing sebanyak 100 mg/L.

Medium filter sintesis tersebut dievaluasi sifat fisis, mekanis, kimia, dan mikrobiologisnya, dan medium filter sintesis yang menunjukkan hasil terbaik akan digunakan sebagai medium filter dalam biofiltrasi. Sifat fisis yang diukur berupa porositas dan densitas partikel, dan sifat mekanis yang diukur berupa kohesi mekanis dalam air dan kapasitas retensi uap air. Kohesi mekanis dalam air ditentukan sebagai waktu yang diperlukan hingga 10 g medium filter sintesis mulai terurai saat direndam dalam 500mL air, dan kemampuan retensi uap air dievaluasi sebagai massa air yang ditahan per massa granul kering setelah direndam 24 jam dalam air. Sifat kimia yang diukur adalah kapasitas kohesi air melalui pelepasan nutrisi dari medium filter tersebut saat direndam dan diaduk terus-menerus agar homogen dalam 500mL air deionisasi. Pengukuran nutrisi yang terlepas dilakukan setiap 24 jam sekali. Medium filter dengan laju kelarutan yang rendah selama setidaknya 6 bulan akan dipilih, karena mencerminkan jangka waktu efektif dari pemakaian medium filter tersebut. Sifat mikrobiologis dari medium filter diukur berdasarkan jumlah mikroorganisme yang berkembangbiak pada medium filter tersebut setelah diinokulasikan selama 1 bulan.

Hasil dari penelitian Gaudin et.al. sebagai berikut:

- Peningkatan %massa senyawa pengikat organik akan mengakibatkan peningkatan densitas medium filter dan penurunan kapasitas retensi uap air. Kapasitas retensi uap air medium filter sintesis ini berkisar 47 – 69%.
- Densitas medium filter yang disintesis pada penelitian ini sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan densitas medium filter tradisional.
- Hasil pengukuran porositas yang berkisar antara 309 – 351 nm untuk Am dan 446 – 517 nm untuk UP menunjukkan bahwa nilai tersebut lebih kecil dari rata-rata panjang sel mikroorganisme, sehingga penempelan biomassa hanya dapat berlangsung pada permukaan granul medium filter saja.
- Pengukuran sifat mekanis menunjukkan bahwa Am 5, Am 10, UP 20, dan UPt 20 tidak menunjukkan kehancuran setelah direndam selama 6 bulan, menandakan kapasitas kohesi air yang baik pada keempat medium filter tersebut dan peranan senyawa pengikat organik dalam membantu meningkatkan kapasitas kohesi air pada medium filter. Semakin tinggi %massa senyawa pembatas organik tersebut, semakin tinggi juga kapasitas kohesi airnya, dan semakin kecil kapasitas retensi uapnya. Oleh karena itu, keempat jenis medium filter sintesis inilah yang digunakan untuk uji sifat kimia dan mikrobiologi.
- pH dasar dari seluruh medium filter sintesis ini adalah 8.0 – 9.0 (tidak pada kisaran pH optimum), namun cukup untuk menghalangi pengasaman medium filter saat proses biofiltrasi. Selain itu, pencampuran dengan medium filter yang bersifat asam (seperti kulit pinus) dapat menetralkan pH-nya.
- Pengukuran sifat kimia dari Am 5, Am 10, UP 20, dan UPt 20 menunjukkan bahwa Am menghasilkan emisi ammonia, sehingga urea lebih dipilih sebagai sumber nitrogen. Rendahnya laju kelarutan pospor dan nitrogen pada kontak solid-liquid dan homogenitas pelepasannya setelah kontak solid-liquid yang pertama (di atas 24 jam) dapat menunjukkan jangka waktu pemakaian efektif dari medium filter sintesis, dan laju kelarutan tersebut mencapai kestabilan setelah 24 jam, sehingga jangka waktu tersebut dapat disebut sebagai *minimum dissolution level*. Dengan mempertimbangkan sifat fisis dan sifat mekanisnya, dipilih UP 20

sebagai medium filter sintesis terbaik untuk kemudian diuji secara mikrobiologinya.

- Pada uji mikrobiologis, efek dari pertumbuhan biomassa yang diinokulasikan selama 1 bulan dievaluasi untuk UP 20, kulit pinus, pozzolan, kombinasi UP 20/kulit pinus (50-50% berat), dan kombinasi UP 20/pozzolan (50-50% berat). Didapatkan bahwa seluruh medium filter tersebut menghasilkan konsumsi oksigen yang sangat kecil (1mg/L), kecuali pada kulit pinus (2mg/L) karena merupakan penyuplai karbon organik terbaik. Namun, medium sintesis menunjukkan bahwa tidak ada efek inhibisi terhadap pertumbuhan biomassa. Medium filter berupa UP 20/pozzolan menghasilkan pertumbuhan mikroba tercepat karena pH-nya yang netral dibandingkan dengan UP 20/kulit pinus dan UP 20 yang pH-nya basa, dan kulit pinus beserta pozzolan yang pH-nya asam.
- Reduksi ammonia dari penyangga terbesar dihasilkan oleh kulit pinus yang memiliki jumlah mikroorganisme terbanyak. UP 20 menghasilkan sedikit konsumsi ammonia, sedangkan pozzolan tidak menunjukkan konsumsi ammonia yang signifikan karena tidak memiliki kandungan nutrisi. Penambahan UP 20 ke pozzolan hanya meningkatkan sedikit konsumsi ammonia pada medium filter.
- Penambahan kulit pinus ke dalam medium filter sintesis dapat menghasilkan kondisi pH yang lebih baik untuk metabolisme biomassa.
- UP 20 tidak dapat digunakan sendirian, dan sebaiknya dikombinasikan dengan kulit pinus untuk mendapatkan efisiensi reduksi yang lebih tinggi jika diimplementasikan pada biofiltrasi.
- Penambahan pozzolan tidak memengaruhi biodegradasi ammonia, tapi dapat meningkatkan resistansi mekanis dari medium filter.
- Sama seperti pada ammonia, biodegradasi H<sub>2</sub>S tertinggi juga dihasilkan oleh UP 20/ kulit pinus karena hanya pH medium filter tersebut yang berada pada jangkauan pH netral (7,6 – 7,7). Hal ini menjelaskan bahwa %RE optimum dapat dicapai pada pH sekitar 7,0 – 8,0, di mana aktivitas optimum bakteri berada pada kisaran pH tersebut.

- Pada biofiltrasi H<sub>2</sub>S, UP 20, UP 20/pozzolan, dan kulit pinus menghasilkan %RE yang cenderung sama pada konsentrasi H<sub>2</sub>S sebesar 50 g/L. Namun signifikansi %RE baru terlihat pada peningkatan konsentrasi H<sub>2</sub>S menjadi sebesar 100 g/L dan 200 g/L, di mana %RE UP 20 cenderung stabil, sementara kulit pinus dan UP 20/pozzolan menunjukkan penurunan %RE yang drastis.
- UP 20 menunjukkan kapasitas buffer pH yang baik dengan pH cenderung stabil selama pengoperasian biofiltrasi H<sub>2</sub>S hingga 93 hari, sementara UP 20/pozzolan dan kulit pinus mengalami penurunan pH yang drastis akibat pengasaman medium filter oleh pembentukan sulfat sebagai produk samping biofiltrasi.
- Biofiltrasi ammonia tidak menunjukkan perbedaan %RE yang signifikan pada UP 20, kulit pinus, dan UP 20/pozzolan, yaitu sebesar 100%.
- UP 20 dapat memberikan keuntungan yang tinggi dengan adanya suplai nutrisi untuk perkembangbiakan biomassa dan efek buffer dalam biofiltrasi H<sub>2</sub>S berkonsentrasi tinggi untuk jangka waktu yang lama.

#### 2.4.3.2 Biofiltrasi N<sub>2</sub>O dengan Medium Kompos dan Serpihan Kayu

Penelitian biofiltrasi skala laboratorium terhadap gas N<sub>2</sub>O dengan menggunakan medium filter berupa serpihan kayu dan pupuk kandang telah dilakukan oleh Simanjuntak (2008). Kultur inokulum yang digunakan berupa campuran air limbah dari kandang binatang dengan medium denitrifikasi. Variasi yang dilakukan adalah kedalaman medium, laju alir, dan penggunaan nutrisi terhadap efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O. Gas N<sub>2</sub>O disirkulasi selama 6 jam menggunakan pompa peristaltik pada kolom biofilter dengan diameter 8 cm dan tinggi 50 cm, lalu sampel gas diambil setiap 1 jam dengan menggunakan *syringe* 1mL, dan dianalisa dengan GC. Uji biofiltrasi dilakukan dengan variasi ketinggian 10, 15, 25, dan 50 cm pada laju alir 50 cc/menit, variasi laju alir 25; 32,14; 50; 100; dan 150 cc/menit pada ketinggian terbaik, dan membandingkan %RE dengan dan tanpa penggunaan nutrisi pada ketinggian dan laju alir terbaik.

Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan bahwa efisiensi reduksi tertinggi diperoleh pada kedalaman medium filter tertinggi yaitu 50 cm,

dengan efisiensi reduksi 67,86%. Hal ini disebabkan oleh lamanya waktu kontak antara pupuk dan gas  $N_2O$ . Selain itu, jumlah mikroba pendenitrifikasi yang terdapat dalam media biofilter dengan panjang kolom tertinggi 50 cm akan lebih banyak apabila dibandingkan dengan kedalaman medium yang lebih rendah.

Sementara itu, efisiensi reduksi tertinggi sebesar 70,22% diperoleh pada laju alir gas  $N_2O$  tertinggi (200 cc/menit). Hal ini karena frekuensi gas  $N_2O$  dalam proses sirkulasi menjadi lebih banyak. Pada laju alir sirkulasi gas  $N_2O$  yang lebih tinggi, frekuensi sirkulasi aliran gas lebih di dalam sistem akan lebih banyak untuk jangka waktu pengoperasian yang sama, sehingga waktu kontak akumulatif antara gas dan medium biofilter lebih lama. Saat gas keluar dari kolom biofilter, aliran gas  $N_2O$  yang berlaju alir tinggi langsung bersirkulasi masuk ke atas kolom biofiltrasi dengan lebih cepat. Hal ini memungkinkan gas  $N_2O$  mengalami proses adsorpsi lebih banyak pada laju alir sirkulasi gas  $N_2O$  yang lebih tinggi dibandingkan dengan laju alir sirkulasi gas  $N_2O$  lebih rendah.

Penambahan nutrisi sintetik yang dilakukan pada ketinggian 50 cm dan laju alir 200 cc/menit menghasilkan efisiensi reduksi tertinggi sebesar 91,49%, sedangkan efisiensi reduksi tanpa penambahan nutrisi hanya sebesar 70,217 %. Nutrisi yang digunakan dalam penelitian ini mengandung unsur C, N, dan P (C:N:P = 100:10:1 dalam 1 liter air). Ketiga unsur ini merupakan tiga nutrisi utama (makronutrien) yang dibutuhkan oleh bakteri dalam melakukan metabolisme sel untuk menghasilkan senyawa-senyawa yang penting dalam pertumbuhan bakteri. Nutrisi ini juga memungkinkan adanya perkembangan jumlah bakteri pendenitrifikasi di dalam pupuk.

#### **2.4.3.3 Biofiltrasi $N_2O$ dengan Medium Kompos dari Kotoran Kambing**

Penelitian biofiltrasi skala laboratorium terhadap gas  $N_2O$  juga telah dilakukan oleh Adriaty (2009) dengan menggunakan medium filter berupa kompos yang terdiri dari kotoran kambing sebagai pupuk kandang yang dicampur dengan sekam, sampah rumah tangga, *cocopeat* (sabut kelapa yang telah dikeringkan dan dihancurkan), gula pasir, kapur dan dedak. Variasi yang dilakukan adalah laju alir gas dan kandungan air pada medium filter. Selain itu, dilakukan juga penambahan nutrisi alami dan sintetik untuk diperbandingkan

pengaruhnya terhadap efisiensi biofiltrasi. Penelitian biofiltrasi ini dilakukan selama 9 jam dengan sistem aliran *batch*. Konsentrasi  $N_2O$  hasil dari biofiltrasi dianalisis dengan GC, sedangkan perkembangbiakan mikroorganisme di dalam kompos setelah biofiltrasi dianalisis dengan metode *Total Plate Count* (TPC).

Uji biofiltrasi dilakukan dengan variasi laju alir 72, 88, 105, 127, 186, dan 233 cc/menit pada ketinggian 50 cm. Penggunaan ketinggian ini berdasarkan pada hasil ketinggian optimum dalam mereduksi  $N_2O$  yang telah diperoleh Simanjuntak (2008). Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi reduksi  $N_2O$  terbaik sebesar 56,7% didapatkan pada laju alir terkecil yaitu 72 cc/menit. Efisiensi reduksi gas  $N_2O$  cenderung meningkat pada laju alir yang semakin kecil karena waktu tinggal gas  $N_2O$  dalam medium filter menjadi lebih lama sehingga waktu kontak antara gas  $N_2O$  dan medium biofilter juga lebih lama. Akibatnya, intensitas gas  $N_2O$  mengalami proses adsorpsi dan degradasi lebih banyak daripada laju alir gas  $N_2O$  yang lebih tinggi.

Sementara itu, efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada kandungan air 60 % (w/w) dengan besar efisiensi sebesar 70,13 %. Hal ini disebabkan oleh pengaruh kelembaban *biofilm* yang lebih besar dibandingkan penggunaan kompos kering. Daerah *biofilm* pada partikel medium filter adalah daerah aerobik dan berfasa cair serta merupakan tempat mikroba melakukan proses biodegradasi terhadap polutan yang mengalir. Selain itu, *biofilm* juga menyediakan nutrisi penting untuk aktivitas biologis serta dapat menjaga kelembaban bagi pertumbuhan bakteri.

Penambahan nutrisi dilakukan pada ketinggian medium filter 50 cm, laju alir 72 cc/menit, dan penambahan kandungan air optimum sebesar 60% (w/w) kompos. Nutrisi yang ditambahkan dilarutkan sebanyak volume air terbaik yang telah diperoleh dalam percobaan. Nutrisi alami yang ditambahkan berupa limbah cair dari peternakan sapi, sedangkan nutrisi sintetis yang digunakan merupakan nutrisi yang pernah digunakan oleh Yang et.al. (2007), yang terdiri dari larutan nutrisi dan *trace element*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa penggunaan nutrisi baik alami maupun sintetis dapat meningkatkan efisiensi reduksi  $N_2O$ . Namun, adanya penambahan *Nitrobacter, sp* dan nutrisi sintetis pada kompos dapat meningkatkan efisiensi reduksi  $N_2O$  2,2% lebih tinggi dibandingkan nutrisi alami. Dapat disimpulkan bahwa kinerja biofilter pada penelitian ini dapat mencapai efisiensi

reduksi sebesar 75,9 % dengan ketinggian medium 50 cm, laju alir  $N_2O$  72 cc/menit, kandungan air 60% dan penambahan nutrisi sintetik serta *Nitrobacter, sp* pada kompos sebagai medium filter.

#### **2.4.3.4 Pengaruh Kedalaman Medium dan Laju Alir Gas pada Biofiltrasi $N_2O$ dengan Medium Kompos Kotoran Sapi**

Penelitian ini dilakukan oleh Noviani (2009) menggunakan medium filter kompos kotoran sapi dengan *bulking agent* berupa *cocopeat* dan sekam beras. Variasi yang dilakukan adalah laju alir gas dan kedalaman medium filter selama 9 jam dengan sistem aliran *batch*. Variasi laju alir yang dilakukan sama seperti variasi laju alir yang dilakukan oleh Adriaty (2009) yaitu 72, 88, 105, 127, 186, dan 233 cc/menit, dan variasi kedalaman yang dilakukan adalah 50, 60, 70, 80, dan 100 cm.

Hasil penelitian Noviani menunjukkan penurunan konsentrasi  $N_2O$  yang semakin rendah untuk laju alir yang semakin besar. Hal ini dikarenakan laju alir tersebut sangat besar sehingga waktu tinggal di dalam medium filter tidak lama. Berdasarkan pernyataan di atas, maka seharusnya laju alir yang semakin kecil akan menghasilkan penurunan konsentrasi  $N_2O$  yang lebih besar. Namun, hal ini tidak diperoleh dalam percobaan karena laju alir terkecil yang digunakan yaitu 73 cc/menit terlalu kecil sehingga *flowmeter* tidak stabil. Gas polutan dengan emisi yang sering berfluktuasi dapat menyebabkan kerusakan pada populasi mikroba biofilter dan kinerja keseluruhan. Akibatnya, penurunan konsentrasi yang dihasilkan tidak sebesar pada laju alir 88 cc/menit. Efisiensi reduksi tertinggi diperoleh pada jam ke-9 terdapat pada laju alir gas  $N_2O$  103 cc/menit dengan efisiensi reduksi sebesar 70,1%. Namun, pemilihan laju alir optimal untuk menghasilkan efisiensi reduksi  $N_2O$  tertinggi tidak hanya didasarkan pada hasil efisiensi reduksi yang diperoleh pada jam ke-9 melainkan juga melalui pengamatan terhadap profil efisiensi reduksi yang stabil dan dapat menghasilkan efisiensi reduksi tinggi. Oleh karena itu, laju alir gas  $N_2O$  optimal yang dipilih adalah 88 cc/menit dengan efisiensi reduksi sebesar 61,3%. Sementara itu, hasil penelitian variasi kedalaman medium menunjukkan %RE tertinggi sebesar

61,30% pada kedalaman terendah (50 cm), bukan pada kedalaman tertinggi yang memiliki jumlah mikroorganisme lebih banyak. Rendahnya %RE pada kedalaman 100 cm dianalisa sebagai dampak *channeling* akibat penggunaan *perforated plate* yang tidak efektif di tengah kolom.

#### **2.4.3.5 Biofiltrasi N<sub>2</sub>O dengan Medium Kompos Kotoran Sapi Biofiltrasi N<sub>2</sub>O dengan Medium Kompos Kotoran Sapi serta Pengaruh Kelembaban Medium terhadap Kinerja Biofilter**

Penelitian ini dilakukan oleh Filayuri (2009) menggunakan bahan yang sama seperti Noviani (2009), yaitu medium filter kompos kotoran sapi dengan *bulking agent* berupa *cocopeat* dan sekam beras. Variasi yang dilakukan adalah kelembaban medium filter selama 9 jam dengan sistem aliran *batch*. Variasi kelembaban yang dilakukan adalah 30%, 50%, 60%, dan 70% (w/w) berat kompos pada kedalaman 50 cm dan laju alir 88 cc/menit sebagai parameter optimum hasil penelitian Noviani (2009). Dalam penelitian Filayuri, juga dilakukan analisa perkembangan mikroorganisme dengan metode TPC.

Kompos yang ditambahkan air sebanyak 60% dan 70% berat kompos membuat medium filter terlalu banyak air atau kelembaban yang tinggi. Hal tersebut akan menghalangi transfer oksigen dan polutan hidrofobik ke dalam *biofilm*, munculnya zona anaerobik dalam medium filter, menghambat laju reaksi, adanya tekanan balik karena pengurangan volume ruang kosong, dan kompaksi medium. Efisiensi reduksi terbaik sebesar 61% dengan kondisi fisis yang baik diperoleh kompos dengan kelembaban 50%. Adapun hasil perhitungan metode TPC menunjukkan peningkatan jumlah mikroorganisme setelah biofiltrasi.

#### **2.4.4 Ringkasan State of The Art**

Gambar 2.8 berikut menunjukkan sejarah penelitian biofilter yang telah dilakukan di berbagai negara dalam mereduksi berbagai gas polutan antara lain emisi bau, ammonia, H<sub>2</sub>S, VOCs, hingga NO<sub>x</sub> yang kini sedang dikembangkan. Penelitian biofilter dalam mereduksi NO<sub>x</sub> dapat dilihat pada Gambar 2.9, di mana pada penelitian yang dilakukan oleh Chang (2006) menggunakan medium filter sintetik berupa *carbon foam* dalam mereduksi NO dan NO<sub>2</sub>, diperoleh bahwa

EBRT yang tinggi akan dapat menghasilkan %RE yang lebih tinggi pula. Sementara itu, Yang et al. (2007) menggunakan medium filter alami berupa kompos babi dengan memvariasikan parameter operasi seperti ketinggian medium, konsentrasi gas polutan, kandungan oksigen, dan penambahan nutrisi untuk medium filter, efisiensi reduksi yang dihasilkan adalah sebesar 60% untuk kondisi aerobik, dan 99% untuk kondisi anaerobik.

Biofiltrasi gas  $N_2O$  dengan menggunakan medium filter alami, pertama kali dilakukan di Departemen Teknik Kimia UI dengan menggunakan serpihan kayu dan pupuk kandang sebagai medium filter untuk sistem aliran sirkulasi 6 jam (Simanjuntak, 2008). Selanjutnya, Adriaty (2009) melakukan biofiltrasi  $N_2O$  dengan sistem aliran *batch* 6 jam menggunakan medium filter kompos yang terdiri dari kotoran kambing, sampah rumah tangga, dan *cocopeat*. Noviani (2009) dan Filayuri (2009) juga melakukan biofiltrasi dengan medium kompos sapi yang ditambahkan *cocopeat* dan sekam beras sebagai *bulking agent* dengan aliran *batch* selama 9 jam. Saat ini, biofiltrasi  $N_2O$  akan dilakukan dengan menggunakan medium filter berupa kompos yang terdiri dari kotoran kambing, sekam beras, dan *cocopeat* selama 12 jam.

## Emisi Gas

<b>N<sub>2</sub>O</b>				<b>Penelitian ini (batch 12 jam; kompos kambing), 2010</b> Noviani, 2009 (batch 9 jam; kompos sapi) Filayuri, 2009 (batch 9 jam, kompos sapi) Adriaty, 2009 (batch 6 jam; kompos kambing) Simanjuntak, 2008 (Sirkulasi)
<b>NO</b>	Chang, 2006			Yang, 2007
<b>NO<sub>2</sub></b>	Chang, 2006			
<b>VOCs</b>			Liu, 2004 Turan, 2008	
<b>VS</b>	Kim, 2007			
<b>H<sub>2</sub>S</b>		Gaudin, 2007		
<b>Ammonia</b>		Gaudin, 2007	Gabriel, 2007	
<b>Emisi Bau</b>			Chen, 2008	
	<b>Sintetik</b>	<b>Sintetik+Alami</b>	<b>Alami</b>	<b>Kompos</b>

**Jenis Medium Filter**

Gambar 2.8 Mapping State of The Art biofilter terhadap berbagai emisi gas polutan

**Gas NO<sub>x</sub>**

<b>N<sub>2</sub>O</b>				Penelitian ini, 2010 ( <i>batch</i> 12 jam; kompos kambing) Noviani, 2009 ( <i>batch</i> 9 jam; kompos sapi) Simanjuntak., 2008 (sirkulasi)	Adriaty, 2009 ( <i>batch</i> 6 jam; kompos kambing) Simanjuntak, 2008 (sirkulasi)	Penelitian ini, 2010 ( <i>batch</i> 12 jam; kompos kambing)		Noviani, 2009 ( <i>batch</i> 9 jam; kompos sapi) Adriaty, 2009 ( <i>batch</i> 6 jam; kompos kambing) Simanjuntak, 2008 (sirkulasi)	Filayuri, 2009 ( <i>batch</i> 9 jam; kompos sapi) Adriaty, 2009 ( <i>batch</i> 6 jam; kompos kambing)
<b>NO</b>	Chang, 2006	Chang, 2006	Yang, 2007	Yang, 2007	Yang, 2007		Yang, 2007		
<b>NO<sub>2</sub></b>	Chang, 2006	Chang, 2006							
	<b>Diameter Pori Medium</b>	<b>EBRT</b>	<b>Konsentrasi Gas Polutan</b>	<b>Kedalaman Medium</b>	<b>Penambahan Nutrisi</b>	<b>Masa Inkubasi Nutrisi</b>	<b>Kandungan Oksigen</b>	<b>Laju Alir</b>	<b>Kandungan Air</b>

**Parameter Operasi**

Gambar 2.9 Mapping State of The Art biofilter terhadap gas NO<sub>x</sub>

Tabel 2.5 di bawah ini menunjukkan ringkasan terhadap berbagai penelitian biofiltrasi yang telah diuraikan di atas.

Tabel 2.5 Ringkasan berbagai penelitian biofiltrasi

Peneliti	Polutan	Medium Filter	Hasil	Kondisi pada Efisiensi Tertinggi
Liu et.al (2004)	Toluena, etil asetat, dan isopropanol,	Kompos, lava, dan sejenis tanah yang mengandung banyak humus	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reduksi Etil Asetat dan Isopropanol , <math>load &lt; 200 \text{ g m}^{-3}</math> dan <math>120 \text{ g m}^{-3}</math> medium <math>\text{jam}^{-1}</math></li> <li>- <u>Setelah beberapa waktu operasi, <i>clogging/channeling</i> akan terjadi pada media filter dan biasanya menyebabkan pemadatan media sepanjang aliran udara atau pembentukan biomassa dalam jumlah berlebihan.</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- %RE isopropanol = 100%</li> <li>- %RE etil asetat = 100%</li> <li>- %RE toluena = 40%-100%</li> </ul>
Kim et.al. (2007)	<i>Volatile Solid</i> (VS)	Kompos babi yang diisikan <i>bulking agent</i> berupa: <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Granular porous media</i> (GPM)</li> </ul> sebanyak 32,7% untuk	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CO<sub>2</sub> total yang dihasilkan pada reaktor A pada selalu lebih besar dari reaktor B pada setiap operasi <i>batch</i> yang dilakukan. Hal ini dapat dijelaskan bahwa <u>perbedaan ukuran partikel GPM (2-4 mm) dengan serbuk gergaji (&lt;2 mm) pada reaktor B dapat menyebabkan <i>clogging</i>.</u></li> <li>- Lebih tingginya %RE dan CO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh reaktor A mengindikasikan <u>keberhasilan</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- %RE total reaktor A = 38,5%</li> <li>- %RE total reaktor B = 29,2%</li> <li>- <i>Water content</i> = 40 – 65%</li> </ul>

		<p>reaktor A</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 17,3% GPM beserta 15,4% serbuk gergaji untuk reaktor B</li> </ul>	<p>GPM dalam meningkatkan efisiensi <u>kelembaban</u> yang menghasilkan efek katalitik abiotik GPM dan/atau peningkatan aktivitas mikroorganisme. <u>Kandungan air pada medium filter yang terukur selama biofiltrasi berada pada jangkauan yang diinginkan menjamin visibilitas aktivitas mikroorganisme hingga akhir eksperimen.</u> Hal ini membuktikan keefektifan GPM sebagai <i>bulking agent</i>.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- pH yang terukur menunjukkan bahwa komposisi ini efektif dalam mendegradasi senyawa asam organik dan terjadi reduksi ammonia dalam sistem aerasi yang dipaksakan.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pH = 7,8 – 8,6</li> </ul>
Gaudin, et.al. (2007)	H <sub>2</sub> S dan amonia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Medium sintetik (amonia (Am) dan urea pospat(UP)): Am, Am 1, Am 5, Am 10,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pengukuran sifat kimia dari variasi medium sintetik menunjukkan bahwa Am menghasilkan emisi ammonia, sehingga urea lebih dipilih sebagai sumber nitrogen yang aman.</li> <li>- Rendahnya laju kelarutan pospor dan nitrogen pada kontak solid-liquid dan homogenitas pelepasannya setelah kontak solid-liquid yang</li> </ul>	

		<p>UP 10, UP 15, UP 20, dan UPt 20</p> <p>- Medium sintetik terbaik kemudian dicampurkan 50-50% w/w dengan medium alami kulit pinus dan pozzolan</p>	<p>pertama (di atas 24 jam) dapat menunjukkan jangka waktu pemakaian efektif dari medium filter sintesis.</p> <p>- <u>Laju kelarutan mencapai kestabilan setelah 24 jam, sehingga jangka waktu tersebut dapat disebut sebagai <i>minimum dissolution level</i>.</u></p> <p>- Biodegradasi H<sub>2</sub>S dan ammonia tertinggi dihasilkan oleh UP 20/kulit pinus karena hanya pH medium filter tersebut yang berada pada jangkauan pH netral. Hal ini menjelaskan bahwa <u>%RE optimum dapat dicapai pada pH sekitar 7,0 – 8,0, di mana aktivitas optimum bakteri berada pada kisaran pH tersebut.</u></p> <p>- <u>UP 20 yang memiliki suplai nutrisi untuk perkembangbiakan biomassa dan efek buffer dapat memberikan keuntungan yang tinggi dalam biofiltrasi H<sub>2</sub>S berkonsentrasi tinggi untuk jangka waktu yang lama.</u></p>	<p>- pH UP 20/kulit pinus= 7,6 – 7,7</p>
--	--	--	--	--

Yang et.al (2007)	NO	Kompos dan serpihan kayu	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <u>Semakin tinggi kolom biofilter, semakin tinggi efisiensi reduksi NO</u></li> <li>- Adanya O<sub>2</sub> dapat menghambat reduksi NO</li> <li>- Efisiensi reduksi NO menurun seiring dengan peningkatan konsentrasi gas NO masukan</li> <li>- Konsentrasi NO menurun ketika glukosa ditambahkan ke baik pada kondisi aerobik maupun anaerobik</li> <li>- Efisiensi reduksi NO anaerobik &gt; aerobik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- %RE (aerobik) = 60%</li> <li>- %RE (anaerobik) = 99 %</li> </ul>
Gabriel et.al (2007)	Amonia	Medium filter serat kelapa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <u>Peningkatan performansi dapat dicapai dengan pemberian air dan dengan penambahan nutrisi untuk membantu pertumbuhan mikroorganism</u></li> <li>- Adanya pemberian air dan <u>distribusi air yang baik pada medium filter dapat meningkatkan efek buffer</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- %RE = 100%</li> <li>- pH = 7,5 ± 0,3</li> </ul>
Chang (2008)	NO <sub>x</sub> (NO <sub>2</sub> dan NO) >100 ppm	<i>Carbon foam</i> (variasi jumlah pori per inci (PPI): 20 PPI, 45, PPI, 60 PPI)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- %RE dan EC untuk <i>carbon foam</i> 20 PPI adalah yang tertinggi untuk konsentrasi gas ≤100ppm, karena <u>adanya pengurangan luas permukaan yang tersedia untuk <i>biofilm</i> pada <i>carbon foam</i> dengan PPI yang lebih tinggi akibat air yang</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- %RE 20 PPI = 100%</li> <li>- %RE 60 PPI = 94%</li> <li>- %RE 45 PPI = 79%</li> </ul>

			<p>terperangkap di dalam pori.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Utk konsentrasi polutan mendekati 300ppm, EC <i>carbon foam</i> 60 PPI adalah yang tertinggi karena luas permukaan area yang tertinggi</li> <li>- pada <i>carbon foam</i> 20 PPI, dgn EBRT mendekati 6m, dihasilkan %RE NO = 35%</li> </ul>																														
Turan et.al. (2008)	<p>VOCs:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>oxygenated compounds</i> (OC)</li> <li>- <i>aliphatic compounds</i> (AIC)</li> <li>- <i>aromatic compounds</i> (ArC)</li> <li>- <i>chlorinated compounds</i> (CC)</li> </ul>	<p>Kotoran ternak, ditambah <i>bulking agent</i> (untuk masing-masing variasi) 10%:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Natural zeolit</i> (NZ)</li> <li>- <i>Expanded perlite</i> (EP)</li> <li>- <i>Pumice</i> (P)</li> <li>- <i>Expanded vermiculite</i> (EV)</li> </ul>	<p>- yang paling gampang direduksi dalam VOCs adalah: AIC &gt; OC &gt; ArC &gt; CC, oleh: P &gt; NZ &gt; EV &gt; EP</p> <p>- %RE yang dihasilkan oleh medium filter yang tidak diberi <i>bulking agent</i> merupakan yang paling kecil dibandingkan dengan yang diberi <i>bulking agent</i> (data tidak ditunjukkan)</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>% Rata-rata</th> <th>OC</th> <th>AIC</th> <th>ArC</th> <th>CC</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P</td> <td>88.22</td> <td>87.59</td> <td>91.21</td> <td>84.84</td> <td>79.71</td> </tr> <tr> <td>NZ</td> <td>79.73</td> <td>78.74</td> <td>81.55</td> <td>79.93</td> <td>73.96</td> </tr> <tr> <td>EV</td> <td>61.53</td> <td>71.30</td> <td>62.10</td> <td>69.03</td> <td>64.17</td> </tr> <tr> <td>EP</td> <td>54.59</td> <td>62.47</td> <td>59.68</td> <td>52.77</td> <td>60.32</td> </tr> </tbody> </table>	% Rata-rata	OC	AIC	ArC	CC	P	88.22	87.59	91.21	84.84	79.71	NZ	79.73	78.74	81.55	79.93	73.96	EV	61.53	71.30	62.10	69.03	64.17	EP	54.59	62.47	59.68	52.77	60.32
% Rata-rata	OC	AIC	ArC	CC																													
P	88.22	87.59	91.21	84.84	79.71																												
NZ	79.73	78.74	81.55	79.93	73.96																												
EV	61.53	71.30	62.10	69.03	64.17																												
EP	54.59	62.47	59.68	52.77	60.32																												
Simanjuntak	N <sub>2</sub> O	Serpihan kayu dan	- Efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada	- %RE = 67,86%																													

(2008)	(sistem aliran sirkulasi)	pupuk kandang	panjang biofilter tertinggi 50 cm - Efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada laju alir gas N <sub>2</sub> O tertinggi 200 cc/menit - <u>Penambahan nutrisi menghasilkan efisiensi reduksi tertinggi</u>	- %RE = 72,02% - %RE = 91,49%
Adriaty (2009)	N <sub>2</sub> O (sistem aliran <i>batch</i> selama 6 jam)	<u>Kompos</u> (bahan organik sampah rumah tangga dan kotoran kambing) <u>bulking agent</u> berupa <u>cocopeat</u> dan sekam beras	- Efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada laju alir gas N <sub>2</sub> O terkecil 72 cc/menit - <u>Efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada kandungan air 60 % (w/w) berat kompos</u> - <u>%RE N<sub>2</sub>O dengan penggunaan nutrisi sintetik lebih tinggi dari nutrisi alami</u> - Efisiensi reduksi tertinggi diperoleh pada ketinggian medium 50 cm, laju alir N <sub>2</sub> O 72 cc/menit, kandungan air 60% dan penambahan nutrisi sintetik serta <i>Nitrobacter,sp</i> pada kompos sebagai medium filter	- %RE = 56,7% - %RE = 70,13% - %RE nutrisi alami + <i>Nitrobacter, sp</i> = 74,7% - %RE nutrisi sintetik + <i>Nitrobacter, sp</i> = 76,9% - %RE = 76,9%
Noviani (2009)	N <sub>2</sub> O (sistem aliran <i>batch</i> selama 9 jam)	Kompos (bahan organik kotoran sapi) dan <u>bulking agent</u> berupa	- <u>Efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada laju alir gas N<sub>2</sub>O 88 cc/menit</u> - Efisiensi reduksi tertinggi pada kedalaman medium filter 50 cm (laju alir gas 88 cc/menit)	- %RE = 61,3% - %RE = 61,3%

		<p><u>cocopeat</u> dan <u>sekam beras</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pH yang menurun pada setiap akhir biofiltrasi menunjukkan adanya pengasaman medium filter oleh sisa metabolisme mikroorganisme</li> <li>- <i>water content</i> kompos akhir biofiltrasi yang meningkat menunjukkan adanya aktivitas mikroorganisme yang menghasilkan air dan sifat retensi air oleh kompos berbasis kotoran sapi yang tinggi.</li> <li>- Karakteristik (area permukaan spesifik, diameter pori, dan kandungan unsur-unsur dalam kompos) medium filter berupa kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing <u>menunjukkan kompos berbasis kotoran kambing memiliki rasio C/N lebih tinggi.</u></li> <li>- Efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O yang diperoleh melalui biofiltrasi dengan laju alir 88 cc/menit pada kedalaman 50 cm menggunakan medium filter berupa kompos berbasis kotoran sapi lebih</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pH kompos awal: 8,1</li> <li>- pH kompos akhir variasi laju alir: 7,6</li> <li>- pH kompos akhir variasi kedalaman medium: 7,1</li> <li>- <i>Water content</i> kompos awal: 57,72%</li> <li>- <i>Water content</i> kompos akhir variasi laju alir: 65,10%</li> <li>- <i>Water content</i> kompos akhir variasi kedalaman medium: 63,65%</li> <li>- Rasio C/N kompos berbasis kotoran sapi: 12,93</li> <li>- <u>Rasio C/N kompos berbasis kotoran kambing: 17,44</u></li> <li>- %RE kompos sapi = 61,3%</li> <li>- %RE kompos kambing = 56,5%</li> </ul>
--	--	---	--	--

			tinggi daripada medium filter kompos berbasis kotoran kambing	
Filayuri (2009)	N <sub>2</sub> O (sistem aliran <i>batch</i> selama 9 jam)	Kompos (bahan organik kotoran sapi) dan <i>bulking agent</i> berupa <i>cocopeat</i> dan sekam beras	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada penambahan air 50%wt</li> <li>- Perkembangan mikroorganismenya (metode TPC) pada kompos 50% w/w merupakan kompos dengan mikroorganismenya terbanyak setelah biofiltrasi, disusul oleh kompos setelah variasi kedalaman medium filter penelitian Noviani (2009), kompos setelah variasi kandungan air 60% w/w, dan terakhir oleh kompos awal sebelum biofiltrasi.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- %RE = 61,0 %</li> <li>- Kompos sebelum biofiltrasi: 1,35 x 10<sup>11</sup> CFU/g kompos</li> <li>- Kompos setelah variasi kedalaman medium: 1,45 x 10<sup>11</sup> CFU/g kompos</li> <li>- Kompos setelah variasi 50% w/w kandungan air dalam kompos: 3,65 x 10<sup>11</sup> CFU/g kompos</li> <li>- Kompos setelah variasi 60% w/w kandungan air dalam kompos: 1,44 x 10<sup>11</sup> CFU/g kompos</li> </ul>
<b>Penelitian ini (2010)</b>	N <sub>2</sub> O (sistem aliran <i>batch</i> selama 12 jam)	Kompos (bahan organik kotoran kambing) dan <i>bulking agent</i> berupa <i>cocopeat</i> dan sekam beras	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <u>Efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada kedalaman medium filter 100 cm</u></li> <li>- <u>Efisiensi reduksi tertinggi pada masa inkubasi dengan larutan sintetik minimal 26,5 jam, dan hasil optimum dengan sifat fisis paling stabil diperoleh untuk inkubasi selama 131 jam</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- %RE = 78,63 %</li> <li>- %RE = 100%</li> </ul>

		<p>- <u>Urutan perkembangan mikroorganism</u> (metode TPC) <u>terbanyak dicapai</u> oleh kompos variasi masa inkubasi dengan larutan nutrisi sintetik, variasi kedalaman medium filter, dan kompos awal, <u>sesuai dengan performa efisiensi reduksinya</u></p> <p>- Sifat fisis, mekanis, dan kimia kompos hasil optimum sebelum dan setelah biofiltrasi menunjukkan <u>bahwa kompos dengan %RE tertinggi</u> pada kedua macam variasi (kedalaman 100 cm dan 131 jam inkubasi) <u>merupakan kompos dengan kestabilan sifat fisis, mekanis, dan kimia tertinggi</u></p>	<p>- Kompos sebelum biofiltrasi: <math>3,88 \times 10^{11}</math> CFU/g kompos</p> <p>- Kompos setelah variasi kedalaman medium: <math>4,58 \times 10^{11}</math> CFU/g kompos</p> <p>- Kompos setelah variasi masa inkubasi: <math>6,95 \times 10^{15}</math> CFU/g kompos</p> <p>- Kompos kedalaman 100 cm:</p> <table border="1" data-bbox="1423 597 1879 885"> <thead> <tr> <th><i>property</i></th> <th>sebelum</th> <th>sesudah</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>pH</td> <td>6,45</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td><math>\rho</math> (g/mL)</td> <td>0,4884</td> <td>0,4378</td> </tr> <tr> <td><math>\Phi</math> (%)</td> <td>80,235</td> <td>89,24</td> </tr> <tr> <td>wc (%)</td> <td>30,345</td> <td>29,291</td> </tr> <tr> <td>m (g)</td> <td>1890</td> <td>1884,3</td> </tr> <tr> <td>h aktual (cm)</td> <td colspan="2">96</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta P</math> (mH<sub>2</sub>O)</td> <td colspan="2">0,04</td> </tr> </tbody> </table> <p>- Kompos inkubasi 131 jam:</p> <table border="1" data-bbox="1423 917 1879 1201"> <thead> <tr> <th><i>property</i></th> <th>sebelum</th> <th>sesudah</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>pH</td> <td>6,93</td> <td>7,63</td> </tr> <tr> <td><math>\rho</math> (g/mL)</td> <td>0,7816</td> <td>0,777</td> </tr> <tr> <td><math>\Phi</math> (%)</td> <td>82,065</td> <td>73,98</td> </tr> <tr> <td>wc (%)</td> <td>60,68</td> <td>57,859</td> </tr> <tr> <td>m (g)</td> <td>3045,26</td> <td>2720,38</td> </tr> <tr> <td>h aktual (cm)</td> <td>94,5</td> <td>94,2</td> </tr> <tr> <td><math>\Delta P</math> (mH<sub>2</sub>O)</td> <td colspan="2">0,02</td> </tr> </tbody> </table>	<i>property</i>	sebelum	sesudah	pH	6,45	7	$\rho$ (g/mL)	0,4884	0,4378	$\Phi$ (%)	80,235	89,24	wc (%)	30,345	29,291	m (g)	1890	1884,3	h aktual (cm)	96		$\Delta P$ (mH <sub>2</sub> O)	0,04		<i>property</i>	sebelum	sesudah	pH	6,93	7,63	$\rho$ (g/mL)	0,7816	0,777	$\Phi$ (%)	82,065	73,98	wc (%)	60,68	57,859	m (g)	3045,26	2720,38	h aktual (cm)	94,5	94,2	$\Delta P$ (mH <sub>2</sub> O)	0,02	
<i>property</i>	sebelum	sesudah																																																	
pH	6,45	7																																																	
$\rho$ (g/mL)	0,4884	0,4378																																																	
$\Phi$ (%)	80,235	89,24																																																	
wc (%)	30,345	29,291																																																	
m (g)	1890	1884,3																																																	
h aktual (cm)	96																																																		
$\Delta P$ (mH <sub>2</sub> O)	0,04																																																		
<i>property</i>	sebelum	sesudah																																																	
pH	6,93	7,63																																																	
$\rho$ (g/mL)	0,7816	0,777																																																	
$\Phi$ (%)	82,065	73,98																																																	
wc (%)	60,68	57,859																																																	
m (g)	3045,26	2720,38																																																	
h aktual (cm)	94,5	94,2																																																	
$\Delta P$ (mH <sub>2</sub> O)	0,02																																																		



Rancangan penelitian diawali dengan studi literatur berupa studi jurnal-jurnal yang mempublikasikan mengenai penelitian biofiltrasi. Setelah itu, dilakukan modifikasi kolom biofilter untuk memaksimalkan fasilitas kolom untuk mempermudah sistem biofiltrasi yang akan dilakukan. Pada saat persiapan alat, digunakan *mass flow meter* dan *flow regulator* dengan laju alir udara inlet biofilter dijaga konstan sebesar 88cc/menit untuk menjaga agar waktu tinggal gas  $N_2O$  dalam kolom dan medium filter lebih lama (Simanjuntak, 2008). Dengan demikian, konsentrasi gas  $N_2O$  yang dapat diserap oleh medium filter akan lebih maksimal. Setelah itu, *T-junction* dipasang pada bagian dasar kolom untuk memisahkan fasa gas dan cair secara sederhana. Pada bagian keluaran untuk fasa gas dari *T-junction*, dipasang *sampling port* gas keluaran biofiltrasi yang dihubungkan oleh pipa silikon sepanjang satu setengah meter mengarah ke bagian atas kolom, agar posisi *sampling port* gas masukan dan gas keluaran sejajar. Setelah modifikasi biofilter berupa pemasangan *mass flow meter*, *flow regulator*, *T-junction*, dan relokasi *sampling port* keluaran gas biofiltrasi selesai dilakukan dan setelah dipastikan tidak ada kebocoran gas sepanjang persambungan melalui uji kebocoran, kolom biofilter siap dioperasikan. Uji kebocoran dilakukan untuk memastikan bahwa konsentrasi gas  $N_2O$  berkurang karena proses adsorpsi oleh medium filter, bukan karena kebocoran alat, dan uji kebocoran ini juga dapat dibuktikan melalui hasil uji EBRT (*Empty Bed Time Residence*), di mana dapat dipastikan bahwa sistem kolom biofilter tidak bocor jika hasil uji EBRT tidak melenceng terlalu jauh dari nilai EBRT teoritis. Perlu diperhatikan bahwa pada penelitian kali ini, tidak perlu lagi dilakukan kalibrasi laju alir gas  $N_2O$  karena skala yang ditunjukkan oleh *mass flow regulator* sudah merupakan laju alir aktual gas  $N_2O$ , sehingga hanya diperlukan uji EBRT saja. Kemudian, preparasi medium filter dilakukan dengan cara pengeringan dan pengayakan guna mendapatkan penyeragaman ukuran *bulk* kompos. Eksperimen biofiltrasi bertujuan untuk mereduksi  $N_2O$  menggunakan biofilter dengan mengevaluasi pengaruh variasi kedalaman medium filter kering terhadap efisiensi reduksi gas  $N_2O$ , serta pengaruh penambahan larutan nutrisi sintetik dan variasi masa inkubasinya terhadap performansi biofilter dan pertumbuhan mikroorganisme dalam kompos. Seluruh sifat fisik dan kimia kompos berupa densitas, pH, *water content*, massa

kompos yang digunakan, porositas kompos di dalam kolom biofilter, ketinggian kompos dalam kolom, dan *pressure drop* kompos dalam kolom dianalisa sebelum dan sesudah eksperimen. Konsentrasi gas yang keluar melalui medium filter kemudian dianalisis dengan kromatografi gas (GC) dan perkembangan populasi bakteri di dalam kompos sebelum dan sesudah biofiltrasi akan diteliti dengan menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC). Luas permukaan spesifik beserta diameter pori kompos awal sebelum biofiltrasi dianalisa menggunakan metode BET yang dilakukan di Laboratorium RPKA DTK FTUI, dan analisa SEM dilakukan di Laboratorium Departemen Metalurgi dan Material FTUI.

## 3.2 Peralatan dan Bahan Penelitian

### 3.2.1 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi kompos sebagai medium filter, nutrisi agar, *aquadest*, larutan nutrisi sintetik. Perincian bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- **Sampel kompos** sebagai medium filter yang terdiri dari bahan organik, pupuk kandang dari kotoran kambing, dan *bulking agent* berupa sekam beras dan *cocopeat*.
- **Nutrien agar** sebagai media agar untuk pembiakan bakteri dalam kompos untuk perhitungan jumlah koloni bakteri dalam kompos.
- **Aquadest** sebagai pelarut bubuk nutrisi agar, larutan *trace element*, larutan nutrisi sintetik, pelarut untuk uji pH kompos, dan untuk pengenceran sampel kompos.
- **Larutan nutrisi** sebagai pemberi nutrisi tambahan untuk bakteri di dalam kompos. Adapun nutrisi yang akan ditambahkan berupa:
  - **Nutrisi Sintetik**, yang terdiri dari komponen  $K_2HPO_4$  (0.4g),  $KH_2PO_4$  (0.15g),  $NH_4Cl$  (0.3g),  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  (0.4g), dan  $CH_3COONa$  (2.93g), yang dilarutkan dalam 1L aquadest.
  - **Larutan *trace element***, yang terdiri dari komponen Titriplex (50g),  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  (2.2g),  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  (5.5g),  $MnCl_2 \cdot 4H_2O$  (5.06g),  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  (5.0g),  $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$  (1.1g),

$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (1.57g), dan  $\text{CoCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  (1.61g), yang dilarutkan dalam 1L aquadest.

Adapun larutan nutrisi ini telah pernah digunakan oleh Yang et.al. (2007) untuk mengembangkan bakteri penitrifikasi aerobik.

### 3.2.2 Peralatan

Perincian peralatan yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu:

Tabel 3.1 Rincian peralatan yang digunakan dalam penelitian

No.	Alat	Fungsi
1.	Timbangan	Menimbang berat bahan dan sampel
2.	Tabung Reaksi	Tempat pengenceran larutan
3.	Cawan Petri	Tempat pembiakan bakteri dalam nutrisi agar dan wadah untuk uji <i>water content</i> sampel kompos
4.	Presto dan oven	Mensterilisasi bahan-bahan yang akan/telah digunakan pada metode TPC
5.	Inkubator	Menginkubasi bakteri untuk TPC
6.	<i>Hot Plate Stirrer</i>	Memanaskan sekaligus mengaduk larutan nutrisi agar
7.	<i>Transferpette</i>	Mengambil larutan dalam jumlah sedikit
8.	Tampah	Tempat untuk mengeringkan kompos
9.	Ayakan/saringan	Mengayak kompos agar dihasilkan ukuran partikel yang seragam
10.	Spatula besi dan kaca arloji	Wadah untuk menimbang sampel dan bahan yang diambil menggunakan spatula besi
11.	<i>Syringe</i>	Mengambil sampel gas untuk analisa GC
12.	Beaker glass	Wadah pembuatan larutan agar, sterilisasi microtube, dan pengujian pH kompos
13.	pH meter digital	Pengukur pH sampel
14.	Plastic wrap, aluminium foil, dan karet gelang	Mengisolasi mulut beaker glass dan tabung reaksi saat proses sterilisasi sebelum dan setelah selesai digunakan untuk TPC
15.	Kertas koran	Pembungkus cawan petri dan tabung reaksi untuk sterilisasi di oven

### 3.3 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi preparasi kompos, eksperimen biofiltrasi, dan pengembangbiakan mikroorganisme dalam metode TPC. Seluruh prosedur ini akan dijelaskan pada subbab – subbab berikut.

#### 3.3.1 Preparasi Kompos

Prosedur preparasi kompos meliputi proses pengomposan untuk mendapatkan kompos yang akan digunakan sebagai media filter dan proses preparasi kompos agar dapat digunakan sebagai media filter.

##### 3.3.1.1 Proses Pengomposan

Medium filter yang digunakan untuk biofiltrasi ini adalah kompos. Kompos yang digunakan berasal dari "Green Lab" Sekolah Alam, Ciganjur. Kandungan kompos terdiri dari kotoran kambing sebagai pupuk kandang yang dicampur dengan sekam, *cocopeat* (sabut kelapa yang telah dikeringkan dan dihancurkan), gula pasir, kapur dan dedak. Diagram alir sederhana mengenai proses pengomposan dapat dilihat dalam Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Prosedur Pengomposan

Adapun perincian prosedur pembuatan kompos sebagai berikut:

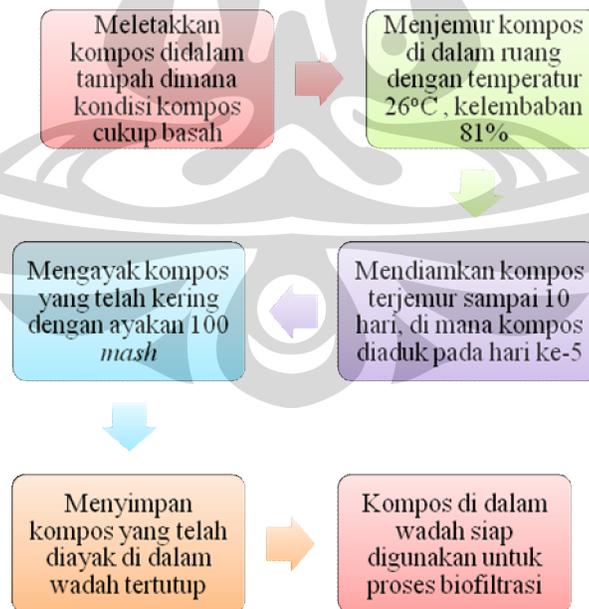
- a. Menyiapkan bahan-bahan yang digunakan sebagai berikut:
  - Pupuk kandang : bahan dasar pembuatan kompos
  - Sekam dan *cocopeat* : sebagai *bulking agent* kompos
  - Gula pasir : sebagai sumber glukosa

- Kapur : meningkatkan pH pupuk
  - Dedak : sumber protein mikroba
- b. Membuat komposisi pembuatan kompos dari bahan-bahan diatas dengan rasio (kg) = 2 pupuk kandang : 2 sekam : 3 sampah rumah tangga : 2 *cocopeat* : 2 dedak : 1 gula pasir : ¼ kapur
- c. Mencampur komponen diatas di aduk dengan larutan EM4 (*Effective Microorganism*) 120mL, dengan penambahan 10L air limbah. Penggunaan EM4 sebagai bioaktivator untuk mempercepat pengomposan
- d. Setelah dicampur, kompos disekap di dalam terpal selama 10 hari dengan dilakukan pengadukan pada hari ke-5 dalam 10 hari tersebut.

Persiapan kompos yang sudah jadi untuk medium filter ini dilakukan dengan pengeringan dan pengayakan, di mana ayakan yang digunakan memiliki 100 *mash* (sekitar 1 – 1.5 mm). Salah satu tujuannya adalah untuk menghasilkan partikel medium filter yang homogen sehingga dapat mengurangi *pressure drop*.

### 3.3.1.2 Proses Preparasi Kompos menjadi Media Filter

Gambar 3.3 berikut ini merupakan diagram prosedur preparasi kompos yang sudah jadi sebelum dimasukkan ke dalam kolom biofilter untuk dilakukan proses biofiltrasi.



**Gambar 3.3** Skema prosedur preparasi kompos sebagai medium filter

### 3.3.2 Eksperimen Biofiltrasi

Eksperimen biofiltrasi gas  $N_2O$  dalam penelitian ini dilakukan secara kontinyu selama 12 jam, tanpa adanya sirkulasi gas  $N_2O$ . Variasi yang dilakukan pada penelitian ini berupa variasi kedalaman medium filter kering dan variasi masa inkubasi kompos dengan larutan nutrisi sintetis yang ditambahkan. Adapun prosedur yang dilakukan pada eksperimen ini adalah sebagai berikut:

#### 3.3.2.1 Variasi Kedalaman Medium Filter Kering

- 1) Menyiapkan medium filter yang telah dipreparasi, yaitu kompos yang terdiri dari bahan organik, pupuk kandang berupa kotoran kambing, dan *bulking agent* berupa *cocopeat* dan sekam beras.
- 2) Menimbang jumlah kompos yang dibutuhkan untuk kedalaman medium filter yang diinginkan (basis berat 94.5g untuk kedalaman 50cm).
- 3) Memasukkan medium filter tersebut ke dalam kolom biofilter dengan variasi ketinggian medium: 50, 60, 80, dan 100 cm.
- 4) Mengalirkan gas sampel dengan kandungan  $N_2O$  sebesar 15000 ppm dalam udara dengan menggunakan laju alir gas  $N_2O$  sebesar 88cc/menit untuk dilakukan biofiltrasi.
- 5) Mengambil 1mL gas sampel yang telah dibiofiltrasi dengan *syringe* untuk dianalisis pada kromatografi gas.
- 6) Mengambil sampel kompos hasil biofiltrasi yang memberikan efisiensi reduksi optimum untuk dianalisis dengan metode TPC dan SEM.

#### 3.3.2.2 Variasi Masa Inkubasi dengan Nutrisi Sintetis

- 1) Menyiapkan medium filter yang telah dipreparasi, yaitu kompos yang terdiri dari bahan organik, pupuk kandang berupa kotoran kambing, dan *bulking agent* berupa *cocopeat* dan sekam beras.
- 2) Menimbang jumlah kompos yang dibutuhkan untuk kedalaman medium filter yang menghasilkan efisiensi reduksi optimum pada hasil eksperimen variasi kedalaman medium filter.

- 3) Menambahkan 40mL larutan nutrisi sintetik dan 2mL larutan *trace element* pada kompos dan menambahkan sejumlah air sebanyak 60% berat kompos yang digunakan.
- 4) Menginkubasikan kompos yang telah diberi air dan larutan nutrisi dengan variasi masa inkubasi: 20.5 jam, 26.5 jam, 131 jam, dan 166.5 jam.
- 5) Mengalirkan gas sampel dengan kandungan N<sub>2</sub>O sebesar 15000 ppm dalam udara dengan menggunakan laju alir gas N<sub>2</sub>O sebesar 88cc/menit.
- 6) Mengambil gas sampel yang telah dibiofiltrasi dengan *syringe* untuk dianalisis pada kromatografi gas.
- 7) Mengambil sampel kompos hasil biofiltrasi yang memberikan efisiensi reduksi optimum untuk dianalisis dengan metode TPC dan SEM.

### 3.3.3 Perhitungan Komunitas Mikroorganisme

Metode yang digunakan untuk melakukan analisis komunitas mikroorganisme pada sampel kompos dalam proses biofiltrasi adalah metode *Total Plate Count* (TPC). *Total Plate Count* dilakukan sebelum biofiltrasi dan sesudah proses biofiltrasi untuk menguji seberapa besar aktivitas degradasi gas oleh bakteri dengan mengetahui jumlah koloni bakteri awal dan akhir pada medium filter. Teknik *Total Plate Count* (TPC) mempunyai keterbatasan akurasi, yakni koloni yang dihasilkan tidak lebih dari 30-300 koloni, dengan asumsi awal satu bakteri akan menghasilkan satu koloni. Oleh karena itu, konsentrasi bakteri dalam kompos yang nantinya akan diuji perlu untuk diketahui. Jumlah bakteri dalam kompos sangat banyak, sehingga perlu dilakukan dilusi atau pengenceran. Rasio pengenceran yang akan digunakan pada uji degradasi bakteri adalah dari 1:10<sup>4</sup>, 1:10<sup>5</sup>, 1:10<sup>6</sup>, 1:10<sup>7</sup>, 1:10<sup>8</sup>, 1:10<sup>9</sup>, 1:10<sup>10</sup>, 1:10<sup>11</sup>, 1:10<sup>12</sup>, hingga 1:10<sup>13</sup> agar keakuratan penghitungan jumlah koloni bakteri dapat terjaga. Langkah-langkah pengencerannya adalah sebagai berikut:

1. Mengambil sampel kompos sebanyak 0.97 gram.
2. Melarutkan sampel kompos tersebut dengan aquadest sebanyak 10mL (untuk membuat rasio dilusi 1:10).
3. Mengambil 1 mL larutan dari dilusi 1:10 kemudian menambahkan aquades sebanyak 9 mL (untuk membuat rasio dilusi 1:100).

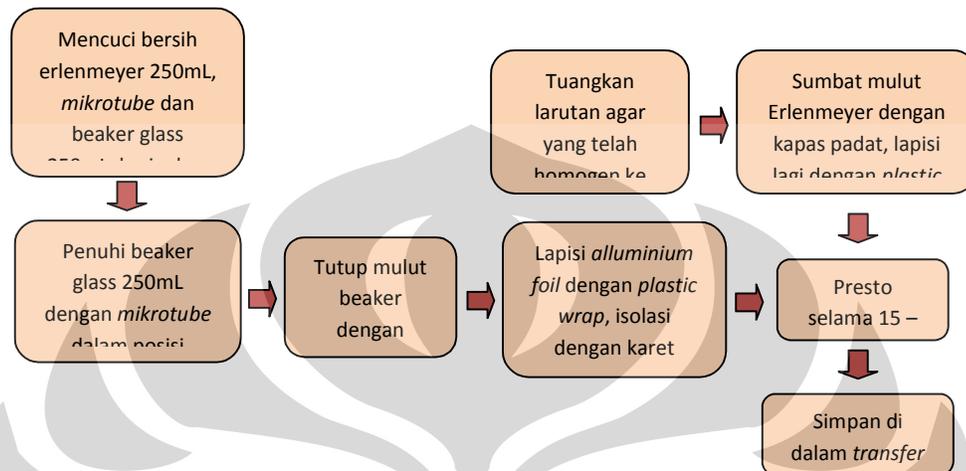
4. Mengulangi langkah di atas hingga diperoleh larutan dilusi kompos dengan rasio dilusi  $1:10^4$ ,  $1:10^5$ ,  $1:10^6$ ,  $1:10^7$ ,  $1:10^8$ ,  $1:10^9$ ,  $1:10^{10}$ ,  $1:10^{11}$ ,  $1:10^{12}$ , dan  $1:10^{13}$  (sesuai dengan banyaknya pengenceran yang diharapkan).
5. Untuk setiap rasio dilusi yang diinginkan, diambil 1 mL larutan sampel pengenceran dan dimasukkan ke dalam medium agar yang telah dituangkan ke dalam cawan petri untuk diinkubasikan selama satu hingga dua hari.
6. Setelah diinkubasikan, dilakukan penghitungan jumlah koloni bakteri setiap cawan secara manual.

### 3.3.3.1 Sterilisasi Alat dan Bahan

Dalam metode TPC, setiap alat dan bahan yang akan digunakan harus dalam keadaan steril dan aseptis agar sampel yang terdapat pada sampel yang akan diuji coba tidak terkontaminasi oleh bakteri dari luar sampel dan kapang. Oleh karena itu, sebelum melakukan metode ini perlu dilakukan sterilisasi alat dan bahan terlebih dahulu. Dua metode sterilisasi yang digunakan pada uji TPC antara lain adalah dengan menggunakan panas lembab dengan uap jenuh bertekanan dan panas kering (Gandjar, 1992). Sterilisasi dengan cara yang pertama dilakukan dengan menggunakan autoklaf. Metode sterilisasi ini memiliki suhu efektif  $121^{\circ}\text{C}$  pada tekanan tinggi dengan waktu standar 15 hingga 20 menit. Cara ini dipakai untuk melakukan sterilisasi alat dan bahan yang digunakan untuk uji TPC. Hal ini disebabkan karena cara ini menyediakan suhu yang jauh di atas titik didih, memiliki daya tembus yang kuat dan kelembaban sangat tinggi sehingga mempermudah koagulasi protein sel-sel mikroba yang menyebabkan sel hancur. Sementara itu, metode pemanasan dengan metode panas kering memiliki suhu efektif minimal  $170^{\circ}\text{C}$  selama 2 jam. Alat yang digunakan pada metode ini adalah oven. Metode ini biasanya digunakan untuk mensterilisasi alat-alat laboratorium.

Bukan hanya alat saja yang harus steril pada metode TPC ini, melainkan segala bahan yang digunakan selain sampel yang diuji juga harus dalam keadaan steril sehingga dapat dipastikan bahwa jumlah mikroba yang terhitung dalam metode TPC berasal dari sampel yang akan diuji dan tanpa adanya kontaminasi. Perlu diperhatikan bahwa akan lebih baik jika alat dan bahan disterilisasi sesaat

sebelum pemakaian, mengingat bahwa alat dan bahan hanya akan tetap steril dalam 48 jam setelah proses sterilisasi. Gambar 3.4 berikut menunjukkan tahapan metode sterilisasi terhadap *mikrotube* dan medium larutan nutrisi agar yang digunakan.



**Gambar 3.4** Metode sterilisasi *mikrotube* dan medium larutan nutrisi agar yang akan digunakan

Pada metode analisis TPC, digunakan cawan petri yang berisikan medium larutan nutrisi agar sebagai tempat pengembangbiakan mikroba. Cawan petri yang digunakan harus dalam kondisi steril. Gambar 3.5 berikut merupakan metode sterilisasi cawan petri yang dilakukan.



**Gambar 3.5** Metode sterilisasi cawan petri

### 3.3.3.2 Medium Nutrien Agar

Nutrien agar digunakan sebagai medium tempat hidup dan berkembang biak bagi mikroba. Adapun cara membuat medium agar adalah sebagai berikut:

1. Melarutkan bubuk nutrien agar sebanyak yang diperlukan (takaran 23g untuk aquadest sebanyak 1L, di mana satu cawan petri mampu menampung sedikitnya 15mL larutan nutrien agar sebagai tempat pengembangbiakan mikroba).
2. Mendidihkan larutan tersebut dengan agitasi pada *hot plate stirrer* selama 15 menit terhitung dari larutan tersebut mendidih, hingga larutan menjadi homogen, yang mana ditandai dengan warna cairan menjadi kuning jernih.
3. Mendinginkan larutan tersebut selama 1 menit setelah *hot plate stirrer* dimatikan.
4. Mensterilisasi dengan autoklaf selama 15 – 20 menit sebelum digunakan dalam TPC.

### 3.3.4 Teknik Transfer Aseptis

Kegiatan perpindahan bahan/sampel dilakukan dengan teknik transfer aseptis. Teknik ini adalah suatu metode/teknik untuk memindahkan kultur bakteri dari satu tempat ke tempat lain secara aseptis agar tidak terjadi kontaminasi oleh mikroba lain ke dalam kultur. Teknik transfer ini dilakukan dalam *transfer box* (ruang steril) dan selalu dilakukan dengan pemanasan mulut setiap alat dari bahan gelas dan penggunaan alkohol 70% pada tangan dan bagian dalam *transfer box* terlebih dahulu. Pada langkah ini, sampel yang akan diuji dipindahkan ke medium agar yang sudah dibuat.

Selanjutnya, dilakukanlah langkah-langkah dalam metode *Total Plate Count* sebagai berikut:

1. Menuangkan larutan agar ke dalam seluruh cawan petri yang akan digunakan sebanyak 15 mL/cawan.
2. Mengambil dan memasukkan larutan dilusi yang diinginkan sebanyak 1 mL (kocok larutan sebelumnya) ke dalam cawan petri.
3. Memutar cawan petri membentuk angka “8” sehingga larutan dilusi dapat tersebar secara merata pada permukaan agar dalam cawan petri.

4. Inkubasikan cawan petri tersebut pada suhu 34 – 35°C selama 1 – 2 hari. Adapun tujuan dari inkubasi ini adalah untuk menunggu pertumbuhan koloni mikroba pada medium agar supaya dapat dihitung tanpa menggunakan alat bantu penglihatan sebelum dilakukan perhitungan.
5. Jika koloni mikroba susah diamati, lakukan penghitungan jumlah koloni yang ada pada cawan petri dengan bantuan mikroskop atau kaca pembesar.
6. Menghitung jumlah bakteri per g dengan rumus sebagai berikut:

$$\Sigma \text{ Bakteri } \left( \frac{\text{CFU}}{\text{g}} \right) = \frac{\text{Jumlah koloni bakteri (CFU)}}{\text{volume pengenceran} \times \text{volume sampel pada cawan petri (mL)}} \times \frac{50 \text{ mL}}{\text{massa sampel kompos awal (g)}} \quad (3.1)$$

7. Sampel yang telah dihitung disterilisasi kembali dengan menggunakan presto untuk membunuh mikroba yang terdapat pada sampel.

### 3.4 Variabel Penelitian

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi kedalaman medium filter dan variasi waktu inkubasi medium filter dengan larutan sintetik. Sedangkan variabel terikat dalam penelitian ini adalah efisiensi reduksi gas N<sub>2</sub>O yang diperoleh setelah melalui proses biofiltrasi dan jumlah populasi mikroorganisme yang terdapat dalam medium filter (kompos) setelah proses biofiltrasi. Selanjutnya, kedua variabel terikat akan diteliti terhadap variabel bebas yang divariasikan, sehingga diperoleh variabel bebas yang tepat untuk menghasilkan efisiensi reduksi gas N<sub>2</sub>O optimal.

### 3.5 Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

Dalam penelitian ini, data-data yang akan diambil adalah:

1. Jumlah koloni bakteri pada medium filter sebelum dan setelah dilakukan biofiltrasi untuk melihat pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme di dalam medium filter menggunakan metode TPC.
2. Konsentrasi gas N<sub>2</sub>O yang di dalam kolom biofilter, di daerah masukan kolom (sebelum biofiltrasi) dan keluaran kolom (setelah biofiltrasi) untuk mengamati aktivitas reduksi gas N<sub>2</sub>O oleh bakteri menggunakan metode GC.
3. Beberapa uji sifat fisik dan kimia kompos berupa uji densitas menggunakan wadah beaker glass, uji pH menggunakan pHmeter, uji *water content* menggunakan oven, dan uji *pressure drop* dalam kolom menggunakan manometer digital.

## BAB 4

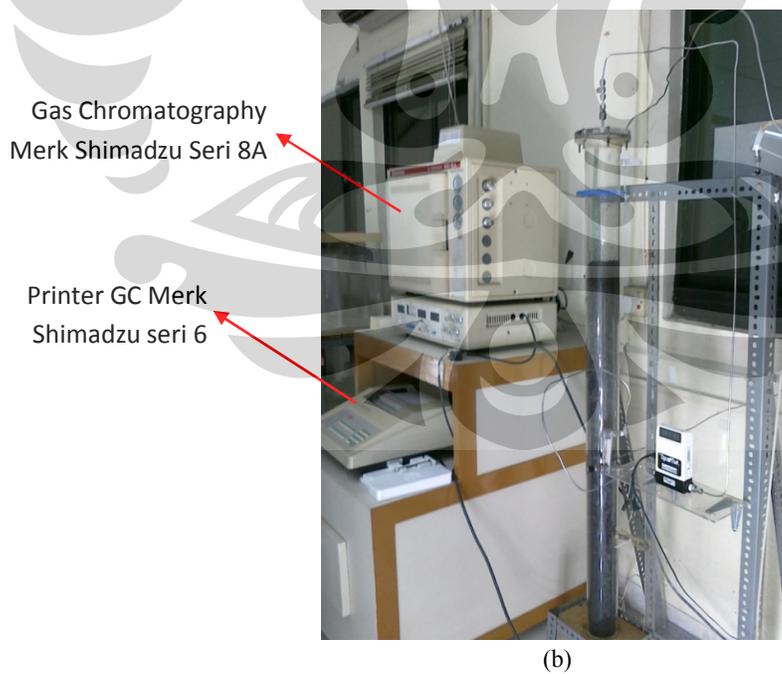
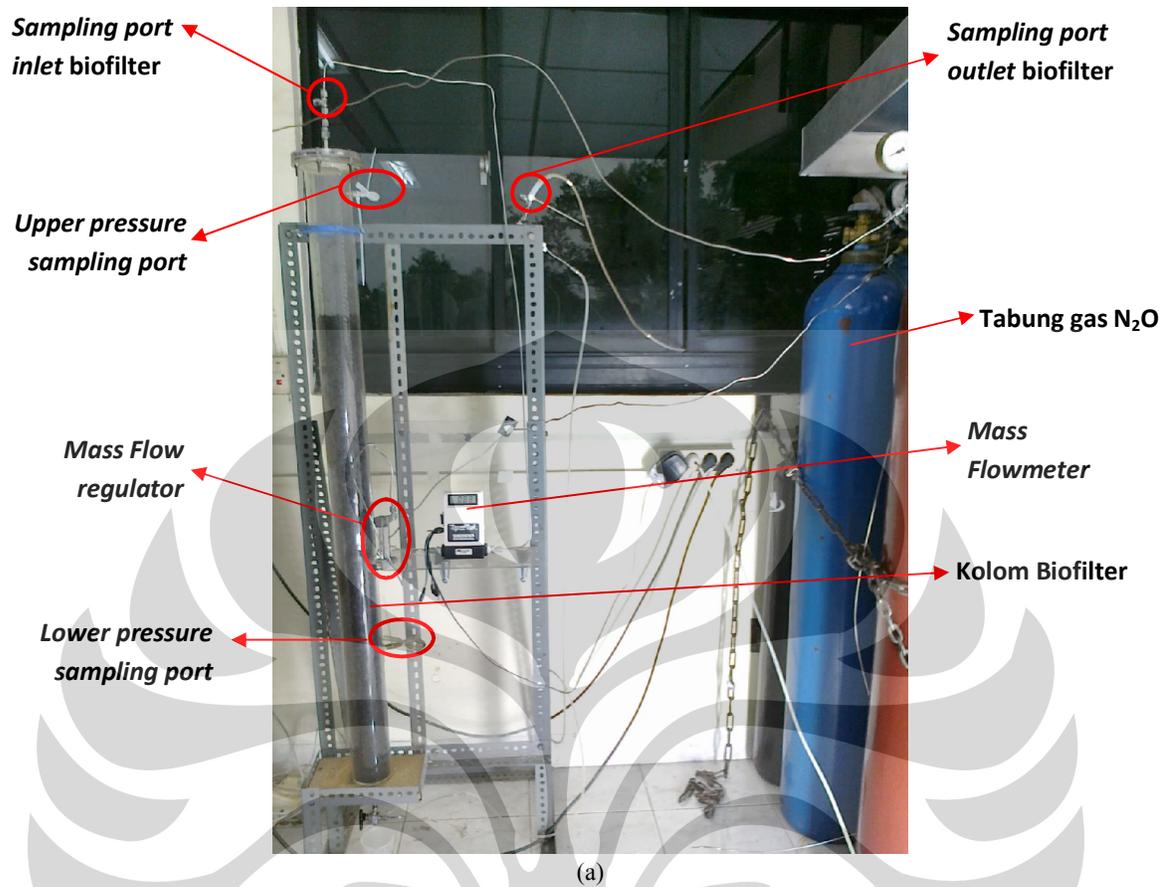
### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil dan analisa variabel dalam penelitian, agar dapat diketahui pengaruh variabel tersebut terhadap hasil penelitian.

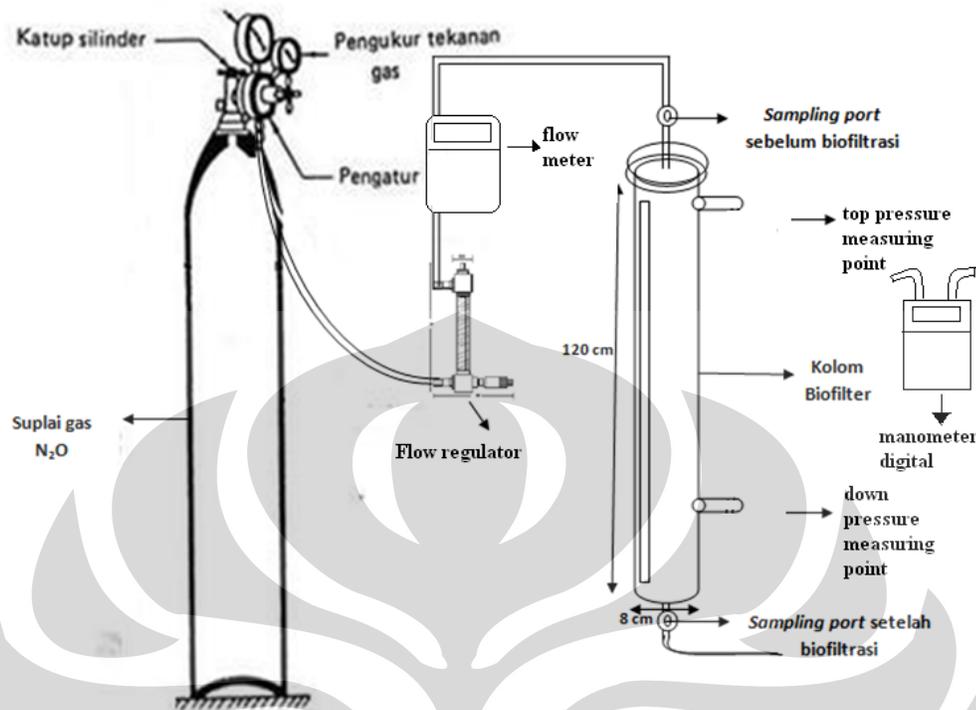
#### 4.1 Modifikasi Sistem Biofilter

Peralatan biofiltrasi yang digunakan dalam penelitian ini merupakan peralatan biofiltrasi dari Noviani (2009) yang dimodifikasi. Peralatan biofilter ini terbuat dari *acrylic* dengan tinggi kolom sebesar 120 cm, diameter dalam 8 cm, dan tebal bahan 0,325 cm. Selain itu, sistem biofiltrasi ini juga terdiri dari tabung gas N<sub>2</sub>O 15.000 ppm dalam udara sebagai gas polutan yang akan dibiofiltrasi, *flow regulator* sebagai pengatur laju alir gas N<sub>2</sub>O, kolom biofilter sebagai tempat terjadinya biofiltrasi, sistem perpipaan yang menghubungkan seluruh sistem biofilter, serta *sampling port* sebagai tempat pengambilan sampel. Aliran gas N<sub>2</sub>O dalam udara akan dialirkan melalui bagian atas kolom biofilter (*down-flow mode*). *Down-flow mode* dipilih untuk meningkatkan kontrol terhadap kelembaban (la Pagans, 2005) agar medium filter dapat menahan air lebih lama. Adapun modifikasi yang dilakukan adalah penambahan *mass flow meter* yang diposisikan setelah *flow regulator* untuk mengetahui laju alir aktual dari gas polutan (gas N<sub>2</sub>O), modifikasi sistem perpipaan sehingga tinggi *sampling port outlet* gas biofiltrasi sama dengan tinggi *sampling port inlet* gas biofiltrasi untuk mencegah terambilnya liquid dari medium filter di *sampling port outlet* gas biofiltrasi, dan pelepasan manometer air tipe U dari kolom biofiltrasi dikarenakan pengukuran tekanan kolom dalam penelitian ini dilakukan menggunakan manometer digital.

Hasil modifikasi peralatan biofilter ditunjukkan dalam Gambar 4.1 merupakan sistem biofilter yang digunakan dalam penelitian ini, sedangkan Gambar 4.2 menunjukkan model tiga dimensinya.



Gambar 4.1 (a) Peralatan biofilter yang digunakan dalam penelitian, dan (b) perangkat GC yang digunakan



Gambar 4.2 Hasil modifikasi peralatan biofilter dalam bentuk 3 dimensi

Pengukuran *pressure drop* di dalam kolom sangatlah penting, mengingat bahwa pertumbuhan *biofilm* mikroorganisme pada permukaan medium filter dapat mengakibatkan semakin kecilnya rongga antar partikel medium filter (kompaksi medium), sehingga gas akan semakin sulit melewati celah antar partikel medium tersebut untuk keluar dari sistem biofiltrasi (Gabriel, 2007). Hal ini dapat mengakibatkan dua fenomena, yang pertama adalah *clogging*, yaitu tidak bisa keluarnya gas dari sistem biofiltrasi akibat tertutupnya celah jalur keluarnya gas dari dalam medium filter. Yang kedua adalah *channeling*, yang terjadi jika pertumbuhan *biofilm* mikroorganisme mengakibatkan hanya ada jalur tertentu yang dapat dilewati gas untuk keluar dari sistem biofiltrasi. *Clogging* dapat mengakibatkan kegagalan sistem biofiltrasi untuk mereduksi gas polutan, dan *channeling* dapat mengakibatkan menurunnya efisiensi reduksi gas polutan oleh medium filter. Baik *clogging* maupun *channeling* merupakan hal yang dihindari dalam pengoperasian biofilter jangka panjang.

Tidak seperti pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Noviani (2009), pada penelitian ini tidak digunakan *perforated plate*, mengingat bahwa

tidak efisiennya penggunaan *perforated plate* tersebut, di mana posisi *perforated plate* sangat sulit dipertahankan untuk tetap horizontal di dalam kolom biofilter. Miringnya *perforated plate* tersebut malah mengakibatkan kompresi medium filter yang berada di bawah *perforated plate*, dan mengakibatkan lubang-lubang *perforated plate* tersebut tersumbat oleh medium filter itu sendiri, sehingga mengakibatkan rendahnya efisiensi reduksi.

#### 4.2 Preparasi Medium Filter

Medium filter yang digunakan dalam penelitian ini adalah medium filter alami berupa kompos. Hal ini dikarenakan kompos merupakan medium filter alami yang mudah diperoleh, dan kompos memenuhi ciri-ciri medium filter yang baik (Gaudin, 2007), yaitu memiliki ruang antar partikel (*void*) yang besar, luas area permukaan yang tinggi, *pressure drop* gas yang rendah, permukaan hidrofilik, dan rendah biaya. Selain itu, kompos diketahui memiliki retensi air yang baik dan kaya akan nutrisi alami yang cocok untuk menyokong pertumbuhan mikroorganisme di dalam kompos tersebut (Liu et al., 2004).

Dalam penelitian ini, kompos dibuat bekerjasama dengan “Green Lab” Sekolah Alam Indonesia yang memproduksi kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing. Namun, yang dipilih untuk digunakan sebagai medium filter dalam penelitian ini adalah kompos yang berbasis kotoran kambing, di mana kompos kotoran kambing lebih kaya akan mineral yang dibutuhkan oleh mikroorganisme untuk menyokong kelangsungan hidupnya, sesuai dengan yang ditunjukkan oleh Tabel 4.1 mengenai perbandingan kompos kotoran kambing dan sapi di halaman berikutnya, dan Tabel 2.3 di bab 2 mengenai perbandingan kompos kotoran ternak lainnya secara umum. Seperti yang diketahui, mikroorganisme akan menggunakan unsur C untuk mendapatkan energi, serta memanfaatkan unsur N, P, dan K untuk pertumbuhan, metabolisme, dan reproduksinya (Biddlestone dkk., 1994). Atas alasan tersebut, diprediksikan bahwa jumlah mikroorganisme di dalam kompos kotoran kambing akan lebih banyak dibandingkan dengan kompos kotoran sapi alami, yang pembuktiannya dapat dilihat dari hasil *Total Plate Count* pada Tabel 4.9 dalam subbab 4.4.3.1.

**Tabel 4.1** Perbandingan komposisi unsur yang terdapat pada kompos berbasis kotoran kambing dan kompos berbasis kotoran sapi

Parameter	Komposisi (%berat kering)		Metode
	Kompos berbasis kotoran kambing	Kompos berbasis kotoran sapi	
Nitrogen (N)	1,73	1,19	SNI 02-2803-2000
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,57	1,7	957.02* 958.01*
K <sub>2</sub> O	1,56	0,59	965.09*
Sulfur (S)	0,34	0,18	973.57*
Organic Carbon (C)	30,17	15,39	Kurmies
Rasio C/N	17,44	12,93	

Sumber: Lab. Sucofindo, Cibitung, Bekasi.

Tahap preparasi medium filter berupa kompos ini terbagi menjadi dua bagian, yaitu pembuatan kompos dan persiapan kompos sebagai medium filter untuk biofiltrasi. Dalam pembuatannya, kompos berbasis kotoran kambing ini ditambahkan dengan *bulking agent* berupa *cocopeat* dan sekam beras kayu untuk membantu penyerapan air dalam medium filter dan meningkatkan kinerjanya sebagai medium filter biofiltrasi. Kemudian, kompos yang sudah dibuat diberikan perlakuan awal agar cocok digunakan sebagai medium filter pada biofiltrasi. Adapun perlakuan awal tersebut meliputi kegiatan pengeringan kompos pada suhu ruang dan pengayakan kompos untuk menghasilkan partikel yang seragam. Pengeringan kompos dilakukan di dalam ruang tertutup dengan temperatur ruang sekitar 26 °C dan humiditas ruangan 81% selama 10 hari.

Proses pengeringan dilakukan dengan menggunakan tampah yang terbuat dari bambu sehingga sirkulasi udara medium yang berada di dalam wadah lebih lancar dibandingkan dengan menggunakan wadah dengan bahan dasar plastik. Hal ini dapat membantu mempercepat pengeringan kompos. Proses pengeringan kompos ini dilakukan selama 10 hari hingga dihasilkan kompos yang agak kering dan dilakukan pengadukan pada hari yang kelima agar pengeringan terjadi secara merata. Tujuan dilakukannya pengeringan adalah agar kompos dapat diayak, sehingga menghasilkan partikel kompos dengan ukuran yang seragam dan cocok sebagai medium filter, yaitu sekitar 2mm. Ukuran partikel ini disarankan untuk

meminimalisir kemungkinan kompaksi medium filter agar tidak terjadi *clogging* atau *channeling* (Yang, 2007). Selain itu, proses pengeringan kompos dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan kelembaban yang sesuai untuk pertumbuhan mikroorganisme pendegradasi polutan. Kelembaban yang direkomendasikan untuk medium filter organik berkisar antara 40-60% basis berat (Van Lith et al., 1997).

Setelah proses pengeringan berakhir, dilakukan pengayakan terhadap kompos tersebut dengan menggunakan ayakan berdiameter 2 mm. Proses pengeringan kompos dapat dilihat pada Gambar 4.3, dan proses pengadukan dan pengayakan kompos dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan 4.5.



Gambar 4.3 Proses pengeringan kompos dengan kondisi  $T = 26^{\circ}\text{C}$



Gambar 4.4 Proses pengadukan kompos



Gambar 4.5 Proses pengayakan kompos

Kompos yang sudah dikeringkan dan diayak, serta siap digunakan sebagai medium filter dapat dilihat pada Gambar 4.6 berikut ini.



Gambar 4.6 Kompos sebagai medium filter

Medium filter kompos yang siap dipakai biofiltrasi ini memiliki pH netral (6.45) sehingga dapat langsung digunakan dan tidak perlu dilakukan pemanasan untuk menaikkan pH seperti pada zeolit.

### 4.3 Persiapan Eksperimen

Sebelum melakukan eksperimen biofiltrasi, penting untuk dilakukan beberapa uji untuk persiapan agar proses biofiltrasi dapat berjalan dengan lancar. Uji yang perlu dilakukan tersebut adalah uji kebocoran, uji waktu tinggal, dan kalibrasi luas *peak*  $N_2O$  dengan konsentrasi  $N_2O$ .

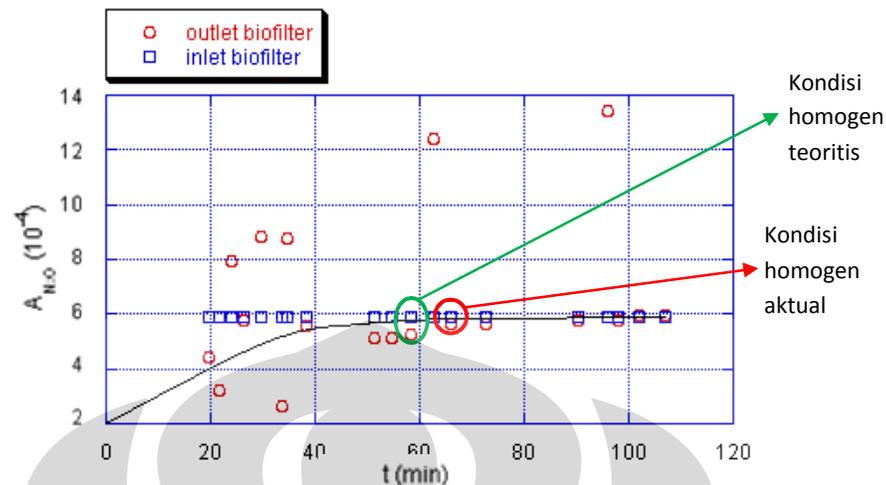
#### 4.3.1 Uji Kebocoran, Uji Waktu Tinggal, dan Kalibrasi Luas *Peak* dengan Konsentrasi Gas $N_2O$

Uji kebocoran merupakan jenis pengujian yang mutlak dilakukan sebelum menjalankan reaktor biofiltrasi demi alasan keamanan. Sedangkan, uji waktu tinggal dan kalibrasi luas *peak* dengan konsentrasi gas  $N_2O$  dilakukan untuk mendapatkan data yang diperlukan untuk dapat menentukan beberapa parameter yang diperlukan dalam analisis proses biofiltrasi.

#### 4.3.1.1 Uji Kebocoran dan Uji Waktu Tinggal

Uji kebocoran dilakukan untuk memastikan bahwa penurunan luas di bawah *peak* saat uji kinerja biofilter disebabkan oleh biofiltrasi akibat adanya biosorpsi pada *biofilm* dan biodegradasi oleh bakteri pada *biofilm*, bukan karena kebocoran pada sistem biofiltrasi. Pengujian kebocoran alat dilakukan dengan meneteskan air sabun pada sambungan-sambungan pipa dan kolom biofilter yang rentan terhadap kebocoran. Selanjutnya, udara dari kompresor dialirkan ke dalam kolom biofilter. Indikasi terjadinya kebocoran adalah timbulnya gelembung/buih sabun pada bagian yang mengalami kebocoran tersebut.

Uji kebocoran juga dapat dilakukan melalui uji *Empty Bed Time Residence* (EBRT) atau uji waktu tinggal dengan cara mengalirkan gas  $N_2O$  ke dalam kolom biofilter kosong, kemudian dicek luas *peak*  $N_2O$  pada *sampling port inlet* biofilter dan *sampling port outlet* biofilter hingga konsentrasi *sampling port outlet* sama dengan konsentrasi *sampling port inlet*. Apabila waktu aktual yang dibutuhkan oleh gas untuk memenuhi seluruh kolom kosong biofiltrasi mendekati waktu yang terhitung secara teoritis, dan jika seluruh daerah pada sistem biofiltrasi yang rentan kebocoran tidak berbusa setelah diolesi dengan air sabun, maka dapat dipastikan bahwa sistem biofiltrasi tersebut tidak mengalami kebocoran. Gambar 4.7 menunjukkan hasil uji EBRT tersebut.



Gambar 4.7 Uji EBRT biofilter

Perhitungan uji waktu tinggal dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (4.1) sebagai berikut

$$EBRT = \frac{\pi \times R^2 \times t}{Q} \quad (4.1)$$

Pada persamaan (4.1) di atas, R merupakan radius dinding dalam kolom biofilter (cm), t merupakan tinggi bagian dalam kolom biofilter (cm), dan Q merupakan laju alir gas yang mengalir ke dalam kolom biofilter (cc/menit). Dari persamaan (4.1), dapat didefinisikan bahwa EBRT merupakan volume total kolom biofilter kosong dibagi dengan laju alir udara kontaminan, di mana kolom biofilter yang digunakan memiliki tinggi 120 cm dan diameter dalam 7,35 cm. Laju alir gas yang terlalu tinggi akan menyebabkan EBRT terlalu rendah, dan *pressure drop* tinggi. EBRT yang terlalu rendah dapat menyebabkan kecilnya efisiensi reduksi gas polutan dan *pressure drop* yang tinggi menyebabkan tingginya kemungkinan kompaksi medium filter di dalam kolom biofiltrasi. Selain itu, untuk menghasilkan efisiensi reduksi yang sama besar, kolom dengan EBRT yang terlalu tinggi membutuhkan medium filter dengan volume yang lebih banyak dibandingkan dengan kolom dengan EBRT yang lebih rendah, sehingga ini berarti bahwa investasi biaya kapital yang dibutuhkan lebih tinggi. Dalam perhitungan EBRT untuk penelitian ini, laju alir gas yang digunakan adalah laju alir gas N<sub>2</sub>O yang menghasilkan %RE optimum dari hasil penelitian Noviani (2009). Hasil EBRT yang diperoleh adalah sebagai berikut

$$EBRT = \frac{\pi \times (3,675\text{cm})^2 \times 120\text{cm}}{88 \text{ cc/menit}} = 57.8286307 \text{ menit} \approx 58 \text{ menit}$$

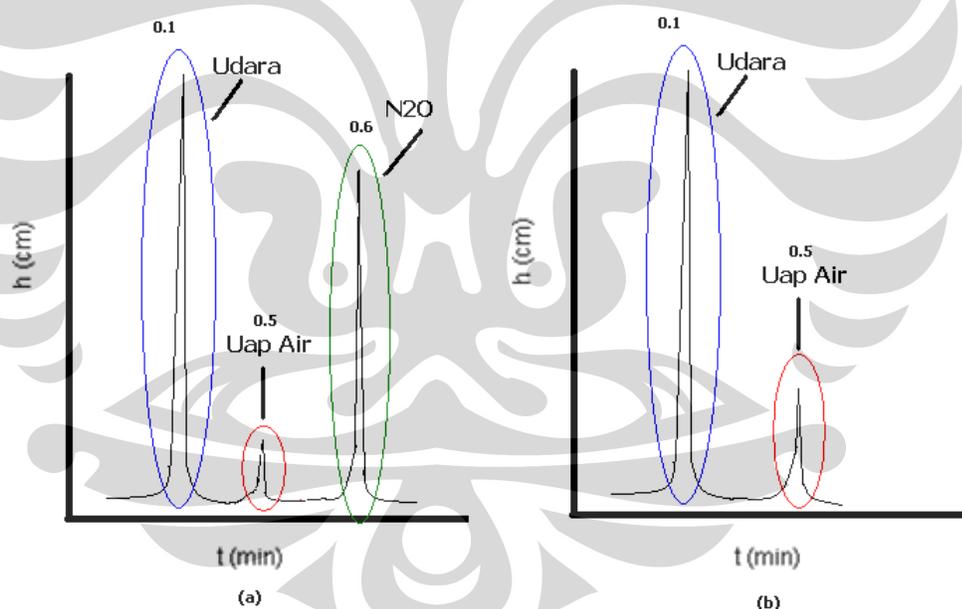
Data untuk uji EBRT dapat dilihat pada Lampiran 1. Berdasarkan Gambar 4.7 di atas, dapat dilihat bahwa konsentrasi  $N_2O$  pada *sampling port outlet* biofilter terus meningkat dari menit ke-1 hingga pada saat mencapai sekitar menit ke-65, konsentrasi gas telah menunjukkan kecenderungan stabil. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi gas  $N_2O$  di dalam kolom biofilter baru homogen pada sekitar menit ke-65. Hal ini dapat dilihat dengan membandingkan grafik hasil uji EBRT tersebut dengan grafik konsentrasi gas  $N_2O$  yang diperoleh pada *sampling port inlet* biofilter pada Gambar 4.7. Berbedanya hasil uji EBRT eksperimental dengan EBRT teoritis mungkin diakibatkan oleh tidak homogenya konsentrasi  $N_2O$  di dalam aliran gas yang keluar dari dalam tabung gas  $N_2O$ , ditandai dengan fluktuasi konsentrasi gas  $N_2O$  yang terdeteksi di *sampling port inlet* biofilter.

Selain itu, lebih beratnya massa molekul relatif gas  $N_2O$  (72 g/mol) dibandingkan dengan massa molekul relatif udara (28 g/mol) mungkin menjadi faktor penyebab tingginya dan berfluktuatifnya konsentrasi gas  $N_2O$  yang keluar dari *sampling port outlet* biofilter, yaitu gas  $N_2O$  cenderung keluar terlebih dahulu dari kolom biofiltrasi karena lebih besarnya massa molekul relatifnya dan belum setimbangnya udara yang bersumber dari dalam kolom dengan udara yang ada di dalam tabung gas  $N_2O$  oleh karena kondisi yang berbeda dari kedua gas tersebut. Lama-kelamaan, konsentrasi gas  $N_2O$  yang keluar akhirnya mencapai kestabilan karena sudah homogenya udara dari dalam tabung dengan udara yang ada di kolom. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pada saat penelitian, berkurangnya konsentrasi gas  $N_2O$  terjadi karena adanya fenomena biosorpsi pada *biofilm*, dan biodegradasi gas oleh mikroorganisme pada *biofilm*, bukan karena kebocoran.

#### 4.3.1.2 Kalibrasi Luas *Peak* dengan Konsentrasi Gas N<sub>2</sub>O

Kalibrasi luas *peak* dengan konsentrasi gas N<sub>2</sub>O dilakukan untuk mengetahui waktu retensi udara dan gas N<sub>2</sub>O, serta luas *peak*, volume, dan konsentrasi aktual gas N<sub>2</sub>O. Konsentrasi gas sampel N<sub>2</sub>O belum dapat diketahui sehingga untuk sementara gas N<sub>2</sub>O dianggap 100% dengan menyesuaikannya terhadap luas *peak* yang tertera dari pembacaan GC.

Kalibrasi gas N<sub>2</sub>O ini dilakukan bersamaan dengan uji EBRT. Kalibrasi dilakukan dengan cara mengambil sampel gas dari *sampling port inlet* biofilter dengan *syringe* sebanyak volume gas di dalam *syringe* yang berbeda-beda antara 0,1 mL hingga 1 mL, kemudian sampel gas tersebut diinjeksikan ke dalam GC untuk dibaca luas area *peak* N<sub>2</sub>O yang terambil tersebut. Contoh pembacaan hasil kromatograf pada sampel gas N<sub>2</sub>O dengan volume 1,0 mL dapat dilihat pada Gambar 4.8 berikut ini.

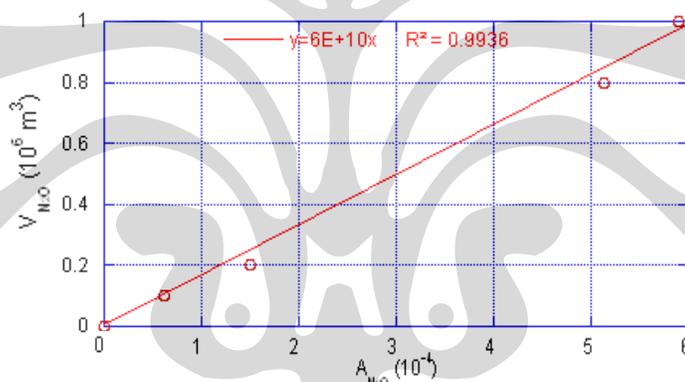


Gambar 4.8 Sampel grafik yang terdeteksi pada: (a) Gas N<sub>2</sub>O, dan (b) Udara bebas oleh GC

Letak *peak* N<sub>2</sub>O dapat diketahui dengan membandingkan Gambar 4.10, yaitu dari grafik gas N<sub>2</sub>O (Gambar 4.10 a) dan grafik udara bebas (Gambar 4.10 b) karena gas N<sub>2</sub>O yang digunakan merupakan gas N<sub>2</sub>O dengan konsentrasi 15.000 ppm dalam udara, sehingga digunakan udara sebagai pembandingnya. Pada Gambar 4.10 b) di atas, dapat dilihat bahwa pada grafik udara bebas hanya

terdapat dua *peak*, yaitu *peak* udara (pada waktu retensi 0,1) dan uap air (pada waktu retensi 0,5). Sementara itu, pada Gambar 4.10 a) terdapat tiga *peak*. Berdasarkan hal ini, maka dapat dikatakan bahwa *peak* ketiga yang terletak pada waktu retensi 0,6 adalah *peak* gas N<sub>2</sub>O yang terletak setelah *peak* udara dan uap air.

Setelah mengetahui letak *peak* N<sub>2</sub>O, dilakukanlah variasi terhadap volume gas N<sub>2</sub>O yang diambil dari dalam *gas sampling* yaitu sebesar 0,1; 0,2; 0,8; dan 1 mL. Pengambilan data pada kalibrasi gas N<sub>2</sub>O dilakukan sebanyak empat kali per variasi konsentrasi volume gas sampel dengan tujuan untuk memastikan keakuratan hasil yang diperoleh. Data yang diperoleh dari hasil kalibrasi gas N<sub>2</sub>O dapat dilihat pada Lampiran 2. Kemudian, data kalibrasi tersebut diplot antara luas *peak* N<sub>2</sub>O terhadap volume gas N<sub>2</sub>O dalam *syringe* sehingga diperoleh grafik seperti terlihat pada Gambar 4.9 berikut.



Gambar 4.9 Grafik hasil kalibrasi volume gas N<sub>2</sub>O di dalam *syringe* terhadap luas *peak* N<sub>2</sub>O

Berdasarkan grafik yang diperoleh, dapat dilihat bahwa grafik kalibrasi volume gas N<sub>2</sub>O terhadap luas *peak* N<sub>2</sub>O juga memiliki kecenderungan garis linear, dengan persamaan garis  $y = 60.000.000.000x$ . Apabila diberi *trendline* garis linier, maka koefisien korelasinya ( $R^2$ ) adalah 0,9936. Besar  $R^2 > 0,9$  menunjukkan bahwa hasil kalibrasi volume gas N<sub>2</sub>O terhadap luas *peak* N<sub>2</sub>O ini dapat digunakan (valid) dalam penelitian biofiltrasi selanjutnya untuk mengetahui volume dan konsentrasi gas N<sub>2</sub>O aktual.

### 4.3.2 Uji Karakteristik Kompos

Pengujian karakteristik yang dilakukan meliputi uji BET dan uji komposisi unsur-unsur yang terdapat di dalam kompos sebelum biofiltrasi. Pengujian komposisi unsur-unsur yang terdapat di dalam kompos ini dilakukan terhadap kompos yang terdiri dari bahan organik berupa kotoran kambing dan *bulking agent* berupa *cocopeat* dan sekam beras, serta terhadap kompos yang digunakan pada penelitian sebelumnya di mana bahan organik yang digunakan adalah kotoran sapi, serta *bulking agent* berupa sekam dan *cocopeat* (Noviani, 2009).

#### 4.3.2.1 Uji BET

Uji BET dilakukan dengan menggunakan alat *Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption* yang dilakukan di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam DTK FTUI (Lab. RPKA) terhadap medium filter yang akan digunakan dalam biofiltrasi, yaitu kompos berbasis kotoran kambing. Tabel 4.2 berikut menunjukkan hasil yang diperoleh dari uji BET terhadap medium filter tersebut.

Tabel 4.2 Hasil uji BET kompos berbasis kotoran kambing

Karakteristik Medium Filter	Kompos Berbasis Kotoran kambing
<i>Multipoint BET</i>	3,957 m <sup>2</sup> /g
<i>DA Method Pore Diameter</i>	1,8 x 10 <sup>1</sup> Å

Adsorbat yang sesuai untuk melakukan evaluasi porositas material padatan dalam uji BET ini adalah nitrogen pada temperatur 77 K. Sementara itu, menurut *Autosorb-6B Manual Book*, karakterisasi pori dilakukan berdasarkan ukurannya, di mana porositas dengan daerah radius bukaan melebihi 500Å disebut makropori, sedangkan pori-pori dengan radius tidak melebihi 20Å didefinisikan sebagai mikropori, dan pori-pori dengan ukuran intermediet (di antara 20Å hingga 500Å) disebut mesopori.

Berdasarkan hasil BET yang diperoleh, diketahui bahwa ukuran diameter pori adalah 18Å. Maka, radius pori dari medium kompos berbasis kotoran kambing adalah 9Å. Dari ukurannya, pori-pori medium kompos ini dapat disebut

sebagai mikropori. Pori-pori sampel yang merupakan mikropori dapat menunjukkan terjadinya Langmuir isoterm tipe I (*Autosorb-6B Manual Book*). Langmuir isoterm tipe I ini berbentuk konkaf terhadap sumbu P/Po dengan jumlah adsorbat mendekati nilai batas 1.

Area permukaan spesifik yang besar merupakan karakteristik favorit untuk aplikasi biofiltrasi (Zilli et al., 1996). Pada setiap kasus, kecilnya ukuran mikropori dari medium filter akan mendorong pertumbuhan biomassa di sepanjang permukaan medium, sehingga memungkinkan terjadinya biodegradasi polutan pada permukaan *biofilm*. Diameter pori medium yang lebih kecil dan homogen juga menyebabkan permukaan bahan dapat dijadikan substrat bagi mikroba (Suriawira, 2002).

#### 4.3.2.2 Uji Komposisi Unsur di dalam Kompos

Uji komposisi unsur-unsur di dalam kompos dilakukan terhadap kompos berbasis kotoran kambing dan kompos berbasis kotoran sapi. Adapun unsur-unsur yang ingin diketahui antara lain adalah komposisi Nitrogen (N),  $P_2O_5$ ,  $K_2O$ , Sulfur (S), dan karbon organik dari kedua jenis kompos tersebut. Uji komposisi unsur ini dilakukan di Laboratorium Sucofindo, Cibitung, yang mana hasilnya telah ditampilkan dalam Tabel 4.1.

Berdasarkan hasil uji komposisi unsur di atas, dapat diketahui bahwa seluruh komposisi unsur yang terdapat pada kompos berbasis kotoran kambing lebih tinggi apabila dibandingkan dengan kompos berbasis kotoran sapi. Demikian pula halnya dengan rasio C/N yang dihasilkan oleh kedua jenis kompos tersebut. Aspek paling penting dari hasil uji komposisi unsur untuk biofiltrasi adalah rasio C/N. Mikroorganisme memerlukan sekitar 30 bagian karbon terhadap setiap bagian nitrogen untuk metabolisme, di mana sekitar 20 bagian dari karbon tersebut dioksidasi menjadi  $CO_2$  (ATP) dan 10 bagian lagi digunakan untuk mensintesis protoplasma untuk berkembang biak. Oleh karena itu, untuk medium filter yang memiliki rasio C/N kurang dari 30 yang merupakan rasio C/N optimumnya (Noviani, 2009), dibutuhkan suatu nutrisi tambahan yang mengandung karbon untuk membantu mikroorganisme mengoptimalkan aktivitas biologisnya dalam mereduksi gas polutan. Banyaknya sumber karbon

yang tersedia akan meningkatkan rasio C/N hingga melebihi rasio optimumnya, sehingga hal ini dapat mendorong mikroorganisme untuk memanfaatkan sumber nitrogen dari luar (dalam kasus ini adalah gas polutan berupa  $N_2O$ ), sehingga dapat meningkatkan efisiensi reduksi gas  $N_2O$ . Jika dikaitkan dengan lebih besarnya rasio C/N dari kompos kotoran kambing dibandingkan dengan kompos kotoran sapi, dapat diprediksi bahwa kompos kotoran kambing akan lebih efektif dalam mereduksi gas  $N_2O$ , atau dengan kata lain, efisiensi reduksi gas  $N_2O$  untuk kotoran kambing akan lebih tinggi dibandingkan dengan kompos kotoran sapi, untuk kondisi yang sama.

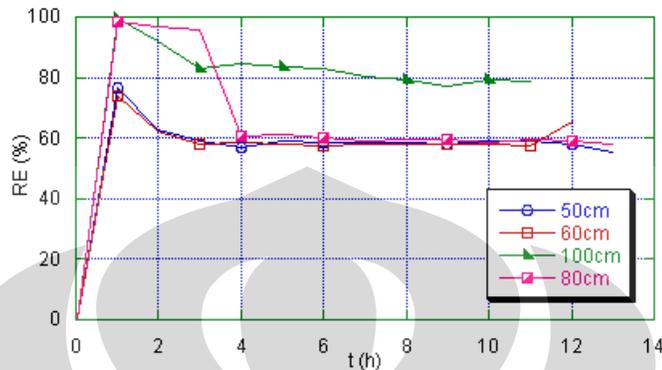
#### 4.4 Uji Kinerja Biofilter

Pengujian kinerja biofilter dilakukan melalui eksperimen dengan menggunakan sistem aliran *batch* selama 12 jam yang bertujuan untuk mengetahui kinerja biofilter dalam menganalisis beberapa parameter. Parameter-parameter yang akan diteliti dalam uji biofiltrasi ini antara lain adalah pengaruh variasi kedalaman medium filter dan variasi masa inkubasi medium filter dengan larutan nutrisi sintetik terhadap performansi biofilter dalam mereduksi  $N_2O$  serta terhadap pertumbuhan mikroorganisme di dalam kompos. Selain itu juga akan dilakukan uji sifat fisik dan kimia terhadap kompos yang digunakan dalam penelitian ini sebelum dan sesudah biofiltrasi, antara lain: densitas, pH, *water content*, porositas, *pressure drop*, massa kompos yang digunakan, dan ketinggian aktual medium filter dalam kolom. Pengambilan data pada uji kinerja biofilter dilakukan dengan memperhatikan prinsip replikasi.

##### 4.4.1 Pengaruh Kedalaman Medium Filter di dalam Kolom Biofilter terhadap Peningkatan Efisiensi Reduksi $N_2O$

Uji kinerja biofilter dalam mereduksi  $N_2O$  dapat dianalisis melalui hasil biofiltrasi pada laju alir 88 cc/menit dengan variasi kedalaman medium filter yaitu 50cm, 60cm, 80cm, dan 100cm. Adapun kedalaman medium filter ini didasarkan pada basis massa medium sebesar 945 g untuk kedalaman 50 cm (Utami dkk., 2009). Alasan penggunaan massa medium filter sebagai basis dalam pengukuran kedalaman medium dalam percobaan yang akan dilakukan adalah untuk

mengantisipasi penggunaan medium filter dengan jenis yang berbeda, di mana massa medium yang sama akan menghasilkan kedalaman medium yang berbeda untuk jenis medium filter yang berbeda.



**Gambar 4.10** Uji kinerja biofilter kering dalam mereduksi  $N_2O$  (basis massa = 945 g untuk  $h = 50\text{cm}$ ,  $Q = 88$  cc/menit, medium kompos kering berbasis kotoran kambing)

Dengan cara perhitungan yang dapat dilihat pada Lampiran 3, dapat dilihat pada Gambar 4.10 bahwa %RE berkurang setiap jamnya. Pada Gambar 4.10 dihasilkan suatu profil hubungan antara konsentrasi keluaran  $N_2O$  selama 12 jam yang naik pada awal percobaan, kemudian turun secara perlahan-lahan dan akhirnya mendekati kestabilan pada %RE tertentu. Hal ini disebabkan oleh belum homogenya gas  $N_2O$  yang mengalir di dalam kolom sehingga dihasilkan kondisi aliran gas dalam medium filter yang tidak stabil. Setelah melewati jam tertentu, konsentrasi  $N_2O$  yang keluar dari medium filter akan mencapai kestabilan. Hal ini dapat terjadi karena telah tercapainya EBRT kolom yang berisi kompos tersebut, di mana akan dicapai EBRT yang lebih lama untuk kolom yang berisi dibandingkan dengan kolom tanpa isi karena berbagai faktor seperti biosorpsi dan biodegradasi oleh mikroorganisme.

Ketika medium filter kompos dialiri kontaminan, terjadi kontak antara fasa gas sebagai kontaminan dengan *biofilm* sebagai fasa cair pada permukaan medium filter. Transformasi kontaminan dari fasa gas ke fasa cair pada partikel kompos adalah langkah dasar dari perlakuan biodegradasi kontaminan dengan biosorpsi pada permukaan *biofilm*. Molekul kontaminan dengan mudah terlarut di fasa cair akan dibiosorpsi oleh lapisan *biofilm* terlebih dahulu hingga mencapai kesetimbangan adsorpsi pada lapisan *biofilm*, sebelum akhirnya aktivitas biodegradasi oleh bakteri menjadi faktor dominan yang berperan dalam mereduksi

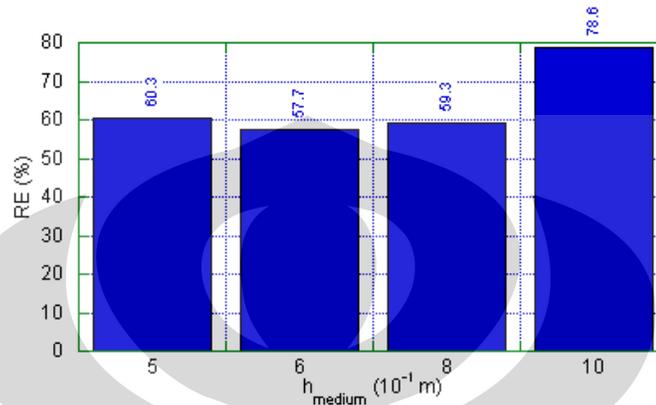
gas  $N_2O$ . Hal ini terjadi karena aktivitas reduksi gas polutan oleh aktivitas mikroorganisme membutuhkan jangka waktu yang lebih lama dibandingkan dengan aktivitas biosorpsi karena degradasi oleh proses biologis biasanya membutuhkan waktu lebih lama dibandingkan dengan proses fisis dan kimiawi. Oleh karena itu, konsentrasi suatu adsorbat akan menurun karena diserap oleh adsorben hingga pada waktu tertentu sebelum mengalami kesetimbangan adsorpsi, dan kemudian setelah mengalami kesetimbangan, reduksi gas  $N_2O$  akan sepenuhnya didominasi oleh aktivitas biodegradasi oleh bakteri hingga sebelum aktivitas biodegradasi tersebut menurun pesat akibat pembusukan medium filter sebagai tanda habisnya sumber karbon di dalam medium filter (Gilbert, 2007).

Penelitian variasi kedalaman medium filter terhadap reduksi  $N_2O$  dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh kedalaman medium filter terhadap performansi biofilter dalam mereduksi  $N_2O$ . Hasil penelitian Yang et al. (2007) menyatakan bahwa posisi kolom yang semakin tinggi dapat menghasilkan performansi reduksi yang lebih baik. Hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya gas polutan yang mengalami kontak dengan medium dan mikroorganisme pendenitrifikasi terinokulasi, sehingga semakin banyak pula gas yang dapat direduksi. Hal ini juga ditunjang oleh waktu kontak yang lebih lama antara gas polutan dan *biofilm* pada permukaan medium filter. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa kolom biofilter yang semakin tinggi akan menghasilkan performansi reduksi yang lebih tinggi pula, dengan syarat medium filter yang dipakai memiliki kondisi sifat fisis yang sama pada kolom yang sama.

Pada penelitian ini, variasi kedalaman medium filter yang akan diuji coba adalah kedalaman 50, 60, 80, dan 100 cm dan dilakukan secara acak, dengan menggunakan laju alir optimum yang telah diperoleh pada penelitian Noviani (2009) sebelumnya, yaitu 88 cc/menit. Namun, sama halnya dengan seluruh penelitian biofilter yang telah dilaksanakan sebelumnya di DTK FTUI, basis kedalaman medium filter yang digunakan adalah massa medium sebesar 945 g untuk kedalaman medium 50 cm (Utami et al., 2009).

Menurut pernyataan Yang et.al. (2007), semakin tinggi ketinggian medium filter di dalam kolom, efisiensi reduksi akan semakin tinggi. Hal ini dikarenakan gas  $N_2O$  yang dapat diadsorp ke dalam medium filter akan semakin banyak dan

jumlah koloni bakteri per satuan gram akan lebih banyak, sehingga akan lebih banyak jumlah gas  $N_2O$  yang juga dapat dibiodegradasi oleh bakteri. Efisiensi reduksi  $N_2O$  dari masing-masing kedalaman medium filter pada jam ke-11 dapat dilihat pada Gambar 4.11.



**Gambar 4.11** Perbandingan efisiensi reduksi pada uji variasi kedalaman medium filter (medium kering,  $t = 11$  jam)

Berdasarkan Gambar 4.10 mengenai profil efisiensi reduksi keseluruhan dan hasil efisiensi reduksi  $N_2O$  pada jam ke-11 yang diperoleh pada Gambar 4.11, terlihat adanya penyimpangan hasil pada kedalaman medium filter yang lebih besar, di mana besarnya efisiensi reduksi pada jam ke-11 untuk hasil penelitian variasi kedalaman medium filter menunjukkan urutan  $100\text{ cm} > 50\text{ cm} > 80\text{ cm} > 60\text{ cm}$ , tidak seperti yang dinyatakan oleh Yang et.al. (2007). Namun dengan meninjau kepada perubahan sifat fisis pada Tabel 4.3, dapat dianalisa bahwa penyimpangan tersebut terjadi karena besarnya porositas tiap medium filter yang berbeda-beda, sementara ketinggian aktual di awal dan akhir filtrasi tidak berubah. Dari Tabel 4.3 tersebut dapat dilihat bahwa porositas yang lebih besar pada ketinggian aktual yang konstan akan menghasilkan efisiensi reduksi yang lebih besar. Hal ini disebabkan oleh semakin meningkatnya rongga antar partikel kompos, sehingga memperpanjang waktu kontak antara gas  $N_2O$  dengan *biofilm* pada permukaan medium filter, yang mana akan mengakibatkan meningkatnya efisiensi reduksi gas  $N_2O$ . Dari hasil profil *water content* yang cukup stabil, terbukti bahwa *water content* merupakan penentu stabilitas partikel kompos karena kompos merupakan material yang hidrofilik dan air merupakan senyawa yang bersifat adhesif (Govind, 2010), sehingga semakin banyak kandungan air, partikel kompos akan semakin lengket satu sama lainnya, dan hal ini akan

mempertinggi kestabilan partikel kompos. Selain itu, kandungan air memiliki efek lain dalam kompos, yaitu untuk membantu mempertahankan agar *biofilm* tidak mengering dan tetap menempel pada permukaan medium filter.

**Tabel 4.3** Perubahan sifat fisis dari kompos kering sebelum dan setelah biofiltrasi  
(h dihitung secara teoritis dengan basis 945 g untuk kedalaman 50 cm medium kompos)

Property	symbol	h								
		50 cm		60cm		80cm		100cm		
		initial	final	initial	final	initial	final	initial	final	
bioreaktor	T kolom (°C)	T <sub>k</sub>	29,8	27,9	27,3	27,8	31	27,4	27,4	29,5
	humiditas kolom (%)	H <sub>k</sub>	64	69	78	63	56	51	73	68
	h aktual kompos (cm)	h <sub>k</sub>	49,5		57,5		80		96	
	Pressure Drop (mH <sub>2</sub> O)	ΔP	-		0		0		0,04	
Kompos	pH	pH	6,45	6,62	7	6,73	7	7	6,45	7
	densitas (g/mL)	ρ	0,4884	0,4152	0,468	0,4642	0,5311	0,442	0,4884	0,4378
	porositas dalam kolom (%)	Φ	76,987	91,375	83,963	84,144	70,83	84,969	80,235	89,24
	water content (% b/b)	wc	30,345	30,194	32,484	29,61	32,106	31,214	30,345	29,291
	massa dipakai (g)	m	945	943,5	1135,15	1128,36	1512	1509,46	1890	1884,3

Keterangan: *pressure drop* kompos setelah biofiltrasi variasi kedalaman medium 50 cm tidak dihitung karena belum dilakukannya pengukuran tekanan pada *pressure sampling port*.

Untuk kedalaman 50 cm, 60 cm, dan 100 cm, kondisi stabil dicapai saat memasuki jam ke-3, ditandai dengan sudah cenderung stabilnya grafik %RE pada Gambar 4.10. Namun, untuk kedalaman 80 cm, kondisi stabil dicapai setelah jam ke-4. Hal ini dapat dianalisa dengan mengaitkan pada selisih densitas antara kompos awal dengan kompos akhir, sesuai dengan yang ditunjukkan oleh Tabel 4.4 sebagai berikut.

**Tabel 4.4** Perubahan densitas dan porositas awal dan akhir pada penelitian variasi kedalaman medium filter

h(cm)	condition	ρ (g/mL)	Δρ (g/mL)	Φ (%)	ΔΦ (%)
50	Initial	0,4884	0,0732	76.987	14.388
	final	0,4152		91.375	
60	initial	0,468	0,0038	83.963	0.181
	final	0,4642		84.144	
80	initial	0,5311	0,0891	70.83	14.139
	final	0,442		84.969	
100	initial	0,4884	0,0506	80.235	9.005
	final	0,4378		89.24	

Selisih densitas awal dan akhir untuk kompos dengan kedalaman 80 cm adalah yang tertinggi. Untuk kedalaman 80 cm, dapat dilihat bahwa profil %RE

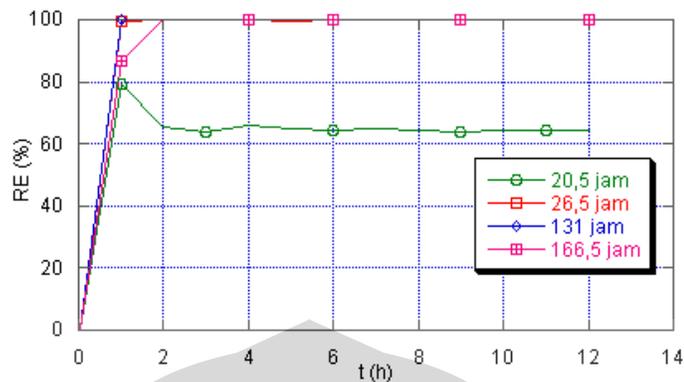
yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 memiliki waktu stabil yang lebih lama (4 jam) dibandingkan dengan kompos kedalaman 50 cm, 60 cm dan 100 cm, di mana waktu stabil yang dicapai hanya 3 jam. Hal ini mungkin dikarenakan oleh perubahan densitas partikel kompos yang sangat signifikan beserta dengan penambahan porositas medium filter di dalam kolom, sehingga pergerakan gas polutan di antara rongga partikel menjadi lebih turbulen, yang menghasilkan kondisi tidak stabil yang lebih panjang.

Adapun sesuai dengan data yang ditunjukkan pada Tabel 4.3, *pressure drop* yang terjadi pada penelitian ini tidak signifikan ( $0 - 0,04 \text{ mH}_2\text{O}$ ), sehingga pengaruh *pressure drop* terhadap hasil penelitian ini dapat diabaikan, karena menurut Govind (2010), *pressure drop* baru akan memberikan kontribusi yang signifikan (dalam bentuk *channeling* dan/atau *clogging*) terhadap penghambatan kinerja reduksi gas polutan oleh medium kompos pada saat nilainya mencapai  $0,3 \text{ inH}_2\text{O}$ , atau setara dengan  $7,62 \text{ cmH}_2\text{O}$ .

Dari hasil penelitian variasi kedalaman medium filter ini, dapat dilihat bahwa secara keseluruhan, efisiensi reduksi tertinggi dicapai oleh kompos dengan kedalaman 100 cm. Berdasarkan hasil penelitian pada variasi inilah, diputuskan untuk menggunakan kedalaman 100 cm sebagai basis untuk variasi penelitian berikutnya, yaitu variasi masa inkubasi medium filter dengan larutan sintetik.

#### **4.4.2 Pengaruh Masa Inkubasi Medium Filter dengan Larutan Nutrisi Sintetik terhadap Peningkatan Efisiensi Reduksi $\text{N}_2\text{O}$**

Uji kinerja biofilter yang diberikan nutrisi tambahan berupa larutan sintetik dapat dianalisis melalui hasil biofiltrasi pada laju alir  $88 \text{ cc/menit}$  dan kedalaman 100 cm (basis massa  $945 \text{ g}$  untuk kedalaman  $50 \text{ cm}$ ), dengan variasi masa inkubasi larutan nutrisi sintetik dalam medium filter selama  $20,5 \text{ jam}$ ,  $26,5 \text{ jam}$ ,  $131 \text{ jam}$ , dan  $166,5 \text{ jam}$ . Hasil penelitian ditunjukkan oleh Gambar 4.12 berikut, sedangkan perubahan sifat fisis dari medium filter sebelum dan sesudah biofiltrasi dapat dilihat pada Tabel 4.5.



Gambar 4.12 Uji kinerja biofilter yang ditambahkan larutan nutrisi sintetis dalam mereduksi  $N_2O$  ( $h = 100\text{cm}$ ,  $Q = 88\text{ cc/menit}$ , medium kompos kering berbasis kotoran kambing)

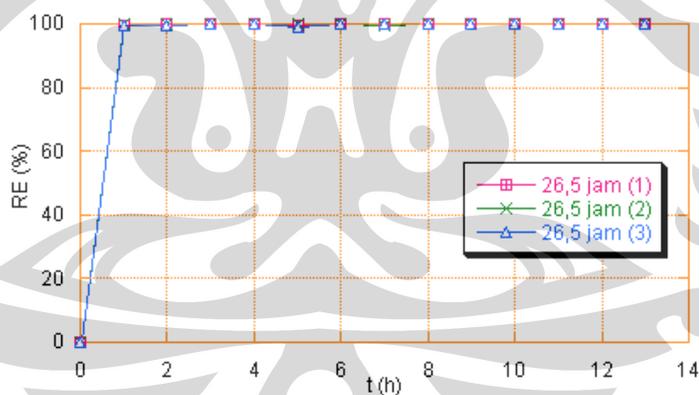
Tabel 4.5 Perubahan sifat fisis dari kompos 100 cm yang diinkubasikan dengan larutan nutrisi sintetis sebelum dan setelah biofiltrasi

Property		symbol	t inkubasi							
			20,5 jam		26,5 jam		131 jam		166.5 jam	
			initial	final	Initial	final	initial	final	initial	final
bioreaktor	T kolom ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_k$	29	28,5	31,4	31,2	28,9	30,1	29	29
	humiditas kolom (%)	$H_k$	68	67	47	57	62	61	65	62
	h aktual kompos (cm)	$h_k$	102,3	102,3	99	98,7	94,5	94,2	100,5	100,4
	Pressure drop ( $\text{mH}_2\text{O}$ )	$\Delta P$	0,04		0,02		0,02		0,02	
Kompos	pH	pH	6,33	6,42	7,5	7,62	6,93	7,63	7,43	7,47
	densitas ( $\text{g/mL}$ )	$\rho$	0,882	0,7216	0,7284	0,7026	0,7816	0,777	1,9906	0,6701
	porositas dalam kolom (%)	$\Phi$	66,559	77,586	86,35	65,83	82,065	73,98	27,625	77,188
	water content (% b/b)	wc	41,48	49,35	56,748	55,3	60,68	57,859	57,74	53,96
	massa dipakai (g)	m	3017,19	2877,44	3128,24	2885,74	3045,26	2720,38	2776,5	2608,99

Dari Gambar 4.12 di atas, terlihat bahwa profil %RE untuk kompos dengan masa inkubasi 20,5 jam menyerupai profil %RE kompos kedalaman medium filter, yaitu naik selama beberapa saat, kemudian turun dan mencapai kestabilan pada jam ke-2. Namun, untuk kompos dengan masa inkubasi 166,5 jam, %RE naik terus hingga mencapai kestabilan pada jam ke-2. Kompos masa inkubasi 26,5 jam dan 131 jam menunjukkan kestabilan profil %RE sejak awal hingga akhir penelitian di efisiensi tertinggi tanpa penurunan yang signifikan, yaitu 100%. Untuk kompos dengan masa inkubasi selama 20,5 jam, analisa yang dapat dibuat adalah belum cukupnya masa inkubasi kompos tersebut dengan larutan nutrisi sintetis. Hal ini dapat dijelaskan sesuai dengan pernyataan Gaudin et.al. (2007) bahwa laju pelepasan nitrogen dan pospor 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 pospor dari nutrisi sintetik baru akan mencapai homogenitas. Dengan kata lain, di bawah jangka waktu 24 jam, perkembangbiakan mikroorganisme belum cukup banyak untuk dapat mereduksi hingga 100% secara terus-menerus seperti pada kompos dengan variasi masa inkubasi yang lainnya, sehingga kinerja dari kompos tersebut untuk mereduksi gas  $N_2O$  tidak terlalu tinggi. Sehingga, sama seperti kompos kering, kompos dengan masa inkubasi 20,5 jam masih mengalami kondisi stabil dan tidak stabil yang dapat diamati melalui hasil penelitian (mengalami kenaikan lalu penurunan %RE).

Adapun validasi data terhadap %RE kompos dengan masa inkubasi 26,5 jam dilakukan dengan duplikasi beberapa set data yang berbeda dari setiap jam (dapat dilihat pada Lampiran 4B), di mana dilakukan pengambilan data 7-8 kali per jam untuk setiap eksperimen, sehingga duplikasi data dapat dilakukan. Hasil duplikasi tersebut ditunjukkan oleh Gambar 4.13 sebagai berikut.



**Gambar 4.13** Grafik %RE hasil duplikasi data untuk validasi data hasil kompos masa inkubasi 26,5 jam

Hasil validasi data di atas menunjukkan bahwa grafik %RE yang dihasilkan tidak jauh berbeda, dengan *error bar* di bawah 1% (data perhitungan dapat dilihat dalam Lampiran 4B), sehingga dapat disimpulkan bahwa data hasil penelitian untuk masa inkubasi 26,5 jam adalah valid.

Hal yang mengakibatkan kurangnya %RE kompos tersebut adalah karena *water content* dari kompos tersebut yang hanya sebesar 41,48% (dapat dilihat dalam Tabel 4.6) tidak berada dalam kisaran *water content* kompos berbasis kotoran kambing yang menghasilkan efisiensi reduksi optimum, yaitu 50 – 70% (Adriaty, 2009). Kisaran *water content* optimum ini sangat penting untuk mempertahankan perkembangbiakan bakteri pendegradasi N<sub>2</sub>O karena air merupakan persyaratan dasar untuk setiap reaksi biokimia yang terjadi di dalam sel (Sattler, 2009). Di dalam biofilter, bukan *water content* yang menentukan efektivitas reduksi gas polutan, melainkan ketersediaan mikroorganisme pendegradasi tersebut. Jika tidak ada air, transpor nutrisi ke dalam sel dan transpor hasil metabolisme dari sel akan terhenti, sehingga akan menghentikan aktivitas mikroorganisme secara tuntas. Selain itu, *water content* yang tidak optimum menyebabkan *biofilm* agak kering, sehingga kemampuan *biofilm* untuk mendifusikan gas ke dalamnya juga berkurang, yang menyebabkan daya biosorpsi permukaan *biofilm* berkurang. Sedangkan, jika *water content* medium filter lebih besar dari kisaran optimumnya, material organik di dalam kompos akan mengalami pembusukan dengan cepat oleh mikroorganisme jenis jamur.

Parameter *water content* dan masa inkubasi yang tidak optimal tersebut dianalisa sebagai faktor yang mengakibatkan %RE kompos dengan masa inkubasi 20,5 jam tidak setinggi kompos dengan masa inkubasi yang lainnya. Namun demikian, %RE yang dicapai oleh kompos dengan masa inkubasi 20,5 jam ini masih lebih tinggi dibandingkan dengan %RE kompos kedalaman 50 cm, 60 cm, dan 80 cm dikarenakan kompos inkubasi 20,5 jam ini menggunakan kedalaman 100 cm. Akan tetapi, jika dibandingkan dengan kompos kering kedalaman 100 cm, %RE kompos inkubasi 20,5 jam ini masih lebih kecil. Hal ini dikarenakan porositasnya yang sangat kecil. Untuk kompos yang diinkubasi selama 20,5 jam, porositas yang tidak terlalu tinggi menyebabkan waktu tinggal gas di dalam medium filter menjadi lebih singkat, sehingga gas yang dapat dibiosorpsi dan dibiodegradasi menjadi lebih sedikit.

**Tabel 4.6** Perbandingan perubahan densitas, porositas, dan *water content* awal dan akhir biofiltrasi pada kompos 100 cm yang kering dengan yang diinkubasikan selama 20,5 jam

	<i>condition</i>	$\rho$ (g/mL)	$\Delta\rho$ (g/mL)	$\Phi$ (%)	<i>water content</i> (%)
<b>100 cm Dry</b>	initial	0,4884	0,0506	80,235	30,345
	final	0,4378		89,24	29,291
<b>100 cm incub. 20,5 jam</b>	initial	0,882	0,1604	66,559	41,48
	final	0,7216		77,586	49,35

Akan tetapi, jika diperhatikan, kompos dengan masa inkubasi 20,5 jam memiliki kondisi tidak stabil yang lebih singkat (yaitu 2 jam) dibandingkan dengan kompos kering berkedalaman 100 cm (3 jam). Densitas dan *water content* kompos inkubasi 20,5 jam yang lebih besar dari kompos kering berkedalaman 100 cm dan porositasnya yang lebih kecil mengakibatkan posisi partikel kompos lebih stabil di dalam kolom. Oleh karena itu, kondisi stabil lebih cepat tercapai untuk kompos yang diinkubasikan selama 20,5 jam dibandingkan dengan kompos kering.

Untuk kompos dengan variasi masa inkubasi 26,5 jam, 131 jam, dan 166,5 jam yang data efisiensi reduksinya menunjukkan kemiripan, data sifat fisiknya dapat dilihat di dalam Tabel 4.5. Dari Tabel 4.5 dan Gambar 4.12, ditunjukkan bahwa profil reduksi gas  $N_2O$  cenderung stabil sejak memasuki jam ke-1 untuk kompos dengan masa inkubasi 26,5 jam dan 131 jam, menandakan bahwa fasa stabilnya tercapai sejak jam ke-1. Sedangkan, fasa stabil kompos inkubasi 166,5 jam baru tercapai pada jam ke-2. Hal ini dianalisa sebagai dampak dari kecilnya porositas kompos di dalam kolom, yang mengakibatkan waktu tinggal gas di dalam medium filter semakin kecil, sehingga tidak dapat tereduksi dengan sempurna (tidak mencapai 100%) pada awal pengoperasian, dan baru mencapai 100% pada jam kedua pengoperasian. Hal ini dianalisa sebagai dampak penurunan densitasnya melalui keluarnya air dari medium filter sebagaimana dapat dilihat pada data di Lampiran 4A. Berbeda dengan kompos masa inkubasi lainnya, untuk kompos dengan masa inkubasi 166,5 jam, uap air baru terdeteksi di *sampling port outlet* biofilter pada jam kedua. Keluarnya air dari medium filter mulai jam kedua pengoperasian dapat menurunkan densitas dan memperbesar porositas, sehingga meningkatkan waktu tinggal gas di dalam medium filter. Hal inilah yang

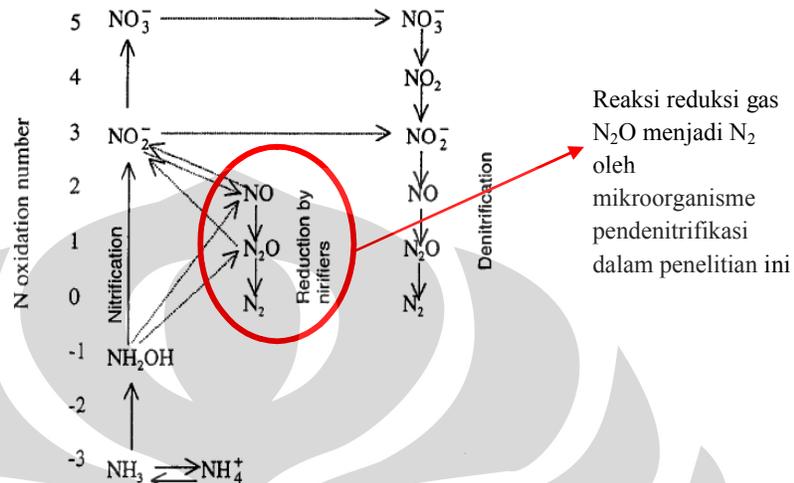
mengakibatkan mulai stabilnya profil %RE kompos dengan masa inkubasi 166,5 jam saat mulai memasuki jam ke-2.

Pada kompos dengan variasi masa inkubasi 26,5 jam, 131 jam, dan 166,5 jam, air akan terakumulasi di bagian bawah kolom saat memasuki jam ke-1 hingga berhenti bertambah setelah jam ke-3 pengoperasian. Air keluar dari kompos dan terakumulasi di dasar kolom sebagai akibat dari dorongan gas polutan yang dialirkan ke dalam kolom, dan juga karena bioaktivitas mikroorganisme yang menghasilkan air sebagai produk sampingnya. Untuk mencegah kenaikan *pressure drop* di dalam kolom, air yang terakumulasi dikeluarkan hingga habis melalui *valve-T* saat pengoperasian biofilter berlangsung untuk seluruh variasi. Adapun perilaku *water content* dari kompos inkubasi 20,5 jam yang mengalami kenaikan dibandingkan dengan *water content* dari kompos seluruh variasi masa inkubasi lainnya yang mengalami penurunan dianalisa sebagai hasil dari retensi kompos (dibuktikan oleh *pressure drop*-nya yang sedikit lebih tinggi, yaitu 0,04 mH<sub>2</sub>O, dibandingkan dengan kompos inkubasi lainnya yang hanya 0,02 mH<sub>2</sub>O) terhadap kandungan air yang dihasilkan oleh metabolisme mikroorganisme.

Berdasarkan hasil penelitian perubahan sifat fisis pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.5, dapat diamati bahwa pH seluruh variasi penelitian sebelum dan setelah biofiltrasi cenderung stabil pada kondisi netral (6 – 8). Hal ini terjadi karena dihasilkannya produk samping berupa air yang memiliki efek *buffer* pH (Gabriel, 2007), dan proses denitrifikasi yang terjadi pada biofiltrasi gas N<sub>2</sub>O tidak menghasilkan senyawa asam maupun basa berfasa liquid yang dapat mempengaruhi pH secara signifikan. Reaksi yang terjadi hanya penguraian gas N<sub>2</sub>O menjadi gas N<sub>2</sub> oleh mikroorganisme pendenitrifikasi, seperti terlihat pada Gambar 4.14.

Namun, pH pada penelitian variasi kedalaman 60 cm mengalami penurunan. Hal ini diakibatkan oleh minimnya produksi air oleh mikroorganisme, yang ditandai dengan efisiensi reduksinya yang paling rendah dari antara seluruh penelitian yang dilakukan, yang juga dapat diamati dari rendahnya konsentrasi air yang terdeteksi pada gas keluaran biofiltrasi (dapat dilihat pada Lampiran 3), dengan mengasumsikan bahwa hampir seluruh uap air gas keluaran biofiltrasi

berasal dari hasil metabolisme mikroorganisme pendenitrifikasi, seperti dituliskan oleh reaksi berikut.



Gambar 4.14 Jalur Metabolisme Nitrogen (Hudepohl, 1999)

Sumber gas polutan pada penelitian ini adalah dari tabung gas  $\text{N}_2\text{O}$  15.000 ppm dalam udara, dan sebagaimana diketahui, udara atmosferik terdiri dari 20% oksigen, 2 ppmv  $\text{CH}_4$ , 370 ppmv  $\text{CO}_2$ , dan sisanya (80% - 372 ppmv)  $\text{N}_2$  (Abichou et.al., 2009). Adanya kandungan gas asam berupa  $\text{CO}_2$  dari udara dan dari hasil metabolisme mikroorganisme serta  $\text{CH}_4$  di dalam udara dapat menjadi faktor penyebab menurunnya pH biofilter selama pengoperasian, terutama apabila gas asam tersebut mudah larut di dalam fasa cair *biofilm*. Minimnya produksi air yang selaras dengan rendahnya efisiensi reduksi gas  $\text{N}_2\text{O}$  pada kompos kedalaman 60 cm mengakibatkan pH lebih mudah berkurang karena tidak ada pencucian gas asam tersebut oleh air yang memiliki pH netral.

Adapun penurunan ketinggian medium filter untuk kompos variasi masa inkubasi terjadi akibat pengeringan permukaan teratas medium filter secara signifikan sebagai bagian yang terlebih dahulu dialiri gas. Hal ini akan mengurangi *water content*-nya, yang berakibat pada pengurangan densitas, sehingga lapisan permukaan tersebut akan lebih mudah mengalami kompaksi. Oleh karena itu, untuk kompos yang memiliki *water content* yang lebih tinggi, kecenderungan untuk mengalami penurunan ketinggian aktual medium filter di dalam kolom akan lebih tinggi.

**Tabel 4.7** Perbandingan perubahan densitas, porositas, *water content*, dan ketinggian aktual medium filter awal dan akhir biofiltrasi pada kompos yang diinkubasikan selama 26,5 jam, 131 jam, dan 166,5 jam

Lama inkubasi	condition	$\rho$ (g/mL)	$\Delta\rho$ (g/mL)	$\Phi$ (%)	water cont. (%)	$\Delta wc$ (%)	h actual (cm)	$\Delta h$ (cm)
26,5 jam	initial	0,7284	0,0258	86,350	56,748	1,448	99,0	0,3
	final	0,7026		65,830	55,300		98,7	
131 jam	initial	0,7816	0,0046	82,065	60,680	2,821	94,5	0,3
	final	0,7770		73,980	57,859		94,2	
166,5 jam	initial	1,9906	1,3205	27,625	57,740	3,780	100,5	0,1
	final	0,6701		77,188	53,960		100,4	

Dengan meninjau pada Tabel 4.7 di atas, dapat dilihat bahwa penurunan ketinggian aktual medium filter kompos 26,5 jam dan 131 jam cukup besar (yaitu 0,3 cm). Namun demikian, *pressure drop* yang terukur untuk seluruh penelitian variasi masa inkubasi tidaklah signifikan, yaitu kurang dari 7,62 cmH<sub>2</sub>O (batas minimal *pressure drop* yang menyebabkan terjadinya *clogging*). Selain itu, didukung oleh adanya signifikansi perubahan sifat fisis kompos setelah biofiltrasi, dapat dipastikan bahwa hasil perhitungan %RE yang tinggi (100%) untuk kompos masa inkubasi 26,5 jam, 131 jam, dan 166,5 jam tidak diakibatkan oleh *clogging*.

Berbeda dengan kompos inkubasi 166,5 jam, dapat diperhatikan bahwa selisih ketinggian aktual dari kompos 166,5 jam cukup kecil (yaitu 0,1 cm) tanpa *pressure drop* yang berarti (0,02 mH<sub>2</sub>O). Akan tetapi, berbeda dengan hasil penelitian mengenai perubahan porositas dari kompos inkubasi 26,5 jam dan 131 jam, kompos inkubasi 166,5 jam malah menunjukkan adanya peningkatan porositas, untuk profil efisiensi reduksi yang mirip antara kompos inkubasi 26,5 jam, 131 jam, dan 166,5 jam. Jika dikaitkan dengan sifat fisis lainnya berupa *water content*, ketinggian aktual, dan selisih densitas, penurunan *water content* dari kompos 166,5 jam yang cukup besar (3,78%) serta perubahan porositas dan perubahan densitas yang ketiganya sangat signifikan dari kompos 166,5 jam dibandingkan dengan kompos masa inkubasi 26,5 jam dan 131 jam menunjukkan bahwa kompos dengan lama masa inkubasi 166,5 jam kurang dapat mempertahankan kestabilan sifat fisisnya. Jika ditinjau dari perubahan densitas, kompos dengan lama masa inkubasi 131 jam memiliki perubahan densitas paling kecil dan *water content* akhir tertinggi dari seluruh variasi penelitian masa

inkubasi. Hal ini menunjukkan bahwa kompos 131 jam merupakan kompos yang memiliki ketahanan sifat fisis yang paling stabil. Dengan demikian, medium kompos inkubasi 131 jam tersebut diprediksikan sebagai medium filter yang paling mampu mempertahankan efisiensi reduksi gas  $N_2O$  agar tetap tinggi untuk jangka waktu pengoperasian yang lama.

Dari kestabilan sifat fisis kompos setelah mengalami biofiltrasi selama 12 jam, disimpulkan bahwa kompos dengan lama masa inkubasi 131 jam merupakan kompos yang memiliki kinerja reduksi gas  $N_2O$  yang optimum dalam penelitian ini.

#### **4.4.3 Hasil Uji Perkembangan Mikroorganisme pada Kompos**

Perkembangan mikroorganisme yang terdapat pada medium filter baik sebelum maupun setelah biofiltrasi dapat dianalisis dengan dua cara, yaitu melalui metode TPC (*Total Plate Count*) dan uji SEM (*Scanning Electron Microscope*).

##### **4.4.3.1 Metode TPC (*Total Plate Count*)**

TPC (*Total Plate Count*) merupakan salah satu metode analisis yang bertujuan untuk mengetahui jumlah koloni mikroba pada suatu sampel. Dalam TPC, perhitungan bakteri dilakukan dengan menggunakan asumsi bahwa satu koloni bakteri dihasilkan oleh satu sel bakteri. TPC pada penelitian ini menggunakan nutrisi agar sebagai medium pengembangbiakan mikroorganisme yang akan dihitung. Hasil dari perhitungan TPC akan direpresentasikan dalam satuan *Colony Forming Units* (CFU) per gram sampel kompos yang diuji.

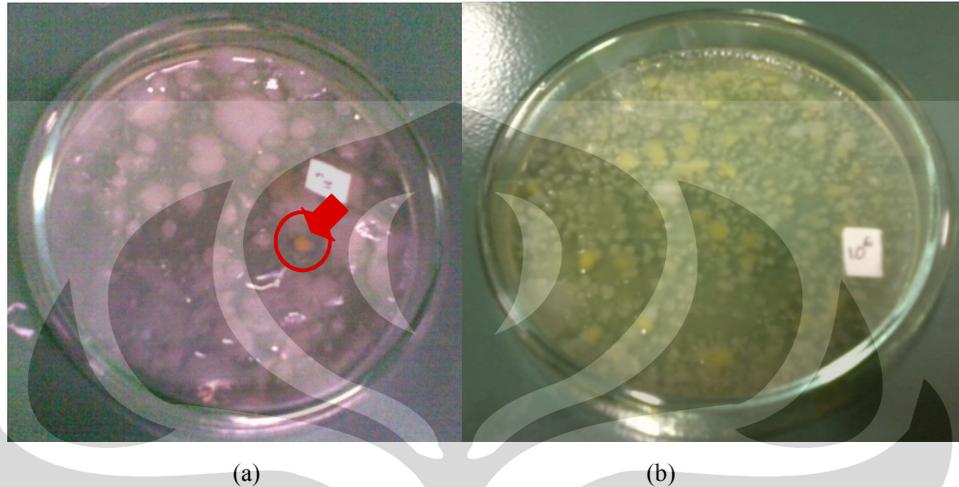
Dalam metode TPC, setiap alat dan bahan yang akan digunakan harus selalu berada dalam keadaan steril dan aseptis supaya peralatan dan bahan yang akan digunakan tidak terkontaminasi oleh mikroorganisme lain yang tidak bersumber dari sampel. Oleh karena itu, sebelum melakukan metode ini perlu dilakukan sterilisasi alat dan bahan terlebih dahulu. Dua metode sterilisasi yang digunakan pada uji TPC antara lain adalah dengan menggunakan panas lembab dengan uap jenuh bertekanan dan panas kering. Sterilisasi dengan cara yang pertama dilakukan dengan menggunakan presto. Metode sterilisasi ini memiliki suhu efektif 121 °C pada tekanan tinggi dengan waktu standar 15 – 20 menit. Cara

ini dipakai untuk melakukan sterilisasi bahan-bahan yang digunakan untuk uji TPC, karena cara ini menyediakan suhu yang jauh di atas titik didih, memiliki daya tembus yang kuat, dan kelembaban sangat tinggi sehingga mempermudah koagulasi protein sel-sel mikroba yang menyebabkan sel hancur. Sementara itu, metode pemanasan dengan metode panas kering memiliki suhu efektif 170 selama 2 jam. Alat yang digunakan pada metode ini adalah oven. Metode ini biasanya digunakan untuk mensterilisasi alat-alat laboratorium.

Setiap kegiatan perpindahan bahan/sampel juga harus dilakukan dengan teknik transfer aseptis. Teknik transfer aseptis adalah suatu metode atau teknik di dalam memindahkan kultur bakteri dari satu tempat ke tempat lain secara aseptis agar tidak terjadi kontaminasi oleh mikroorganisme lain ke dalam kultur. Teknik transfer aseptis ini sangat esensial dan merupakan kunci keberhasilan prosedur mikrobial dalam analisis mikrobiologi. Oleh karena itu, segala proses perpindahan kultur bakteri dilakukan di dalam *transfer box* (ruangan steril) dan selalu dilakukan dengan sterilisasi *transfer box* menggunakan alkohol 70% dan pemanasan alat terlebih dahulu untuk membunuh mikroorganisme pengontaminasi yang terdapat di dalam *transfer box* dan di permukaan peralatan agar tidak memasuki dan mengontaminasi bagian dalam peralatan saat dilakukan transfer sampel.

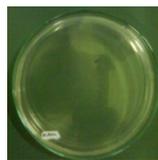
Selain sterilisasi alat dan bahan serta teknik transfer aseptis, metode TPC juga meliputi dilusi/pengenceran sampel, pembuatan nutrisi agar sebagai medium pengembangbiakan mikroorganisme, serta inkubasi sampel TPC dengan suhu 34-35°C selama 1 – 2 hari. Inkubasi dilakukan dengan tujuan untuk menunggu pertumbuhan koloni mikroorganisme pendenitrifikasi supaya dapat dilakukan perhitungan tanpa menggunakan alat bantu, di mana koloni bakteri pendenitrifikasi akan berbentuk bulatan berwarna putih susu. Rentang suhu tersebut dipilih karena suhu 34°C merupakan suhu maksimum yang digunakan pada proses pengomposan (Turan, 2008). Selain itu, di atas suhu 35°C, bakteri patogen akan tumbuh. Hal ini tidak diharapkan karena bakteri patogen tersebut dapat membunuh bakteri denitrifikasi. Hal ini dapat dibuktikan dengan adanya koloni bakteri berwarna kuning yang tidak muncul pada sampel yang diinkubasikan di bawah suhu 35°C (lihat Gambar 4.15), dan adanya bau busuk

yang tercium dari medium agar jika sampel diinkubasikan di atas 35°C. Setelah metode TPC selesai dilakukan, maka sampel yang telah dihitung harus disterilisasi kembali dengan menggunakan presto untuk membunuh mikroba yang terdapat pada sampel.

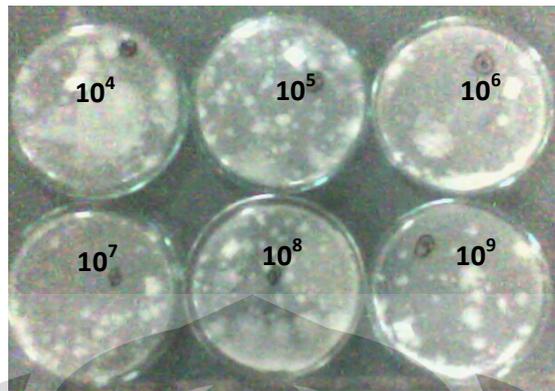


**Gambar 4.15** Sampel TPC yang diinkubasikan di atas 35°C: (a) satu koloni bakteri patogen berwarna kuning di antara koloni bakteri pendenitrifikasi berwarna putih pada sampel yang inkubasi 35,2°C, dan (b) koloni bakteri patogen yang berkembang pesat dan berkompetisi dengan bakteri pendenitrifikasi pada suhu inkubasi 37°C

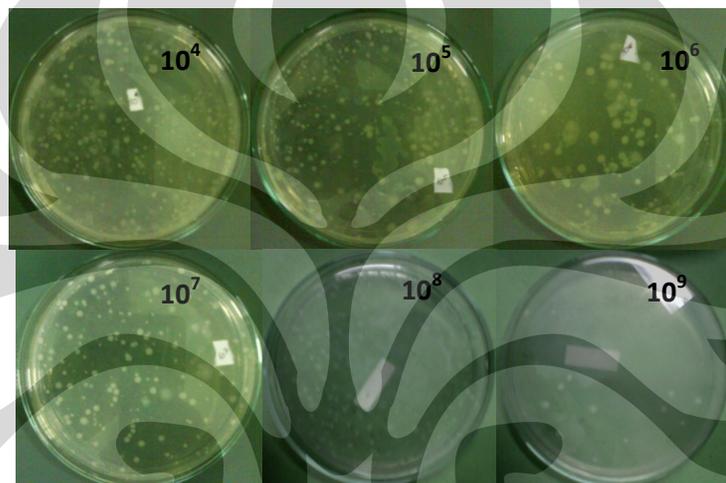
Sebelum dilakukan TPC, adalah penting untuk melakukan uji blangko medium agar terlebih dahulu untuk menguji ketepatan dan keefektifan prosedur TPC yang telah dirancang. Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah metode dan prosedur yang akan digunakan telah efektif untuk menjamin terbebasnya medium nutrisi agar dari kontaminasi. Gambar 4.16 menunjukkan hasil uji blangko medium agar. Sementara itu, Gambar 4.17 merupakan hasil TPC kompos awal sebelum biofiltrasi, Gambar 4.18 menunjukkan hasil TPC kompos setelah biofiltrasi variasi kedalaman medium filter optimum (100 cm), dan Gambar 4.19 menunjukkan kompos setelah biofiltrasi variasi masa inkubasi 166,5 jam (yang secara teoritis memiliki jumlah mikroorganisme terbanyak karena masa inkubasinya paling lama) dengan larutan nutrisi sintetik.



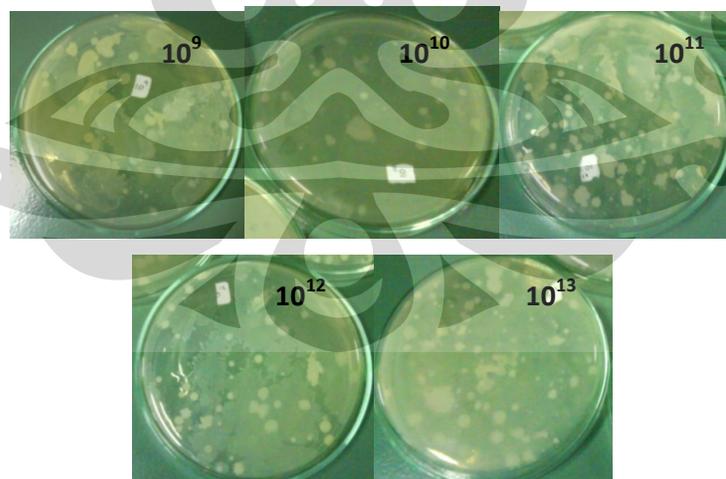
**Gambar 4.16** Hasil uji blangko pada medium agar



**Gambar 4.17** Hasil uji TPC pada kompos awal sebelum biofiltrasi

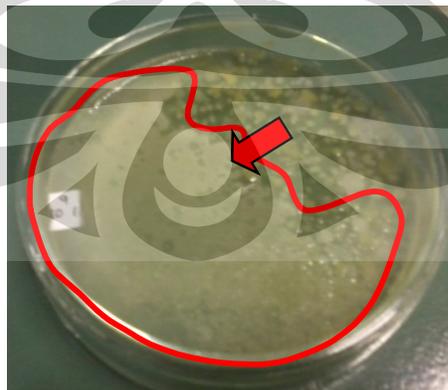


**Gambar 4.18** Hasil uji TPC pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi optimum kedalaman medium filter ( $h = 100$  cm)

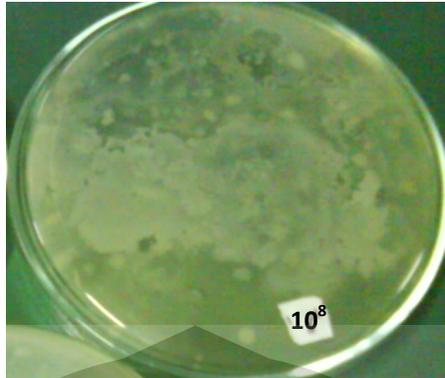


**Gambar 4.19** Hasil uji TPC pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi optimum masa inkubasi medium filter dengan larutan nutrisi sintetik (166,5 jam)

Pada TPC kompos awal sebelum biofiltrasi dan kompos variasi optimum kedalaman 100 cm, pengenceran sampel dilakukan hingga  $10^9$ , dan untuk kompos variasi masa inkubasi 166,5 jam dengan larutan sintetik dilakukan pengenceran hingga  $10^{13}$ . Sampel yang diinkubasikan adalah sampel 6 dilusi terakhir, dengan jumlah duplikasi sampel yang diinkubasikan untuk setiap dilusi adalah sebanyak tiga sampel. TPC ini dilakukan hingga berhasil, yang ditandai oleh tidak adanya kontaminasi oleh jamur. Jamur yang tumbuh pada medium agar memiliki bentuk yang menyebar dan warna yang sama dengan warna koloni bakteri yang dibiakkan (berwarna putih susu), sehingga kontaminasi oleh jamur dapat mengakibatkan kesulitan pengamatan jumlah bakteri yang tumbuh dalam medium agar. Hal ini dapat mengakibatkan ketidakakuratan perhitungan jumlah koloni bakteri, seperti terlihat pada Gambar 4.20. Dari hasil TPC, didapat jumlah rata-rata koloni mikroorganisme. Adapun alasan dilakukannya pengenceran adalah karena jumlah mikroorganisme dalam kompos sangat banyak. Oleh karena itu, semakin tinggi kadar pengenceran yang dilakukan, maka jumlah mikroorganisme yang terkandung di dalamnya akan semakin sedikit, sehingga mempermudah perhitungan secara visual tanpa menggunakan alat bantu. Gambar 4.21 merupakan contoh hasil TPC sampel dilusi  $10^8$  dari kompos variasi masa inkubasi larutan nutrisi sintetik yang jumlah mikroorganismenya masih terlalu banyak, sehingga belum dapat dihitung, dan oleh karenanya, tidak diikutsertakan ke dalam hasil perhitungan jumlah koloni bakteri untuk kompos variasi masa inkubasi.



**Gambar 4.20** Sampel hasil TPC yang terkontaminasi oleh jamur; bagian berwarna putih yang berada di dalam garis berwarna merah merupakan jamur yang tumbuh dalam medium agar



**Gambar 4.21** Sampel hasil TPC kompos variasi masa inkubasi  $10^8$

Populasi mikroorganisme akan tumbuh dari energi (ATP) yang berasal dari transformasi polutan udara yang mengalir pada biofilter. Dengan kata lain, pertumbuhan mikroorganisme dalam sistem biofiltrasi merupakan hasil dari metabolisme menggunakan zat yang merupakan polutan dalam gas umpan. Adapun mineral yang dibutuhkan oleh mikroorganisme mengandung N, S, P, Ca, K, Na, Mg, Fe, Co, dan Zn (Shuler dan Kragi, 1992), di mana beberapa unsur tersebut umumnya terkandung di dalam gas polutan. Pada polutan yang mengandung sulfur, nitrogen atau halogen, beberapa elemen tersebut akan terakumulasi di dalam sistem dan akan direduksi oleh mikroorganisme autotropi yang menurunkan energi dari oksidasi molekul dan menggunakan  $\text{CO}_2$  sebagai sumber karbon. Nitrogen terutama akan direduksi oleh mikroorganisme anaerob, di mana dalam keadaan miskin oksigen, mikroorganisme anaerob akan memanfaatkan nitrogen teroksidasi sebagai elektron akseptor menggantikan oksigen.

Berdasarkan hasil perhitungan TPC yang telah dilakukan (Lampiran 5), diketahui bahwa urutan jumlah mikroorganisme setelah biofiltrasi dengan variasi masa inkubasi dengan larutan nutrisi sintetik memiliki jumlah bakteri terbanyak, diikuti oleh kompos variasi kedalaman medium filter, dan terakhir adalah kompos awal sebelum biofiltrasi. Kompos variasi kedalaman memiliki jumlah mikroorganisme sekitar 18,04% lebih banyak dari kompos awal sebelum biofiltrasi, sedangkan jumlah mikroorganisme pada kompos variasi masa inkubasi larutan nutrisi sintetik jauh lebih banyak dibandingkan dengan kompos awal sebelum biofiltrasi. Hal ini diakibatkan oleh perbedaan *water content* pada variasi

kedalaman medium filter dan variasi masa inkubasi, di mana *water content* kompos awal sebelum biofiltrasi hampir sama dengan *water content* pada kompos variasi kedalaman medium filter, yaitu sekitar 30%. Namun, selain diberikan air hingga mencapai *water content* yang akan menghasilkan %RE optimum untuk biofiltrasi dengan medium filter berupa kompos, kompos variasi masa inkubasi juga diberikan larutan nutrisi sintetik yang dapat menunjang pertumbuhan mikroorganisme dan mempermudah penyerapan gas polutan ke dalam *biofilm*, sehingga perkembangbiakan mikroorganisme akan meningkat sangat pesat untuk hasil variasi masa inkubasi dengan larutan nutrisi sintetik. Hasil perhitungan TPC pada ketiga jenis sampel ini dapat dilihat pada Tabel 4.8.

**Tabel 4.8** Hasil uji TPC (sebelum dan setelah biofiltrasi) dan %RE yang dicapai

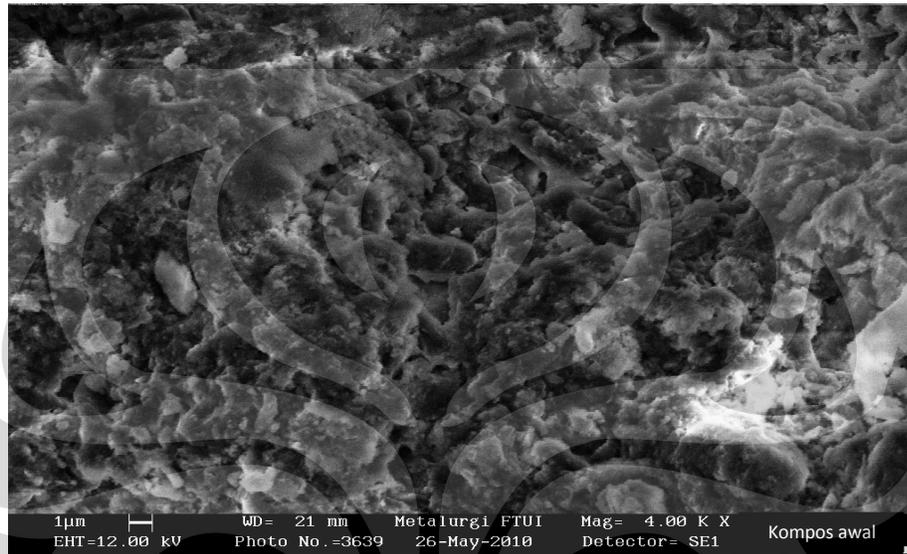
Sampel Uji TPC	$\Sigma$ Mikroorganisme ( $10^{-11}$ CFU/g)	RE (%)
Kompos Awal Sebelum Biofiltrasi	3,88	-
Kompos Setelah Biofiltrasi Variasi Kedalaman 100 cm Medium Filter	4,58	78,63%
Kompos Setelah Biofiltrasi Variasi Masa Inkubasi 166,5 jam dengan Larutan Sintetik	$6,95 \times 10^4$	100%

#### 4.4.3.2 Uji SEM (*Scanning Electron Microscope*)

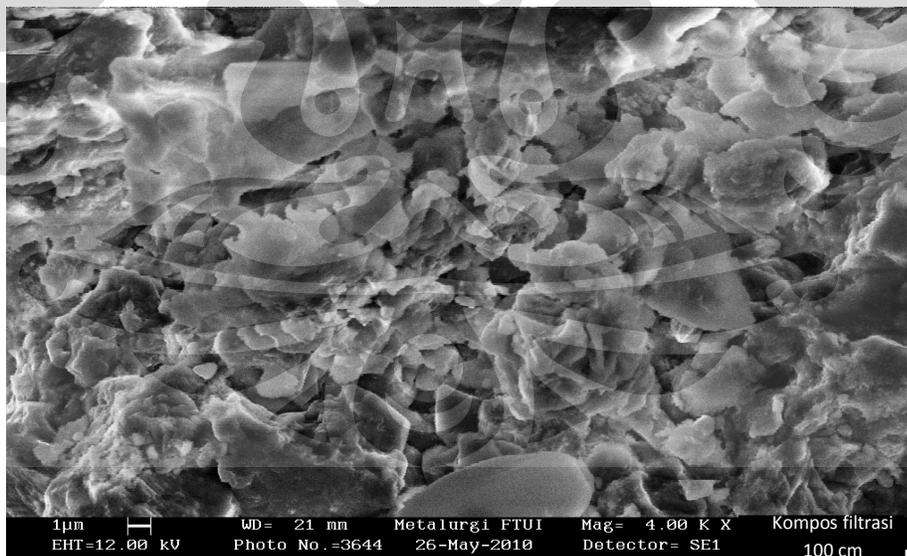
Jumlah mikroorganisme sebelum dan setelah biofiltrasi juga dapat diamati secara visual melalui uji SEM (*Scanning Electron Microscope*) untuk melihat morfologi kompos secara mikroskopik. Gambar 4.22 hingga Gambar 4.24 di halaman berikutnya menunjukkan jumlah mikroorganisme yang terlihat pada medium filter yang diuji dengan menggunakan SEM.

Perbesaran yang digunakan untuk uji SEM ini adalah 4000 x sehingga mikroorganisme yang terdapat di dalam medium filter dapat terlihat dengan jelas. Berdasarkan hasil SEM di atas, dapat dilihat perbedaan pada kompos awal yang belum digunakan untuk biofiltrasi dengan kompos yang telah digunakan untuk biofiltrasi variasi kedalaman medium filter dan variasi masa inkubasi medium filter dengan larutan nutrisi sintetik. Kompos awal sebelum biofiltrasi mengandung lebih sedikit mikroorganisme yang terlihat daripada kompos yang

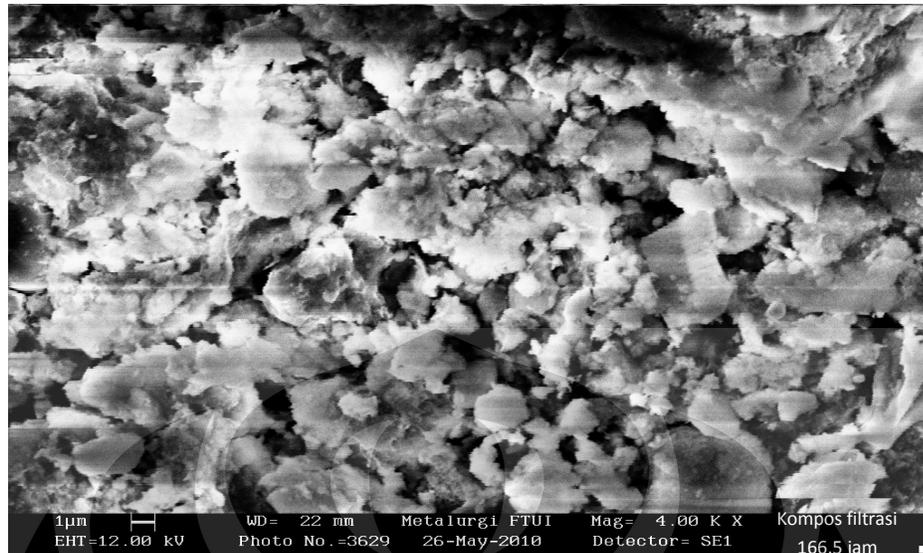
sudah digunakan untuk biofiltrasi. Fenomena peningkatan jumlah mikroorganisme pada kompos setelah dilakukan biofiltrasi memperkuat analisis bahwa terjadi proses biodegradasi oleh mikroorganisme untuk metabolisme dan reproduksinya dengan mereduksi polutan berupa  $N_2O$  dalam aliran gas umpan penelitian ini.



Gambar 4.22 Hasil Uji SEM pada kompos awal sebelum biofiltrasi



Gambar 4.23 Hasil Uji SEM pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi kedalaman 100 cm medium filter



**Gambar 4.24** Hasil Uji SEM pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi masa inkubasi 166,5 jam dengan larutan nutrisi sintetik

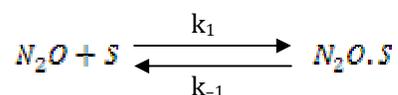
#### 4.5 Pemodelan Hasil Eksperimen

Biofiltrasi terbagi atas dua jenis proses, yaitu proses biosorpsi gas polutan ke permukaan *biofilm*, dan proses biodegradasi gas polutan yang teradsorpsi ke permukaan *biofilm* oleh mikroorganisme. Berikut ini dibuat persamaan kinetika dari kedua proses tersebut.

##### 4.5.1 Pemodelan untuk Proses Biosorpsi Gas $N_2O$ ke Permukaan *Biofilm*

Pemodelan biosorpsi hasil eksperimen biofiltrasi menggunakan persamaan adsorpsi Langmuir. Proses biosorpsi ini hanya terjadi pada permukaan *biofilm* saja karena tidak pada pori-pori partikel kompos yang tergolong mikropori, sebagaimana disimpulkan dari hasil uji BET pada subbab 4.3.2.1. Biosorpsi yang terjadi pada eksperimen biofiltrasi ini merupakan adsorpsi fisika karena tidak ada reaksi kimia yang terjadi pada *biofilm*, dan proses biosorpsi terjadi pada suhu ruang yang cenderung konstan dan tekanan atmosferik, sehingga persamaan yang lebih cocok untuk digunakan adalah persamaan adsorpsi isoterms Langmuir.

Reaksi biosorpsi yang terjadi pada substrat (S) berupa *biofilm* pada permukaan medium filter dituliskan sebagai berikut:



di mana konsentrasi adsorben (dalam penelitian ini adalah N<sub>2</sub>O) dapat dituliskan ke dalam bentuk berikut (Lin et.al., 2004):

$$q_s = (C_0 - C_t) \frac{V}{m} \quad (4.2)$$

di mana  $q_s$ , setara dengan  $C_{N_2O,s}$ , adalah konsentrasi kesetimbangan pada adsorben (g/kg),  $C_0$  adalah konsentrasi *inlet* gas N<sub>2</sub>O (g/m<sup>3</sup>),  $C_t$  adalah konsentrasi gas N<sub>2</sub>O pada waktu  $t$  (g/m<sup>3</sup>),  $V$  adalah volume teoritis medium filter di dalam kolom (m<sup>3</sup>), dan  $m$  adalah massa adsorben yang dipakai (kg).

Selain itu, untuk rumus gas ideal pada kondisi isothermal dan isovolum, perubahan tekanan menjadi sebanding dengan perubahan mol, dan perubahan mol sebanding dengan perubahan massa per volume sampel dalam *syringe*. Oleh karena konsentrasi dalam adsorpsi isothermis Langmuir ini dituliskan dalam satuan massa, maka konversi tekanan parsial menjadi massa dapat dituliskan sebagai berikut:

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

maka

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

$$m = n \times Mr$$

$$m_{N_2O} = n_{N_2O} \times Mr_{N_2O} \quad ; \quad C_s = m_{N_2O}/V$$

sehingga

$$C_s = \frac{n_{N_2O} \times Mr_{N_2O}}{V} \quad (4.3)$$

Persamaan (4.3) digunakan jika data N<sub>2</sub>O teradsorp diperoleh dalam satuan mol. Dengan mengadaptasikan rumus (4.2) dan (4.3), persamaan laju adsorpsi dan desorpsi untuk persamaan reaksi biosorpsi N<sub>2</sub>O ke permukaan *biofilm* dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$\text{laju desorpsi N}_2\text{O} = k_{-1} C_{N_2O,s} = k_{-1} q_s$$

$$\text{laju adsorpsi N}_2\text{O} = k_1 C_v P_{N_2O} = k_1 C_v C_s$$

di mana  $C_v$  merupakan total massa *biofilm* yang masih dapat mengadsorp.

Dengan demikian, persamaan laju reaksi pada permukaan *biofilm* adalah sebagai berikut:

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

$$r_{AD} = k_1 C_v C_s - k_{-1} q_s$$

$$r_{AD} = k_1 \left( C_v C_s - \frac{k_{-1}}{k_1} q_s \right) \quad ; K_L = \frac{k_1}{k_{-1}}$$

$$r_{AD} = k_1 \left( C_v C_s - \frac{q_s}{K_L} \right) \quad (4.4)$$

di mana  $K_L$  merupakan konstanta Langmuir ( $m^3/g$ ). Pada kondisi kesetimbangan adsorpsi dan desorpsi  $N_2O$ , laju kesetimbangannya adalah sama, sehingga laju persamaan (4.4) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$r_{AD} = 0$$

sehingga

$$0 = k_1 \left( C_v C_s - \frac{q_s}{K_L} \right)$$

dengan mengasumsikan bahwa  $N_2O$  merupakan satu-satunya gas yang diadsorpsi ke dalam *biofilm*, maka dapat dituliskan bahwa  $q_m = q_s + C_v$ , di mana  $q_m$  merupakan kapasitas penyerapan *biofilm*. Dengan demikian, rumus di atas menjadi

$$\frac{q_s}{K_L} = (q_m - q_s) C_s$$

$$q_s - (q_m - q_s) K_L C_s$$

$$q_s = q_m K_L C_s - q_s K_L C_s$$

$$q_s + q_s K_L C_s = q_m K_L C_s$$

$$q_s (1 + K_L C_s) = q_m K_L C_s$$

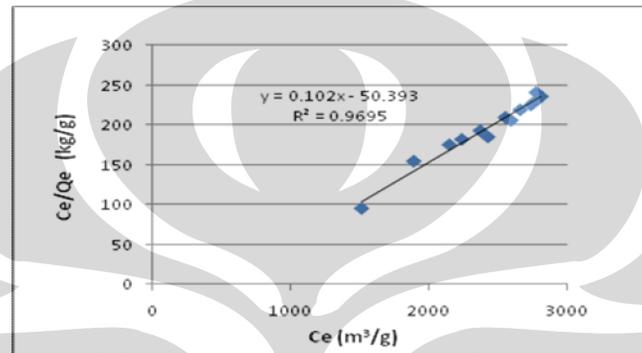
$$q_s = \frac{q_m K_L C_s}{1 + K_L C_s}$$

$$\frac{1}{q_s} = \frac{1 + K_L C_s}{q_m K_L C_s}$$

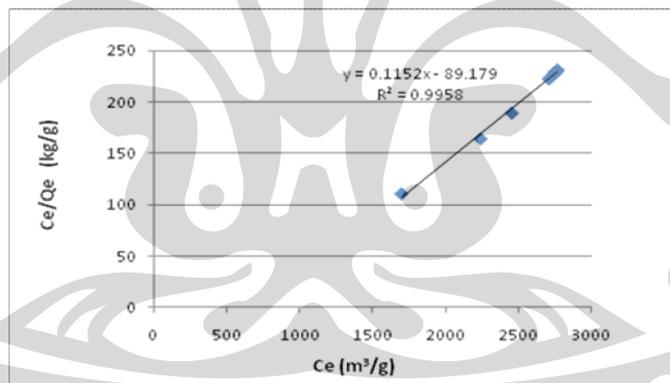
$$\frac{1}{q_s} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L C_s}$$

$$\frac{C_s}{q_s} = \frac{C_s}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L} \quad (4.5)$$

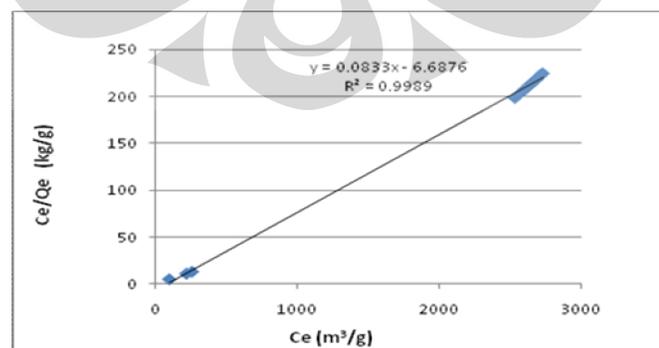
Pengolahan data dilakukan terhadap data yang diperoleh pada selama 12 jam pengoperasian biofilter. Data-data tersebut kemudian diplot antara  $C_e$  vs  $C_e/q_e$  (Soeprijanto dan Fabella., 2010) sesuai dengan persamaan adsorpsi Langmuir yang terlinearisasi, yaitu persamaan (4.5). Berikut ini dapat dilihat grafik linearisasi adsorpsi isothermis seluruh eksperimen pada Gambar 4.25 hingga Gambar 4.28 untuk variasi kedalaman medium filter, dan Gambar 4.29 untuk variasi masa inkubasi 20,5 jam dengan larutan sintetik.



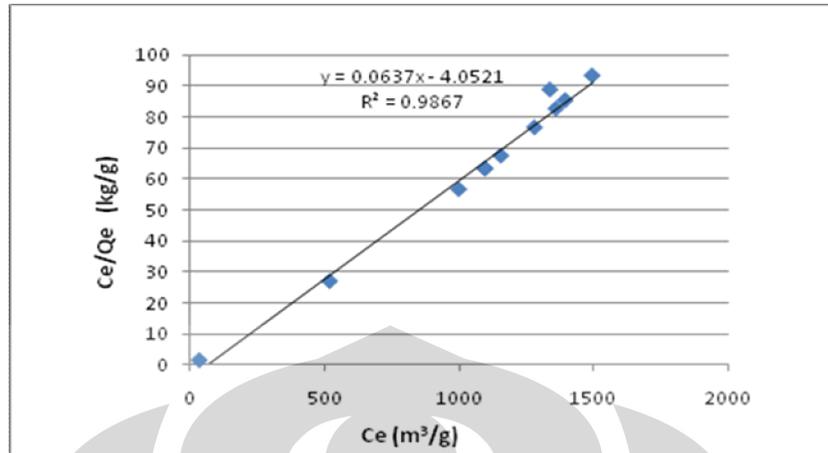
Gambar 4.25 Kurva Adsorpsi Isothermis Langmuir (kompos kering, h = 50cm)



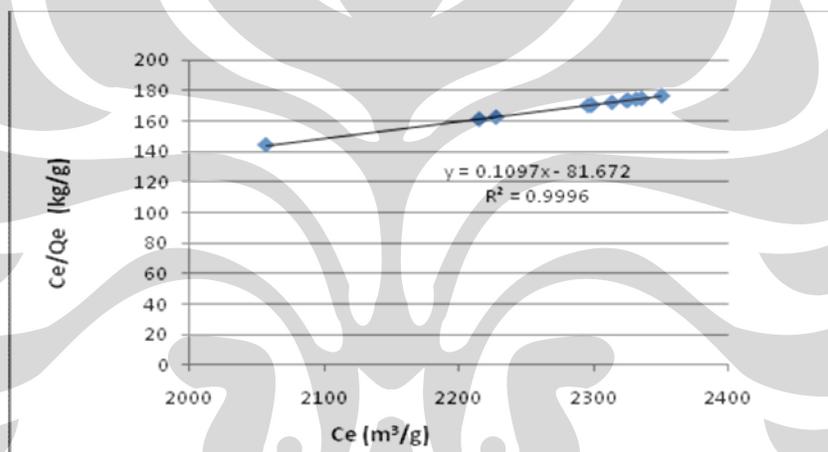
Gambar 4.26 Kurva Adsorpsi Isothermis Langmuir (kompos kering, h = 60cm)



Gambar 4.27 Kurva Adsorpsi Isothermis Langmuir (kompos kering, h = 80cm)



**Gambar 4.28** Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (kompos kering, h = 100cm)



**Gambar 4.29** Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (masa inkubasi 20,5 jam, h = 100cm)

Konstanta Langmuir dapat dicari dari nilai intersep (titik perpotongan garis pada sumbu y) persamaan linearisasi yang diperoleh. Berikut ini adalah contoh perhitungan konstanta Langmuir untuk kompos kedalaman 50 cm, di mana

$$\text{gradien} = m = \frac{1}{q_m} \quad (4.6)$$

dan

$$\text{intersep} = \frac{1}{q_m K_L} \quad (4.7)$$

Hubungan antara persamaan (4.6) dan (4.7) dapat dituliskan menjadi persamaan (4.8) sebagai berikut:

$$\text{intersep} = \frac{m}{K_L} \quad (4.8)$$

Dari persamaan yang tertera pada Gambar 4.24, dapat dilihat bahwa gradien bernilai 0,1123 dan intersep bernilai – 83,324. Dengan mensubstitusikan kedua nilai tersebut ke dalam persamaan (4.8), diperoleh nilai  $K_L$  dengan hasil sebagai berikut

$$\begin{aligned} \text{intersep} &= \frac{m}{K_L} \\ -83,324 &= \frac{0,1123}{K_L} \\ K_L &= -0,00135 \end{aligned}$$

Sedangkan, untuk konstanta  $q_m$  persamaan pada Gambar 4.24, nilainya dapat diperoleh dengan mengubah persamaan (4.6) menjadi persamaan (4.9) sebagai berikut

$$\begin{aligned} m &= \frac{1}{q_m} \rightarrow q_m = \frac{1}{m} & (4.9) \\ q_m &= \frac{1}{0,1123} = 8,90472 \end{aligned}$$

sehingga nilai  $q_m$  dari persamaan garis pada Gambar 4.24, diperoleh  $q_m = 8,90472$ . Dengan cara yang sama, nilai parameter  $K_L$  dan  $q_m$  untuk seluruh grafik adsorpsi isotermis Langmuir lainnya dapat diperoleh, seperti yang tercantum pada Tabel 4.9. Data perhitungan pada permodelan adsorpsi isotermis Langmuir ini dapat dilihat pada Lampiran 6 untuk seluruh variasi penelitian kedalaman medium filter dan variasi masa inkubasi 20,5 jam dengan larutan sintetik.

**Tabel 4.9** Persamaan, nilai korelasi, dan konstanta Langmuir dari kurva adsorpsi isotermis Langmuir hasil eksperimen biofiltrasi seluruh variasi kedalaman medium filter dan masa inkubasi 20,5 jam dengan larutan sintetik

variasi		persamaan y	nilai R	Nilai $K_L$ ( $m^3/g$ )	$q_m$ (g $N_2O/kg$ kompos)
Kedalaman Medium Filter	50 cm	$y = 0.102x - 50.393$	$R^2 = 0.9695$	-0.00205	9.80392
	60 cm	$y = 0,1152x - 89,179$	$R^2 = 0,9958$	-0,00129	8,68056
	80 cm	$y = 0,923x - 657,55$	$R^2 = 0,9909$	-0,00140	1,08342
	100 cm	$y = 0,0637x - 4,0521$	$R^2 = 0,9867$	-0,01572	15,69859
Masa inkubasi	20,5 jam	$y = 0,1097x - 81,672$	$R^2 = 0,9996$	-0,00134	9,11577

Adapun tanda negatif pada konstanta Langmuir menunjukkan bahwa gas N<sub>2</sub>O yang dapat diadsorp semakin berkurang. Namun, nilai nominalnya menunjukkan kemampuannya dalam mengadsorp. Semakin besar nilai konstanta Langmuir, maka semakin tinggi kemampuannya mengadsorp. Sedangkan, konstanta q<sub>m</sub> menunjukkan kapasitas biosorpsi medium. Semakin besar q<sub>m</sub>, semakin banyak N<sub>2</sub>O yang dapat diadsorp. Dari Tabel 4.9, dapat dilihat bahwa medium filter yang memiliki kemampuan mengadsorp paling besar untuk variasi kedalaman medium filter adalah kompos dengan kedalaman 100 cm (dan ditunjukkan oleh %RE-nya yang merupakan %RE tertinggi kompos variasi kedalaman). Untuk variasi masa inkubasi, kemampuan mengadsorp terbesar dimiliki oleh kompos masa inkubasi 131 jam, yang juga merupakan kompos dengan kemampuan terbesar dalam mengadsorp. Hasil pemodelan tersebut juga selaras dengan besarnya %RE yang dicapai oleh kompos dengan %RE terendah, di mana kemampuan terkecil dalam mengadsorp dan %RE terendah dimiliki oleh kompos kedalaman 60 cm dan kompos masa inkubasi 20,5 jam.

Hasil dari Tabel 4.9 juga menunjukkan bahwa kapasitas biosorpsi maksimum yang tertinggi dimiliki oleh kompos kedalaman 100 cm dan kompos inkubasi 131 jam. Hal ini juga menjadi salah satu parameter penentu kompos kedalaman 100 cm dan kompos masa inkubasi 131 jam sebagai kompos yang memiliki kinerja optimum dalam mereduksi gas N<sub>2</sub>O.

#### **4.5.2 Pemodelan Biodegradasi Gas N<sub>2</sub>O yang Teradsorb pada Permukaan Biofilm oleh Mikroorganisme**

Hasil eksperimen biofiltrasi pada kondisi tidak stabil ini dimodelkan menggunakan persamaan Michaelis-Menten (Chiu et. al., 2006, Kim *et al.*, 2000). Parameter Kinetik V<sub>m</sub> dan K<sub>s</sub> ditentukan oleh persamaan Michaelis-Menten sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (4.10) dan (4.11) (Chiu et. al., 2006, Kim *et al.*, 2000). Nilai laju reduksi dari eksperimen ditentukan dengan persamaan (4.10).

$$R = \frac{C_{in} - C_{out}}{t} = \frac{SV}{\alpha} (C_0 - C_e) \quad (4.10)$$

$$R = \frac{V_m \times \frac{C_{in} - C_{out}}{\ln\left(\frac{C_{in}}{C_{out}}\right)}}{K_s + \frac{C_{in} - C_{out}}{\ln\left(\frac{C_{in}}{C_{out}}\right)}} \quad (4.11)$$

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

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

$K_s$  = konstanta saturasi ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$C_{in} = C_o$  = konsentrasi  $\text{N}_2\text{O}$  terukur pada *inlet* biofilter ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

$C_{out} = C_e$  = konsentrasi  $\text{N}_2\text{O}$  terukur pada *outlet* biofilter ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

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

$S_a$  = *cross sectional area* ( $\text{m}^2$ )

$F$  = laju alir gas ( $\text{m}^3/\text{jam}$ )

$L$  = tinggi kolom *packed bed* (m)

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

$\alpha$  = koefisien konversi

Nilai parameter yang penting untuk diketahui dalam mengevaluasi efektivitas biodegradasi  $\text{N}_2\text{O}$  oleh mikroorganisme dalam kompos penelitian ini berupa  $K_s$  dan  $V_m$ . Ini dikarenakan  $K_s$  menunjukkan ukuran kemampuan mikroorganisme dalam medium filter kompos kambing ini mendegradasi gas  $\text{N}_2\text{O}$ , dan  $V_m$  merupakan laju biodegradasi maksimum yang dapat dicapai oleh mikroorganisme di dalam kompos. Untuk mendapatkan nilai parameter  $K_s$  dan  $V_m$  dari persamaan linearisasi Michaelis – Menten dalam penelitian ini, diturunkan terlebih dahulu persamaan (4.12) berikut ini yang merupakan rumus laju perubahan konsentrasi gas polutan terhadap perubahan kedalaman medium filter.

$$\frac{-dC}{dL} = \frac{V_m C}{K_s + C} \left( \frac{S_a}{F} \right) \alpha \quad (4.12)$$

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

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

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

$$-\frac{(K_s+C) dC}{V_m C} = \left(\frac{S_a}{F}\right) \alpha dL \quad (4.13)$$

Integrasi ruas kiri persamaan (4.13) dari  $C = C_o$  ke  $C = C_e$  dan ruas kanan dari  $L = 0$  ke  $L = L$  menghasilkan

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

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

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

$$-\frac{K_s}{V_m} (\ln C_e - \ln C_o) - \frac{1}{V_m} (C_e - C_o) = \left(\frac{S_a \alpha}{F}\right) (L - 0)$$

$$-\frac{K_s}{V_m} \left(\ln \frac{C_e}{C_o}\right) - \frac{1}{V_m} (C_e - C_o) = \left(\frac{S_a L \alpha}{F}\right) ; \text{ di mana } SV = \frac{F}{S_a L}$$

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

$$\frac{K_s}{V_m} \left(\ln \frac{C_e}{C_o}\right) + \frac{1}{V_m} (C_o - C_e) = \left(\frac{\alpha}{SV}\right) \quad (4.14)$$

Dengan mengalikan  $\left(\frac{1}{C_o - C_e}\right)$  ke kedua ruas di persamaan (4.14), dihasilkan

$$\frac{K_s}{V_m} \left(\frac{\ln \frac{C_e}{C_o}}{C_o - C_e}\right) + \frac{1}{V_m} = \left(\frac{\alpha}{SV(C_o - C_e)}\right) ; \text{ di mana } \frac{\ln \frac{C_e}{C_o}}{C_o - C_e} = \frac{1}{\left(\frac{C_o - C_e}{\ln \frac{C_e}{C_o}}\right)}$$

$$\frac{K_s}{V_m} \frac{1}{\left(\frac{C_o - C_e}{\ln \frac{C_e}{C_o}}\right)} + \frac{1}{V_m} = \left(\frac{\alpha}{SV(C_o - C_e)}\right) \quad (4.15)$$

Dengan mensubstitusikan  $R = \frac{SV}{\alpha}(C_o - C_e)$  dari persamaan (4.10) dan dengan mengubah termin  $\frac{C_o - C_e}{\ln \frac{C_o}{C_e}}$  sebagai  $C_{In}$ , persamaan (4.15) dapat disederhanakan menjadi

$$\frac{K_s}{V_m} \left( \frac{1}{C_{In}} \right) + \frac{1}{V_m} = \left( \frac{1}{R} \right) \quad (4.16)$$

Dengan mengalikan kedua ruas persamaan (4.16) dengan  $C_{In}$ , diperoleh

$$\frac{K_s}{V_m} + \frac{C_{In}}{V_m} = \left( \frac{C_{In}}{R} \right)$$

$$\frac{(K_s + C_{In})}{V_m} = \left( \frac{C_{In}}{R} \right)$$

$$\frac{(K_s + C_{In})}{V_m} = \left( \frac{C_{In}}{R} \right)$$

$$(K_s + C_{In})R = V_m C_{In}$$

$$R = \frac{V_m C_{In}}{(K_s + C_{In})} \quad ; \text{ di mana } C_{In} = \frac{C_o - C_e}{\ln \frac{C_o}{C_e}}$$

Sehingga

$$R = \frac{V_m \times \left( \frac{C_o - C_e}{\ln \frac{C_o}{C_e}} \right)}{K_s + \left( \frac{C_o - C_e}{\ln \frac{C_o}{C_e}} \right)} \quad (4.17)$$

Dengan mengganti  $C_o$  menjadi  $C_{in}$  dan  $C_e$  menjadi  $C_{out}$  beserta substitusi  $R = \frac{C_{in} - C_{out}}{t}$  dari persamaan (4.10), maka persamaan (4.17) berubah menjadi

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

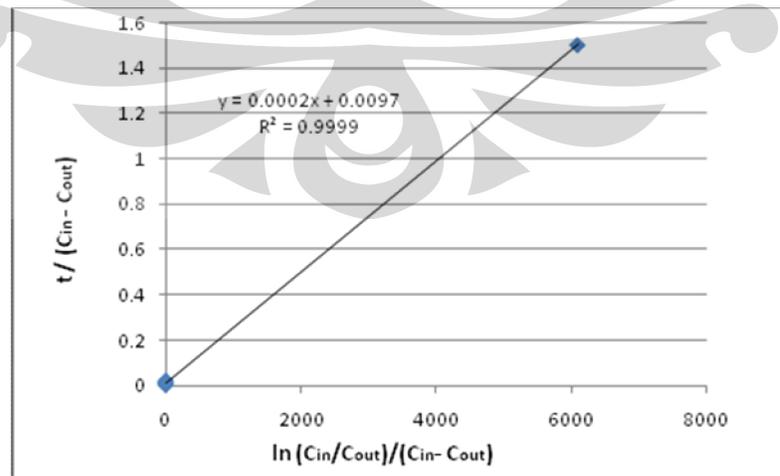
$$\frac{t}{C_{in} - C_{out}} = \frac{K_s + \frac{C_{in} - C_{out}}{\ln \left( \frac{C_{in}}{C_{out}} \right)}}{V_m \times \frac{C_{in} - C_{out}}{\ln \left( \frac{C_{in}}{C_{out}} \right)}}$$

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

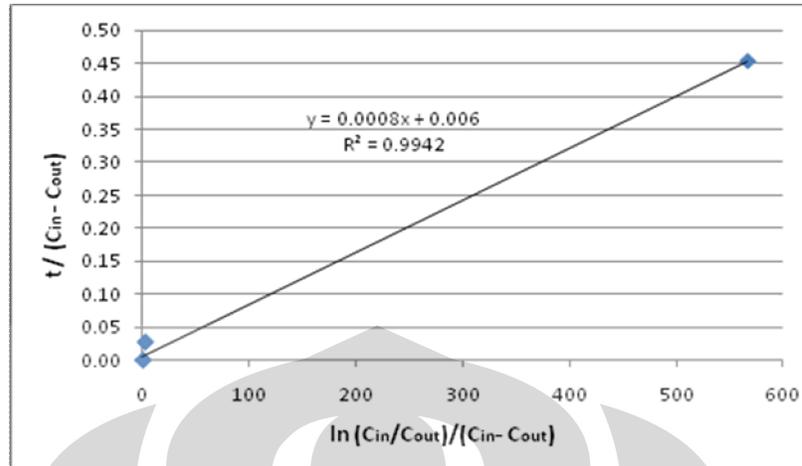
$$\left(\frac{t}{C_{in} - C_{out}}\right) = \frac{K_s}{V_m} \left(\frac{1}{\frac{C_{in} - C_{out}}{\ln\left(\frac{C_{in}}{C_{out}}\right)}}\right) + \frac{1}{V_m}$$

$$\left(\frac{t}{C_{in} - C_{out}}\right) = \frac{K_s}{V_m} \left(\frac{\ln\left(\frac{C_{in}}{C_{out}}\right)}{C_{in} - C_{out}}\right) + \frac{1}{V_m} \quad (4.18)$$

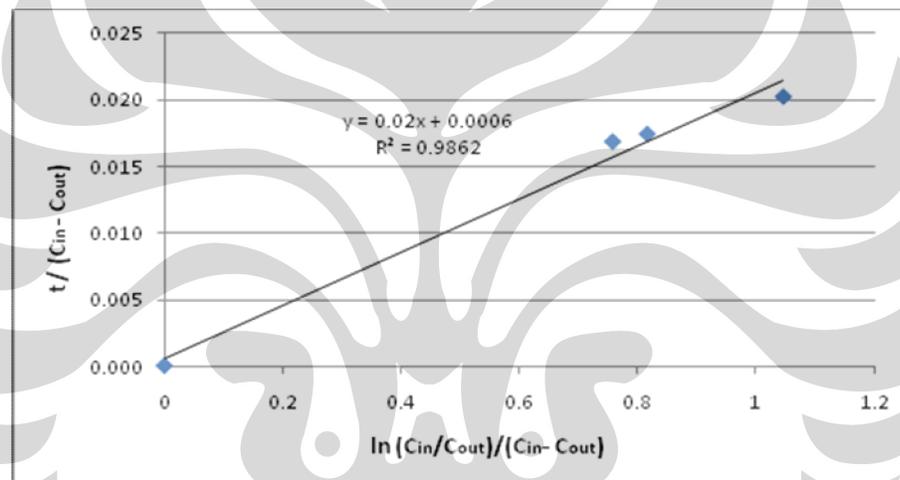
Persamaan (4.18) di atas merupakan persamaan Michaelis – Menten yang terlinearisasi. Plot data  $\left(\frac{\ln\left(\frac{C_{in}}{C_{out}}\right)}{C_{in} - C_{out}}\right)$  vs  $\left(\frac{t}{C_{in} - C_{out}}\right)$  kemudian dilakukan untuk mendapatkan grafik pemodelan Michaelis – Menten yang terlinearisasi untuk biodegradasi N<sub>2</sub>O oleh mikroorganisme dalam kompos. Pengolahan data menggunakan persamaan (4.18) dapat dilihat pada Lampiran 7 untuk seluruh variasi penelitian. Grafik hasil linearisasi dengan persamaan Michaelis Menten dapat dilihat pada Gambar 4.30 hingga Gambar 4.33 untuk variasi kedalaman medium filter, dan Gambar 4.34 untuk variasi masa inkubasi 20,5 jam dengan larutan sintetik.



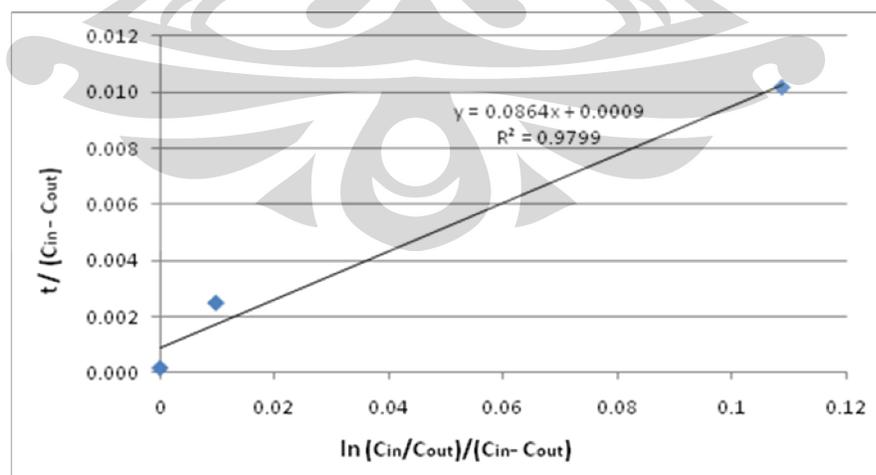
**Gambar 4.30** Kurva Michaelis Menten (kompos kering, h = 50 cm)



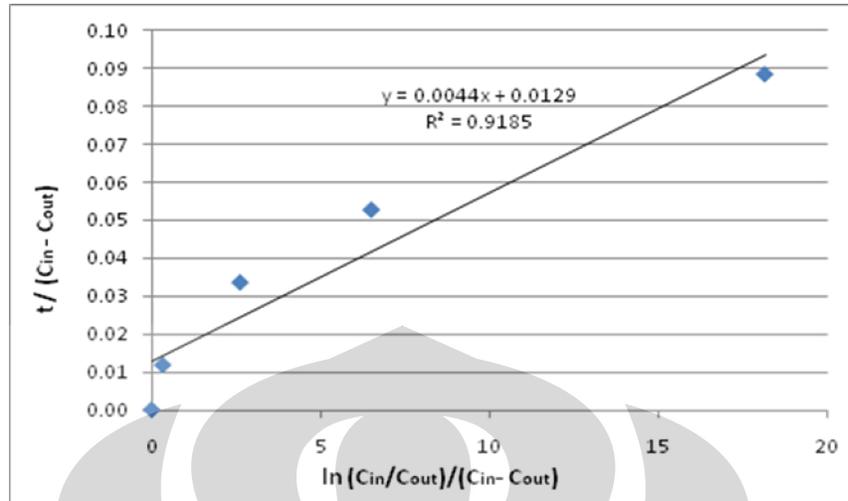
Gambar 4.31 Kurva Michaelis Menten (kompos kering,  $h = 60$  cm)



Gambar 4.32 Kurva Michaelis Menten (kompos kering,  $h = 80$  cm)



Gambar 4.33 Kurva Michaelis Menten (kompos kering,  $h = 100$  cm)



**Gambar 4.34** Kurva Michaelis Menten (masa inkubasi = 20,5 jam, h = 100 cm)

Nilai parameter  $V_m$  dan  $K_s$  dapat dicari dari nilai intersep dan gradien persamaan garis linear yang terbentuk, melalui persamaan (4.19) dan (4.20) sebagai berikut

$$\text{intersep} = \frac{1}{V_m} \quad (4.19)$$

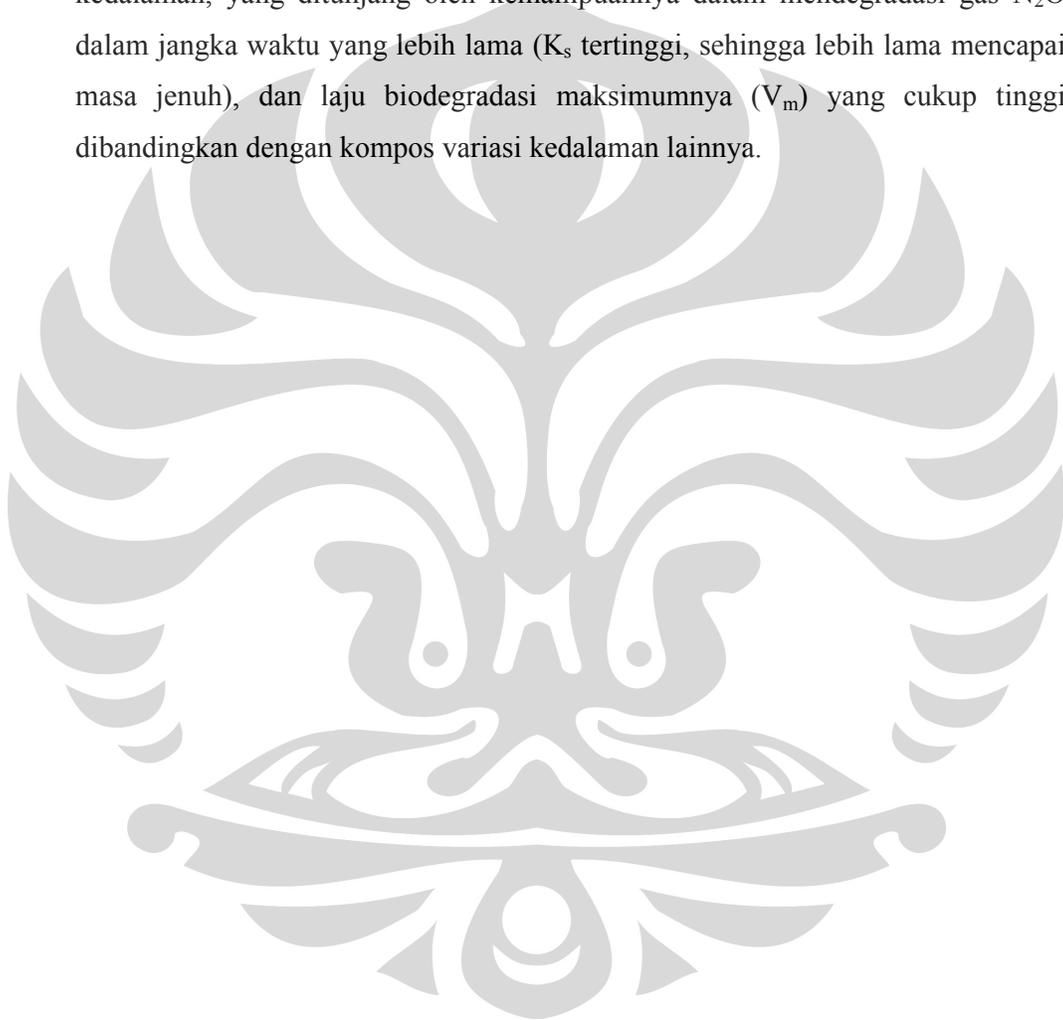
$$\text{gradien} = m = \frac{K_s}{V_m} \quad (4.20)$$

Dengan menggunakan persamaan (4.19) dan (4.20), diperoleh data-data parameter  $V_m$  dan  $K_s$  dari kompos seluruh variasi kedalaman medium filter dan variasi masa inkubasi 20,5 jam dengan larutan sintetik, seperti yang tercantum pada Tabel 4.10.

**Tabel 4.10** Persamaan, nilai korelasi, nilai  $V_m$  dan  $K_s$  dari kurva degradasi Michaelis – Menten hasil eksperimen biofiltrasi seluruh variasi kedalaman medium filter dan masa inkubasi 20,5 jam dengan larutan sintetik

Variasi		persamaan y	nilai R	Nilai $K_s$ (g/m <sup>3</sup> )	$V_m$ (g/m <sup>3</sup> jam)
Kedalaman Medium Filter	50 cm	y = 0.0002x + 0.0097	R <sup>2</sup> = 0,9999	0,021	103,10
	60 cm	y = 0,0008x + 0,006	R <sup>2</sup> = 0,9942	0,133	166,67
	80 cm	y = 0,02x + 0,0006	R <sup>2</sup> = 0,9862	33,333	1666,67
	100 cm	y = 0,0864x + 0,0009	R <sup>2</sup> = 0,9799	96	1111,11
Masa inkubasi	20,5 jam	y = 0,0044x + 0,0129	R <sup>2</sup> = 0,9185	0,3411	77,52

Nilai  $V_m$  tersebut mengindikasikan bahwa besarnya laju biodegradasi  $N_2O$  pada kompos, dan  $K_s$  adalah parameter kejenuhan kompos dalam mereduksi gas  $N_2O$  dalam jangka waktu tertentu. Semakin besar nilai  $K_s$ , maka semakin cepat kompos mencapai kejenuhan dalam mereduksi  $N_2O$ . Nilai  $K_s$  dari kompos 100 cm yang merupakan nilai  $K_s$  terbesar menunjukkan bahwa mikroorganisme di dalam kompos kedalaman 100 cm memiliki tingkat kejenuhan tercepat untuk variasi kedalaman, yang ditunjang oleh kemampuannya dalam mendegradasi gas  $N_2O$  dalam jangka waktu yang lebih lama ( $K_s$  tertinggi, sehingga lebih lama mencapai masa jenuh), dan laju biodegradasi maksimumnya ( $V_m$ ) yang cukup tinggi dibandingkan dengan kompos variasi kedalaman lainnya.



## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

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

- Efisiensi reduksi tertinggi untuk laju alir 88cc/menit dapat dicapai pada kedalaman medium 100cm untuk variasi kedalaman kering, yaitu sebesar 78,63%.
- Efisiensi reduksi sebesar 100% dapat dicapai oleh kompos yang diinkubasikan dengan larutan nutrisi sintetik selama minimal 26,5 jam, dan hasil optimum dicapai oleh kompos masa inkubasi 131 jam yang memiliki sifat fisis, kimia, dan mekanis paling stabil.
- Medium filter kompos berbasis kotoran kambing memiliki stabilitas pengoperasian yang baik, di mana pH untuk biofiltrasi gas N<sub>2</sub>O pada penelitian ini cenderung stabil di rentang pH 6 – 8 (pH untuk aktivitas optimum mikroorganisme) yang disebabkan penetralan produk gas asam oleh produksi air yang cukup banyak, sehingga tidak dibutuhkan penambahan *buffer* basa ke dalam medium filter.
- Kemampuan retensi udara medium filter kompos berbasis kotoran kambing cukup baik, ditandai dengan pengurangan maksimal ketinggian kompos yang hanya sebesar 0,3 cm dan *pressure drop* tidak lebih dari 0,04 mH<sub>2</sub>O selama 12 jam pengoperasian, sehingga tidak akan terjadi *channeling* maupun *clogging* pada jangka waktu tersebut.
- Semakin tinggi porositas medium filter di dalam kolom, semakin lama waktu yang dibutuhkan oleh aliran gas polutan untuk mencapai fasa stabil.
- Perubahan porositas dipengaruhi oleh perubahan densitas dan sifat adhesif dari kompos, di mana sifat adhesif tersebut dipengaruhi oleh *water content*-nya.

- Kecenderungan peningkatan porositas kompos di awal proses biofiltrasi akan meningkatkan lamanya fasa tidak stabil gas di dalam kompos, dan sebaliknya.
- Medium filter kompos berbasis kotoran kambing memiliki kemampuan retensi air yang cukup baik, ditandai dengan penurunan *water content* yang tidak terlalu signifikan dari seluruh kompos setelah dioperasikan selama 12 jam, baik kompos untuk variasi kedalaman kering maupun kompos untuk variasi masa inkubasi dengan larutan nutrisi sintetik.
- Efisiensi reduksi gas N<sub>2</sub>O oleh kompos yang diinkubasikan dengan larutan nutrisi sintetik lebih tinggi dibandingkan dengan efisiensi reduksi gas N<sub>2</sub>O oleh kompos kering berkedalaman 100 cm, terutama untuk kompos yang diinkubasikan selama 166,5 jam, dibuktikan oleh perbandingan jumlah bakteri yang tumbuh dari  $3,88 \times 10^{11}$  CFU/g bakteri sebelum kompos melalui proses biofiltrasi hingga  $4,58 \times 10^{11}$  CFU/g bakteri untuk kompos setelah variasi kedalaman kering, dan  $6,95 \times 10^{15}$  CFU/g bakteri untuk kompos setelah variasi masa inkubasi dengan larutan nutrisi sintetik selama 166,5 jam yang menghasilkan %RE optimum.
- Kinetika biosorpsi gas N<sub>2</sub>O ke permukaan *biofilm* mengikuti kinetika adsorpsi isothermis Langmuir dengan hasil korelasi  $R > 0,9$  dan hasil  $K_L$  dan  $q_m$  tertinggi dicapai oleh kompos kedalaman 100 cm ( $K_L = -0,1572$  m<sup>3</sup>/g;  $q_m = 15,69859$  g N<sub>2</sub>O/kg kompos) untuk variasi kedalaman kering, dan kompos inkubasi 131 jam ( $K_L = -\infty$  m<sup>3</sup>/g;  $q_m = 20,8333$  g N<sub>2</sub>O/kg kompos) untuk kompos variasi masa inkubasi dengan larutan sintetik.
- Kinetika biodegradasi N<sub>2</sub>O oleh mikroorganisme dalam kompos mengikuti kinetika Michaelis – Menten dengan hasil korelasi  $R > 0,9$  dengan hasil  $K_s$  dan  $V_m$  optimum dicapai oleh kompos kedalaman 100 cm ( $K_s = 96$  g/m<sup>3</sup>;  $V_m = 1111,11$  g/m<sup>3</sup>jam) untuk variasi kedalaman kering, sedangkan nilai  $K_s$  dan  $V_m$  terukur untuk variasi masa inkubasi dengan larutan sintetik adalah  $K_s = 0,3411$  g/m<sup>3</sup> dan  $V_m = 77,52$  g/m<sup>3</sup>jam untuk kompos inkubasi 20,5 jam.

## 5.2 Saran

Sebaliknya, peneliti menyarankan beberapa hal sebagai berikut untuk meningkatkan akurasi data yang akan diperoleh, di mana saran berikut sudah dibuktikan sendiri efektivitasnya oleh peneliti:

- Untuk *Total Plate Count*

- Sebaiknya dilakukan penghitungan dengan cepat (selesaikan penghitungan semuanya dalam 20 – 25 menit setelah dikeluarkan dari inkubator), untuk menghindari mencairnya sampel sehingga menjadi tidak bisa dihitung.
- Sebaiknya prosedur inkubasi mikroorganisme ke dalam medium agar dilakukan secara cepat, namun tidak dengan terburu-buru. Ketergesaan akan menurunkan ketelitian, yang berakibat banyaknya kesalahan yang dilakukan peneliti.
- Sebaliknya, prosedur TPC juga jangan dilakukan terlalu lama, karena akan meningkatkan risiko kontaminasi oleh bakteri dari udara, dan waktu pengerjaan yang terlalu lama akan menurunkan konsentrasi peneliti sehingga menurunkan ketelitian.

- Untuk *running* biofiltrasi:

- Sebaiknya melakukan penginjeksian syringe ke septum injection port pada GC dengan pelan dan tidak terlalu mengeluarkan tenaga, karena septum GC sangat rawan terhadap kebocoran, di mana septum GC terbuat dari karet dan injection port GC dipanaskan hingga 130°C sehingga hal ini menjadikan elastisitasnya sangat sensitif terhadap tenaga yang dikeluarkan oleh peneliti (pemakaian tenaga berlebih dan injeksi yang terlalu cepat akan mengakibatkan septum mudah bocor, karena bagian septum yang dilewati jarum suntik belum sempat menyatu oleh pelelehan akibat panas dari GC dan kontak dengan udara luar yang jauh lebih dingin yang terlalu cepat mengakibatkan cepatnya pengerasan karet septum GC yang belum sempat meleleh tersebut). Hal ini penting untuk diperhatikan, mengingat panjangnya waktu biofiltrasi yang

mengharuskan peneliti menginjeksikan gas sampel secara frekuentif setiap jamnya, dan GC merupakan satu-satunya alat deteksi konsentrasi gas sampel biofiltrasi, sehingga bocornya septum GC akan mengacaukan data yang dianalisa oleh GC.

- Sebaiknya menyiapkan segala peralatan yang mungkin dapat menjadi alat bantu pertama jika seandainya terjadi hal yang dapat mengganggu jalannya penelitian yang bersumber dari sistem biofiltrasi itu sendiri, seperti kebocoran pada kolom maupun pipa persambungan yang tiba-tiba, atau genangan air yang memasuki septum outlet biofiltrasi.
- Sebaiknya memastikan ke seluruh peneliti yang lain mengenai jadwal pemakaian peralatan dalam waktu dekat yang digunakan bersama dengan peneliti yang lain (dua hingga satu hari sebelum pemakaian), untuk mencegah terhalangnya jadwal running akibat pemakaian mendadak peralatan tersebut oleh peneliti lain, baik pemakaian dalam jangka waktu cepat maupun lama. Hal ini akan sangat mengganggu penelitian karena sifat fisis dari kompos yang digunakan (terutama kompos yang diinkubasikan dengan larutan sintetik) akan sangat mudah berubah terhadap waktu prabiofiltrasi dengan gas polutan.

## DAFTAR ISTILAH

- Biosorpsi** : proses adsorpsi gas polutan ke permukaan *biofilm* secara selektif biologis oleh mikroorganisme pendegradasi gas polutan tersebut.
- Biodegradasi** : proses degradasi gas polutan pada *biofilm* secara selektif biologis oleh mikroorganisme pendegradasi gas polutan tersebut.
- Biofilm** : lapisan berfasa cair yang kaya akan mikroorganisme dan menempel pada permukaan medium filter, merupakan tempat berkembangbiaknya mikroorganisme dan tempat terjadinya aktivitas biosorpsi dan biodegradasi gas polutan.
- Channeling** : peristiwa distribusi aliran gas yang tidak merata di dalam *packed bed reactor*, di mana hanya ada jalur tertentu yang dapat dilalui oleh gas untuk keluar dari kolom akibat pemblokiran rongga-rongga antarpartikel di dalam kolom.
- Clogging** : peristiwa penyumbatan rongga-rongga antarpartikel di dalam *packed bed reactor* sehingga aliran gas sama sekali tidak dapat keluar dari kolom.
- Hk** : humiditas kolom, kelembaban kolom biofilter.
- hk** : kedalaman terukur medium filter setelah diisikan ke dalam kolom biofilter.
- Kompaksi** : pepadatan.
- $\rho$**  : densitas, rapat massa.
- $\Phi$  (psi)** : lambang untuk porositas, dalam penelitian ini menunjukkan porositas kompos di dalam kolom.
- wc** : *water content*, kandungan air di dalam medium filter.

**DAFTAR REFERENSI**

- Abichou, Tarek, Koenraad Mahieu, Lei Yuan, Jeffrey Chanton, and Gary Hater. "Effect of Compost Biocovers on Gas Flow and Methane Oxidation in A Landfill Cover". (Waste Management) Was. Man. 29 (2009) 1595 – 1601. 7 January 2009.
- Adriaty, Lila. "Pemanfaatan Kompos sebagai Biofilter untuk Mereduksi Emisi Gas N<sub>2</sub>O". Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok. Juni 2009.
- Anonim. "Nitrous Oxide". ([en.wikipedia.org/wiki/Nitrous\\_oxide](http://en.wikipedia.org/wiki/Nitrous_oxide)). 29 Desember 2009.
- Chang, Daniel P.Y, Edward D. Schroeder, and Jianmeng Chen. "Carbon Foam-Based NO<sub>x</sub> Biofilter". Feasibility Assessment and Final EISG (Energy Innovations Small Grant) Report for California Energy Commission. Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Davis. Januari 2006.
- Chen, Jianmeng, Chengqiang Wu, Jiade Wang, and Jianfeng Ma. "Performance Evaluation of Biofilters Packed With Carbon Foam and Lava for Nitric Oxide Removal". College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, China. Journal of Hazardous Materials B137 (2006) 172 – 177. 24 Januari 2006.
- Dallmann, Timothy. "2003 Wisconsin Sulfur Dioxide and Nitrogen Oxides Emissions Report". Internship report for Air & Waste Management Division in Wisconsin Department of Natural Resources. Environmental Engineering, Bureau of Air Management, Wisconsin. November 2005.
- Darvin, Charles and Mohamed Serageldin. "Using Bioreactors to Control Air Pollution". The Clean Air Technology Center, U.S. Environmental

Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina. September 2003.

Delhomènie, Marie-Caroline, Louise Bibeau, and Michèle Heitz. "A Study of The Impact of Particle Size and Adsorption Phenomena in A Compost-Based Biological Filter". Department of Chemical Engineering Université de Sherbrooke, Canada. Chem. Eng. Sci. 57 (2002) 4999 – 5010. 14 Agustus 2002.

Filayuri, Shilfa. "Evaluasi Kinerja Medium Berbasis Kompos sebagai Material Isian pada Biofiltrasi Gas Dinitrogen Monoksida". Proposal Program Kreativitas Mahasiswa Penelitian Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok. Mei 2009.

Gabriel, D., J.P. Maestre, L. Martin, X. Gamisans, and J. Lafuente. "Characterisation and Performance of Coconut Fibre as Packing Material in The Removal of Ammonia in Gas-Phase Biofilters". Biosystems Engineering 97 (2007) 481 – 490. 6 Juli 2007.

Gandjar, Indrawati, Isworo Rukmi Koentjoro, Wibowo Mangunwardoyo, dan Lanita Soebagya. "Pedoman Praktikum Mikrobiologi Dasar". Jurusan Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia. 1992.

Gaudin, François, Yves Andres, and Pierre Le Cloirec. "Packing Material Formulation for Odorous Emission Biofiltration". Chemosphere 70 (2008) 958 – 966. 21 September 2007.

Gilbert, Yan, Yann Le Bihan, Geneviève Aubry, Marc Veillette, Caroline Duchaine, and Paul Lessard. "Microbiological and Molecular Characterization of Denitrification in Biofilters Treating Pig Manure". Bioresource Technology 99 (2008) 4495 – 4502. 1 November 2007.

Govind, Rakesh. "Biofiltration: An Innovative Technology for The Future". University of Cincinnati, Cincinnati. Januari 2010.

- Van Groenestijn, J.W. and N. J. R. Kraakman. "Recent Development in Biological Waste Gas Purification in Europe". *Chemical Engineering Journal* 113 (2005) 85 – 91. 5 Maret 2005.
- Hudepohl, Nate J., Yulya Davidova, Chris A. du Plessis, and Daniel P.Y. Chang. "Biofilter Technology for NO<sub>x</sub> Control". Final Report for Air Resources Board Research Division of California Environmental Protection Agency. Department of Civil & Environmental Engineering University of California, Davis. (<http://www.arb.ca.gov/rd/rd.htm>). Februari 1999.
- Jin, Y., M. Veiga, and C. Kennes. "Bioprocesses for The Removal of Nitrogen Oxides from Polluted Air." *J. Chem. Technol, Biotechnol*, Vol. 80, pp 483–494. 2005.
- Kim, Ku-Yong, Hyun-Woo Kim, Sun-Kee Han, Eung-Ju Hwang, Chae-Young Lee, and Hang-Sik Shin. "Effect of Granular Porous Media on The Composting of Swine Manure". *Was. Man.* 28 (2008) 2336 – 2343. 26 Desember 2007.
- La Pagans, Estel, Xavier Font, Antoni Sánchez. "Biofiltration for Ammonia Removal from Composting Exhaust Gases". *Chemical Engineering Journal* 113 (2005)105 – 110. 1 Maret 2005.
- Lin, Kaili, Jiayong Pan, Yiwei Chen, Rongming Cheng, and Xuecheng Xu. "Study the Adsorption of Phenol from Aqueous Solution on Hydroxyapatite Nanopowders". *Journal of Hazardous Materials* 161 (2009) 231–240. 22 Maret 2008.
- Liu, Yonghui, et al. "Removal of Ternary VOCs in Air Streams at High Loads Using a Compost-Based Biofilter." Dalian University of Technology, China. 2004.
- Nicolai, R.E., K.A. Janni. "Biofilter media mixture ratio of wood chips and compost treating swine odors". *Water Sci. Technol*, Vol. 44, pp 261-267. 16 Januari 2001.

- Noviani, Cynthia. “Reduksi Gas Dinitrogen Monoksida melalui Biofiltrasi dengan Menggunakan Material Kompos Termodifikasi”. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok. Desember 2009.
- Sattler, Dieter, Jörg Sattler, and Ralf Schneider. “No Chance, Not Only for Odours: Combined Biofilter-systems for Industrial Exhaust Air Treatment”. ([www.biosal.de](http://www.biosal.de)). 20 November 2009.
- Seagle, Edward D. “Self Cleaning Granular Activated Carbon HAPs/VOC Reduction Filter with Continuous Bioregeneration”. 1997 Air Biotreatment Meeting—US EPA\_NC, Research Triangle Park, North Carolina. 3 Juni 1997.
- Simanjuntak, Josia. “Reduksi Gas Dinitrogen Monoksida dengan Menggunakan Pupuk Kompos sebagai Biofilter”. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok. 21 Juni 2008.
- Stanley, W. Brad M. and Christopher O. Muller. “Choosing an Odor Control Technology – Effectiveness and Cost Considerations”. Proceedings of Odors and Toxic Air Emissions 2002 – WEF Albuquerque, NM. Purafil Environmental Systems Division. 2002.
- Soeprijanto, Bambang Aryanto dan Ryan Fabella. “Biosorpsi Ion Logam Berat Cu (II) dalam Larutan Menggunakan Biomassa *Phanerochaete chrysosporium*”. Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya. 2010.
- Torkian, A., H. Keshavarzi Shirazi, and A. Azimi. “Effects of Operational Conditions on The Performance of Triethylamine Biofiltration”. Iranian J Env Health Sci Eng, 2005, Vol.2, No.2, pp.31-40. 24 Juli 2005.
- Turan, N.G., A. Akdemir, and O. N. Ergun. “Removal of Volatile Organic Compounds by Natural Materials During Composting of Poultry Litter”. Bioresource Technology 100 (2009) 798 – 803. 12 Juli 2008.

Utami dkk. “Pengaruh Parameter Operasi Dalam Proses Biofiltrasi  $N_2O$  Dengan Medium Filter Berbasis Kompos”. Makalah dipresentasikan pada Proceeding Seminar Tjipto Utomo 2009, Kampus ITENAS Bandung. Agustus 2009.

Willingham, Ray, Scot Standefer, Janice Tacconi, and Bruce Bullough. “Biofiltration Pilot Unit Study to Control Fugitive Emissions from A Solvent Mixing Area at Imation Enterprise’s White City, Oregon Facility”. 1997 Air Biotreatment Meeting – US EPA\_NC, Research Triangle Park, North Carolina. 3 Juni 1997.

Yang, Wan Fa, Hsing Hao Jan, Yang Yu Chiung, and Shyng Jhieh Yu. “The Effects of Selected Parameters on The Nitric Oxide Removal by Biofilter”. Taiwan: Journal of Hazardous Materials (2007). 7 Maret 2007.

You, Jia, Atreyee Das, Elizabeth M. Dolan, and Zhiqiang Hu. “Ammonia-Oxidizing Archaea Involved in Nitrogen Removal”. Wat. Res. (→Water Research) 43 (2009) 1801 – 1809. 31 Januari 2009.

## Lampiran 1. Data Hasil Uji EBRT

<i>t</i> (menit)	<i>luas peak N<sub>2</sub>O outlet</i>	<i>luas peak N<sub>2</sub>O inlet</i>
19.78	44087	58979
21.65	32329	58979
23.93	79603	58979
26.37	57624	58979
29.75	88204	58979
33.67	26646	58979
34.83	87807	58979
38.48	55984	58979
51.28	51442	58979
54.52	51127	58979
58.20	52307	58979
62.83	1.24E+05	58979
66.08	56161	58979
72.77	56152	58979
90.32	57424	58979
96.00	1.34E+05	58979
98.10	57811	58979
102.10	59420	58979
107.13	59343	58979

## Lampiran 2. Hasil Kalibrasi Luas Peak Gas N<sub>2</sub>O vs Konsentrasi Gas N<sub>2</sub>O

		volume gas N <sub>2</sub> O (*10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> )					
		0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8
luas peak N <sub>2</sub> O	0	17597	18423	35429	64500	51349	53155
	0	23907	15085	36233	53640	37077	58979
	0	6061	12446	48565	54687	49226	82453
	0	6234	16644	33653	48358	7658	83705
	0	21095	24536	36522	50195	65505	75391
						58194	75378
						57612	61533
							115397
						75368	
						70811	

Untuk data kalibrasi, diambil data dengan simulasi hasil R<sup>2</sup> terbaik, yaitu data sebagai berikut:

X (volume gas dalam syringe mL)	Y (luas peak N <sub>2</sub> O)
0	0
0.1	6234
0.2	15085
0.8	51349
1	58979

Plot grafik volume gas N<sub>2</sub>O (sebagai x) vs luas peak N<sub>2</sub>O (sebagai y) dari data di atas menghasilkan persamaan kalibrasi:  $y = 2E-05x$  dan  $y = 6E+10x$  dengan R<sup>2</sup> = 0,9936

### Lampiran 3. Data Hasil Uji Variasi Kedalaman Medium Filter

Langkah perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N<sub>2</sub>O:

- Menghitung volume N<sub>2</sub>O hasil biofiltrasi dari persamaan kalibrasi.
- Menghitung massa N<sub>2</sub>O dengan massa jenis N<sub>2</sub>O = 1812 g/mL
- Menghitung konsentrasi N<sub>2</sub>O.
- Menghitung RE (*Removal Efficiency*) dengan persamaan:

$$\text{Removal Efficiency (RE)} = \left( \frac{C_i - C_o}{C_i} \right) \times 100$$

a. Kedalaman 50 cm, kompos kering (laju alir = 88 cc/menit)

Waktu (jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (gram)	Konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE (kons)	% RE (luas area)
	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O					
0	1.105	3.372	4.343	6268208	126884	216182	94.81	1.92	3.27	3.60303E-06	0.006528696	6528.6964	0.00	0.00
1	1.15		2.667	8968548		50241	99.44	1.00	0.56	8.37350E-07	0.001517278	1517.2782	76.76	76.76
2	1.162	2.282	2.700	9204582	22884	80285	98.89	0.25	0.86	1.33808E-06	0.002424607	2424.6070	62.86	62.86
3	1.162	2.262	2.668	8137218	16090	90561	98.71	0.20	1.10	1.50935E-06	0.002734942	2734.9422	58.11	58.11
4	1.148	2.245	2.652	8185894	13147	92939	98.72	0.16	1.12	1.54898E-06	0.002806758	2806.7578	57.01	57.01
5	1.157	2.247	2.657	7736570	24430	88684	98.56	0.31	1.13	1.47807E-06	0.002678257	2678.2568	58.98	58.98
6	1.157	2.257	2.663	8101165	10044	89147	98.79	0.12	1.09	1.48578E-06	0.002692239	2692.2394	58.76	58.76
7	1.143	2.227	2.632	7980894	8328	89125	98.79	0.10	1.10	1.48542E-06	0.002691575	2691.5750	58.77	58.77
8	1.245		2.867	8765452		90068	98.98	0.00	1.02	1.50113E-06	0.002720054	2720.0536	58.34	58.34
9	1.145	2.235	2.638	8029623	7752	90500	98.79	0.10	1.11	1.50833E-06	0.0027331	2733.1000	58.14	58.14
10	1.138	2.225	2.628	8120521	7352	88883	98.83	0.09	1.08	1.48138E-06	0.002684267	2684.2666	58.89	58.89
11	1.135	2.217	2.618	7976094	85781	85778	97.89	1.05	1.05	1.42963E-06	0.002590496	2590.4956	60.32	60.32
12	1.138	2.220	2.623	8066510	6703	91787	98.79	0.08	1.12	1.52978E-06	0.002771967	2771.9674	57.54	57.54
13	1.145	2.222	2.268	8043406	20513	97012	98.56	0.25	1.19	1.61687E-06	0.002929762	2929.7624	55.12	55.12

(Lanjutan)

b. Kedalaman 60 cm, kompos kering (laju alir = 88 cc/menit)

t	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (gram)	Kons N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE kons	% RE luas
	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O					
0	1.105	3.372	4.343	6268208	126884	216182	94.81	1.92	3.27	3.60303E-06	0.006528696	6528.6964	0.00	0.00
1	1.142	2.215	2.622	7861181	186588	56362	97.00	2.30	0.70	9.39367E-07	0.001702132	1702.1324	73.93	73.93
2	1.137	2.217	2.618	7984750	88536	81256	97.92	1.09	1.00	1.35427E-06	0.002453931	2453.9312	62.41	62.41
3	1.147	2.228	2.628	8022567	17614	90846	98.67	0.22	1.12	1.51410E-06	0.002743549	2743.5492	57.98	57.98
4	1.140	2.212	2.617	9560247	9001	89642	98.98	0.09	0.93	1.49403E-06	0.002707188	2707.1884	58.53	58.53
5	1.085	2.163	2.560	7959482	9019	90986	98.76	0.11	1.13	1.51643E-06	0.002747777	2747.7772	57.91	57.91
6	1.135	2.215	2.612	7969564	8426	91579	98.76	0.10	1.13	1.52632E-06	0.002765686	2765.6858	57.64	57.64
7	1.130	2.200	2.607	8465052	7183	90441	98.86	0.08	1.06	1.50735E-06	0.002731318	2731.3182	58.16	58.16
8	1.122	2.197	2.595	7919503	7848	91175	98.77	0.10	1.14	1.51958E-06	0.002753485	2753.4850	57.82	57.82
9	1.123	2.197	2.598	7981285	8054	91102	98.77	0.10	1.13	1.51837E-06	0.002751280	2751.2804	57.86	57.86
10	1.137	2.217	2.613	7889375	7090	91128	98.77	0.09	1.14	1.51880E-06	0.002752066	2752.0656	57.85	57.85
11	0.928	2.075	2.492	8755855	8414	91516	98.87	0.10	1.03	1.52527E-06	0.002763783	2763.7832	57.67	57.67
12	1.068	2.150	2.550	8084658	6882	74199	99.01	0.08	0.91	1.23665E-06	0.002240810	2240.8098	65.68	65.68

(Lanjutan)

c. Kedalaman 80 cm, kompos kering (laju alir = 88 cc/menit)

t (jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (gram)	kons N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE kons	% RE luas
	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O					
0	1.105	3.372	4.343	6268208	126884	216182	94.81	1.92	3.27	3.60303E-06	0.006528696	6528.6964	0.00	0.00
1	1.120	2.193	2.598	7781169	87142	3324	98.85	1.11	0.04	5.54000E-08	0.000100385	100.3848	98.46	98.46
2	1.118	2.183	2.587	7718510	7143	7314	99.81	0.09	0.09	1.21900E-07	0.000220883	220.8828	96.62	96.62
3	1.135	2.212	2.617	7856796	5836	8589	99.82	0.07	0.11	1.43150E-07	0.000259388	259.3878	96.03	96.03
4	1.142	2.223	2.622	7890290	18033	85545	98.70	0.23	1.07	1.42575E-06	0.002583459	2583.4590	60.43	60.43
5	1.133	2.197	2.597	8123859	12042	83908	98.83	0.15	1.02	1.39847E-06	0.002534022	2534.0216	61.19	61.19
6	1.110	2.170	2.567	7534356	15049	86122	98.67	0.20	1.13	1.43537E-06	0.002600884	2600.8844	60.16	60.16
7	1.123	2.197	2.595	7760947	14312	89018	98.69	0.18	1.13	1.48363E-06	0.002688344	2688.3436	58.82	58.82
8	1.068	2.137	2.533	7965669	13022	87057	98.76	0.16	1.08	1.45095E-06	0.002629121	2629.1214	59.73	59.73
9	0.860	1.932	2.330	7761096	13113	87789	98.72	0.17	1.12	1.46315E-06	0.002651228	2651.2278	59.39	59.39
10	1.122	2.195	2.593	8067422	13540	89783	98.74	0.17	1.10	1.49638E-06	0.002711447	2711.4466	58.47	58.47
11	1.137	2.187	2.582	7601749	12763	87885	98.69	0.17	1.14	1.46475E-06	0.002654127	2654.1270	59.35	59.35
12	1.035	2.085	2.480	7722438	11726	88883	98.71	0.15	1.14	1.48138E-06	0.002684267	2684.2666	58.89	58.89
13	1.127	2.198	2.593	7838839	13271	90328	98.70	0.17	1.14	1.50547E-06	0.002727906	2727.9056	58.22	58.22

(Lanjutan)

d. Kedalaman 100 cm, kompos kering (laju alir = 88 cc/menit)

t (jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (gram)	kons N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE kons	% RE luas
	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O					
0	1.105	3.372	4.343	6268208	126884	216182	94.81	1.92	3.27	3.60303E-06	0.006528696	6528.6964	0.00	0.00
1	1.153	2.240	2.633	7949266	165415	1142	97.95	2.04	0.01	1.90333E-08	0.000034488	34.4884	99.47	99.47
2	1.177	2.267	2.678	6233022	15528	17199	99.48	0.25	0.27	2.86650E-07	0.000519410	519.4098	92.04	92.04
3	1.155	2.253	2.668	8271879	15683	36327	99.38	0.19	0.44	6.05450E-07	0.001097075	1097.0754	83.20	83.20
4	1.198	2.272	2.680	4202919	8250	33079	99.03	0.19	0.78	5.51317E-07	0.000998986	998.9858	84.70	84.70
5	1.098	2.197	2.613	8127342	7750	36319	99.46	0.09	0.44	6.05317E-07	0.001096834	1096.8338	83.20	83.20
6	1.362		2.610	10025666		38264	99.62	0.00	0.38	6.37733E-07	0.001155573	1155.5728	82.30	82.30
7	1.240	2.378	2.798	8091698	10475	42411	99.35	0.13	0.52	7.06850E-07	0.001280812	1280.8122	80.38	80.38
8	1.178	2.258	2.665	5901272	8808	45050	99.10	0.15	0.76	7.50833E-07	0.001360510	1360.5100	79.16	79.16
9	1.188	2.295	2.707	7063498	9469	49518	99.17	0.13	0.70	8.25300E-07	0.001495444	1495.4436	77.09	77.09
10	1.212	2.348	2.772	8608379	9335	44310	99.38	0.11	0.51	7.38500E-07	0.001338162	1338.1620	79.50	79.50
11	1.167	2.235	2.645	5510240	7789	46198	99.03	0.14	0.83	7.69967E-07	0.001395180	1395.1796	78.63	78.63

#### Lampiran 4A. Data Hasil Uji Variasi Masa Inkubasi Medium Filter dengan Larutan Sintetik

a. Masa inkubasi 20,5 jam (h = 100 cm, laju alir = 88 cc/menit, penambahan air 60% b/b kompos kering)

t	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (gram)	Kons N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE kons	% RE luas
	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O					
0	1.105	3.372	4.343	6268208	126884	216182	94.81	1.92	3.27	3.60303E-06	0.006528696	6528.6964	0.00	0.00
1	1.105	3.385	4.378	6239884	285081	68097	94.64	4.32	1.03	1.13495E-06	0.002056529	2056.5294	68.50	68.50
2	1.128	3.412	4.390	6294221	158724	73740	96.44	2.43	1.13	1.22900E-06	0.002226948	2226.9480	65.89	65.89
3	1.113	3.390	4.367	6365053	116764	76090	97.06	1.78	1.16	1.26817E-06	0.002297918	2297.9180	64.80	64.80
4	1.122	3.445	4.445	6401683	105226	73327	97.29	1.60	1.11	1.22212E-06	0.002214475	2214.4754	66.08	66.08
5	1.110	3.442	4.445	6388377	104757	76061	97.25	1.59	1.16	1.26768E-06	0.002297042	2297.0422	64.82	64.82
6	1.113	3.472	4.487	6320357	93502	76983	97.37	1.44	1.19	1.28305E-06	0.002324887	2324.8866	64.39	64.39
7	1.137	3.513	4.532	6364856	84629	75999	97.54	1.30	1.16	1.26665E-06	0.002295170	2295.1698	64.84	64.84
8	1.053	3.423	4.443	6455978	73351	76586	97.73	1.11	1.16	1.27643E-06	0.002312897	2312.8972	64.57	64.57
9	1.122	3.495	4.517	6400876	69614	77808	97.75	1.06	1.19	1.29680E-06	0.002349802	2349.8016	64.01	64.01
10	1.123	3.508	4.535	6555500	67490	77180	97.84	1.01	1.15	1.28633E-06	0.002330836	2330.8360	64.30	64.30
11	1.115	3.508	4.537	6362506	63430	77314	97.84	0.98	1.19	1.28857E-06	0.002334883	2334.8828	64.24	64.24
12	1.117	3.522	4.558	6384926	59777	76939	97.90	0.92	1.18	1.28232E-06	0.002323558	2323.5578	64.41	64.41

(Lanjutan)

b. Masa inkubasi 26,5 jam (h = 100 cm, laju alir = 88 cc/menit, penambahan air 60% b/b kompos kering)

t	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (gram)	Kons N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE (kons)	% RE (luas)
	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O					
0	1.105	3.372	4.343	6268208	126884	216182	94.81	1.92	3.27	3.60303E-06	0.006528696	6528.6964	0.00	0.00
1	1.202	2.322	2.647	7970351	4272	600	99.94	0.05	0.01	1.00000E-08	0.000018120	18.1200	99.72	99.72
2	1.197	2.323	2.657	7947633	4733	417	99.94	0.06	0.01	6.95000E-09	0.000012593	12.5934	99.81	99.81
3	1.195	2.325		7940590	4579		99.94	0.06	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
4	1.195	2.323	2.748	7978383	4467	392	99.94	0.06	0.00	6.53333E-09	0.000011838	11.8384	99.82	99.82
5	1.182	2.292	2.725	8068386	61099	1328	99.23	0.75	0.02	2.21333E-08	0.000040106	40.1056	99.39	99.39
6	1.195	2.322		8145446	37013		99.55	0.45	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
7	1.190	2.313		8110866	7620		99.91	0.09	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
8	1.195	2.323	2.825	8141910	5819	148	99.93	0.07	0.00	2.46667E-09	0.000004470	4.4696	99.93	99.93
9	1.195	2.312		8144256	39822		99.51	0.49	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
10	1.132	2.442		794459	288755		73.34	26.66	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
11	1.217	2.367		8482226	7236		99.91	0.09	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
12	1.213	2.362		8357103	6432		99.92	0.08	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
13	1.217	2.367		8436060	6583		99.92	0.08	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00

(Lanjutan)

c. Masa inkubasi 131 jam (h = 100 cm, laju alir = 88 cc/menit, penambahan air 60% b/b kompos kering)

t (jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (gram)	kons N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE kons	% RE luas
	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O					
0	1.105	3.372	4.343	6268208	126884	216182	94.81	1.92	3.27	3.60303E-06	0.006528696	6528.6964	0.00	0.00
1	1.268	2.373	2.698	8037042	34275	27	99.58	0.42	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
2	1.185	2.297		7903128	8212		99.90	0.10	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
3	1.165	2.273		8003309	12488		99.84	0.16	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
4	1.177	2.287		7993203	13202		99.84	0.16	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
5	1.170	2.275		7947374	4660		99.94	0.06	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
6	1.162	2.262		8059365	41637		99.49	0.51	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
7	1.178	2.283		7992798	76770		99.05	0.95	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
8	1.038	2.140		7985736	8115		99.90	0.10	0.00	4.50000E-10	0.000000815	0.8154	99.99	99.99
9	1.173	2.287		7784900	20303		99.74	0.26	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
10	1.173	2.280		8049584	7112		99.91	0.09	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
11	1.175	2.280		7981378	6465		99.92	0.08	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
12	1.167	2.270		8027992	6927		99.91	0.09	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
13	1.177	2.287		8047434	47643		99.41	0.59	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00

(Lanjutan)

d. Masa inkubasi 166,5 jam (h = 100 cm, laju alir = 88 cc/menit, penambahan air 60% b/b kompos kering)

t	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (gram)	Kons N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE kons	% RE luas
	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O					
0	1.105	3.372	4.343	6268208	126884	216182	94.81	1.92	3.27	3.60303E-06	0.006528696	6528.6964	0.00	0.00
1	1.295		2.512	9249145		29202	99.69	0.00	0.31	4.86700E-07	0.000881900	881.9004	86.49	86.49
2	1.203	2.332		8015002	17468		99.78	0.22	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
3	1.190	2.310		8099820	16766		99.79	0.21	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
4	1.193	2.317		8183759	14846		99.82	0.18	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
5	1.198	2.323		8328126	11212		99.87	0.13	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
6	1.177	2.303		8198067	190679		97.73	2.27	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
7	1.190	2.317		8187937	9968		99.88	0.12	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
8	1.183			8183249			100.00	0.00	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
9	1.187	2.308		7910322	8132		99.90	0.10	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
10	1.177	2.300		8257257	13384		99.84	0.16	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
11	1.188	2.308		8213313	8509		99.90	0.10	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
12	1.178	2.290		8331835	17019		99.80	0.20	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00
13	1.188	2.305		8218163	20509		99.75	0.25	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	100.00

**Lampiran 4B. Data Hasil Validasi Uji Variasi Masa Inkubasi 26,5 Jam Medium Filter dengan Larutan Sintetik**

a. Set data I masa inkubasi 26,5 jam (h = 100 cm, laju alir = 88 cc/menit, penambahan air 60% b/b kompos kering)

t	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (gram)	Kons N <sub>2</sub> O	% RE kons	% RE average all set data	Error Bar (%)
	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O						
0	1.105	3.372	4.343	6268208	126884	216182	94.81	1.92	3.27	3.60303E-06	0.006528696	6528.6964	0.00	-	-
1	1.202	2.322	2.647	7970351	4272	600	99.94	0.05	0.01	1.00000E-08	0.000018120	18.1200	99.72	99.75	0.02
2	1.197	2.323	2.657	7947633	4733	417	99.94	0.06	0.01	6.95000E-09	0.000012593	12.5934	99.81	99.79	0.02
3	1.195	2.325		7940590	4579		99.94	0.06	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	99.93	0.07
4	1.195	2.323	2.748	7978383	4467	392	99.94	0.06	0.00	6.53333E-09	0.000011838	11.8384	99.82	99.88	0.06
5	1.182	2.292	2.725	8068386	61099	1328	99.23	0.75	0.02	2.21333E-08	0.000040106	40.1056	99.39	99.44	0.06
6	1.195	2.322		8145446	37013		99.55	0.45	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	99.99	0.01
7	1.190	2.313		8110866	7620		99.91	0.09	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	99.92	0.08
8	1.195	2.323	2.825	8141910	5819	148	99.93	0.07	0.00	2.46667E-09	0.000004470	4.4696	99.93	99.91	0.02
9	1.195	2.312		8144256	39822		99.51	0.49	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	99.98	0.02
10	1.132	2.442		794459	288755		73.34	26.66	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	99.97	0.03
11	1.217	2.367		8482226	7236		99.91	0.09	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	99.97	0.03
12	1.213	2.362		8357103	6432		99.92	0.08	0.00	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	100.00	99.98	0.02

(Lanjutan)

b. Set data II masa inkubasi 26,5 jam ( $h = 100$  cm, laju alir = 88 cc/menit, penambahan air 60% b/b kompos kering)

t	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (gram)	Kons N <sub>2</sub> O	% RE kons	% RE average all set data	Error Bar (%)
	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O						
0	1.105	3.372	4.343	6268208	126884	216182	94.81	1.92	3.27	3.60303E-06	0.006528696	6528.6964	0.00	-	-
1	1.105	3.385	4.378	6239884	285081	68097	94.64	4.32	1.03	1.13495E-06	0.002056529	2056.5294	100.00	99.75	0.25
2	1.128	3.412	4.390	6294221	158724	73740	96.44	2.43	1.13	1.22900E-06	0.002226948	2226.9480	99.80	99.79	0.01
3	1.113	3.390	4.367	6365053	116764	76090	97.06	1.78	1.16	1.26817E-06	0.002297918	2297.9180	99.78	99.93	0.15
4	1.122	3.445	4.445	6401683	105226	73327	97.29	1.60	1.11	1.22212E-06	0.002214475	2214.4754	100.00	99.88	0.12
5	1.110	3.442	4.445	6388377	104757	76061	97.25	1.59	1.16	1.26768E-06	0.002297042	2297.0422	100.00	99.44	0.56
6	1.113	3.472	4.487	6320357	93502	76983	97.37	1.44	1.19	1.28305E-06	0.002324887	2324.8866	99.97	99.99	0.02
7	1.137	3.513	4.532	6364856	84629	75999	97.54	1.30	1.16	1.26665E-06	0.002295170	2295.1698	99.75	99.92	0.17
8	1.053	3.423	4.443	6455978	73351	76586	97.73	1.11	1.16	1.27643E-06	0.002312897	2312.8972	100.00	99.91	0.09
9	1.122	3.495	4.517	6400876	69614	77808	97.75	1.06	1.19	1.29680E-06	0.002349802	2349.8016	99.94	99.98	0.04
10	1.123	3.508	4.535	6555500	67490	77180	97.84	1.01	1.15	1.28633E-06	0.002330836	2330.8360	99.91	99.97	0.06
11	1.115	3.508	4.537	6362506	63430	77314	97.84	0.98	1.19	1.28857E-06	0.002334883	2334.8828	99.91	99.97	0.06
12	1.117	3.522	4.558	6384926	59777	76939	97.90	0.92	1.18	1.28232E-06	0.002323558	2323.5578	99.93	99.98	0.04

(Lanjutan)

c. Set data III masa inkubasi 26,5 jam (h = 100 cm, laju alir = 88 cc/menit, penambahan air 60% b/b kompos kering)

t	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (gram)	Kons N <sub>2</sub> O	% RE kons	% RE <i>average</i> <i>all set data</i>	<i>Error</i> <i>Bar (%)</i>
	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap Air	N <sub>2</sub> O						
0	1.105	3.372	4.343	6268208	126884	216182	94.81	1.92	3.27	3.60303E-06	0.006528696	6528.6964	0.00	-	-
1	1.233	2.393	2.597	8358390	8779	1053	99.88	0.10	0.01	1.75500E-08	3.18006E-05	31.8006	99.51	99.75	0.23
2	1.207	2.332	2.645	7983806	4780	530	99.93	0.06	0.01	8.83333E-09	1.60060E-05	16.0060	99.75	99.79	0.03
3	1.203	2.335		7952548	4560		99.94	0.06	0.00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000	100.00	99.93	0.07
4	1.202	2.327	2.700	8031763	4735	413	99.94	0.06	0.01	6.88333E-09	1.24726E-05	12.4726	99.81	99.88	0.07
5	1.198	2.322	2.733	7976038	101648	2287	98.71	1.26	0.03	3.81167E-08	6.90674E-05	69.0674	98.94	99.44	0.50
6	1.193	2.322		8161117	35281		99.57	0.43	0.00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000	100.00	99.99	0.01
7	1.165	2.290		8159220	7778		99.90	0.10	0.00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000	100.00	99.92	0.08
8	1.233	2.370	2.682	8494481	6136	406	99.92	0.07	0.00	6.76667E-09	1.22612E-05	12.2612	99.81	99.91	0.10
9	1.190	2.305		8121858	5180		99.94	0.06	0.00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000	100.00	99.98	0.02
10	1.132	2.442		794459	288755		73.34	26.66	0.00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000	100.00	99.97	0.03
11	1.213	2.362		8376054	25987		99.69	0.31	0.00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000	100.00	99.97	0.03
12	1.217	2.362		8432784	8339		99.90	0.10	0.00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.0000	100.00	99.98	0.02

### Lampiran 5. Pengolahan Data Hasil *Total Plate Count*

Berikut ini adalah langkah-langkah perhitungan uji TPC.

- Melakukan pengenceran sebesar  $10^4$  hingga  $10^{13}$  sesuai dengan yang dibutuhkan dan menghitung rata-rata jumlah bakteri yang tumbuh pada setiap pengenceran
- Menghitung jumlah bakteri pada setiap sampel menggunakan persamaan (3.1), sebagai berikut:

$$\Sigma \text{ Bakteri } \left( \frac{\text{CFU}}{\text{g}} \right) = \frac{\text{Jumlah koloni bakteri (CFU)}}{\text{vol. pengenceran} \times \text{vol. sampel pada cawan petri (mL)}} \times \frac{90 \text{ mL}}{\text{massa sampel kompos awal (g)}}$$

a. Kompos sebelum biofiltrasi

volume pengenceran	pengenceran	jumlah koloni			rata-rata jumlah koloni	jumlah sel	rata-rata jumlah (CFU/g)
1.00E+04	1.00E+04	164	289		229	2.12E+07	3.88E+11
1.00E+05	1.00E+05	279	222	294	265	2.46E+08	
1.00E+06	1.00E+06	280	218		249	2.31E+09	
1.00E+07	1.00E+07	288	265	301	285	2.64E+10	
1.00E+08	1.00E+08	90	227	149	155	1.44E+11	
1.00E+09	1.00E+09	185	215	296	232	2.15E+12	

(Lanjutan)

b. Kompos setelah biofiltrasi variasi optimum kedalaman medium filter (100 cm)

volume pengenceran	pengenceran	jumlah koloni			rata-rata jumlah koloni	jumlah sel	rata-rata jumlah (CFU/g)
1.00E+04	1.00E+04	179	185	179	306	2.84E+07	4.58E+10
1.00E+05	1.00E+05	532	406	567	502	4.66E+08	
1.00E+06	1.00E+06	762	726	721	736	6.83E+09	
1.00E+07	1.00E+07	260	360	398	339	3.15E+10	
1.00E+08	1.00E+08	89	451	296	279	2.59E+11	
1.00E+09	1.00E+09	209	252	331	264	2.45E+12	

c. Kompos setelah biofiltrasi variasi optimum masa inkubasi dengan larutan sintetik (131 jam)

volume pengenceran	pengenceran	jumlah koloni			rata-rata jumlah koloni	jumlah sel	rata-rata jumlah (CFU/g)
1.00E+09	1.00E+09	290	299	273	287	2.66E+12	6.95E+15
1.00E+10	1.00E+10	321	412		367	3.41E+13	
1.00E+11	1.00E+11	581	261	398	413	3.83E+14	
1.00E+12	1.00E+12	323	340	345	336	3.12E+15	
1.00E+13	1.00E+13	438	384		411	3.81E+16	

### Lampiran 6. Data Pemodelan Adsorpsi Langmuir Isotermis Seluruh Variasi Penelitian

a. Kedalaman 50 cm, kompos kering (laju alir = 88 cc/menit)

t (jam)	Luas Area N <sub>2</sub> O pada t (Le)	Luas Area N <sub>2</sub> O (diadsorp) Li - Le	Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> ) (diadsorp) Vi - Ve	Massa N <sub>2</sub> O (gram) (per cm <sup>3</sup> diadsorp) mi-me	Konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> ) (diadsorp)	Langmuir Model			
						Qe (g/kg)	1/Qe (kg/g)	Ce (g/m <sup>3</sup> )	Ce/Qe (kg/m <sup>3</sup> )
0	6268208	126884	216182	3.6E-06	0.006528696	6528.696	0	#DIV/0!	6528.696
1	8968548		50241	8.37E-07	0.001517278	1517.278	0.001606	622.8258	1517.278
2	9204582	22884	80285	1.34E-06	0.002424607	2424.607	0.002566	389.7539	2424.607
3	8137218	16090	90561	1.51E-06	0.002734942	2734.942	0.002894	345.5283	2734.942
4	8185894	13147	92939	1.55E-06	0.002806758	2806.758	0.00297	336.6874	2806.758
5	7736570	24430	88684	1.48E-06	0.002678257	2678.257	0.002834	352.8414	2678.257
6	8101165	10044	89147	1.49E-06	0.002692239	2692.239	0.002849	351.0089	2692.239
7	7980894	8328	89125	1.49E-06	0.002691575	2691.575	0.002848	351.0955	2691.575
8	8765452		90068	1.5E-06	0.002720054	2720.054	0.002878	347.4196	2720.054
9	8029623	7752	90500	1.51E-06	0.0027331	2733.1	0.002892	345.7612	2733.1
10	8120521	7352	88883	1.48E-06	0.002684267	2684.267	0.00284	352.0515	2684.267
11	7976094	85781	85778	1.43E-06	0.002590496	2590.496	0.002741	364.7951	2590.496
12	8066510	6703	91787	1.53E-06	0.002771967	2771.967	0.002933	340.9131	2771.967
13	8043406	20513	97012	1.62E-06	0.002929762	2929.762	0.0031	322.5518	2929.762

(Lanjutan)

b. Kedalaman 60 cm, kompos kering (laju alir = 88 cc/menit)

t (jam)	Luas Area N <sub>2</sub> O pada t (Le)	Luas Area N <sub>2</sub> O (diadsorp) Li - Le	Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> ) (diadsorp) Vi - Ve	Massa N <sub>2</sub> O (gram) (per cm <sup>3</sup> diadsorp) mi-me	Konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> ) (diadsorp)	Langmuir Model			
						Qe (g/kg)	1/Qe (kg/g)	Ce (g/m <sup>3</sup> )	Ce/Qe (kg/m <sup>3</sup> )
0	216182	0	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	0.0000000000	#DIV/0!	6528.6964	#DIV/0!
1	56362	159820	3.19640E-06	0.005791877	5791.8768	15.3824083048	0.0650	1702.1324	1.107E+02
2	81256	134926	2.69852E-06	0.004889718	4889.7182	12.9864023460	0.0770	2453.9312	1.890E+02
3	90846	125336	2.50672E-06	0.004542177	4542.1766	12.0633808490	0.0829	2743.5492	2.274E+02
4	89642	126540	2.53080E-06	0.004585810	4585.8096	12.1792638399	0.0821	2707.1884	2.223E+02
5	90986	125196	2.50392E-06	0.004537103	4537.1030	12.0499060826	0.0830	2747.7772	2.280E+02
6	91579	124603	2.49206E-06	0.004515613	4515.6127	11.9928308222	0.0834	2765.6858	2.306E+02
7	90441	125741	2.51482E-06	0.004556854	4556.8538	12.1023614232	0.0826	2731.3182	2.257E+02
8	91175	125007	2.50014E-06	0.004530254	4530.2537	12.0317151480	0.0831	2753.4850	2.289E+02
9	91102	125080	2.50160E-06	0.004532899	4532.8992	12.0387412762	0.0831	2751.2804	2.285E+02
10	91128	125054	2.50108E-06	0.004531957	4531.9570	12.0362388196	0.0831	2752.0656	2.286E+02
11	91516	124666	2.49332E-06	0.004517896	4517.8958	11.9988944670	0.0833	2763.7832	2.303E+02
12	74199	141983	2.83966E-06	0.005145464	5145.4639	13.6656268198	0.0732	2240.8098	1.640E+02

(Lanjutan)

c. Kedalaman 80 cm, kompos kering (laju alir = 88 cc/menit)

t (jam)	Luas Area N <sub>2</sub> O pada t (Le)	Luas Area N <sub>2</sub> O (diadsorp) Li - Le	Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> ) (diadsorp) Vi - Ve	Massa N <sub>2</sub> O (gram) (per cm <sup>3</sup> diadsorp) mi-me	Konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> ) (diadsorp)	Langmuir Model			
						Qe (g/kg)	1/Qe (kg/g)	Ce (g/m <sup>3</sup> )	Ce/Qe (kg/m <sup>3</sup> )
0	216182	0	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	0.0000000000	#DIV/0!	6528.6964	#DIV/0!
1	3324	212858	4.25716E-06	0.007713974	7713.9739	20.5052936371	0.0488	100.3848	4.896E+00
2	7314	208868	4.17736E-06	0.007569376	7569.3763	20.1209241437	0.0497	220.8828	1.098E+01
3	8589	207593	4.15186E-06	0.007523170	7523.1703	19.9980993057	0.0500	259.3878	1.297E+01
4	85545	130637	2.61274E-06	0.004734285	4734.2849	12.5846810778	0.0795	2583.4590	2.053E+02
5	83908	132274	2.64548E-06	0.004793610	4793.6098	12.7423785366	0.0785	2534.0216	1.989E+02
6	86122	130060	2.60120E-06	0.004713374	4713.3744	12.5290968178	0.0798	2600.8844	2.076E+02
7	89018	127164	2.54328E-06	0.004608423	4608.4234	12.2501158522	0.0816	2688.3436	2.195E+02
8	87057	129125	2.58250E-06	0.004679490	4679.4900	12.4390252698	0.0804	2629.1214	2.114E+02
9	87789	128393	2.56786E-06	0.004652962	4652.9623	12.3685093628	0.0809	2651.2278	2.144E+02
10	89783	126399	2.52798E-06	0.004580700	4580.6998	12.1764209493	0.0821	2711.4466	2.227E+02
11	87885	128297	2.56594E-06	0.004649483	4649.4833	12.3592613750	0.0809	2654.1270	2.147E+02
12	88883	127299	2.54598E-06	0.004613316	4613.3158	12.2631208350	0.0815	2684.2666	2.189E+02
13	90328	125854	2.51708E-06	0.004560949	4560.9490	12.1239193519	0.0825	2727.9056	2.250E+02

(Lanjutan)

d. Kedalaman 100 cm, kompos kering (laju alir = 88 cc/menit)

t (jam)	Luas Area N <sub>2</sub> O pada t (Le)	Luas Area N <sub>2</sub> O (diadsorp) Li - Le	Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> ) (diadsorp) Vi - Ve	Massa N <sub>2</sub> O (gram) (per cm <sup>3</sup> diadsorp) mi-me	Konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> ) (diadsorp)	Langmuir Model			
						Qe (g/kg)	1/Qe (kg/g)	Ce (g/m <sup>3</sup> )	Ce/Qe (kg/m <sup>3</sup> )
0	216182	0	0.00000E+00	0.000000	0.000000	0.000	#DIV/0!	6528.6964	#DIV/0!
1	1142	215040	4.30080E-06	0.007793	7793.049600	20.715	0.0483	34.4884	1.665E+00
2	17199	198983	3.97966E-06	0.007211	7211.143920	19.169	0.0522	519.4098	2.710E+01
3	36327	179855	3.59710E-06	0.006518	6517.945200	17.326	0.0577	1097.0754	6.332E+01
4	33079	183103	3.66206E-06	0.006636	6635.652720	17.639	0.0567	998.9858	5.664E+01
5	36319	179863	3.59726E-06	0.006518	6518.235120	17.327	0.0577	1096.8338	6.330E+01
6	38264	177918	3.55836E-06	0.006448	6447.748320	17.139	0.0583	1155.5728	6.742E+01
7	42411	173771	3.47542E-06	0.006297	6297.461040	16.740	0.0597	1280.8122	7.651E+01
8	45050	171132	3.42264E-06	0.006202	6201.823680	16.486	0.0607	1360.5100	8.253E+01
9	49518	166664	3.33328E-06	0.006040	6039.903360	16.055	0.0623	1495.4436	9.314E+01
10	59524	156658	3.13316E-06	0.005677	5677.285920	15.091	0.0663	1338.1620	8.867E+01
11	46198	169984	3.39968E-06	0.006160	6160.220160	16.375	0.0611	1395.1796	8.520E+01

(Lanjutan)

e. Masa inkubasi 20,5 jam ( $h = 100$  cm, laju alir = 88 cc/menit, penambahan air 60% b/b kompos kering)

t (jam)	Luas Area N <sub>2</sub> O pada t (Le)	Luas Area N <sub>2</sub> O (diadsorp) Li - Le	Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> ) (diadsorp) Vi - Ve	Massa N <sub>2</sub> O (gram) (per cm <sup>3</sup> diadsorp) mi-me	Konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> ) (diadsorp)	Langmuir Model			
						Qe (g/kg)	1/Qe (kg/g)	Ce (g/m <sup>3</sup> )	Ce/Qe (kg/m <sup>3</sup> )
0	216182	0	0.00000E+00	0.000000000	0.0000	0.000000000	#DIV/0!	6528.6964	#DIV/0!
1	68097	148085	2.96170E-06	0.005366600	5366.6004	14.26550286	0.0701	2056.5294	1.442E+02
2	73740	142442	2.84884E-06	0.005162098	5162.0981	13.72189458	0.0729	2226.9480	1.623E+02
3	76090	140092	2.80184E-06	0.005076934	5076.9341	13.49551154	0.0741	2297.9180	1.703E+02
4	73327	142855	2.85710E-06	0.005177065	5177.0652	13.76168019	0.0727	2214.4754	1.609E+02
5	76061	140121	2.80242E-06	0.005077985	5077.9850	13.49830521	0.0741	2297.0422	1.702E+02
6	76983	139199	2.78398E-06	0.005044572	5044.5718	13.40948599	0.0746	2324.8866	1.734E+02
7	75999	140183	2.80366E-06	0.005080232	5080.2319	13.50427787	0.0741	2295.1698	1.700E+02
8	76586	139596	2.79192E-06	0.005058959	5058.9590	13.44773027	0.0744	2312.8972	1.720E+02
9	77808	138374	2.76748E-06	0.005014674	5014.6738	13.33001110	0.0750	2349.8016	1.763E+02
10	77180	139002	2.78004E-06	0.005037432	5037.4325	13.39050835	0.0747	2330.8360	1.741E+02
11	77314	138868	2.77736E-06	0.005032576	5032.5763	13.37759970	0.0748	2334.8828	1.745E+02
12	76939	139243	2.78486E-06	0.005046166	5046.1663	13.41372465	0.0746	2323.5578	1.732E+02

### Lampiran 7. Data Pemodelan Degradasi Michaelis – Menten Seluruh Variasi Penelitian

a. Kedalaman 50 cm, kompos kering (laju alir = 88 cc/menit)

t	konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE	Δt	C <sub>in</sub> - C <sub>out</sub>	C <sub>in</sub> /C <sub>out</sub>	ln(C <sub>in</sub> /C <sub>out</sub> )	y	x	Fitting data (used)		Fitting data (not used)	
									y	x	y	x
0	6528.6964	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	1517.2782	76.76	1	5011.418	4.3029	1.459289219	0	0.000136741	0	0.000136741	-0	0.002351217
2	2424.607	62.862	1	-907.329	0.6258	-0.468751378	-0	0.002351217	0	0.16605628	-0	0.026754395
3	2734.9422	58.109	1	-310.335	0.8865	-0.120440853	-0	0.026754395	1.5	6098.188355	-0	0.537218693
4	2806.7578	57.009	1	-71.816	0.9744	-0.025919707	-0	0.537218693	0	1.135827923	-0	3.336235561
5	2678.2568	58.977	1	128.501	1.048	0.046863874	0	0.16605628	0	0.299909372	-0	16.01900463
6	2692.2394	58.763	1	-13.983	0.9948	-0.005207203	-0	13.73433286			-0	0.081386083
7	2691.575	58.773	1	0.664	1.0002	0.000246814	1.5	6098.188355				
8	2720.0536	58.337	1	-28.479	0.9895	-0.010525062	-0	3.336235561				
9	2733.1	58.137	1	-13.046	0.9952	-0.00478491	-0	16.01900463				
10	2684.2666	58.885	1	48.833	1.0182	0.018028953	0	1.135827923				
11	2590.4956	60.321	1	93.771	1.0362	0.035558335	0	0.299909372				
12	2771.9674	57.542	1	-181.472	0.9345	-0.067708112	-0	0.081386083				

(Lanjutan)

b. Kedalaman 60 cm, kompos kering (laju alir = 88 cc/menit)

t	konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE	Δt	Cin - Cout	Cin/Cout	ln(Cin/Cout)	y	x	Fitting data (used)		Fitting data (not used)	
									y	x	y	x
0	6528.696	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	1702.132	73.928	1	4826.564	3.8356	1.34432547	0	0.000154	0	0.000154	-0	0.003636
2	2453.931	62.413	1	-751.799	0.6936	-0.3658095	-0	0.003636	0	2.061351	-0	0.03095
3	2743.549	57.977	1	-289.618	0.8944	-0.1115611	-0	0.03095	0	2.326976	-0	1.655547
4	2707.188	58.534	1	36.361	1.0134	0.01334181	0	2.061351	0.5	566.3034	-0	8.595471
5	2747.777	57.912	1	-40.589	0.9852	-0.0148817	-0	1.655547	0	0.009116	-0	5.581137
6	2765.686	57.638	1	-17.909	0.9935	-0.0064963	-0	8.595471			-1	4463.096
7	2731.318	58.164	1	34.368	1.0126	-0.01250428	0	2.326976			-0	0.003636
8	2753.485	57.825	1	-22.167	0.9919	-0.008083	-0	5.581137				
9	2751.280	57.859	1	2.205	1.0008	0.00080098	0.5	566.3034				
10	2752.066	57.847	1	-0.785	0.9997	-0.0002854	-1	4463.096				
11	2763.783	57.667	1	-11.718	0.9958	-0.0042487	-0	20.0865				
12	2240.810	65.678	1	522.973	1.2334	0.20976315	0	0.009116				

(Lanjutan)

c. Kedalaman 80 cm, kompos kering (laju alir = 88 cc/menit)

t	konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE	Δt	Cin - Cout	Cin/Cout	ln(Cin/Cout)	y	x	Fitting data (used)		Fitting data (not used)	
									y	x	y	x
0	6528.696	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	100.385	98.462	1	6428.312	65.0367	4.17495177	0	3.73E-05	0	3.73E-05	-0	0.010523
2	220.883	96.617	1	-120.498	0.45447	-0.78862144	-0	0.010523	0	1.046891	-0	0.161618
3	259.388	96.027	1	-38.505	0.85155	-0.160692	-0	0.161618	0	0.758032	-0	0.000187
4	2583.459	60.429	1	-2324.071	0.1004	-2.29856024	-0	0.000187	0	0.816513	-0	0.57426
5	2534.022	61.186	1	49.437	1.01951	0.01932159	0	1.046891			-0	0.34571
6	2600.884	60.162	1	-66.863	0.97429	-0.02604394	-0	0.57426			-0	5.402491
7	2688.344	58.823	1	-87.459	0.96747	-0.0330737	-0	0.34571			-0	0.739382
8	2629.121	59.730	1	59.222	1.02253	0.02227552	0	0.758032			-0	2.938333
9	2651.228	59.391	1	-22.106	0.99166	-0.00837313	-0	5.402491				
10	2711.447	58.469	1	-60.219	0.97779	-0.02245944	-0	0.739382				
11	2654.127	59.347	1	57.320	1.0216	0.02136651	0	0.816513				
12	2684.267	58.885	1	-30.140	0.98877	-0.01129176	-0	2.938333				

(Lanjutan)

d. Kedalaman 100 cm, kompos kering (laju alir = 88 cc/menit)

t	konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE	Δt	C <sub>in</sub> - C <sub>out</sub>	C <sub>in</sub> /C <sub>out</sub>	ln(C <sub>in</sub> /C <sub>out</sub> )	y	x	Fitting data (used)		Fitting data (not used)	
									y	x	y	x
0	6528.696	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	34.488	99.472	1	6494.208	189.3	5.243339534	0	2.94E-05	0	2.94E-05	-0	0.00076
2	519.410	92.044	1	-484.921	0.0664	-2.71207013	-0	0.00076	0	0.108846	-0	0.002315
3	1097.075	83.196	1	-577.666	0.4734	-0.74771002	-0	0.002315	0	0.009804	-0	0.109371
4	998.986	84.699	1	98.090	1.0982	0.093662626	0	0.108846			-0	0.326336
5	1096.834	83.200	1	-97.848	0.9108	-0.09344238	-0	0.109371			-0	0.077598
6	1155.573	82.300	1	-58.739	0.9492	-0.05216849	-0	0.326336			-0	0.207858
7	1280.812	80.382	1	-125.239	0.9022	-0.10289826	-0	0.077598			-0	0.078371
8	1360.510	79.161	1	-79.698	0.9414	-0.06036522	-0	0.207858			-0	0.017981
9	1495.444	77.094	1	-134.934	0.9098	-0.09456326	-0	0.078371				
10	1797.625	72.466	1	-302.181	0.8319	-0.18404335	-0	0.017981				
11	1395.18	78.630	1	402.445	1.2885	0.253443085	0	0.009804				

(Lanjutan)

e. Masa inkubasi 20,5 jam (h = 100 cm, laju alir = 88 cc/menit, penambahan air 60% b/b kompos kering)

t	konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE	Δ t	Cin - Cout	Cin/Cout	ln(Cin/Cout)	y	x	Fitting data (used)		Fitting data (not used)	
									y	x	y	x
0	6528.696	0.000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	2056.529	68.50	1	4472.167	3.1746186	1.155187486	0.000224	0.000194	0.000224	0.000194	-0.00587	0.073706
2	2226.948	65.89	1	-170.419	0.9234744	-0.07961223	-0.00587	0.073706	0.011984	0.324005	-0.01409	0.449149
3	2297.918	64.80	1	-70.970	0.9691155	-0.03137146	-0.01409	0.449149	0.033651	2.615816	-0.01211	0.330852
4	2214.475	66.08	1	83.443	1.0376805	0.03698796	0.011984	0.324005	0.052727	6.506381	-0.03591	2.980659
5	2297.042	64.82	1	-82.567	0.9640552	-0.03660676	-0.01211	0.330852	0.0883	18.160730	-0.05641	7.331563
6	2324.887	64.39	1	-27.844	0.9880233	-0.01204897	-0.03591	2.980659			-0.0271	1.711757
7	2295.170	64.85	1	29.717	1.0129475	0.012864436	0.033651	2.615816			-0.24711	142.450827
8	2312.897	64.57	1	-17.727	0.9923354	-0.00769411	-0.05641	7.331563				
9	2349.802	64.01	1	-36.904	0.9842947	-0.01582996	-0.0271	1.711757				
10	2330.836	64.30	1	18.966	1.0081368	0.008103898	0.052727	6.506381				
11	2334.883	64.24	1	-4.047	0.9982668	-0.0017347	-0.24711	142.450827				
12	2323.558	64.41	1	11.325	1.004874	0.004862152	0.0883	18.160730				