



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**BIOSORPSI GAS DINITROGEN MONOKSIDA DALAM  
PROSES BIOFILTRASI MENGGUNAKAN MEDIUM  
KOMPOS BERBASIS KOTORAN SAPI**

**SKRIPSI**

**CYNTHIA NOVIANI  
0606076223**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
DESEMBER 2009**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**HALAMAN JUDUL**

**BIOSORPSI GAS DINITROGEN MONOKSIDA DALAM  
PROSES BIOFILTRASI MENGGUNAKAN MEDIUM  
KOMPOS BERBASIS KOTORAN SAPI**

**SKRIPSI**

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

**CYNTHIA NOVIANI  
0606076223**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
DESEMBER 2009**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Cynthia Noviani**

**NPM : 0606076223**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 28 Desember 2009**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Cynthia Noviani  
NPM : 0606076223  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Biosorpsi Gas Dinitrogen Monoksida Dalam Proses  
Biofiltrasi Menggunakan Medium Kompos Berbasis  
Kotoran Sapi

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 : Ir. Rita Arbianti, MSi ( )  
Penguji : Dr. Heri Hermansyah, ST., M.Eng ( )  
Penguji : Prof. Dr. Ir. Anondho Wijanarko, M.Eng ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 28 Desember 2009

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tania Surya Utami, ST., MT selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran, serta kesabaran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Ir. Rita Arbianti, MSi selaku dosen pembimbing dan kepala laboratorium DPK atas izin penggunaan laboratorium;
3. Dr. Heri Hermansyah, ST., M.Eng dan Prof. Dr. Ir. Anondho Wijanarko, M.Eng selaku penguji sidang skripsi yang telah memberikan masukan bagi pengembangan skripsi ini;
4. Kang Jajat, Mbak Fita, Mang Ijal, dan Mas Eko sebagai teknisi laboratorium yang telah banyak membantu saya secara teknis;
5. Orang tua dan keluarga saya tercinta yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
6. Nando sebagai teman dekat yang selalu menyemangati saya dalam menyelesaikan skripsi ini. Shilfa dan Lila sebagai teman seperjuangan dalam biofilter yang telah membantu saya selama penelitian dan pembuatan skripsi, serta semua pihak 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, 27 Desember 2009

Penulis

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

---

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

Nama : Cynthia Noviani

NPM : 0606076223

Program Studi : Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

“ Biosorpsi Gas Dinitrogen Monoksida Dalam Proses Biofiltrasi Menggunakan  
Medium Kompos Berbasis Kotoran Sapi”

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 : 27 Desember 2009

Yang menyatakan

(Cynthia Noviani)

## ABSTRAK

Nama : Cynthia Noviani  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul : Biosorpsi Gas Dinitrogen Monoksida Dalam Proses Biofiltrasi Menggunakan Medium Kompos Berbasis Kotoran Sapi

Penelitian biofilter skala laboratorium dilaksanakan dengan tujuan untuk mengevaluasi pengaruh laju alir dan kedalaman medium filter terhadap efisiensi reduksi  $N_2O$  dan pertumbuhan mikroorganisme di dalam kompos. Selain itu, perubahan sifat medium yang terjadi sebelum dan setelah biofiltrasi serta karakteristik dari medium filter yang digunakan yaitu kompos berbasis kotoran sapi dan *bulking agent* berupa sekam dan *cocopeat* juga akan diteliti. Penelitian dilakukan dengan sistem aliran *batch* selama 9 jam. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi reduksi  $N_2O$  terbaik didapatkan pada laju alir 88 cc/menit dengan kedalaman 50 cm sebesar 61,35%, dan kapasitas eliminasi yang diperoleh sebesar 14078 g/m<sup>3</sup>h. Hasil kualitatif mikroorganisme di dalam kompos diamati dengan menggunakan SEM dan diketahui bahwa kompos awal sebelum biofiltrasi mengandung lebih sedikit mikroorganisme dibandingkan kompos setelah biofiltrasi.

Kata kunci:

Biofilter, biofiltrasi, efisiensi reduksi, kompos, kedalaman medium, laju alir, mikroorganisme,  $N_2O$

## ABSTRACT

Name : Cynthia Noviani  
Study Programme : Chemical Engineering  
Title : Nitrous Oxide Biosorption In Biofiltration Process Using Cow-Manure Compost Based Medium

A laboratory-scale biofilter was used to evaluate the effects of flow rate and depth of the filter medium on the removal efficiency of  $N_2O$  and the growth of microorganisms in the compost. Properties of the medium before and after biofiltration and characteristics of the filter medium will also be examined. The biofilter was operated using cow manure compost based medium with husk and cocopeat as bulking agent. Research was carried out by batch flow system for 9 hours. The result indicates that the highest  $N_2O$  removal efficiency is obtained under flow rate of 88 cc/minutes with a depth of 50 cm by 61,35%, and elimination capacity for 14078  $g/m^3h$  was achieved. Qualitative result of microorganisms in the compost was observed by using SEM and note that the initial compost before biofiltration contains less microorganisms than compost after biofiltration.

**Key words:**

Biofilter, Biofiltration, compost, depth, flow rate, microorganism,  $N_2O$ , reduction efficiency



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN .....	v
ABSTRAK .....	vi
ABSTRACT .....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	7
1.3 Tujuan Penelitian .....	8
1.4 Batasan Masalah.....	8
1.5 Sistematika Penulisan .....	9
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>11</b>
2.1 Dinitrogen Monoksida (N <sub>2</sub> O).....	11
2.2 Biofilter .....	12
2.2.1 Terminologi Biofilter.....	15
2.2.2 Karakteristik Performa Biofilter.....	16
2.2.3 Keefektifan Teknologi dan Biaya.....	17
2.2.4 Karakteristik Biofilter Ideal.....	19
2.3 Medium Filter .....	20
2.3.1 Kompos Sebagai Medium Filter.....	24
2.4 Parameter yang Mempengaruhi Kinerja Biofiltrasi .....	29
2.4.1 Medium filter.....	30
2.4.2 Kandungan Kelembaban.....	30
2.4.3 Temperatur.....	32
2.4.4 Kandungan Oksigen .....	33
2.4.5 pH .....	33
2.4.6 Nutrisi .....	33
2.4.7 <i>Pressure Drop</i> .....	34
2.4.8 Kedalaman Medium Filter.....	35
2.4.9 Mikrobiologi pada Biofilter.....	35
2.5 Metabolisme Nitrogen.....	37
2.5.1 Denitrifikasi .....	38
2.5.2 Nitrifikasi .....	39
2.6 <i>State of The Art</i> Biofiltrasi .....	40
2.6.1 Biofiltrasi dengan Medium Alami.....	40
2.6.2 Biofiltrasi dengan Medium Sintetik .....	59

2.6.3	Biofiltrasi dengan Campuran Medium Alami serta Sintetik .....	61
2.6.4	Biofiltrasi N <sub>2</sub> O dengan Medium Kompos dan Serpihan Kayu.....	66
2.6.5	Biofiltrasi N <sub>2</sub> O dengan Medium Kompos dari Kotoran Kambing.	68
2.6.6	Ringkasan <i>State of The Art</i> .....	69
<b>BAB 3 METODE PENELITIAN.....</b>		<b>82</b>
3.1	Diagram Alir Penelitian .....	82
3.2	Peralatan dan Bahan Penelitian.....	84
3.2.1	Peralatan .....	84
3.2.2	Bahan .....	86
3.3	Prosedur Penelitian.....	86
3.3.1	Perancangan dan Instalasi Sistem Biofilter .....	86
3.3.2	Preparasi Medium Filter .....	87
3.3.3	Uji Kebocoran Alat dan Uji Blangko .....	89
3.3.4	Kalibrasi Laju Alir dan Gas N <sub>2</sub> O.....	91
3.3.5	Pengujian Karakteristik Kompos.....	92
3.4	Pengujian Kinerja Biofilter .....	94
3.4.1	Variasi Laju Alir Gas N <sub>2</sub> O.....	94
3.4.2	Variasi Kedalaman Medium Filter .....	95
3.4.3	Pengujian Sifat Fisik dan Kimia Kompos .....	95
3.5	Data Penelitian .....	97
3.6	Pengukuran dan Analisis.....	98
3.6.1	Analisis Gas N <sub>2</sub> O.....	98
3.6.2	Analisis Perkembangan Bakteri.....	99
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>104</b>
4.1	Perancangan dan Instalasi Sistem Biofilter.....	104
4.2	Preparasi Medium Filter.....	106
4.3	Persiapan Eksperimen .....	110
4.3.1	Uji Kebocoran dan Uji Blangko .....	110
4.3.2	Kalibrasi Laju Alir dan Gas N <sub>2</sub> O.....	112
4.3.3	Uji Waktu Tinggal .....	115
4.3.4	Uji Karakteristik Kompos.....	116
4.4	Uji Kinerja Biofilter .....	119
4.4.1	Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N <sub>2</sub> O.....	119
4.4.2	Pengaruh Laju Alir terhadap Peningkatan Efisiensi Reduksi N <sub>2</sub> O....	121
4.4.3	Pengaruh Kedalaman Medium Filter terhadap Performansi Biofilter dalam Mereduksi N <sub>2</sub> O .....	126
4.4.4	Pengujian Sifat Fisik dan Kimia Kompos .....	130
4.4.5	Perbandingan Hasil Efisiensi Reduksi N <sub>2</sub> O antara Kompos Berbasis Kotoran Sapi dengan Kompos Berbasis Kotoran Kambing (Utami dkk., 2009).....	132
4.4.6	Hasil Uji Perkembangan Mikroorganisme pada Kompos .....	135
<b>BAB 5 KESIMPULAN .....</b>		<b>142</b>
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>		<b>143</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>		<b>147</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Komposisi gas rumah kaca per tahun ( <a href="http://www.mnp.nl/edgar/model/v32ft2000edgar/;4/8/08">http://www.mnp.nl/edgar/model/v32ft2000edgar/;4/8/08</a> ).....	2
Gambar 1.2 Konsentrasi beberapa gas rumah kaca selama 2000 tahun terakhir (IPCC, 2007) .....	2
Gambar 1.3 Kenaikan suhu rata-rata bumi selama 157 tahun terakhir (IPCC, 2007) .....	3
Gambar 2.1 Mekanisme biofilter (Shihabudheen. M.M and Ligy Philip, 2004)..	14
Gambar 2.2 Tipe kurva EC vs <i>Loading</i> (Devinny et al., 1999) .....	17
Gambar 2.3 Aplikasi berbagai teknologi polusi berdasarkan laju alir dan konsentrasi kontaminan (Devinny et al., 1999) .....	18
Gambar 2.4 Perbandingan biaya modal teknologi biofilter (Devinny, 1999).....	18
Gambar 2.5 Perbandingan biaya operasi teknologi biofilter (Devinny, 1999) ....	19
Gambar 2.6 Proses biofiltrasi dengan media kompos (Dr. Rakesh Govind, 1998) .....	22
Gambar 2.7 Proses adsorpsi pada biofilter (Devinny et.al, 1999) .....	22
Gambar 2.8 Aliran kontaminan udara dalam biofilter (Devinny et.al, 1999) .....	23
Gambar 2.9 Model transfer gas (Devinny et.al, 1999) .....	23
Gambar 2.10 Efek kandungan air untuk reduksi iso-pentanadengan biofilter (Shareefdeen, 2005) .....	31
Gambar 2.11 Jalur metabolisme nitrogen (Hudepohl, 1999).....	38
Gambar 2.12 Tampak depan biofilter Gabriel et al., 2007) .....	47
Gambar 2.13 Skema representasi dari proses nitrifikasi meliputi substrat dan inhibisi non kompetitif (Guillermo Baquerizo et al., 2005).....	50
Gambar 2.14 Medium <i>Hardwood</i> (HW) dan <i>Western cedar</i> (WC) (Chen et al., 2008) .....	52
Gambar 2.15 (a) <i>Pall ring</i> komersial, (b) Tampak atas biofilter yang diisi dengan <i>pall ring</i> yang mengandung sel terimobilisasi (Jung Hoon Kim et al., 2007) .....	60
Gambar 2.16 <i>Mapping State of The Art Biofilter</i> .....	71
Gambar 2.17 <i>Mapping State of The Art</i> biofilter terhadap gas NO <sub>x</sub> .....	72
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian secara umum.....	82
Gambar 3.2 Diagram skematik biofilter.....	84
Gambar 3.3 a) Manometer air tipe U, b) <i>Perforated plates</i> .....	87
Gambar 3.4 Diagram prosedur pengomposan.....	88
Gambar 3.5 Skema prosedur preparasi kompos yang sudah jadi sebelum biofiltrasi dilakukan .....	89
Gambar 3.6 Skema uji kebocoran alat dengan uji sabun (rute kiri) dan uji blangko (rute kanan) .....	90
Gambar 3.7 Diagram alir prosedur kalibrasi laju alir .....	92
Gambar 3.8 Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption.....	93
Gambar 3.9 Diagram alir prosedur pengoperasian GC.....	98
Gambar 3.10 Metode sterilisasi cawan petri .....	101
Gambar 3.11 Metode sterilisasi bahan-bahan yang akan digunakan .....	102

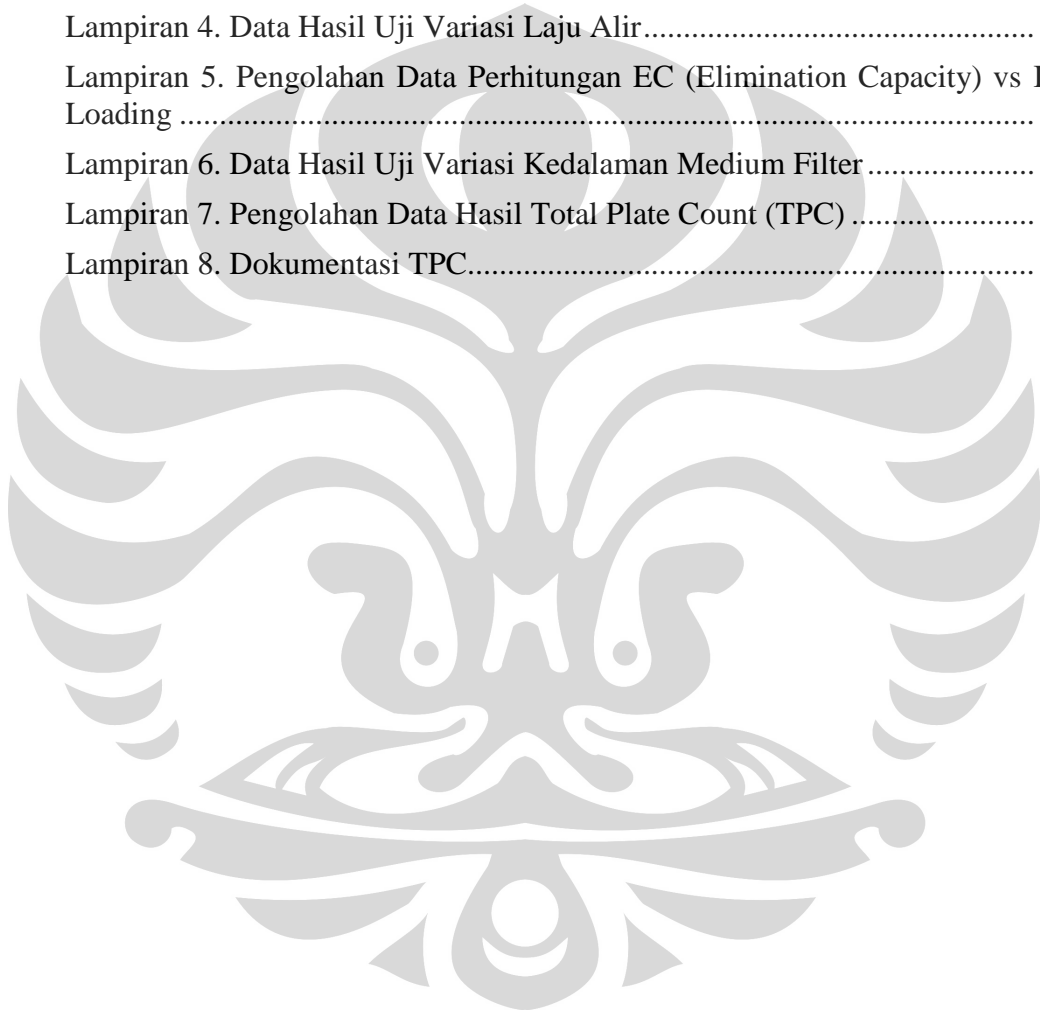
Gambar 4.1 Hasil perancangan alat biofilter dalam bentuk 3 dimensi .....	105
Gambar 4.2 Peralatan biofilter yang digunakan dalam penelitian .....	106
Gambar 4.3 Proses pengeringan kompos dengan kondisi $T = 33^{\circ}\text{C}$ .....	108
Gambar 4.4 Proses pengadukan kompos .....	109
Gambar 4.5 Proses pengayakan kompos.....	109
Gambar 4.6 Kompos sebagai medium filter .....	109
Gambar 4.7 a) Terjadi kebocoran pada bagian atas kolom biofilter, b) Tidak terjadi kebocoran .....	110
Gambar 4.8 Uji blangko biofilter .....	111
Gambar 4.9 Kalibrasi laju alir gas $\text{N}_2\text{O}$ pada <i>flowmeter</i> .....	113
Gambar 4.10 Sampel grafik yang terdeteksi pada a) Gas $\text{N}_2\text{O}$ , b) Udara bebas oleh GC .....	114
Gambar 4.11 Kalibrasi gas $\text{N}_2\text{O}$ .....	115
Gambar 4.12 Uji kinerja biofilter dalam mereduksi $\text{N}_2\text{O}$ (h = 49,7 cm; Q = 73,48 cc/menit, medium kompos kering) .....	120
Gambar 4.13 Profil variasi laju alir terhadap efisiensi reduksi $\text{N}_2\text{O}$ (h = 49,7 cm, m = 945 g, medium filter = kompos kering) .....	122
Gambar 4.14 Grafik batang perbandingan efisiensi reduksi pada uji variasi laju alir gas $\text{N}_2\text{O}$ (h = 49,7 cm, medium kering, t = 9 jam) .....	123
Gambar 4.15 Grafik <i>Elimination Capacity</i> (EC) terhadap <i>Inlet Loading</i> (IL) pada variasi laju alir.....	124
Gambar 4.16 Profil variasi kedalaman medium filter terhadap efisiensi reduksi $\text{N}_2\text{O}$ (medium filter = kompos kering) .....	127
Gambar 4.17 Perbandingan efisiensi reduksi pada uji variasi kedalaman medium filter (medium kering, t = 9 jam).....	128
Gambar 4.18 Grafik perbandingan efisiensi reduksi $\text{N}_2\text{O}$ yang dihasilkan oleh kompos berbasis kotoran kambing dan kompos berbasis kotoran sapi (variasi laju alir, medium kering, t = 9 jam) .....	133
Gambar 4.19 Profil variasi laju alir terhadap efisiensi reduksi $\text{N}_2\text{O}$ pada kompos berbasis kotoran kambing (h = 50 cm, m = 945 g, medium filter = kompos kering) .....	134
Gambar 4.20 Grafik <i>Elimination Capacity</i> (EC) terhadap <i>Inlet Loading</i> (IL) pada kompos berbasis kotoran kambing.....	135
Gambar 4.21 Uji Blangko Medium Agar.....	137
Gambar 4.22 Hasil uji TPC pada kompos awal sebelum biofiltrasi .....	137
Gambar 4.23 Hasil uji TPC pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi laju alir (medium kering) .....	137
Gambar 4.24 Hasil uji TPC pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi kedalaman medium filter (medium kering).....	138
Gambar 4.25 Kontaminasi pada larutan dilusi $10^9$ pada saat TPC kompos awal .....	139
Gambar 4.26 Hasil Uji SEM pada kompos awal sebelum biofiltrasi .....	140
Gambar 4.27 Hasil Uji SEM pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi laju alir .....	140
Gambar 4.28 Hasil Uji SEM pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi kedalaman medium filter.....	141

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Global Warming Potential</i> untuk beberapa GRK terhadap CO <sub>2</sub> dalam waktu 100 Tahun (GWP Tahun 1990).....	12
Tabel 2.2 Perbandingan desain biofilter beserta keuntungannya.....	14
Tabel 2.3 Organisme yang terlibat dalam proses pengomposan.....	25
Tabel 2.4 Perkiraan kandungan hara makro dari beberapa jenis kotoran hewan...28	
Tabel 2.5 Nilai optimal yang mengontrol proses pengomposan.....	29
Tabel 2.6 Properti awal dan akhir biofilter kompos.....	43
Tabel 2.7 Properti dari media biofilter sebelum dan setelah periode biofiltrasi... 45	
Tabel 2.8 Karakteristik dari kompos yang digunakan dalam biofilter.....	57
Tabel 2.9 Ringkasan berbagai penelitian biofiltrasi.....	73
Tabel 3.1 Rincian peralatan yang digunakan dalam penelitian.....	85
Tabel 3.2 Spesifikasi kromatografi gas dalam penelitian.....	98
Tabel 4.1 Hasil uji BET kompos berbasis kotoran sapi.....	117
Tabel 4.2 Perbandingan kandungan unsur yang terdapat pada kompos berbasis kotoran kambing dan kompos berbasis kotoran sapi.....	118
Tabel 4.3 <i>Pressure drop</i> terukur pada kolom biofilter.....	125
Tabel 4.4 Kondisi <i>pressure drop</i> yang terjadi selama penelitian variasi kedalaman medium filter.....	129
Tabel 4.5 Kedalaman medium filter yang terbaca pada kolom biofilter.....	130
Tabel 4.6 Karakteristik kompos sebelum dan setelah biofiltrasi.....	131
Tabel 4.7 Hasil uji TPC sebelum dan setelah biofiltrasi.....	139

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Hasil Uji Blangko .....	147
Lampiran 2. Data Hasil Kalibrasi Laju Alir Gas N <sub>2</sub> O .....	148
Lampiran 3. Data Hasil Kalibrasi Gas N <sub>2</sub> O .....	149
Lampiran 4. Data Hasil Uji Variasi Laju Alir.....	150
Lampiran 5. Pengolahan Data Perhitungan EC (Elimination Capacity) vs Inlet Loading .....	156
Lampiran 6. Data Hasil Uji Variasi Kedalaman Medium Filter .....	157
Lampiran 7. Pengolahan Data Hasil Total Plate Count (TPC) .....	161
Lampiran 8. Dokumentasi TPC.....	165



# BAB 1

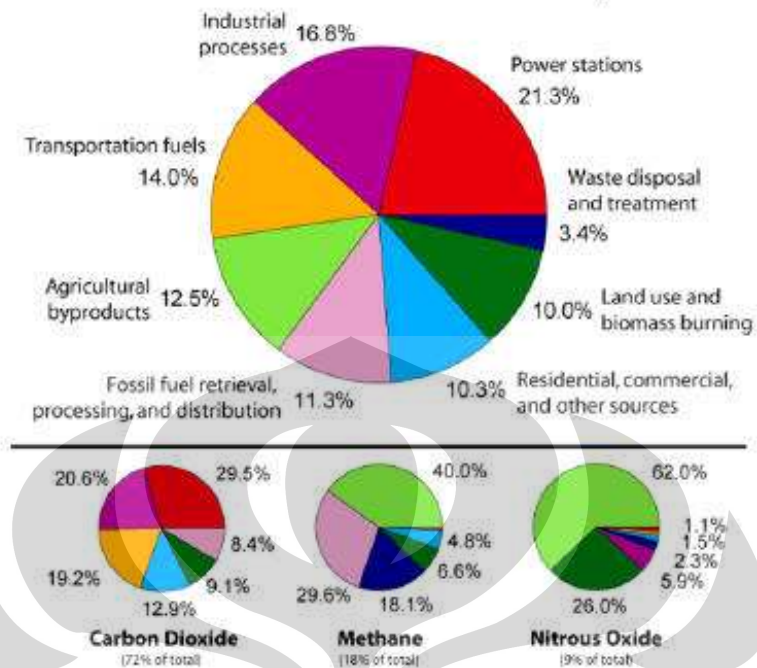
## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Sebagian besar polusi udara yang dihadapi oleh berbagai negara, khususnya negara berkembang dihasilkan oleh asap buangan kendaraan bermotor dan proses industri. Sekitar 10% pencemar udara setiap tahun terdiri dari gas nitrogen oksida yang merupakan gas polutan berbahaya yang dapat menyebabkan masalah lingkungan yang serius (Yang, 2007). Ada delapan kemungkinan hasil reaksi apabila nitrogen bereaksi dengan oksigen, namun yang jumlahnya cukup banyak ialah NO, N<sub>2</sub>O, dan NO<sub>2</sub>. Gas N<sub>2</sub>O memiliki jumlah terbesar di antara ketiga oksida tersebut, namun yang menyebabkan pencemaran udara hanyalah gas NO dan NO<sub>2</sub>.

Pembakaran bahan bakar fosil besar-besaran seperti batu bara dan minyak bumi melepaskan kadar nitrogen oksida yang tinggi (termasuk oksida nitrat atau N<sub>2</sub>O) sebagai asap. Jika gas N<sub>2</sub>O mencapai stratosfer, maka gas ini akan membantu merusak lapisan ozon, sehingga menghasilkan tingkat radiasi UV yang lebih tinggi dan risiko kanker kulit serta katarak yang meningkat. Selain pembakaran bahan bakar fosil, emisi gas N<sub>2</sub>O juga dihasilkan oleh industri peternakan dan pertanian. PBB melaporkan bahwa industri daging, telur, dan produk hewani lain melepaskan 60% gas N<sub>2</sub>O di bumi. Jadilah industri daging salah satu penyebab besar masalah lingkungan yang serius. Sumbangan gas rumah kaca dari industri peternakan (CO<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) sebesar 18% diketahui lebih besar dari emisi yang dikeluarkan oleh seluruh moda transportasi di dunia (13%). Menurut U.N. News Centre beternak menghasilkan lebih banyak gas rumah kaca daripada mengendarai mobil. Gambar 1.1 menunjukkan komposisi gas rumah kaca per tahun.

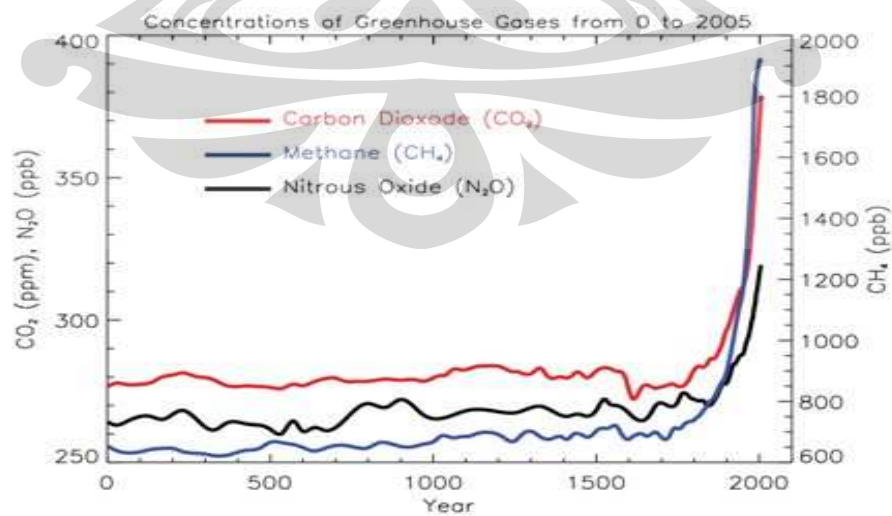
### Annual Greenhouse Gas Emissions by Sector



**Gambar 1.1** Komposisi gas rumah kaca per tahun

(<http://www.mnp.nl/edgar/model/v32ft2000edgar/;4/8/08>)

Gas-gas rumah kaca tersebut akan terakumulasi di atmosfer sehingga menyebabkan peningkatan konsentrasi seiring dengan perjalanan waktu. Peningkatan ini sangat kentara pada era industri seperti ditunjukkan pada Gambar 1.2 berikut.

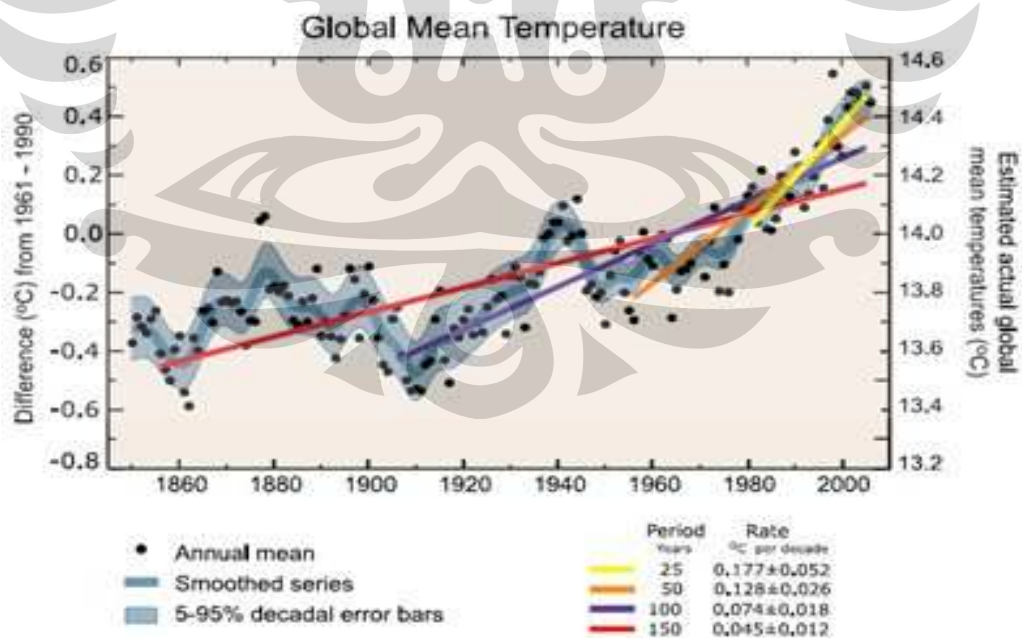


**Gambar 1.2** Konsentrasi beberapa gas rumah kaca selama 2000 tahun terakhir (IPCC, 2007)



Semakin tinggi konsentrasi gas rumah kaca, maka semakin banyak radiasi panas dari bumi yang terperangkap di atmosfer dan dipancarkan kembali ke bumi. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya peningkatan suhu di permukaan bumi dan perubahan iklim global.

Perubahan iklim adalah sebuah fenomena dimana panas matahari yang masuk ke bumi hanya sebagian kecil yang dapat dipantulkan kembali ke atmosfer, sementara sisanya terjebak di bumi akibat adanya lapisan gas rumah kaca di atmosfer. Terjebaknya panas matahari ini pada akhirnya menyebabkan bumi menjadi semakin panas. Peristiwa ini dikenal dengan pemanasan global atau *global warming*. Perubahan iklim itu sendiri terjadi secara perlahan dalam jangka waktu yang cukup lama, antara 50-100 tahun. Walaupun terjadi secara perlahan, perubahan iklim memberikan dampak yang sangat besar bagi kehidupan umat manusia. Sebagian besar wilayah di dunia akan menjadi semakin panas, sedangkan di bagian lain akan menjadi semakin dingin. Pengamatan selama 157 tahun terakhir menunjukkan bahwa suhu permukaan bumi mengalami peningkatan sebesar  $0,05^{\circ}\text{C}/\text{dekade}$ . Selama 25 tahun terakhir ini, peningkatan suhu semakin tajam yaitu sebesar  $0,18^{\circ}\text{C}/\text{dekade}$  (lihat Gambar 1.3).



**Gambar 1.3** Kenaikan suhu rata-rata bumi selama 157 tahun terakhir (IPCC, 2007)

Gas dinitrogen monoksida ( $N_2O$ ) atau yang dikenal dengan sebutan gas tawa merupakan gas rumah kaca terbanyak keempat di atmosfer setelah  $CO_2$ ,  $CH_4$ , dan uap air, namun gas ini memberi kontribusi terbesar pada pemanasan global. Hal ini disebabkan oleh sifatnya yang sangat sulit terurai di atmosfer, meskipun konsentrasinya relatif rendah. Emisi dari gas  $N_2O$  diketahui memiliki dampak 320 kali lebih besar daripada dampak  $CO_2$  terhadap pemanasan global. Selain  $N_2O$ , gas nitrogen oksida lain juga memberikan dampak terhadap pemanasan global secara tidak langsung, yaitu melalui kontribusi terhadap produksi ozon troposferik pada proses pembentukan *smog*.

Dalam rangka mengurangi emisi  $NO_x$  yang berbahaya bagi lingkungan, diperlukan beberapa cara untuk mereduksi gas tersebut dari udara. Sebelumnya, teknologi kontrol tradisional seperti *Selective Catalytic Reduction* (SCR) dan *Selective Non Catalytic Reduction* (SNCR) telah digunakan untuk mengontrol emisi  $NO_x$  pada kegiatan-kegiatan industri. Akan tetapi, kedua proses ini membutuhkan temperatur yang tinggi dan juga penggunaan katalis sehingga memerlukan biaya instalasi dan biaya operasi yang tinggi. Selain itu, proses-proses ini juga menghasilkan produk buangan dalam jumlah cukup besar sehingga mengharuskan pemilik pabrik untuk membayar biaya pembersihan dan pembuangan (Y.Jin, M. Viega, C.Kennes, 2005). Adanya kelemahan dari segi ekonomi dan teknik inilah yang mendorong para peneliti untuk mengembangkan teknologi baru yang lebih murah untuk mereduksi  $NO_x$  dari gas buangan. Teknologi baru ini dikenal dengan sebutan biofilter.

Biofilter bekerja dengan cara mengalirkan aliran udara yang terkontaminasi melalui suatu media berpori dimana kontaminan dalam aliran udara akan teradsorpsi oleh *biofilm* dan kontaminan ini akan teroksidasi untuk menghasilkan biomassa,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $NO_3^-$ , dan  $SO_4^{2-}$ . Selain itu, biofilter dapat mendukung pertumbuhan biologi dari mikroorganisme yang terdapat di dalam media berpori (Liu et al., 2004). Biofilter juga telah berhasil digunakan secara efektif untuk menghilangkan bau dan senyawa organik volatil (VOC) seperti benzena (K. Kardono, E.R. Allen, 1995), stirena (L. Lackey, T. Holt, 1996), fenol (Zilli et al., 1993), dan alkena (Morgenroth et al., 1995) dari berbagai proses industri (Yang, 2007).

Beberapa kelebihan dari teknik biofilter antara lain adalah tercapainya efisiensi yang tinggi dalam mereduksi gas polutan, biaya instalasi dan operasi yang rendah, kondisi operasi yang aman dan konsumsi energi yang rendah, tidak menghasilkan produk samping, dan dapat mengkonversi banyak campuran organik dan inorganik menjadi produk oksidasi yang tak berbahaya (B.A. Sheridan, T.P. Curran, V.A. Dodd, 2002; J.S. Devigny, M.A. Deshusses, T.S., 1999). Selain itu, kesederhanaan desainnya juga merupakan salah satu alasan kepopuleran biofilter (Zilli et al., 2001). Apabila biofilter dibandingkan dengan metode fisika-kimia konvensional, metode biofilter ini mempunyai kelebihan lain yaitu stabil pada waktu yang relatif lama dan memiliki daya degradasi gas polutan yang tinggi.

Aplikasi pengolahan NO<sub>x</sub> pada teknik biofilter juga bergantung pada organisme pendenitrifikasi yang banyak terdapat di alam. Organisme pendenitrifikasi memiliki kemampuan untuk mengurangi kadar NO<sub>x</sub> dengan jumlah oksigen tertentu. Adapun proses reduksi yang terjadi mengikuti urutan penyederhanaan berikut:  $NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$  (Barnes, 1994). Pada proses denitrifikasi, karbon organik bertindak sebagai donor elektron seperti asam asetat, metanol, dan sampah domestik (G. Bitton, 1994). Jadi, mikroba pendenitrifikasi dapat membentuk gas nitrogen yang ramah lingkungan sehingga dapat mencegah bahaya yang ditimbulkan NO<sub>x</sub>.

Dalam penelitian biofiltrasi ini, medium filter yang akan digunakan untuk mereduksi gas N<sub>2</sub>O adalah kompos. Hal ini disebabkan kompos memiliki retensi air yang baik dan kandungan zat organik yang cocok. Selain itu, kompos juga merupakan media yang murah dan banyak tersedia. Kompos juga dapat dicampur dengan *bulking agent* seperti potongan kayu, bulu, atau material sintetis untuk menghindari *pressure drop* yang tinggi, hambatan dan *chanelling*, serta untuk meningkatkan daya tahan biofilter (Nicolai et al., 2001; Liang et al., 2000). Pemilihan jenis *bulking agent* yang akan dicampur dengan kompos dan juga bahan organik kompos dapat mempengaruhi performansi biofilter dalam mereduksi gas N<sub>2</sub>O.

Adapun komposisi kompos yang akan digunakan dalam penelitian ini terdiri dari bahan organik berupa kotoran sapi serta *bulking agent* berupa *cocopeat* dan

sekam beras. Alasan dari pemilihan kotoran sapi sebagai bahan organik adalah karena kotoran sapi memiliki kandungan air yang sangat besar yaitu sekitar 60-85%, dimana hal ini dapat mendukung pertumbuhan mikroorganisme yang terdapat di dalam kompos. Nutrisi tambahan juga tidak diperlukan untuk biofilter karena kompos kotoran sapi memiliki jumlah nitrogen organik, fosfor, kalium, dan mikronutrisi lain yang signifikan (Pagans et al., 2005). Selain itu, kompos dari kotoran sapi ini banyak tersedia dan dapat diperoleh dengan mudah di peternakan. Sementara itu, pemilihan *cocopeat* dan sekam beras sebagai *bulking agent* disebabkan karena keduanya dapat menghindari *pressure drop* yang tinggi dan *channeling*, serta dapat meningkatkan rasio C/N kompos.

Selain medium filter, laju alir gas  $N_2O$  juga harus diatur sedemikian rupa karena laju alir ini dapat mempengaruhi lamanya waktu tinggal gas  $N_2O$  pada medium filter dan besarnya konsentrasi gas  $N_2O$  yang dapat tereduksi oleh medium filter. Selanjutnya, parameter yang turut mempengaruhi efisiensi reduksi gas  $N_2O$  dalam biofiltrasi adalah kedalaman medium filter. Kedalaman medium filter mempunyai rentang kurang dari 0,5 sampai 2 m. Namun, kedalaman medium filter yang biasa digunakan adalah sekitar 0,5-1 m, dimana pada kedalaman ini waktu retensi yang dibutuhkan sangat cukup dengan luas area medium filter yang minimum.

Sebelumnya, dalam jurnal berjudul “The Effect of Selected Parameters on The Nitric Oxide Removal by Biofilter”, Yang et al. (2007) juga telah melakukan penelitian mengenai biofiltrasi NO pada kolom biofilter dengan menggunakan medium filter berupa campuran kompos dan serbuk kayu, dan memperoleh efisiensi reduksi NO sebesar 99%. Sementara itu, penelitian mengenai biofiltrasi  $N_2O$  dengan menggunakan medium filter berupa serpihan kayu dan pupuk kandang dari kotoran sapi juga telah dilakukan oleh Utami dkk (2009) dan dipublikasikan dalam simposium internasional berjudul “Biosorption Study For The Removal of Nitrous Oxide Gas Using Compost Biofilter”. Pada penelitian ini gas  $N_2O$  disirkulasi selama 6 jam menggunakan pompa peristaltik pada kolom biofilter. Efisiensi reduksi gas  $N_2O$  yang dihasilkannya dapat mencapai 70,217% tanpa melakukan penambahan nutrisi dan dapat mencapai efisiensi reduksi tertinggi sebesar 91,49% pada ketinggian kolom biofilter sebesar 50 cm dan laju

alir gas N<sub>2</sub>O 200 cc/menit melalui penambahan nutrisi. Penelitian lain mengenai biofiltrasi N<sub>2</sub>O dengan menggunakan medium filter yang terdiri dari kompos dengan bahan organik berupa kotoran kambing dan sampah rumah tangga, serta *bulking agent* berupa sekam dan *cocopeat* juga telah dilakukan oleh Utami dkk (2009) dan dipublikasikan dalam seminar dengan judul “Pengaruh Parameter Operasi dalam Proses Biofiltrasi N<sub>2</sub>O dengan Medium Filter Berbasis Kompos”. Penelitian biofiltrasi ini dilakukan selama 9 jam dengan sistem aliran *batch*. Efisiensi reduksi yang dihasilkannya dapat mencapai 75,9% pada ketinggian medium 50 cm, laju alir N<sub>2</sub>O 72 cc/menit, kandungan air 60% berat kompos, dan penambahan nutrisi sintetik serta *Nitrobacter, sp* pada kompos.

Berdasarkan uraian di atas, diharapkan penelitian ini dapat menghasilkan efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O yang lebih tinggi dengan menggunakan parameter-parameter yang telah dipilih dengan sistem aliran *batch* (sekali jalan) selama 9 jam. Parameter-parameter yang akan diteliti dalam uji biofiltrasi ini antara lain adalah pengaruh variasi laju alir gas N<sub>2</sub>O dan variasi kedalaman medium filter terhadap performansi biofilter dalam mereduksi N<sub>2</sub>O serta terhadap pertumbuhan mikroorganisme di dalam kompos. Selain itu juga akan dilakukan uji sifat fisik dan kimia terhadap kompos yang digunakan dalam penelitian ini antara lain densitas, pH, *water content*, dan porositas, serta uji karakteristik melalui uji BET dan uji kandungan unsur-unsur di dalam kompos.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, maka dapat dirumuskan permasalahan yang ada sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi laju alir gas N<sub>2</sub>O terhadap peningkatan efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O dan terhadap pertumbuhan mikroorganisme pada kompos?
2. Bagaimana pengaruh variasi kedalaman medium filter terhadap performansi biofilter dalam mereduksi N<sub>2</sub>O dan terhadap pertumbuhan mikroorganisme pada kompos?

3. Bagaimana sifat fisik dan kimia (densitas, pH, *water content*, porositas) kompos awal dan kompos akhir tiap variasi, serta pengaruhnya terhadap efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O yang dihasilkan?
4. Bagaimana karakteristik (area permukaan spesifik, diameter pori, dan kandungan unsur-unsur dalam kompos) medium filter berupa kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing?
5. Bagaimana perbandingan hasil efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O yang diperoleh melalui biofiltrasi dengan menggunakan medium filter berupa kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan umum dari penelitian ini adalah untuk memperoleh efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O seoptimal mungkin melalui parameter-parameter yang telah ditentukan. Sementara itu, tujuan khusus yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengevaluasi pengaruh variasi laju alir gas N<sub>2</sub>O terhadap peningkatan efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O dan terhadap pertumbuhan mikroorganisme pada kompos.
2. Mengevaluasi pengaruh variasi kedalaman medium filter terhadap performansi biofilter dalam mereduksi N<sub>2</sub>O dan terhadap pertumbuhan mikroorganisme pada kompos.
3. Mengevaluasi sifat fisik dan kimia kompos awal dan kompos akhir tiap variasi serta pengaruhnya terhadap efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O yang dihasilkan.
4. Mengetahui dan mengevaluasi karakteristik medium filter berupa kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing.
5. Mengevaluasi perbandingan hasil efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O yang diperoleh melalui biofiltrasi dengan menggunakan medium filter berupa kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing.

### 1.4 Batasan Masalah

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

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (RPKA) Departemen Teknik Kimia dan Laboratorium 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 N<sub>2</sub>O sebagai gas sampel adalah 15000 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 yang terdiri dari bahan organik berupa kotoran sapi dan *bulking agent* berupa *cocopeat* dan sekam beras.

## 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, pembuatan kompos, 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, kalibrasi laju alir dan gas N<sub>2</sub>O, uji kemampuan alat biofilter dalam mereduksi gas N<sub>2</sub>O dengan variasi laju alir gas N<sub>2</sub>O dan variasi kedalaman medium

filter, hasil uji sifat kompos awal dan kompos akhir tiap variasi, serta hasil uji karakteristik medium filter yang digunakan, dan pengaruhnya terhadap efisiensi reduksi  $N_2O$  yang dihasilkan. Pembahasan akan dilanjutkan dengan perbandingan hasil efisiensi reduksi  $N_2O$  yang diperoleh melalui biofiltrasi pada medium filter berupa kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing.

#### **BAB 5. KESIMPULAN**

Berisikan kesimpulan dari hasil penelitian dan pembahasan.





## 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 anestetik lemah yang digunakan dalam pembedahan dan kedokteran gigi. Gas ini pertama kali dihasilkan pada tahun 1775 oleh Joseph Priestley. Gas dinitrogen monoksida ini juga kadang digunakan dalam duniaomotif sebagai penambah kecepatan dan digunakan pula dalam penyelaman untuk mempersiapkan para penyelam terhadap efek *nitrogen narcosis*.

N<sub>2</sub>O 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. Selain itu, N<sub>2</sub>O juga merupakan salah satu gas yang memberi kontribusi terbesar pada pemanasan global. Dampak gas rumah kaca terhadap pemanasan global sangat bervariasi. Untuk jumlah yang sama, gas rumah kaca yang berbeda mempunyai dampak pemanasan global yang berbeda. Untuk membandingkan dampak yang bervariasi ini, digunakanlah indeks potensi pemanasan global (*Global Warming Potential=GWP*). Indeks GWP menggunakan CO<sub>2</sub> sebagai tolok ukur. Hal ini berarti, GWP ditentukan dengan membandingkan efek radiasi gas rumah kaca di atmosfer terhadap CO<sub>2</sub> dalam jumlah yang sama. Dari indeks GWP ini diketahui bahwa 1 ton emisi gas N<sub>2</sub>O dampaknya sama dengan 320 ton emisi gas CO<sub>2</sub>. Tabel 2.1 menunjukkan *Global Warming Potential* untuk beberapa GRK terhadap CO<sub>2</sub> dalam waktu 100 tahun (GWP tahun 1990).

**Tabel 2.1** *Global Warming Potential* untuk beberapa GRK terhadap CO<sub>2</sub> dalam waktu 100 Tahun (GWP Tahun 1990)

Gas	<i>Global Warming Potential (GWP)</i>
CO <sub>2</sub>	1,0
CH <sub>4</sub>	24,5
N <sub>2</sub> O	320,0
CO	3,0
NO <sub>x</sub>	290,0

Sumber: *ALGAS National Workshop Proceedings*, Maret 1997

Seperti telah disebutkan sebelumnya, 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 lain juga memberikan dampak terhadap pemanasan global secara tidak langsung melalui kontribusi terhadap produksi ozon troposferik pada proses pembentukan *smog*.

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 60% 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 Biofilter

Sistem pengolahan dengan metode fisika-kimia konvensional seperti adsorpsi, absorpsi, *scrubbing*, dan kondensasi untuk mengontrol emisi merupakan sistem yang kurang efektif, membutuhkan banyak energi, menggunakan banyak zat kimia, serta memerlukan pengoperasian yang rumit (Khan dan Ghosal, 2000; Burgess et al., 2001). Seiring dengan meningkatnya perhatian akan peraturan tentang emisi nitrogen oksida yang dihasilkan oleh proses perlakuan panas dan meningkatnya protes masyarakat mengenai emisi bau dari *plant* pengolahan air limbah, industri pabrik, dan juga fasilitas pengolahan limbah padat, disadari adanya kebutuhan akan teknologi yang ramah lingkungan dan membutuhkan

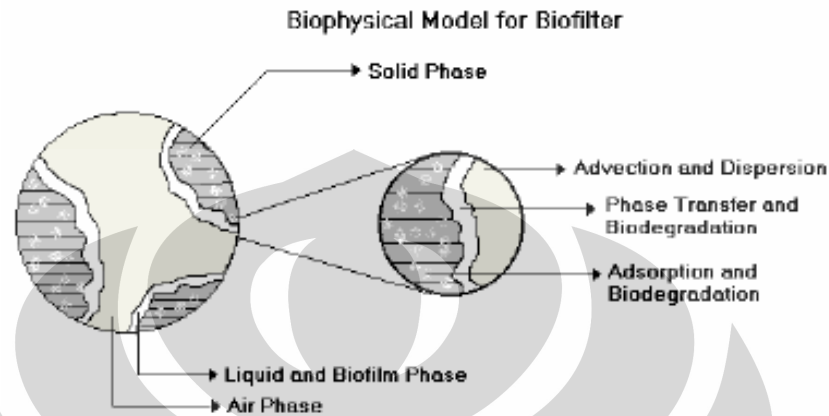
biaya rendah. Salah satu sistem pengolahan yang lebih disukai adalah pengolahan gas buang secara biologis karena lebih efektif dalam penanganan kontaminan berkonsentrasi rendah dengan laju alir tinggi (Kennes dan Thalasso, 1998; Deviny et al., 1999; Rene et al., 2005). Selain itu, perlakuan secara biologis dapat dioperasikan di bawah temperatur ambien dengan menggunakan mikroba yang tidak mahal. Salah satu perlakuan secara biologis yang paling umum adalah biofilter.

Biofilter dapat didefinisikan sebagai reaktor biokimia *fixed-bed* dimana terdapat mikroorganisme pada permukaan medium filter untuk mengkonsumsi udara yang terserap. Zat-zat kontaminan yang terdapat di udara diserap dan dikonsumsi oleh mikroorganisme (M. Schlegelmilch, J. Streese, R. Stegmann, 2005). Prinsip dari biofiltrasi relatif sederhana, mula-mula aliran udara yang terkontaminasi dialirkan melalui suatu unggun berpori dimana suatu kultur mikroorganisme pengurai polutan diimobilisasi. Udara berbau dan terkontaminasi kemudian melewati *porous packed bed*, 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  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Biofiltrasi merupakan suatu teknologi berkembang yang menawarkan beberapa keuntungan dibandingkan dengan metode tradisional dalam mengontrol zat polutan udara dalam konsentrasi rendah. Biofilter ini memberikan porositas yang tinggi, memiliki ketersediaan nutrisi yang tinggi, kapasitas retensi dengan kelembaban yang tinggi, dan kapasitas *buffering* yang tinggi guna mempertahankan pertumbuhan mikrobial pada matriks support yang diinginkan. Efektivitas biofilter tergantung pada aktivitas populasi mikroba dan jenis pengayaan (*enrichment*) yang dilakukan selama tahap inokulasi. Selain itu, jenis matriks support juga mempengaruhi stabilitas jangka panjang dan kinerja dari biofilter. Bahan *packing* yang paling sering digunakan dalam biofilter adalah *peat*, kompos, karbon teraktivasi, tanah, *heather*, serpihan kayu, dan batu lava.

Selain merupakan pereduksi polutan yang sangat efisien, biofilter hanya memerlukan investasi modal dan biaya operasi yang rendah, memiliki kondisi operasional yang aman, serta konsumsi energi yang rendah (Govind, 1998). Biofilter juga tidak mengeluarkan produk samping yang tidak diinginkan dan

dapat mengkonversi banyak senyawa organik dan anorganik ke dalam produk oksidasi yang tidak berbahaya. Selain itu, kesederhanaan desain biofilter juga merupakan alasan mengapa biofilter sering digunakan. Gambar 2.1 berikut menunjukkan mekanisme yang terjadi pada proses biofiltrasi.



**Gambar 2.1** Mekanisme biofilter  
(Shihabudheen. M.M and Ligy Philip, 2004)

Berbagai jenis desain biofilter dapat disesuaikan sesuai kebutuhan dalam mereduksi kontaminan yang ada. Tabel 2.2 menunjukkan jenis-jenis biofilter beserta kelebihanannya.

**Tabel 2.2** Perbandingan desain biofilter beserta keuntungannya

<b>Jenis- jenis Biofilter</b>	<b>Keuntungan</b>
Biofilter terbuka (kompos)	Simpel, biaya modal yang rendah
Biofilter terbuka dengan peningkatan kualitas medium filter	Memiliki ketahanan terhadap pepadatan medium filter, <i>pressure drop</i> yang lebih rendah
Biofilter tertutup (tipe <i>container</i> )	Pengontrolan proses yang lebih baik, kontak aliran dengan medium filter lebih baik
Biofilter modular <i>multilayer</i>	Proses kontrol secara keseluruhan, meningkatkan efisiensi reduksi polutan per unit volum

Sumber: Deviny et al., 1999

### 2.2.1 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.

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

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:

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

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:

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

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

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

### 2.2.2 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.

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

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

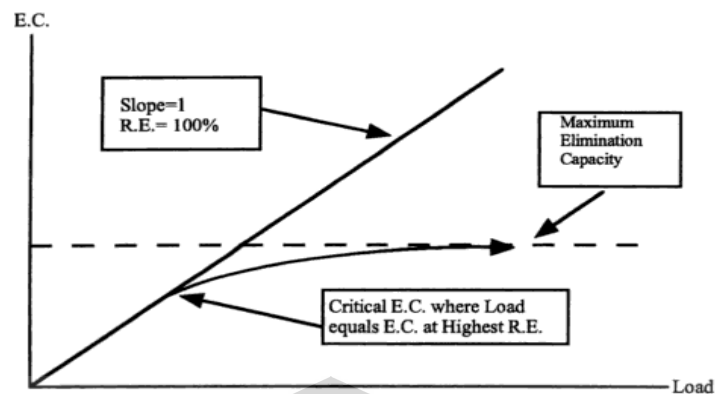
$C_o$  = konsentrasi kontaminan yang keluar ( $\text{ppmv, g m}^{-3}$ )

- **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:

$$\text{Elimination capacity} = \frac{(C_i - C_o) \times Q}{V_F} \dots \dots \dots (2.6)$$

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.

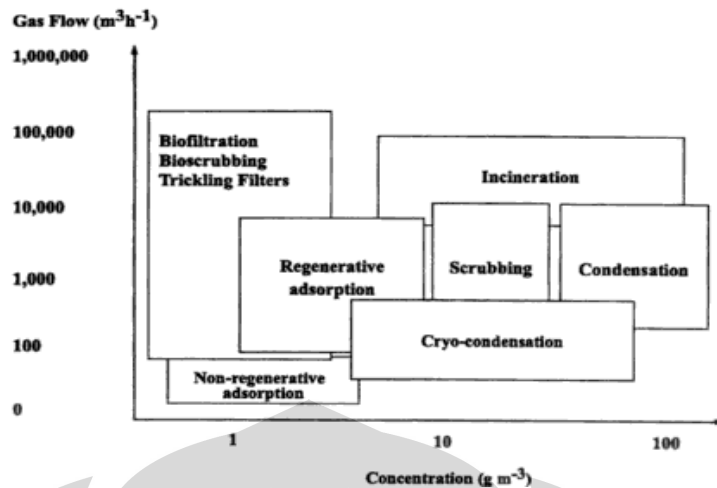


**Gambar 2.2** Tipe kurva EC vs *Loading*  
(Devanny et al., 1999)

Gambar 2.2 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.

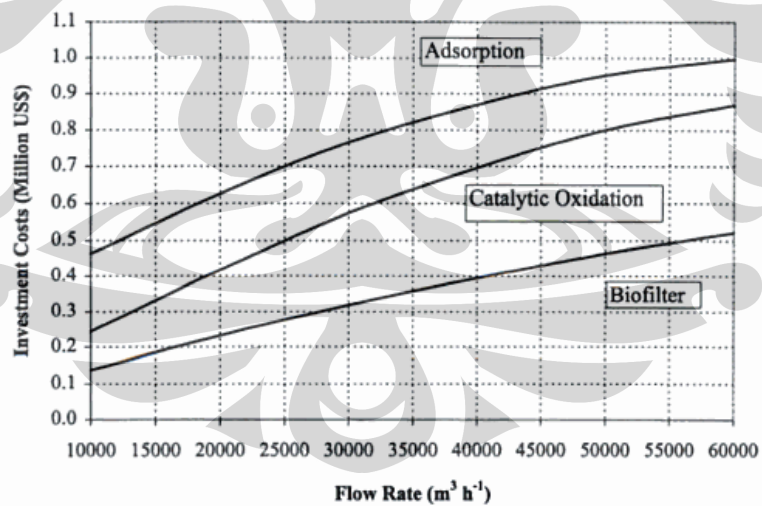
### 2.2.3 Keefektifan Teknologi dan Biaya

Tidak ada teknologi reduksi polutan yang seefektif dan seekonomis biofilter yang dapat diaplikasikan pada sebagian besar industri. Keefektifan teknologi dapat ditentukan oleh laju alir dan konsentrasi kontaminan yang dapat direduksi, khususnya pada keefektifan biaya. Biaya untuk teknologi reduksi limbah gas sangat bervariasi. Hal ini bergantung pada penerapan aplikasi yang disesuaikan, aliran kontaminan yang akan diberi perlakuan, material yang digunakan, sistem *monitoring*, dan lain-lain. Biaya yang diperlukan untuk teknologi pengolahan limbah polutan bermacam-macam dikarenakan prosesnya yang berbeda. Hal tersebut terlihat pada Gambar 2.3.



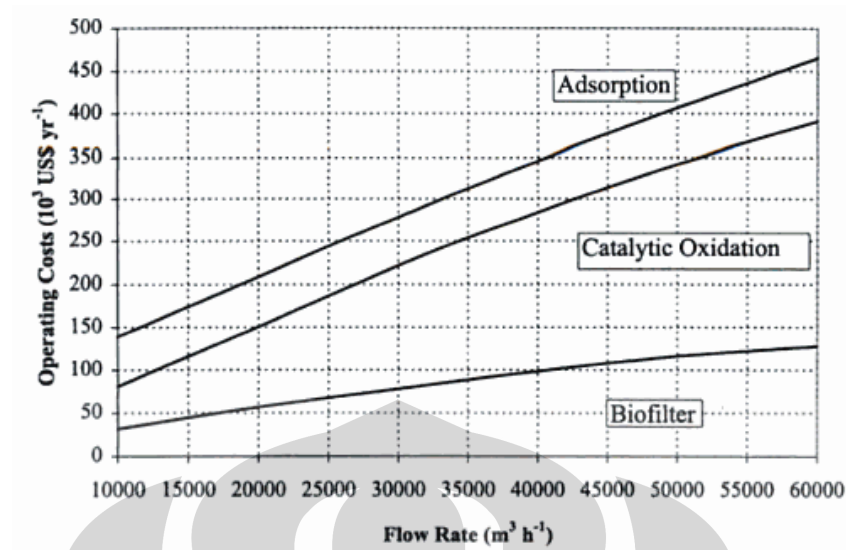
**Gambar 2.3** Aplikasi berbagai teknologi polusi berdasarkan laju alir dan konsentrasi kontaminan (Deviny et al., 1999)

Berdasarkan Gambar 2.3 dapat dilihat bahwa teknologi biofilter memiliki cakupan yang luas dalam mereduksi polutan. Hal inilah yang menjadikan salah satu nilai positif penggunaan biofilter sebagai teknologi polusi kontrol. Selain itu, biofilter jauh lebih efisien dilihat dari segi biaya instalasi dan operasi. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.4 dan 2.5 berikut.



**Gambar 2.4** Perbandingan biaya modal teknologi biofilter (Deviny, 1999)





Gambar 2.5 Perbandingan biaya operasi teknologi biofilter (Devinny, 1999)

Berdasarkan Gambar 2.4 dan 2.5 di atas, dari ketiga metode teknologi reduksi gas polutan seperti adsorpsi, oksidasi katalitik, dan biofilter dapat disimpulkan bahwa metode reduksi gas polutan dengan biofilter merupakan cara paling efisien dari segi ekonomi.

#### 2.2.4 Karakteristik Biofilter Ideal

Berikut adalah karakteristik ideal untuk diaplikasikan pada sebuah biofilter (Pandey, 2004).

- **Kepadatan dan kemudahan mobilisasi**

Biofilter seharusnya membutuhkan tempat sekecil mungkin untuk mempermudah desain dan operasi. Selain itu, biofilter juga harus mudah untuk dipindah-pindahkan untuk memfasilitasi jika terdapat perubahan operasi.

- **Material konstruksi inert**

Semua material yang digunakan pada biofilter harus tidak korosif, tahan akan sinar UV, tidak membusuk, dan kedap air untuk menghindari terjadinya reaksi kimia yang tidak diinginkan. Biasanya material konstruksi yang berstandar *marine-grade* lebih aman

digunakan untuk memperpanjang umur manfaat dari alat biofiltrasi tersebut.

- **Biaya operasi rendah**

Biofilter yang ideal sebaiknya membutuhkan energi yang minimum, dimana biasanya energi hanya dibutuhkan untuk mengoperasikan pompa.

- **Keamanan dan Reliabilitas**

Idealnya, biofilter tidak memiliki bagian yang dapat dipisahkan untuk menghindari keadaan yang tidak diduga. Apabila bagian dari alat biofilter dapat dipisahkan, maka seharusnya disambungkan dan didesain untuk menjalani operasi yang kontinu dalam jangka waktu beberapa tahun.

- **Sistem monitor**

Pengadaan sistem monitor dapat memudahkan operasi biofilter untuk memastikan bahwa operasi biofiltrasi berjalan dengan benar.

- **Sistem kontrol**

Penggunaan sistem kontrol dapat memudahkan perubahan variabel operasi untuk meningkatkan performa biofilter yang optimum.

### 2.3 Medium Filter

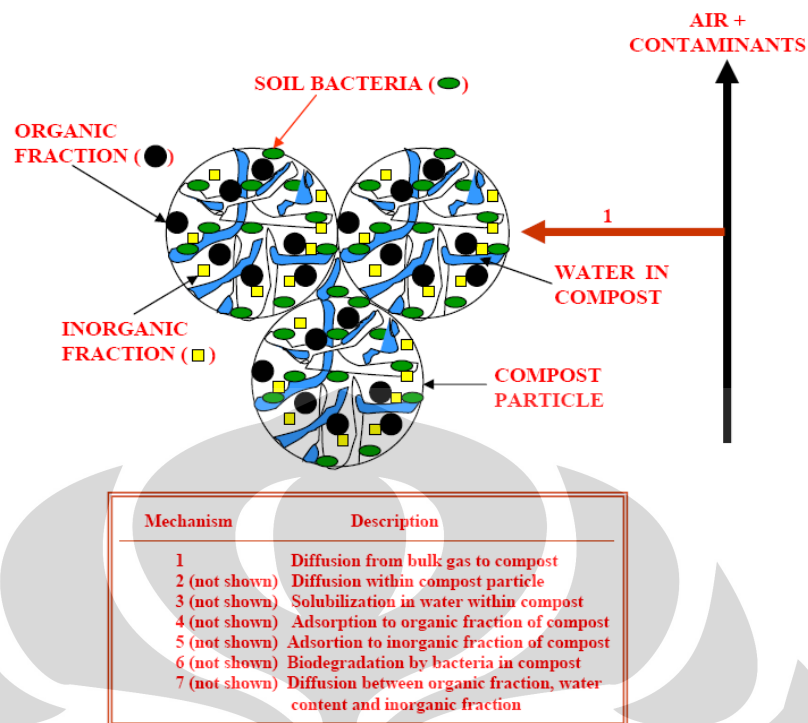
Pemilihan medium filter sebagai substrat untuk hidup dan pertumbuhan mikroba merupakan hal yang sangat penting dalam rangka mendukung kehidupan mikroba yang digunakan (Hirai et al., 2001). Material yang dapat digunakan sebagai medium filter diantaranya berupa kompos, gambut (*peat*), tanah, karbon aktif, serpihan atau kulit kayu (*bark*), lava, serta *perlite* dan media sintetik, dimana mikroba akan terimmobilisasi secara alami di dalam medium dan selanjutnya membentuk lapisan tipis (*biofilm* atau *biolayer*). Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam menentukan 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.

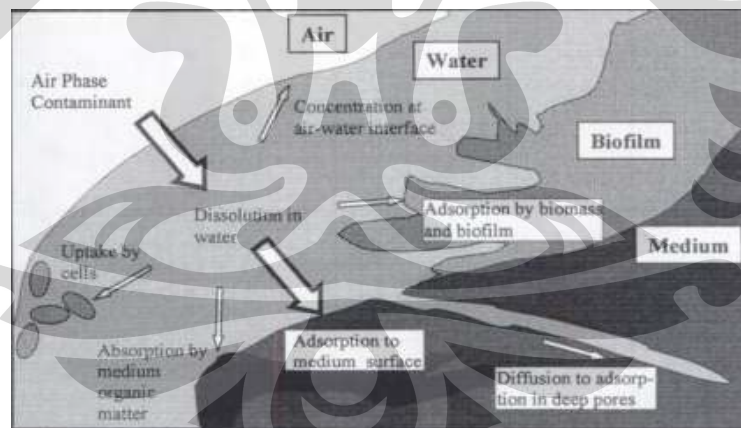
3. Kemampuan untuk menyerap nutrisi dan menyuplainya ketika dibutuhkan oleh mikroba.
4. Kemampuan menahan aliran udara (*pressure drop* udara dan kekuatan angin yang dikeluarkan blower). *Pressure drop* fasa gas sangatlah penting mengingat biaya operasi sesuai dengan *pressure drop* di sepanjang *bed* 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 medium filter alami mengandung sejumlah nutrisi yang cukup untuk pertumbuhan mikroorganismenya, sehingga penambahan nutrisi dan mineral tidak diperlukan. Demikian pula halnya dengan medium filter berupa kompos, dimana 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 (nitrogen atau fosfor) secara manual untuk mempertahankan kelangsungan hidup mikroorganismenya tersebut.

Pada penggunaan biofilter dengan media kompos, kontaminan dari gas akan berdifusi ke dalam pori-pori partikel kompos, terlarut ke dalam larutan *film*, teradsorpsi pada fraksi organik dan inorganik dari kompos tersebut, kemudian terbiodegradasi akibat bakteri kompos aktif di dalamnya, serta terperangkap di dalam partikel-partikel kompos. Hal ini dapat terlihat pada Gambar 2.6 dan 2.7 berikut.



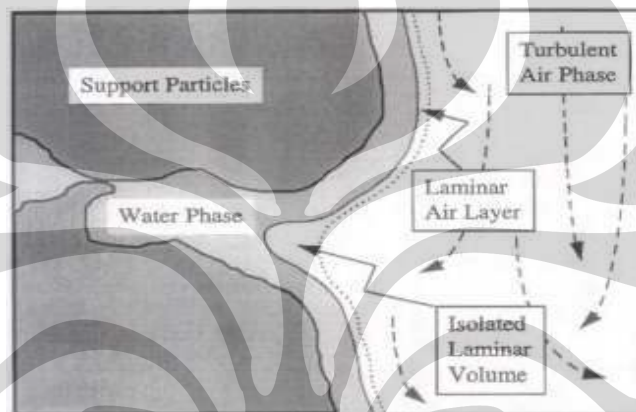
**Gambar 2.6** Proses biofiltrasi dengan media kompos  
(Dr. Rakesh Govind, 1998)



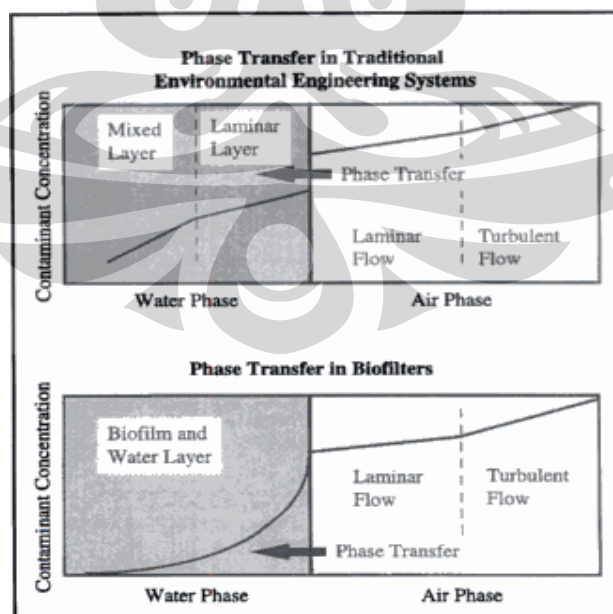
**Gambar 2.7** Proses adsorpsi pada biofilter  
(Deviny et.al, 1999)

Gambar 2.7 menggambarkan proses yang terjadi dalam medium filter ketika dialiri kontaminan. Pada proses ini terjadi kontak antara fasa gas sebagai kontaminan, fasa cair dan *biofilm* sebagai permukaan medium filter, dan fasa padat sebagai partikel padatan medium filter. Transformasi kontaminan dari fasa

gas ke air dan padatan pada partikel kompos adalah langkah awal perlakuan degradasi kontaminan dengan adsorpsi. Bagaimanapun, proses ini merupakan mekanisme yang kompleks. Molekul kontaminan dengan mudah terlarut di fasa cair dan didegradasi oleh mikroba tetapi juga diadsorpsi oleh permukaan medium filter pada lapisan *biofilm*. Dalam lapisan cair ini terjadi degradasi oleh mikroba seperti pada Gambar 2.7 di atas. Di samping itu, di daerah cair inilah kontaminan mengalami disolusi dan teradsorpsi pada lapisan *biofilm*, sementara sebagian lainnya terabsorpsi oleh bahan medium organik. Beberapa kontaminan juga ada yang berdifusi masuk ke bagian dalam dari pori medium filter untuk diabsorpsi.



**Gambar 2.8** Aliran kontaminan udara dalam biofilter  
(Deviny et.al, 1999)



**Gambar 2.9** Model transfer gas  
(Deviny et.al, 1999)

Pada Gambar 2.8 dapat dilihat dimana 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 2.9 menunjukkan hasil perbandingan penggunaan biofilter dan teknologi sistem lingkungan lain terhadap efektifitas penurunan konsentrasi kontaminan. Pada biofilter dihasilkan penurunan konsentrasi kontaminan secara signifikan pada lapisan *biofilm* (Devinny et.al, 1999).

Fenomena adsorpsi pada biofilter merupakan mekanisme yang sulit dipahami tetapi sangat penting pada aplikasi operasi 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 beragam dan berpengaruh terhadap daya adsorpsi dan absorpsi.

### **2.3.1 Kompos Sebagai Medium Filter**

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 2.3 berikut menunjukkan organisme yang terlibat dalam proses pengomposan.

**Tabel 2.3** Organisme yang terlibat dalam proses pengomposan

<b>Kelompok Organisme</b>	<b>Organisme</b>	<b>Jumlah/g kompos</b>
Mikroflora	Bakteri Aktinomicetes 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

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).

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 dan 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 (temperatur 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.

Beberapa faktor yang perlu diperhatikan dalam proses pengomposan menurut Suriawira (2002) adalah:

1. Pemisahan bahan: bahan-bahan yang sekiranya lambat atau sukar untuk didegradasi/diurai, harus dipisahkan/diduakan, baik yang berbentuk logam, batu, maupun plastik. Bahkan, bahan-bahan tertentu yang bersifat toksik serta dapat menghambat pertumbuhan mikroba harus benar-benar dibebaskan dari dalam timbunan bahan, misalnya residu pestisida.
2. Bentuk bahan: semakin kecil dan homogen bentuk bahan, semakin cepat dan baik pula proses pengomposan. Hal ini disebabkan bentuk bahan yang lebih kecil dan homogen, mengakibatkan permukaan bahan yang dapat dijadikan substrat bagi aktivitas mikroba lebih luas. Selain itu, bentuk bahan berpengaruh pula terhadap kelancaran difusi oksigen yang diperlukan serta pengeluaran CO<sub>2</sub> yang dihasilkan.
3. Kadar air bahan: kadar air pada bahan tergantung kepada bentuk dan jenis bahan, misalnya kadar air optimum di dalam pengomposan bernilai antara 50-70, terutama selama proses fasa pertama. Kadangkadang dalam keadaan tertentu, kadar air bahan dapat bernilai hingga 85%, misalnya pada jerami.

Bahan organik yang dapat digunakan dalam kompos dapat berasal dari limbah/hasil pertanian dan non-pertanian (limbah kota dan limbah industri) (Kurnia et al., 2001). 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).

Adapun alasan penggunaan pupuk kandang sebagai bahan organik dalam kompos adalah karena jumlah ternak di Indonesia cukup banyak dan volum 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 urin (Rosmarkam & Nasih Widya Yuwono, 2002). Secara umum dapat disebutkan bahwa setiap ton pupuk kandang mengandung 5 kg N, 3 kg  $P_2O_5$ , dan 5 kg  $K_2O$  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. 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 urin adalah lima kali lebih banyak daripada dalam kotoran padat, sedang kandungan unsur N adalah dua kali lebih banyak.
- Kandungan unsur hara dalam kotoran ayam adalah yang paling tinggi, karena bagian cair (urin) tercampur dengan bagian padat (Hardjowigeno, 1987).

Komposisi hara pada masing-masing kotoran hewan berbeda tergantung pada jumlah dan jenis makanannya, serta jumlah kotoran (*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 ketersediaannya (*release*) lambat sehingga 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. Tabel 2.4 di bawah ini adalah perkiraan kandungan hara makro dari beberapa jenis kotoran ternak.

**Tabel 2.4** Perkiraan kandungan hara makro dari beberapa jenis kotoran hewan

Jenis Ternak	Nitrogen (N)	Phosporus (P)	Potassium (K)
Sapi	1	0.4	0.5
Unggas	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*

Kotoran sapi diketahui memiliki kandungan air yang sangat besar yaitu sekitar 60–85% dan juga mengandung banyak N serta sedikit C, sehingga rasio C/N rendah. Penambahan *bulking agent* seperti serbuk gergaji, serutan kayu atau jerami, *cocopeat*, maupun sekam beras dapat membantu penyerapan kelebihan air dan mengatur keseimbangan rasio C/N. Mikroba menggunakan unsur C untuk

mendapatkan energi dan memanfaatkan unsur N, P, dan K untuk pertumbuhan, metabolisme, dan reproduksinya (Biddlestone dkk., 1994).

Kotoran sapi 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 sapi mempunyai kandungan C dan K yang cukup tinggi, sedangkan kompos kotoran ayam mempunyai kandungan P yang tinggi.

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 2.5.

**Tabel 2.5** Nilai optimal yang mengontrol proses pengomposan

<b>Parameter</b>	<b>Nilai Optimum</b>
<b>Ukuran partikel bahan</b>	25-40 mm 50 mm untuk aerasi alami dan timbunan panjang
<b>Nisbah C/N</b>	20-40
<b>Kandungan lengas</b>	50-60%
<b>pH</b>	5,0-8,0
<b>Suhu</b>	55°C-60°C untuk 4-5 hari
<b>Aerasi</b>	Secara periodik timbunan dibalik
<b>Kehalusan bahan</b>	Makin halus makin cepat terdekomposisi
<b>Ukuran timbunan</b>	Panjang bervariasi, tinggi 1,5m dan lebar 2,5 m
<b>Aktivator</b>	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

#### **2.4 Parameter yang Mempengaruhi Kinerja Biofiltrasi**

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

*pressure drop*, dan kedalaman medium. Parameter-parameter inilah yang akan menentukan efisiensi reduksi gas polutan yang dihasilkan pada biofiltrasi.

#### 2.4.1 Medium filter

Medium filter merupakan salah satu parameter penting yang mempengaruhi kinerja biofilter. Kinerja optimal dari biofilter dapat diperoleh dengan cara mengoptimalkan: area permukaan untuk pertumbuhan *biofilm*, kestabilan fisik jangka panjang, *pressure drop* yang rendah, retensi kelembaban yang baik, kapasitas *buffer* pH yang baik, dan ketersediaan nutrisi. Penggunaan medium filter yang tepat dapat mencapai biodegradasi optimum pada kontaminan udara.

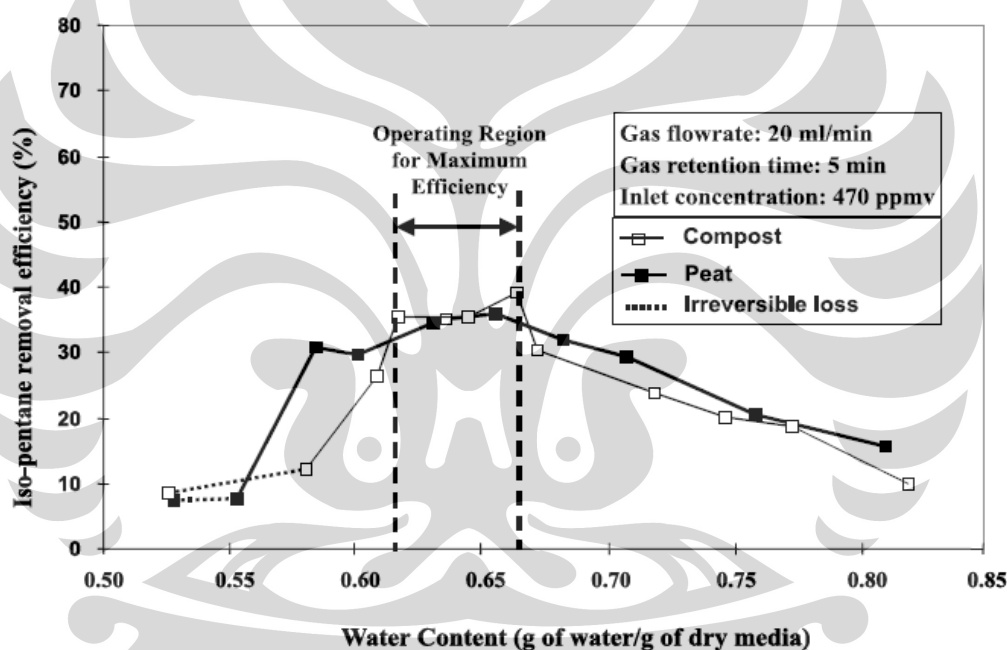
Medium filter yang umum digunakan untuk aplikasi biofilter adalah kompos, *peat*, serbuk kayu, tanah, dll (Shareefdeen & Singh, 2005). Beberapa biofilter juga diisi dengan adsorben seperti karbon teraktivasi. Namun meskipun adsorben ini dapat mereduksi sejumlah kontaminan yang lolos selama masa aklimasi mikrobiologi (Bishop dan Govind, 1995), adsorben ini tidak meningkatkan performansi selama operasi *steady-state* (Mohseni et al. 1998). Dalam metode biofilter, pemilihan medium filter sebagai tempat hidup mikroorganisme merupakan hal sangat penting untuk mendukung kehidupan mikroorganisme (Hirai et al, 2001).

#### 2.4.2 Kandungan 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 medium 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 medium filter, menghambat laju reaksi, adanya

tekanan balik karena pengurangan volum ruang kosong, dan gas *channeling* dalam medium 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 penyemprot air agar dapat langsung memberikan air ke dalam medium filter.



Gambar 2.10 Efek kandungan air untuk reduksi iso-pentanadengan biofilter (Shareefdeen, 2005)

Gambar 2.10 menunjukkan efek kandungan air pada efisiensi reduksi biofilter antara kompos dan *peat* sebagai medium filter. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa efisiensi reduksi gas polutan akan maksimal saat kandungan air berada pada rentang 0,62-0,67 g air/g berat kering medium filter. Saat kandungan air di atas 0,67 g air/g berat kering medium, efisiensi reduksi biofilter akan berkurang perlahan-lahan.

Kelembaban *biofilm* merupakan salah satu langkah penting untuk menjaga performa biofilter sebagai aktivitas biologis yang meningkat seiring dengan aktivitas air (Aw). Panas yang dibentuk pada reaksi biologis dan kelembaban pada polutan yang masuk dapat menentukan laju air yang hilang, dan dari sinilah dapat diketahui kebutuhan air akibat kelembaban yang berkurang (Morales et al. 2003).

### 2.4.3 Temperatur

Kontrol temperatur juga 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 filter (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 mesofilik (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 termofilik (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 ambien di bawah 0°C bersama dengan salju. Namun, Shareefdeen et al. (2004) mencatat adanya 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.

#### 2.4.4 Kandungan Oksigen

Oksigen 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 untuk bertahan hidup (Dharmvaram, 1991). Yang et al. (2002) menunjukkan bahwa terdapat batas oksigen dalam biofiltrasi pada sistem dengan *loaded* yang tinggi, dengan menunjukkan bahwa biofiltrasi dengan 63% oksigen pada aliran masuk dapat meningkatkan laju reduksi maksimum metanol dari 120 menjadi 145 g m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup> pada udara normal (21% oksigen). Sementara itu, penambahan kandungan hingga 80% tidak membawa peningkatan lebih lanjut pada kinerja biofilter. Secara umum, bagi kebanyakan sistem kontrol polusi udara, kandungan oksigen biasanya tidak menjadi persoalan karena jumlahnya yang berlimpah pada aliran udara masuk dan relatif sedikit pada *biofilm*.

#### 2.4.5 pH

Sebagian besar mikroorganisme memiliki 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 terklorinasi (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 medium filter pada saat memulai biofiltrasi, dan ketika *buffer* tersebut telah habis, maka medium filter diganti dengan yang baru.

#### 2.4.6 Nutrisi

Mikroba memerlukan makanan dengan nutrisi seimbang untuk dapat bertahan hidup dan memperbanyak diri. 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. Pembusukkan 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 nukleid. Mikroba menggunakan nitrogen untuk membangun dinding sel, dimana 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.

#### 2.4.7 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).

#### **2.4.8 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.

#### 2.4.9 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 bioavailibilitas konsorsium mikroba yang dikembangkan untuk mendegradasi gas polutan. Semakin cepat masa adaptasi mikroba (*log phase*), maka kinerja biofilter akan semakin baik.

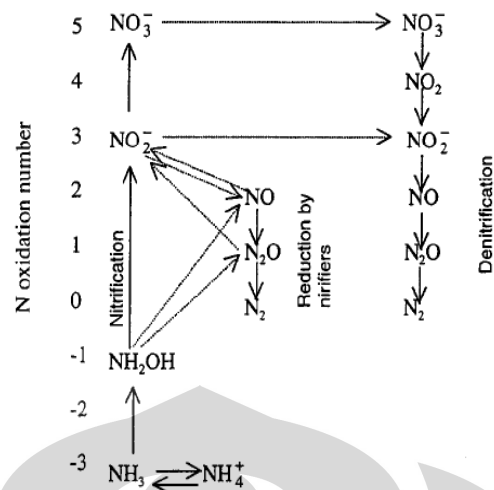
3. Kemampuan mempertahankan rasio degradasi gas (efisiensi degradasi) dalam waktu yang lama. Rasio degradasi polutan gas dari biofilter umumnya di atas 95% dan dapat bertahan dalam jangka waktu yang relatif lama.
4. Kemampuan bahan pengisi dalam mempertahankan kondisi pH, temperatur, dan kadar air. Kemampuan ini menggambarkan kinerja biofilter terhadap fluktuasi *loading* polutan gas yang tinggi, kurangnya humidifikasi dan masa tidak terpakainya biofilter akibat fluktuasi proses produksi pada industri.

## 2.5 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 2.11.



**Gambar 2.11** Jalur metabolisme nitrogen  
(Hudepohl, 1999)

### 2.5.1 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  $\text{NO}_2^-$  sering terakumulasi pada hari-hari awal operasi proses denitrifikasi, namun menghilang secara bertahap ketika reaksi menjadi setimbang.  $\text{NO}$  dan  $\text{N}_2\text{O}$  dapat dilepaskan sebagai hasil dari kondisi lingkungan yang bervariasi seperti pH rendah atau fluktuasi temperatur secara mendadak.

Penggunaan  $\text{NO}_3^-$  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.

### 2.5.2 Nitrifikasi

Kumpulan bakteri yang mampu mereduksi senyawa nitrogen (misalnya  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2^-$ ) sebagai sumber energi, dan  $\text{CO}_2$  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 europaea*, *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  $\text{N}_2\text{O}$  pada tanah (Baumgartner dan Conrad, 1992).

## 2.6 *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 untuk mencapai efisiensi reduksi gas polutan tertentu.

### 2.6.1 Biofiltrasi dengan Medium Alami

Beberapa medium alami yang biasa digunakan dalam proses biofiltrasi antara lain adalah kompos, gambut (*peat*), tanah, karbon aktif, serpihan atau kulit kayu (*bark*), lava, *perlite*, 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 (Zeisig, 1987; Nicolai dan Janni, 1998 dan 1999; von Bernuth et al., 1999). Selain itu, kompos juga memiliki komunitas mikroba kompleks yang mampu mendegradasi beberapa polutan, serta memiliki retensi air yang baik dan kandungan zat organik yang cocok. Oleh karena itu, tambahan nutrisi biasanya tidak diperlukan untuk biofilter berbasis kompos karena kompos tersebut telah memiliki sejumlah nitrogen organik dan mikronutrien lainnya. Berdasarkan data penelitian yang diperoleh, diketahui pula bahwa serat kelapa juga merupakan media alami yang mempunyai beberapa sifat menarik seperti kapasitas penahan air yang tinggi dan rasio C, N, dan P yang stabil untuk digunakan sebagai medium filter dalam biofilter. Beberapa penelitian yang telah mengaplikasikan penggunaan medium alami tersebut sebagai medium filter dalam proses biofiltrasi akan diuraikan di bawah ini.

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

Yang et al. (2007) melakukan biofiltrasi *bench-scale* dengan menggunakan NO sebagai gas polutan dengan tujuan untuk mengevaluasi

beberapa parameter operasional seperti konsentrasi NO dan O<sub>2</sub>, ketinggian kolom, laju alir, dan sumber karbon eksternal terhadap efisiensi reduksi NO. Medium filter yang digunakan mengandung serbuk kayu dan kompos, dimana kompos telah disaring terlebih dahulu untuk mencegah hambatan dari medium filter itu sendiri. Selanjutnya, serbuk kayu *Cyatheaceae* ditambahkan ke dalam kompos sebagai *bulking agent* yang dapat meningkatkan ruang kosong, mengurangi kepadatan, dan meningkatkan ventilasi di dalam sistem. Pada penelitian ini ditambahkan pula nutrisi ke dalam biofilter sebagai sumber karbon (glukosa), nutrisi inorganik, dan kelembaban. Medium ini dimasukkan dari bagian atas biofilter dengan laju alir 40 mL/hari.

Kondisi yang digunakan dalam penelitian ini antara lain adalah laju alir 30 L/jam, konsentrasi NO inlet 200 ppm, kandungan oksigen 6%, dan penambahan glukosa 1 g/hari. Hasil yang diperoleh dalam penelitian ini antara lain:

- Jumlah mikroorganisme pada medium filter setelah 6 hari operasi menjadi jauh lebih besar daripada jumlah mikroorganisme sebelum inokulasi. Hal ini menunjukkan bahwa mikroorganisme dapat tumbuh pada medium filter dan menggunakan NO sebagai akseptor elektron untuk meningkatkan metabolisme.
- Jumlah NO yang dapat direduksi tergantung pada ketinggian medium di dalam kolom, dimana posisi kolom yang semakin tinggi dapat menghasilkan performansi reduksi NO yang lebih baik. Hal ini disebabkan oleh semakin banyaknya gas NO yang mengalami kontak dengan mikroorganisme pendenitrifikasi terinokulasi, sehingga semakin banyak pula gas NO yang dapat direduksi. Ketika NO menuruni kolom biofilter, gas NO digunakan dan konsentrasinya menjadi berkurang. Oleh karena itu, sedikit NO tersisa pada aliran gas untuk denitrifikasi selanjutnya. Hal ini juga ditunjang oleh waktu kontak yang lebih lama antara gas NO dan medium filter. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa kolom biofilter yang semakin tinggi akan menghasilkan performansi reduksi yang lebih tinggi pula.

- Efek konsentrasi O<sub>2</sub> pada reduksi gas NO juga diselidiki dan hasilnya menunjukkan bahwa efisiensi reduksi NO terbaik dihasilkan pada keadaan anaerob, dimana efisiensinya dapat mencapai 99%.
- Reduksi gas NO berbanding terbalik dengan konsentrasi NO dalam gas masuk, dimana efisiensi reduksi berkurang dari 88% menjadi 40% seiring dengan peningkatan konsentrasi inlet dari 60 sampai 500 ppm pada kondisi anaerobik dan tidak ada glukosa tambahan. Hal ini mungkin disebabkan oleh biomassa yang tidak cukup. Jumlah NO yang direduksi oleh mikroorganisme akan sebanding dengan konsentrasi NO dalam gas masuk. Dapat dikatakan bahwa dengan semakin banyak NO, maka pertumbuhan mikroorganisme akan semakin meningkat pada kondisi nutrien yang sesuai.
- Penambahan sumber karbon eksternal (glukosa) ke dalam biofilter dapat mereduksi konsentrasi NO secara signifikan. Adapun efek dari penambahan glukosa pada reduksi NO tidak begitu terlihat apabila dibandingkan dengan pengaruh penurunan ketinggian kolom. Hal ini dikarenakan sedikitnya jumlah glukosa yang tertinggal dalam medium filter mengindikasikan bahwa materi-materi organik dalam medium filter sulit untuk mengalami degradasi dibandingkan dengan glukosa. Penambahan glukosa ke dalam biofilter dapat meningkatkan efisiensi reduksi NO untuk kedua kondisi baik aerobik maupun anaerobik.

#### **2.6.1.2 Biofiltrasi Amonia dengan Medium Kompos dan Kulit Kelapa**

Hong dan Park (2004) melakukan penelitian untuk membuktikan kemungkinan sistem biofiltrasi dengan menggunakan campuran pupuk kompos dan kulit kelapa (MC/CP) untuk mereduksi amonia dari *composting* pupuk padat dan evaluasi efeknya terhadap properti biofisika dari kompos yang dihasilkan.

Penelitian dilaksanakan pada skala pilot dengan kedalaman media 500 mm dan dioperasikan pada suhu 15-21°C. Adapun material kompos pada



eksperimen ini berasal dari campuran pupuk ternak, kulit kelapa, dan sekam beras dengan rasio berat 10:1:1. Alasan utama pemilihan sekam beras sebagai *bulking agent* adalah adanya properti yang diinginkan seperti *moisture content* (MC) rendah, rasio C dan N tinggi, dan densitas *bulk* yang relatif rendah dibanding dengan *bulking agent* lainnya. Sementara itu, medium biofilter yang digunakan pada ketiga tanki biofilter menggunakan perbandingan berat 50:50 campuran pupuk kompos dan kulit kelapa (MC/CP). Penelitian tersebut dilakukan secara *batch* dalam waktu 19 hari dan tidak digunakan penggantian material baik pada komposter ataupun biofilter.

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa MC dan rasio C dan N tidak berubah secara signifikan selama proses *composting*. Hal ini menunjukkan bahwa hanya sedikit perbedaan yang terjadi antara properti awal dan akhir selama *composting* (MC, pH, dan rasio C dan N). Demikian pula halnya dengan pH, densitas, abu, EC, dan massa yang tidak mengalami perubahan secara signifikan selama proses biofiltrasi. Hal ini disebabkan penggunaan media biofilter kompos yang sama.

Properti awal dan akhir dari biofilter kompos selama proses biofiltrasi ditunjukkan pada Tabel 2.6. Pada tabel ini dapat dilihat bahwa nilai C/N berkurang sementara nilai T-N meningkat karena adanya gas keluaran dari reaktor pengomposan yang dibiofiltrasi.

**Tabel 2.6** Properti awal dan akhir biofilter kompos

<b>Properti</b>	<b>MC (% wb)</b>	<b>pH</b>	<b>Densitas (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Abu (%,db)</b>	<b>EC (ds/m)</b>	<b>T-C (%, db)</b>	<b>T-N (%, db)</b>	<b>C/N</b>
<b>Awal</b>	64,8	7,1	346	4	10,1	53,65	0,61	88,0
<b>Akhir</b>								
<b>Biofilter A</b>	65,1	6,8	345	4	10,0	53,71	0,68	79,0
<b>Biofilter B</b>	63,9	6,7	340	4	10,0	53,04	0,99	53,6
<b>Biofilter C</b>	64,5	6,7	340	4	10,0	51,02	0,80	63,8
<b>Rata-rata</b>	64,5	6,7	342	4	10,0	52,59	0,82	64,1

Sumber: Hong dan Park, 2004

Kandungan emisi amonia bervariasi antara 33 sampai 190 ppm selama periode *composting* aktif 19 hari dengan temperatur antara 18 dan 73°C. Konsentrasi amonia akan menjadi 0 ppm setelah melalui proses biofiltrasi. Hasil ini menunjukkan bahwa kedalaman media biofilter 500 mm merupakan hal yang kritis untuk menurunkan konsentrasi amonia menjadi 0 ppm. Hong et al. (2002) merekomendasikan kedalaman media antara 400 sampai 600 mm untuk menghasilkan laju reduksi amonia yang bervariasi dari 63% sampai 100%.

### 2.6.1.3 Biofiltrasi Amonia dengan Medium Kompos

Biofiltrasi amonia dengan menggunakan medium filter berupa kompos juga dilakukan oleh Estel la Pagans, Xavier Font, dan Antoni Sanchez (2005). Pemilihan kompos sebagai medium filter dikarenakan oleh harganya yang murah dan availibilitasnya. Selain itu, kompos juga dapat dicampur dengan *bulking agent* untuk menghindari *pressure drop* yang tinggi, *clogging* dan *flow channeling*, serta untuk meningkatkan ketahanan medium filter.

Biofilter mempunyai tingkat reduksi amonia yang tinggi, biasanya sekitar 95-98% pada berbagai material baik organik atau inorganik. Liang et al. meneliti mengenai reduksi amonia jangka panjang dengan menggunakan biofilter kompos dan menghasilkan efisiensi reduksi di atas 95% dengan *loads* bervariasi dari 0,33 hingga 16,25 mgNH<sub>3</sub> kg media<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> dan EBRT dari 31,8 hingga 78 s. Penelitian lain mengenai biofiltrasi gas keluaran pada fasilitas pengomposan mengindikasikan terjadinya reduksi 98% untuk laju *loading* rata-rata 10.180 mgNH<sub>3</sub> m<sup>-3</sup> biofilter h<sup>-1</sup> dan EBRT 16 s.

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan biofilter skala pilot pada jangkauan mesofilik (temperatur antara 15-26°C) dan bertujuan untuk mengetahui efisiensi dari biofilter kompos untuk mereduksi amonia gas keluaran proses pengomposan yang mengandung sumber *organic fraction of municipal solid wastes* (OFMSW), *digested wastewater sludge* (DS), dan *animal by-product* (AP).

Seluruh limbah tersebut dicampur secara manual dengan *bulking agent* (potongan limbah pemangkasan) untuk memastikan tercapainya porositas dan kandungan kelembaban optimal. Pada kasus OFMSW, dua rasio volumetrik *bulking agent*: limbah (5:1, 1:1) dicoba. Selanjutnya, limbah tersebut dikomposkan dalam reaktor laboratorium yang terinsulasi secara termal. Gas keluaran dari proses pengomposan ini dimasukkan ke dalam biofilter dengan menggunakan kompos sebagai medium filter. Penelitian ini dilakukan dengan laju *loading* volumetrik 0,69 dm<sup>3</sup> dm<sup>-3</sup> media min<sup>-1</sup> dan waktu retensi gas 86 s. Properti awal dari kompos alami yang digunakan sebagai media biofilter terlihat pada Tabel 2.7.

**Tabel 2.7** Properti dari media biofilter sebelum dan setelah periode biofiltrasi

Parameter	Initial	Final
Moisture content (% wb)	40.40	60.80
Organic matter content (% db)	59.69	48.57
pH	8.70	8.98
Electrical conductivity (mS cm <sup>-1</sup> )	3.33	3.95
Organic-N (% db)	3.46	3.28
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> - N (% db)	0.33	0.93
C/N	8.72	6.40
Respirometric index (mg O <sub>2</sub> g OM <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	1.03	1.82

wb: *wet basis*; db: *dry basis*

Sumber: Pagans et al., 2005

Hasil yang diperoleh dari penelitian Pagans et al. ini antara lain adalah:

- Peningkatan kandungan *moisture* (MC) dari nilai awal 40,4% menjadi nilai akhir 60,8% disebabkan oleh adanya absorpsi *moisture* dari gas keluaran. Diketahui pula bahwa gas keluaran dari pengomposan biasanya bersifat *saturated*.
- Rasio C dan N berkurang seiring dengan biofiltrasi gas keluaran dari reaktor pengomposan.
- *Respirometric Index* (RI) atau aktivitas biologi meningkat selama proses biofiltrasi. Hal ini menunjukkan terjadinya pertumbuhan biomassa aktif selama penelitian. Peningkatan nilai RI ini juga dapat disebabkan oleh reaktivasi aktivitas biologi dari media kompos itu sendiri atau pembentukan koloni biologi aktif baru yang dihasilkan dari proses biofiltrasi.
- *Pressure drop* menunjukkan peningkatan sebanyak 17 mm air karena adanya *clogging* secara bertahap dan kompaksi partikel kompos. Fakta ini semakin terbukti ketika laju *loading* dan kandungan kelembaban medium filter ditingkatkan.
- Nilai tertinggi konsentrasi amonia dalam aliran gas inlet sesuai dengan nilai yang tinggi dari temperatur pengomposan. Hal ini menunjukkan adanya hubungan yang erat antara temperatur pengomposan dan emisi

amonia. Beberapa penelitian seperti pengomposan sampah dan pengomposan pupuk unggas menunjukkan bahwa puncak tertinggi dari emisi amonia muncul pada saat peningkatan temperatur. Dengan merujuk pada Sikora, kelarutan  $\text{NH}_3$  berkurang menjadi 30% ketika temperatur meningkat dari 40 menjadi 55°C dan ketika pH meningkat. Hal ini menyebabkan peningkatan amonia pada gas keluaran dari proses pengomposan.

- Optimasi campuran kompos awal juga merupakan faktor penting dalam penyimpanan nitrogen dalam kompos. Hal ini akan mengurangi jumlah emisi amonia yang membutuhkan pengolahan pada proses biofiltrasi.

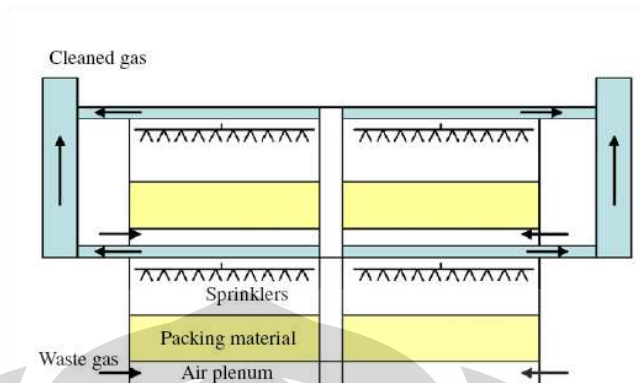
#### 2.6.1.4 Biofiltrasi Amonia dengan Medium Serat Kelapa

Gabriel et al. (2007) melakukan penelitian terhadap karakterisasi dan performa serat kelapa sebagai medium filter dalam reduksi amonia pada biofilter fasa gas. Penelitian dilakukan pada biofilter *full-scale* yang diisi dengan serat kelapa sebagai medium filter pada fasilitas pengolahan limbah padat perkotaan. Serat kelapa merupakan medium filter yang biasa digunakan di Eropa dalam biofilter *full-scale* untuk penanganan bau (Van Groenestijn, 2005).

Pemilihan medium filter yang tepat merupakan faktor utama dalam penentuan performansi reaktor karena perkembangan biomassa dan aktivitasnya bergantung pada keadaan dan karakteristik medium yang sesuai. Karakteristik utama yang harus diperhatikan dalam memilih medium filter yang sesuai adalah area permukaan spesifiknya, densitas, porositas, pH, *water holding capacity* (WHC), kapasitas *buffering*, dan komposisi medium (Bohn, 1996). Terakhir, yang paling penting adalah sumber nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan biomassa.

Biofilter yang digunakan dalam Gabriel et al. dapat dilihat pada Gambar 2.12 Biofilter ini dipisahkan menjadi 4 modul yang identik. Setiap tingkat dipisahkan menjadi dua modul dengan udara buangan bebas dan *plenum* udara bersih. Ketinggian udara bersih *plenum* adalah 3,5 m dari

permukaan medium filter. 20 *sprinklers* per modul diletakkan pada langit-langit biofilter dan digunakan untuk humidifikasi medium filter.



**Gambar 2.12** Tampak depan biofilter  
(Gabriel et al., 2007)

Medium filter mempunyai lapisan pertama dengan ketinggian sekitar 25-30 cm terbuat dari akar untuk distribusi udara yang tepat dan lapisan kedua dengan ketinggian 80-85 cm terbuat dari serat kelapa sebagai pendukung medium secara biologi.

Beberapa parameter operasi yang akan divariasikan dalam penelitian tersebut antara lain adalah laju alir udara, kelembaban relatif, suhu, komposisi *leachate*, serta konsentrasi gas amonia dan hidrogen sulfida. Untuk menghindari terjadinya efisiensi reduksi yang rendah karena masalah operasi pada plant *full-scale*, maka serat kelapa terlebih dahulu dikarakterisasi properti fisika dan kimianya, dan kemudian diuji dalam sebuah reaktor skala pilot untuk diperkirakan performansinya dalam mereduksi amonia pada kondisi operasi yang dikontrol dengan baik. Pada saat penelitian, diketahui bahwa ketinggian medium filter lebih rendah daripada ketinggian total kolom. Hal ini mungkin disebabkan oleh adanya pemadatan serat kelapa. Kelembaban dan sistem pengairan didesain untuk memastikan kandungan air berada antara 50% dan 70%.

Biofilter skala pilot ini bekerja secara otomatis. Selain itu, medium filter yang digunakan pada biofilter skala pilot ini berasal dari biofilter *full-scale*. Oleh karena itu, tidak diperlukan adanya inokulasi karena biofilter *full-scale* telah beroperasi lebih dari 2 tahun dengan konsentrasi masukan amonia

rata-rata sebesar 40 ppm<sub>v</sub>. Eksperimen ini dilakukan pada kondisi *steady* dan kondisi transien dengan konsentrasi masukan amonia dalam jangkauan 45-300 ppm<sub>v</sub> serta waktu kontak gas selama 36-19 s.

Adapun hasil yang diperoleh dari penelitian ini antara lain adalah:

- Area permukaan spesifik yang besar dari serat kelapa, mirip dengan *peat* (Zilli et al., 1996), merupakan karakteristik favorit untuk aplikasi biofiltrasi. Pada setiap kasus, ukuran pori-pori yang kecil dari material dapat mendorong pertumbuhan biomassa di sepanjang permukaan serat kelapa, sehingga pengurangan area permukaan spesifik memungkinkan terjadinya degradasi polutan. Selain itu, diketahui pula bahwa retentivitas air yang berbeda akan diperoleh tergantung pada laju alir udara yang melewati kolom. Apabila dibandingkan dengan material inorganik yang diuji pada kecepatan spasial yang sama (Hirai et al., 2001) pada 100 h<sup>-1</sup>, retentivitas air pada serat kelapa diketahui 4-5 kali lebih rendah.
- WHC (*water holding capacity*) pada kandungan kelembaban tertentu juga dapat dibandingkan. Serat kelapa dengan kandungan air sebesar 70% dapat menyimpan sampai dengan 5,5 kali berat keringnya sendiri dalam air, lebih tinggi dibandingkan WHC 2,8 g [H<sub>2</sub>O] g<sup>-1</sup> material kering kulit kacang. Oleh karena itu, serat kelapa dianggap sebagai medium filter yang sesuai untuk aplikasi biofiltrasi (Ramirez-Lopez et al., 2003).
- Hasil observasi pada hari ke- 150-180 menunjukkan bahwa beberapa bagian permukaan medium filter tidak sepenuhnya terbasahi. Hal ini mungkin disebabkan oleh adanya penurunan area yang dibasahi oleh *sprinklers*. Zona kering dalam biofilter telah dilaporkan dapat menyebabkan “short-circuiting” dan akibatnya dapat menurunkan efisiensi reduksi (Devinny et al., 1999). Diketahui bahwa semakin kering serat kelapa, maka semakin kecil WHC. Oleh sebab itu, sangatlah penting untuk menghindari kekeringan dari material karena kekurangan kelembaban dapat

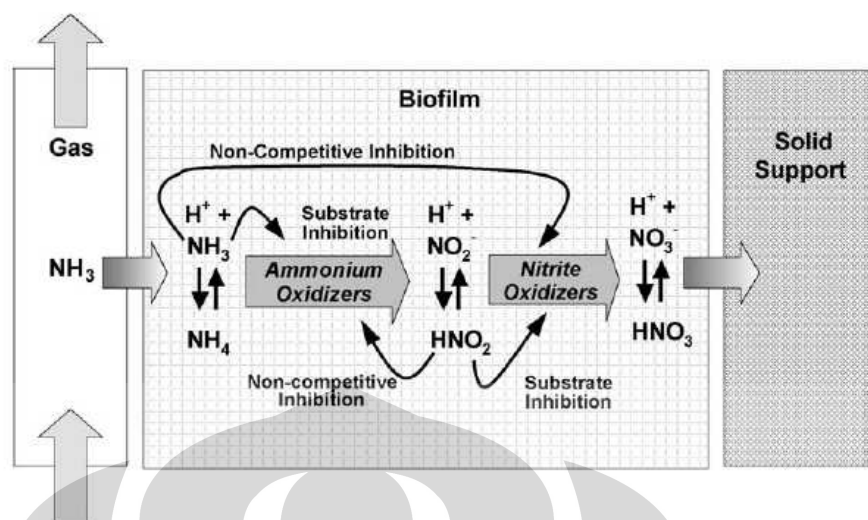
mengakibatkan penurunan aktivitas mikrobiologi dan kemungkinan terjadinya “short-circuiting”.

- Biofilter *full-scale* mengungkapkan bahwa pengairan yang tepat dari medium filter sangatlah penting untuk menjaga aktivitas biofilter, namun sebaliknya hal ini juga dapat mengurangi efisiensi dan EC.
- Seperti halnya penambahan nutrisi dapat membantu meningkatkan pertumbuhan biomassa, peningkatan performansi juga dapat dicapai dengan memasukkan *loads* yang lebih tinggi ke dalam biofilter, dimana hal ini dapat mendorong jumlah biomassa yang lebih banyak.
- Perhatian khusus harus dilakukan karena adanya resiko penyumbatan biofilter yang disebabkan oleh pertumbuhan biomassa dan juga karena inhibisi yang disebabkan oleh akumulasi produk samping, khususnya amonium dan nitrit dalam biofilter.

Baquerizo et al. (2005) juga telah melakukan penelitian serupa mengenai biofiltrasi amonia dengan menggunakan medium filter berupa serat kelapa. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan biofilter skala pilot pada laju alir gas sebesar  $10,46 \text{ min L}^{-1}$  dengan EBRT 36 s. Biofilter ini memiliki panjang 1,1 m, diameter dalam 0,1 m, dan terbuat dari silinder PVC yang dibagi dalam empat modul, dimana material filter ditahan oleh piring plastik PVC yang berlubang-lubang. Serat kelapa diisikan ke dalam empat bagian tersebut dengan total ketinggian filter 80 cm (20 cm setiap bagian).

Adapun hasil yang diperoleh sama dengan penelitian yang dilakukan oleh Gabriel et al. Namun, pada penelitian ini diketahui pula model untuk biofiltrasi amonia. Model matematika yang diperoleh pada penelitian ini meliputi fenomena yang terjadi dalam biofilter. Degradasi amonia dalam biofilter dapat dideskripsikan melalui model dinamik yang didasarkan pada kesetimbangan massa dan dikombinasikan dengan model detail mengenai proses nitrifikasi yang digambarkan oleh Carrera. Skema representasi dari model tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.13.





**Gambar 2.13** Skema representasi dari proses nitrifikasi meliputi substrat dan inhibisi non kompetitif

(Guillermo Baquerizo et al., 2005)

#### 2.6.1.5 Biofiltrasi VOCs dengan Medium Kompos, Lava, dan Tanah

Liu et al. (2004) melakukan penelitian biofiltrasi terhadap toluene, etil asetat, dan isopropanol yang berasal dari emisi industri percetakan dengan menggunakan medium filter berupa kompos, lava, dan tanah. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki kemampuan pengolahan campuran etil asetat, isopropanol, dan toluene yang diemisikan dari industri percetakan dengan konsentrasi etil asetat dan isopropanol yang tinggi, dengan menggunakan biofilter kompos. 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.

Biofilter yang digunakan adalah biofilter *full-scale* yang terbagi dalam tiga bagian dengan ketinggian masing-masing 30 cm, dimana setiap bagian diisi hingga ketinggian 19 cm dengan jumlah yang sama dari medium filter yang telah disediakan. Media filter yang digunakan terdiri atas campuran kompos, lava, dan sejenis tanah yang mengandung senyawa humus. 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 *plant* pengolahan air limbah disimpan di dalam tong

selama 3 bulan di dalam laboratorium dan disaring untuk memindahkan kotoran dan partikel flok yang besar sebelum digunakan. Media 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. Interaksi antara biodegradasi etil asetat dan isopropanol hanya dapat diketahui dari performansi dua bagian pertama, dimana dua polutan direduksi paling banyak pada dua bagian pertama tersebut, dan bagian ketiga memiliki peran paling kecil dalam reduksi polutan. Dapat dikatakan bahwa reduksi etil asetat dan isopropanol pada dua bagian atas selalu terjadi diiringi dengan penurunan terhadap reduksi toluene pada aliran udara. Selain itu, dapat terlihat pula bahwa hanya sedikit atau tidak ada reduksi toluene yang terjadi pada lokasi dimana konsentrasi etil asetat dan isopropanol tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa kehadiran konsentrasi tinggi dari etil asetat dan isopropanol menghambat biodegradasi toluene. Penghambatan serupa juga telah ditemukan oleh peneliti lainnya. Namun, mekanisme yang sesungguhnya berhubungan dengan inhibisi ini masih tidak jelas dan data yang dilaporkan oleh beberapa peneliti masih mengalami konflik.

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.

### 2.6.1.6 Biofiltrasi Bau dengan Medium Kepingan Kayu

Chen et al. (2008) melakukan penelitian mengenai biofilter skala pilot dengan menggunakan medium filter berupa dua jenis kepingan kayu (*western cedar* dan *hardwood*) untuk mengatasi emisi bau dari sebuah fasilitas lubang galian kotoran di peternakan babi, sentral Iowa. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menginvestigasi hubungan antara bahan kimia tertentu ketika digunakan pada biofilter dengan dua kepingan kayu yang berbeda, yang beroperasi pada berbagai kadar kelembaban dan *empty bed residence time* (EBRT). Gambar 2.14 menunjukkan kedua kepingan kayu yang digunakan.



Gambar 2.14 Medium *Hardwood* (HW) dan *Western cedar* (WC)  
Chen et al., 2008)

Pada penelitian ini dilakukan pendekatan secara simultan dengan menggunakan *solid-phase microextraction* (SPME) dan *multidimensional gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry* (MDGC-MS-O). SPME yang dikombinasikan dengan MDGC-MS-O merupakan sebuah pendekatan yang digunakan pada *sampling* udara dan bahan kimia serta analisa penciuman dari senyawa penyebab bau pada operasi peternakan. Pendekatan ini digunakan untuk menentukan senyawa utama penyebab karakteristik bau.

Suatu laboratorium biofilter *mobile* skala pilot dikonstruksi untuk proyek penelitian ini. Pada laboratorium ini, terdapat 8 barel reaktor plastik (diameter 56 cm, kedalaman 86 cm) paralel, dimana empat diantaranya dipilih secara acak dan diisi dengan kepingan *western cedar* (WC) dan sisanya

diisikan dengan 5 cm (2in.) kepingan *hardwood* (HW). Awalnya, setiap reaktor diisi sampai kedalaman 51 cm. Seluruh reaktor juga mempunyai variabel kecepatan kipas masing-masing yang diatur secara manual berdasarkan kebutuhan dari desain eksperimen. Kecepatan variabel kipas digunakan untuk mengatur EBRT sebesar 1,6; 2,5; 2,6; 3,3; 3,6; 4,0; 5,3; 5,5; dan 7,3 detik.

Awal pengujian laboratorium yang dilakukan pada 7 variasi media berbasis kepingan mengidentifikasi bahwa kepingan kayu WC dan kepingan HW dengan standar 5 cm (2 in.) memiliki keunggulan pada ketahanan kelembabannya. Setelah satu bulan periode stabilisasi, kedalaman media berubah dari 51 cm menjadi 38 cm dan kemudian menjadi 25 cm setelah periode 9 minggu, dengan inkremen 3 minggu. Pada setiap kedalaman diuji tiga tingkat kecepatan aliran udara (2265 L/min, 1410 L/min and 1025 L/min) yang diatur secara acak pada setiap reaktor selama satu minggu. Hasil akhir menunjukkan bahwa pada kedalaman 25 cm, *sample* SPME yang diperoleh memiliki kelembaban yang berbeda (60%, 40%, 20% basis basah) dengan kecepatan aliran udara tetap yaitu 2265 L/min.

*Sampling* udara dengan SPME memberikan banyak keuntungan apabila dibandingkan dengan metode *sampling* konvensional (Koziel et al., 2005; Koziel dan Pawliszym, 2001) karena kesederhanaan, kemampuan untuk kembali digunakan, pemulihan sampel yang sangat baik, dan kemampuan hidrofobik dari SPME *coating*. Selanjutnya, senyawa yang diambil oleh fiber SPME dianalisa menggunakan MDGC-MS-O yang mengintegrasikan GC-O dengan konvensional GC-MS.

Hasil dari penelitian ini adalah:

- Reduksi yang lebih tinggi didapatkan WC untuk asam asetat, fenol, p-cresol, dan *skatole* apabila dibandingkan dengan HW. Hal ini mungkin disebabkan oleh porositas WC yang lebih tinggi dibandingkan HW. Selain itu, *indole* tidak terdeteksi baik dengan pengolahan WC maupun HW menggunakan GC-MS, meskipun bau tersebut terdeteksi oleh penciuman panelis dari pengolahan HW pada EBRT 5,3 detik. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi

*indole* berada di bawah kemampuan deteksi dari GC-MS, tetapi masih berada di atas ambang penciuman panelis.

- Efisiensi reduksi senyawa berdasarkan rata-rata secara keseluruhan berkisar antara 76% sampai 92,6%. Hal ini menunjukkan bahwa kedua jenis media biofilter sangat baik untuk digunakan. Hal yang terpenting adalah reduksi p-cresol yang merupakan penyebab bau utama pada peternakan babi (Kozziel et al., 2006). Reduksi p-cresol rata-rata pada semua EBRT adalah 99,9% dan 95,3%, baik untuk WC maupun HW. Alasan yang paling mungkin untuk hal ini adalah bahwa media diatur pada kadar kelembaban tinggi yaitu 60%. Hal ini juga menunjukkan bahwa untuk perancangan dan pengoperasian biofilter, kadar kelembaban yang tinggi adalah yang paling penting.
- Melalui penggunaan WC didapatkan efisiensi reduksi maksimal untuk VFAs adalah sampai dengan 99,8% dengan efisiensi minimum adalah 96,1%. Sebaliknya, pada penggunaan HW didapatkan efisiensi reduksi maksimal untuk VFAs sampai 99,7% dengan efisiensi minimum 86,8%.
- Sementara itu, efisiensi reduksi maksimum pada WC untuk senyawa yang mengandung sulfur dapat mencapai 74,9% dan minimum 16,9%, sementara HW mendapatkan efisiensi reduksi maksimum 67,9% dan minimum 12,8%. Sheridan et al. (2002) melaporkan senyawa yang mengandung sulfur dapat dikurangi antara 8-65% dan -147% sampai 50% dengan dua sistem biofilter yang dibuat dari dua kepingan kayu berbeda ukuran. Efisiensi reduksi yang relatif rendah untuk senyawa yang mengandung sulfur (dibandingkan dengan VFA, fenolik, dan kelompok indolik) kemungkinan merupakan hasil dari zona anaerob antara medium biofilter, dimana organisme dapat menghasilkan organik yang mengandung sulfur (Devinny et al., 1999; Sheridan et al., 2002).
- Untuk senyawa fenolik, efisiensi reduksi untuk WC adalah antara 98,6% dan 94,6%, dan efisiensi reduksi untuk HW adalah antara

98,1% dan 85,5%. Untuk senyawa indolik, efisiensi reduksi adalah di atas 98,3% untuk WC dan di atas 97,5% untuk HW.

- Peningkatan kelembaban media WC dan HW juga meningkatkan efisiensi reduksi dari lima senyawa utama seperti asam asetat, fenol, p-cresol, *indole*, dan *skatole*.
- Hasil yang diperoleh juga menunjukkan bahwa WC mempunyai performa lebih baik dibandingkan HW pada semua tingkat kelembaban, kecuali efisiensi reduksi untuk p-cresol dan fenol pada tingkat kelembaban 20%. Efisiensi reduksi dari WC untuk tingkat kelembaban antara 20% sampai 60% adalah antara 32%-77% untuk asam asetat, 19-96% untuk fenol, di atas 49% untuk p-cresol, di atas 73% untuk *indole* dan di atas 53% untuk *skatole*. Sementara itu, efisiensi reduksi HW untuk tingkat kelembaban antara 20%-60% adalah antara 14%-77% untuk asam asetat, 55-93% untuk fenol, 72-98% untuk p-cresol, di atas 75% untuk *indole* dan 52-96% untuk *skatole*.
- Tidak terdapat peningkatan efisiensi reduksi yang signifikan ketika tingkat kelembaban dinaikkan dari 40% menjadi 60% untuk WC, tetapi terdapat peningkatan signifikan untuk HW. Untuk senyawa yang mengandung sulfur, efisiensi reduksi menurun ketika tingkat kelembaban media meningkat di atas 20% baik untuk WC dan HW. Penyebab yang paling utama adalah perkembangan dari zona anaerob seperti yang dikemukakan oleh Devanny et al. (1999).
- Biofilter WC dapat mencapai efisiensi reduksi yang relatif tinggi (93,8%, 97,2%, 97,8%, dan 74% masing-masing untuk VFAs, fenolik, indolik, dan rata-rata keseluruhan untuk semua senyawa) pada kadar kelembaban yang lebih rendah (40%), sementara biofilter HW membutuhkan kadar kelembaban yang lebih tinggi (60%) untuk mencapai efisiensi reduksi yang sama untuk senyawa-senyawa tersebut. Untuk senyawa yang mengandung sulfur, medium HW mempunyai performa yang lebih baik dibandingkan dengan WC pada semua tingkat kelembaban media.

### 2.6.1.7 Biofiltrasi Bau dengan Medium Kompos dan Serbuk Kayu

Pandey et al. (2005) melakukan penelitian biofiltrasi *bench-scale* terhadap emisi gas buang industri yang mengandung piridin dengan menggunakan medium filter berupa kompos dan serbuk kayu yang disuntikan dengan *Pseudomonas pseudoalcaligenes-KPN* untuk menyuburkan mikroorganisme pendegradasi piridin. Piridin memiliki bau amis yang tidak enak dengan indeks bau 2390. Selain itu, piridin juga merupakan senyawa beracun, karsinogenik, dan teratogenik, sehingga piridin ditetapkan sebagai salah satu polutan utama oleh USEPA.

Media filter pengisi kolom biofilter ini terdiri atas campuran kompos sapi (dengan usia 5 bulan) dan serbuk kayu sisa (dari pembuatan perabotan kayu, dengan ukuran kira-kira 10 cm x 1 cm dan ketebalan 1 mm) dengan rasio 1:1 (v/v) sebagai medium untuk tambahan *biofilm*. Karakteristik dari kompos yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.8.

**Tabel 2.8** Karakteristik dari kompos yang digunakan dalam biofilter

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

Sumber: Pandey et al., 2005

Selanjutnya, lapisan serbuk kayu dengan ketebalan 6 mm diletakkan di antara medium filter yang berisi campuran kompos dan serbuk kayu (300 mm) untuk meminimalisasi *clogging* biofilter.

Media dasar yang ditambahkan dengan piridin (sebagai karbon tunggal dan nitrogen)  $50 \text{ mg L}^{-1}$  dan agar 2% (w/v) digunakan sebagai medium padat untuk menentukan jumlah tertentu dari mikroorganisme dalam medium filter pada biofilter. Jumlah keseluruhan organisme (pereduksi piridin dan *non-degraders*) dihitung dengan menggunakan medium nutrisi agar. Nutrien agar digunakan untuk menghitung jumlah keseluruhan mikrobial, sementara medium agar dasar yang telah ditambahkan dengan sejumlah piridin yang diinginkan digunakan untuk perhitungan mikrobial spesifik (Houghton dan Cain, 1972). Sementara itu, metode *plating* permukaan digunakan untuk menghitung populasi bakteri sesuai metode standar (APHA, 1995). Hasil untuk jumlah keseluruhan dan jumlah spesifik ini dinyatakan sebagai unit pembentukan koloni (CFU) per gram dari kompos (basis basah) yang dicampur dengan serbuk kayu.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini menunjukkan bahwa medium biofilter dengan kandungan air sebesar 68% dan *effective bed retention time* (EBRT) selama 28,5 s dapat mendegradasi piridin dengan efektif (>99%), dimana laju masuk sebesar  $434 \text{ g piridin m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ . Hasil dari gas buang yang diperoleh juga terbukti tidak lagi berbau piridin.

Selain itu, berdasarkan hasil penelitian diketahui pula bahwa kompos memiliki kapasitas penyimpanan air yang baik, pH netral, dan nutrisi. *Pressure drop* pada kompos umumnya lebih tinggi daripada *peat*, dikarenakan oleh pemadatan medium (Deviny dkk., 1999; Ottengraph, 1977). Oleh karena itu, sangatlah penting untuk mencampurnya dengan beberapa *bulking agent*. Serbuk kayu sisa digunakan sebagai *bulking agent* pada medium filter biofilter. Kompos yang dicampur dengan serbuk kayu sisa sebagai medium filter menunjukkan *pressure drop* yang rendah ( $0,3\text{-}0,4 \text{ kN m}^{-2}$ ) apabila dibandingkan dengan medium kompos tradisional ( $0,6\text{-}1,2 \text{ kN m}^{-2}$ ) (Deviny dkk., 1999).



### 2.6.1.8 Biofiltrasi Triethylamine dengan Medium Kompos dan Serbuk Kayu

Penelitian biofiltrasi skala laboratorium terhadap senyawa nitrogen seperti trietilamina telah dilakukan oleh Torkian et al. (2005). Amina secara luas digunakan sebagai katalis dalam operasi percetakan, dimana amina ini juga merupakan polutan utama dalam emisi gas dari pabrik penghasil bahan kimia. Amina tersier, seperti trietilamina, merupakan katalis gas-gas utama yang terdiri atas emisi nitrogen (Borger et al., 1997).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menguji respon sistem biofilter terhadap variasi konsentrasi masuk, temperatur, dan kondisi *loading* (organik dan hidrolis). Adapun biofilter yang digunakan terdiri atas dua buah reaktor yang diisi dengan media filter berupa campuran kompos yang telah disaring dan serbuk kayu. Kompos (diameter ekuivalen 2-5 mm) dengan rasio C, N, dan P sebesar 100:7:2, 37,8% bahan organik, dan nilai pH 6,8 diperoleh dari fasilitas pengomposan lokal. Sementara itu, serbuk kayu (2-5 mm) ditambahkan sebagai material *bulking* untuk memproduksi rasio 60:40 v/v kompos-serbuk kayu.

Penelitian biofiltrasi ini dilakukan pada periode operasi tunak, dengan temperatur filter dan kelembaban dijaga pada  $30 \pm 1^\circ\text{C}$  dan 50-55%. Agar dapat memahami proses biofiltrasi dan kapasitas adsorpsi fisik dari material filter, pada permulaan, eksperimen dilakukan dalam biofilter aktif dan beracun (disterilkan dengan larutan  $\text{HgCl}_2$ ).

Efisiensi reduksi (RE) dan kapasitas eliminasi (EC) digunakan untuk menunjukkan performansi biofilter. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pada permulaan biofiltrasi (sekitar 2 minggu), adsorpsi mungkin merupakan mekanisme utama untuk memindahkan TEA, tetapi setelah selang waktu 25 hari dari awal operasi, efisiensi menurun dari 100 menjadi 42% dan kemudian meningkat kembali menjadi sekitar 100% selama periode 11 hari.

Data yang diperoleh menunjukkan bahwa ada hubungan linear antara kapasitas eliminasi dan laju *loading* organik hingga nilai *organic loading rate* (OLR)  $72,3 \text{ gm}^{-3} \text{ h}^{-1}$  (konsentrasi inlet TEA 250 ppm untuk biofilter A) dan  $68 \text{ gm}^{-3} \text{ h}^{-1}$  (konsentrasi inlet TEA 227 ppm untuk biofilter B). Pada kedua

reaktor, bagian pertama memiliki kapasitas reduksi tertinggi karena pemaparan pada konsentrasi TEA yang relatif lebih tinggi. Apabila *loading* organik ditingkatkan, penetrasi lebih dari substrat akan terjadi dan bagian berikutnya menunjukkan peningkatan kapasitas eliminasi. Penurunan potensi biodegradasi yang hanya sedikit pada bagian pertama dan peningkatan aktivitas pada bagian berikutnya dapat dihubungkan dengan limitasi densitas mikrobial keseluruhan dan saturasi dari aktivitas spesifik untuk mikroorganisme pada bagian pertama.

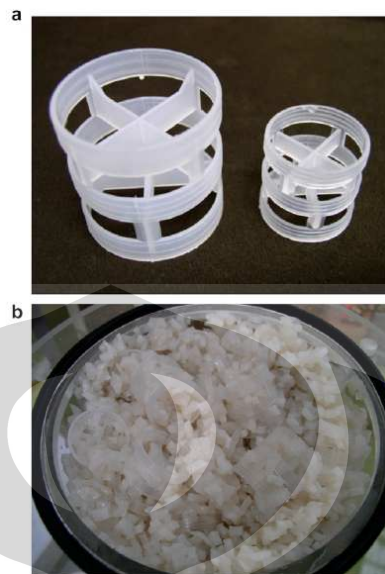
### 2.6.2 Biofiltrasi dengan Medium Sintetik

Selain medium alami, beberapa penelitian mengenai proses biofiltrasi juga dilakukan dengan menggunakan medium sintetik. Medium sintetik tersebut dapat berupa *pall rings* dengan sel terimobilisasi, metal oksida seperti keramik yang dapat menyerap, dan *calcinate cristobalite* atau *perlite*, serta UP20. 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. Penelitian biofiltrasi dengan menggunakan medium sintetik berupa biomedial yang dienkapsulasi oleh sodium *alginate* dan polivinil alkohol akan diuraikan di bawah ini.

Jung Hoon Kim, Eldon R. Rene, dan Hung Suck Park (2007) melakukan penelitian biofiltrasi skala laboratorium terhadap amonia dengan menggunakan medium sintetik berupa biomedial yang dienkapsulasi oleh sodium *alginate* dan polivinil alkohol. Biofilter yang digunakan pada penelitian ini dibuat dengan menggunakan silinder akrilik dengan diameter dalam 14 cm dan volum efektif 8,5 L.

*Pall rings* yang berisi sel mikrobial terimobilisasi ini diisi secara acak ke dalam biofilter untuk menyediakan volum kolom isian sebesar 6,5 L. Gambar biofilter berisi *pall ring* dapat dilihat pada Gambar 2.15. Selanjutnya, biofilter dengan sel terimobilisasi dioperasikan pada laju alir rendah. Sebuah tempat pencampuran yang dilengkapi dengan *baffles* dan regulator disediakan sebelum masukan biofilter dengan tujuan untuk meningkatkan karakteristik pencampuran  $\text{NH}_3$ . Selain itu, hal ini juga berfungsi sebagai alat untuk mengontrol konsentrasi inlet ke dalam biofilter dengan cara mencampurnya dengan udara yang berasal

dari kompresor udara. Sistem *recycle* nutrisi menyediakan nutrisi penting yang diperlukan untuk menjaga aktivitas mikrobial.



**Gambar 2.15** (a) *Pall ring* komersial, (b) Tampak atas biofilter yang diisi dengan *pall ring* yang mengandung sel terimobilisasi  
(Jung Hoon Kim et al., 2007)

Parameter yang divariasikan dalam penelitian ini adalah konsentrasi masukan  $\text{NH}_3$  dari 10-150 ppm. Sementara itu, laju alir disesuaikan agar diperoleh EBRT sebesar 85, 64, 51, dan 32 s. Selama beberapa hari pada awal operasi biofilter secara kontinu, konsentrasi dan laju alir dijaga rendah untuk membongkar sel terimobilisasi agar mengalami kontak dengan  $\text{NH}_3$ . Selanjutnya, konsentrasi inlet ditingkatkan secara bertahap dan setiap tahap dioperasikan hingga konsentrasi keluaran rendah ( $< 1$  ppm).

Hasil yang diperoleh dalam penelitian tersebut menunjukkan bahwa biofilter memerlukan waktu beberapa hari untuk beradaptasi dengan konsentrasi baru dan mencapai nilai *steady state* yang baru setelahnya. Berdasarkan hasil yang diperoleh, diketahui pula bahwa sel terimobilisasi memiliki aktivitas yang baik dan hal ini dapat terlihat melalui reduksi yang stabil dan konsisten sejak awal eksperimen. Sistem biofilter terimobilisasi dianggap sangat efektif dalam pengolahan campuran  $\text{H}_2\text{S}$  dan  $\text{NH}_3$  dengan sel terimobilisasi antara lain *Thiobacillus thioparus*, *Nitrosomonas europaea*, *Arthobacter oxydans*, dan *Pseudomonas putida*, serta inhibisi/efek sinergistiknya juga telah dilaporkan (Chung et al., 2000, 2001).

### 2.6.3 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.

#### 2.6.3.1 Biofiltrasi Amonia dengan Medium Kompos dan Plastik Keras

Taghipour et al. (2007) melakukan penelitian reduksi  $\text{NH}_3$  dalam udara melalui biofiltrasi *bench-scale* tiga tingkat dengan menggunakan kombinasi medium alami dan sintetik berupa kompos, lumpur teraktivasi, dan plastik keras dengan tujuan untuk melihat adanya pengaruh dari parameter operasional seperti konsentrasi masukan, laju *loading*, waktu retensi, *pressure drop*, serta variasi pH dan alkalinitas dalam medium filter terhadap performansi biofilter. Lumpur teraktivasi digunakan untuk mengolah medium kompos tanpa melalui proses penyuburan dengan tujuan meningkatkan densitas mikroba dan juga meningkatkan homogenitas medium filter. Setelah itu, reaktor diisi dengan menggunakan medium berbasis kompos yang dicampur dengan irisan plastik keras (1,0 cm x 0,5 cm) sebagai *bulking agent* untuk mengurangi *pressure drop*, meningkatkan porositas medium filter, dan mempertebal lumpur teraktivasi pada rasio 3:2:1 (v/v/v) dengan porositas 52%, densitas 0,65, dan pH 7,2.

Setelah dilakukan inokulasi biofilter dengan menggunakan lumpur teraktivasi yang tebal, sistem dioperasikan dengan laju alir udara ( $Q$ ) sebesar  $0,388 \text{ m}^3/\text{h}$  sesuai dengan EBRT 60 s dengan laju inlet *loading* rata-rata ( $L$ )  $2,15 \text{ g NH}_3 / \text{m}^3 \text{ h}$ . Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa efisiensi reduksi biofilter meningkat secara perlahan-lahan dan mencapai 97,9% pada hari ke-10, setelah itu sistem menjadi stabil. Selain itu, konsentrasi amonium pada medium filter kecuali pada hari pertama operasi menurun dan konsentrasi nitrat meningkat secara bertahap pada ketiga tingkat biofilter selama waktu aklimasi. Hal tersebut menunjukkan bahwa amonia yang terabsorpsi pada medium filter dikonversi oleh mikroorganisme nitrifikasi menjadi nitrat setelah periode aklimasi.

Jumlah bakteri nitrifikasi pun mengalami peningkatan yang signifikan dari  $5,6 \times 10^4$  sel/g medium basah pada keadaan awal dan menjadi  $2,8 \times 10^8$  sel/g medium basah setelah biofiltrasi dimulai dan periode aklimasi yang mengindikasikan bahwa bakteri nitrifikasi menjadi dominan pada kondisi tunak.

Dapat disimpulkan bahwa setelah 10 hari aklimasi, mikroorganisme pendenitrifikasi dan proses reduksi menjadi dominan. Selain itu, dapat disimpulkan pula bahwa inokulasi medium biofilter dengan *aggregates* seperti lumpur teraktivasi yang tebal dapat mengurangi waktu aklimasi.

Setelah waktu aklimasi dan mencapai kondisi *steady-state* pada biofilter dengan laju alir ( $Q$ ) sebesar  $0,388 \text{ m}^3/\text{h}$  dan EBRT 60 s, konsentrasi inlet dan laju *loading* akan meningkat secara bertahap. Selama masa ini, kapasitas eliminasi (EC) dan efisiensi reduksi meningkat. Sementara itu, EC maksimum  $9,85 \text{ g NH}_3/\text{m}^3 \text{ h}$  (RE 99,9%) dicapai pada laju *loading*  $9,86 \text{ g NH}_3/\text{m}^3 \text{ h}$ , sesuai dengan konsentrasi inlet sekitar 236 ppm<sub>v</sub>. Hasil yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan bahwa bagian ketiga dari biofilter, terutama pada bulan pertama operasi, merupakan lapisan yang paling aktif dalam reduksi amonia. Dapat disimpulkan bahwa sejumlah kecil biomassa pengoksidasi amonia dan pengoksidasi nitrit yang mengalami *leaching* dari tingkat atas (0-40 dan 40-80 cm) ternyata mempunyai peran dalam menempatkan bakteri nitrifikasi pada bagian ketiga biofilter.

Berdasarkan hasil yang diperoleh, diketahui bahwa campuran kompos, irisan plastik keras, dan lumpur teraktivasi yang tebal memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menjaga pH agar tetap netral dan juga dalam menyediakan lingkungan yang sesuai bagi bakteri nitrifikasi dibandingkan dengan medium filter inorganik. Penggunaan kompos dalam campuran dengan lumpur teraktivasi yang tebal dan irisan plastik keras merupakan medium biofilter yang sesuai dalam reduksi amonia dari aliran gas limbah karena memiliki *pressure drop* yang kecil.

### 2.6.3.2 Biofiltrasi Stirena dengan Medium Kompos dan Irisan Plastik Keras

Penelitian biofiltrasi *bench-scale* tiga tingkat dengan menggunakan medium kompos dan irisan plastik keras juga dilakukan oleh Bina et al. (2004). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperkirakan periode aklimasi biofilter yang dikultivasi oleh lumpur teraktivasi tanpa adanya proses penyuburan serta untuk menunjukkan kemampuan dan efektifitas dari mikroorganisme yang terdapat pada lumpur teraktivasi dalam mendegradasi stirena. Selain itu, penelitian juga dilakukan untuk mengevaluasi efek parameter operasional seperti waktu retensi gas, konsentrasi masukan stirena, dan laju *loading* organik terhadap performansi sistem, serta aplikasi hasil eksperimen untuk mendesain dan mengoperasikan biofilter stirena pada industri.

Medium filter yang digunakan dalam penelitian biofiltrasi ini adalah campuran kompos dari sampah kebun dan irisan plastik keras sebagai *bulking agent* dalam perbandingan 75:25 v/v campuran plastik-kompos. Sistem inokulasi diperoleh dengan menambahkan lumpur tebal teraktivasi yang diperoleh dari *plant* pengolahan air limbah, kemudian efek dari laju *loading*, konsentrasi masukan, dan variasi EBRT terhadap performansi dan operasi biofilter dipelajari. Adapun tujuan dari penambahan lumpur teraktivasi ke dalam campuran kompos dan *bulking agent* adalah untuk meningkatkan densitas mikroba dan membuat partikel kompos bercampur dengan *bulking agent*.

Aklisasi mikroba terhadap stirena telah diperoleh pada konsentrasi masuk  $65 \pm 11$  ppm dan waktu kontak 360 s setelah 57 hari operasi. Pada percobaan di bawah kondisi *steady state* diperoleh hasil yang menunjukkan bahwa rata-rata efisiensi reduksi sekitar 84% pada laju *loading* 60 dan  $80 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  dengan EBRT 60 s. Kapasitas eliminasi maksimal diperoleh hingga  $81 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  dengan laju *loading* organik sekitar  $120 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ . Selain itu, penurunan kinerja yang terjadi telah diamati pada konsentrasi masukan lebih dari 650 ppm yang berkaitan dengan laju *loading* organik hingga  $160 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$  dan kemudian efisiensi reduksi menurun secara tajam. Evaluasi terhadap profil konsentrasi

sepanjang ketinggian filter dalam kolom mengindikasikan bahwa kapasitas eliminasi yang paling besar terjadi pada bagian pertama dari biofilter. Kapasitas eliminasi juga menunjukkan kinerja yang lebih tinggi ketika EBRT dikurangi hingga 30 s.

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa periode aklimasi mikroba untuk biofiltrasi styrena yang diinokulasi dengan lumpur teraktivasi lebih lama daripada inokulasi dengan bakteri yang diperkaya atau diadaptasi. Selain itu, diketahui bahwa semakin tinggi laju *loading* masukan, maka kinerja biofilter akan semakin baik sampai pada batas terjadinya efek inhibitif pada aktivitas mikroorganisme.

### 2.6.3.3 Biofiltrasi H<sub>2</sub>S dengan Medium UP20

Penelitian biofiltrasi skala laboratorium untuk mengolah H<sub>2</sub>S dengan menggunakan campuran medium alami dan sintetik (UP20) telah dilakukan oleh Dumont et al. (2008). UP20 (banyak mengandung kalsium karbonat dan bahan pengikat organik) berbentuk silinder dan beberapa penelitian sebelumnya telah membuktikan bahwa formula terbaru UP20 ini menawarkan keuntungan bagi proses dengan konsentrasi polutan yang relatif tinggi karena dapat menyediakan nutrisi untuk biomassa dan efek *buffering*.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki reduksi H<sub>2</sub>S sebagai satu-satunya polutan dalam biofilter yang diisi dengan UP20 dalam hal kapasitas eliminasi, efisiensi reduksi, perubahan pH, dan perubahan tekanan. Hasilnya akan dibandingkan dengan dua biofilter, satu diisi dengan kulit kayu pinus dan lainnya dengan suatu konfigurasi yang terdiri atas pozzolan dan UP20 yang terbagi dalam dua lapisan (80/20, v/v).

Material UP20 ini mengandung CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O, H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, CaCO<sub>3</sub> (rasio molar C, N, dan P sebesar 100:5:1) dan sebuah bahan pengikat organik (20% massa) dari industri Elotex (merupakan sebuah serbuk putih yang biasa digunakan dalam industri bangunan dan biasanya mengandung etilena dan vinil asetat). Medium filter lain yang digunakan untuk perbandingan performa adalah kulit pinus dan pozzolan. Kulit pinus dipilih karena sifat fisik yang baik (densitas filter rendah) dan murah. Sementara itu, pozzolan merupakan batuan vulkanik

yang mengandung kerikil, inert, dan relatif murah. Pozzolan yang digunakan dalam penelitian ini terutama terdiri atas  $\text{SiO}_2$  (44%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15%),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (15%), dan  $\text{CaO}$  (10%), serta terlihat seperti butiran yang tidak beraturan dengan diameter berkisar dari 5 sampai 10 mm. Karakteristik mekanisnya sangat baik untuk proses filtrasi air (densitas rendah, porositas besar, area permukaan spesifik besar, dan kemampuan untuk menyimpan air yang rendah).

Berdasarkan hasil penelitian ini dapat diketahui bahwa perubahan RE terhadap waktu menunjukkan beberapa kesamaan pada medium filter yang berbeda. Setelah periode dimana mikroorganisme dapat beradaptasi, ketiga biofilter dapat mereduksi lebih dari 95%  $\text{H}_2\text{S}$  yang masuk ketika LR lebih rendah dari  $5 \text{ g m}^{-3}\text{h}^{-1}$ . Selain itu, diketahui pula bahwa nilai RE untuk biofilter kulit pinus adalah 69% dan untuk biofilter dengan konfigurasi pozzolan/UP20 adalah 74%.

Untuk LR lebih tinggi, kapasitas reduksi meningkat pada laju yang lebih rendah. Hal ini juga terjadi pada kedua biofilter yang diisi kulit pinus dan konfigurasi pozzolan/UP20. Pada kasus tertentu, biofilter yang diisi dengan pozzolan/UP20 menghasilkan keuntungan jika dibandingkan dengan biofilter yang diisi dengan kulit pinus karena: (i) UP20 menstimulasi pertumbuhan aktivitas bakteri dengan cara melarutkan nutrisi yang melewati pozzolan dan (ii) sifat mekanis dari pozzolan mengurangi pengendapan filter, yang juga dapat mengurangi *pressure drop* dalam biofilter. Barona et al. menguji empat medium filter organik untuk reduksi  $\text{H}_2\text{S}$  (kotoran kuda, lumpur, tanah dan alga, serta kotoran babi dan serbuk kayu) dan menunjukkan bahwa hanya medium kotoran babi dan serbuk kayu yang dapat mencapai efisiensi reduksi yang tinggi, yaitu  $\text{RE} = 97\%$  untuk  $\text{LR} = 5 \text{ gm}^{-3}\text{h}^{-1}$ .

Biofilter UP20 menghasilkan penurunan yang lambat dari pH 8 ke 6 melalui enam periode operasi, sementara kedua biofilter yang lain mengalami penurunan dari pH 7 ke 3 selama periode 1 (dimulai dari hari kelima penanganan  $\text{H}_2\text{S}$ ). Untuk material UP20 yang mempunyai sifat *buffering* yang baik, nilai pH 8 yang terukur di hari pertama mungkin berhubungan dengan pelarutan kalsium karbonat dan fosfat yang terdapat pada material ini. Hal ini



juga dapat menjelaskan perubahan kecil pH menjadi 6,5. Meskipun demikian, pengasaman dari medium tidak berpengaruh pada efisiensi reduksi.

Selain itu juga diketahui bahwa kadar kelembaban medium biofilter yang tepat juga merupakan kunci parameter untuk memastikan performa yang baik. Kadar kelembaban sekitar 50% untuk UP20 pada bagian atas biofilter untuk seluruh waktu operasi dan 70% untuk kulit pinus, sementara nilai yang lebih rendah diukur pada bagian bawah kolom. Pengurangan kadar kelembaban yang signifikan terhadap waktu disebabkan oleh akumulasi biomassa, pemadatan filter, efek penyumbatan. Sementara itu, biofilter yang diisi dengan konfigurasi pozzolan/UP20 memiliki kadar kelembaban sekitar 50% pada bagian atas kolom (berhubungan dengan lapisan UP20), tetapi nilai yang terukur akan turun pada lapisan pozzolan hingga mencapai 15-20%. Nilai tersebut berhubungan dengan kapasitas penyimpanan air dari pozzolan.

#### **2.6.4 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 Utami dkk. (2009). Adapun kultur inokulum yang digunakan berupa campuran air limbah dari kandang binatang dengan medium denitrifikasi. Tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah untuk menginvestigasi pengaruh parameter operasi biofilter yaitu 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*. Selanjutnya, gas N<sub>2</sub>O keluaran biofilter dianalisa dengan gas *chromatography* (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 tanpa dan 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 lebih banyak secara kuantitas apabila dibandingkan dengan panjang biofilter yang lainnya.

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, aliran gas lebih banyak bersirkulasi di dalam sistem sehingga waktu kontak 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 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 di dalam pupuk.

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

Penelitian biofiltrasi skala laboratorium terhadap gas  $N_2O$  juga telah dilakukan oleh Utami dkk. (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. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji pengaruh variasi parameter operasi yaitu laju alir gas dan kandungan air pada medium filter terhadap efisiensi reduksi  $N_2O$ , serta mengkaji dan membandingkan pengaruh penambahan nutrisi alami dan sintetik terhadap efisiensi biofiltrasi. Penelitian biofiltrasi ini dilakukan selama 9 jam

dengan sistem aliran *batch*. Penurunan konsentrasi N<sub>2</sub>O hasil dari biofiltrasi dianalisis dengan kromatografi gas (GC), sedangkan kompos sebagai medium filter dianalisis dengan metode *Total Plate Count* (TPC) untuk mengetahui peningkatan jumlah bakteri hasil biofiltrasi.

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<sub>2</sub>O yang telah diperoleh pada penelitian sebelumnya di Departemen Teknik Kimia, UI (Utami, 2009). Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O terbaik sebesar 56,7% didapatkan pada laju alir terkecil yaitu 72 cc/menit. Efisiensi reduksi gas N<sub>2</sub>O cenderung meningkat pada laju alir yang semakin kecil karena waktu tinggal gas N<sub>2</sub>O dalam medium filter menjadi lebih lama sehingga waktu kontak antara gas N<sub>2</sub>O dan medium biofilter juga lebih lama. Akibatnya, intensitas gas N<sub>2</sub>O mengalami proses adsorpsi dan degradasi lebih banyak daripada laju alir gas N<sub>2</sub>O 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 mengandung air serta merupakan tempat mikroba melakukan degradasi 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 volum air terbaik yang telah diperoleh dalam percobaan. Nutrisi alami yang ditambahkan berupa limbah cair dari peternakan sapi, sedangkan nutrisi sintetis yang diberikan terdiri dari larutan nutrisi dan *trace element*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa penggunaan nutrisi baik alami maupun sintetis dapat meningkatkan efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O. Namun, adanya penambahan *Nitrobacter, sp* dan nutrisi sintetis pada kompos dapat meningkatkan efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O 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.

#### 2.6.6 Ringkasan *State of The Art*

Gambar 2.16 berikut menunjukkan peta perjalanan penelitian biofilter yang telah dilakukan di berbagai negara. Peta ini menjelaskan perjalanan penelitian biofilter dalam mereduksi berbagai gas polutan antara lain emisi bau, triethylamine, stirena, ammonia,  $H_2S$ , VOCs, hingga  $NO_x$  yang kini sedang dikembangkan. Penelitian biofilter dalam mereduksi  $NO_x$  dapat dilihat pada Gambar 2.7, dimana penelitian ini pertama kali dirintis oleh Barnes (1994) dengan judul “Removal of nitrogen oxides from gas streams using biofiltration”. Penelitian ini melakukan uji coba terhadap kemampuan kompos sebagai medium filter dalam mereduksi  $NO_x$ . Gas sampel yang diujikan pada penelitian ini adalah  $NO$ , dengan hasil efisiensi reduksi >90%. Penelitian selanjutnya bertujuan untuk mengevaluasi beberapa parameter operasional untuk meningkatkan kinerja biofilter dalam mereduksi  $NO$ . Penelitian ini dilakukan oleh Yang et al. (2007) dengan memvariasikan parameter operasi seperti ketinggian medium, konsentrasi gas polutan, kandungan oksigen, dan penambahan nutrisi untuk medium filter yang menghasilkan efisiensi reduksi sebesar 60% untuk kondisi aerobik, dan 99% untuk kondisi anaerobik.

Biofiltrasi gas dinitrogen monoksida ( $N_2O$ ) 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 (Utami dkk., 2009). Selanjutnya, Utami dkk. (2009) melakukan biofiltrasi  $N_2O$  dengan sistem aliran *batch* dengan menggunakan medium filter berupa kompos yang terdiri dari kotoran kambing, sampah rumah tangga, dan *cocopeat*. Saat ini, biofiltrasi  $N_2O$  akan dilakukan dengan menggunakan medium filter berupa kompos yang terdiri dari kotoran sapi, sekam beras, dan *cocopeat*.

## Emisi Gas

<b>N<sub>2</sub>O</b>				<b>Penelitian ini (batch; kompos berbasis kotoran sapi), 2009</b> Utami dkk., 2009 (batch; kompos berbasis kotoran kambing) Utami dkk., 2009 (Sirkulasi)
<b>NO</b>				Barnes, 1994 Yang, 2007
<b>VOCs</b>	Delhomenie, 2008		Liu, 2004 Chen, 2008	
<b>H<sub>2</sub>S</b>		Dumont, 2008	Hirai, 1990	
<b>Ammonia</b>	Kim, 2007	Taghipour, 2007	Hong dan Park, 2004 Baquerizo, 2005 Gabriel, 2007	Pagans, 2005 Liang, 2000
<b>Stirena</b>		Bina, 2004		
<b>Triethylamine</b>				Torkian, 2005
<b>Emisi Bau</b>			Chen, 2008	Pandey, 2005 Chung, 2007
	<b>Sintetik</b>	<b>Sintetik+Alami</b>	<b>Alami</b>	<b>Kompos</b>

**Jenis Medium Filter**

Gambar 2.16 Mapping State of The Art biofilter terhadap berbagai emisi gas polutan

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

<b>N<sub>2</sub>O</b>		<b>Penelitian ini, 2009 (batch; kompos berbasis kotoran sapi)</b> Utami dkk., 2009 (sirkulasi)	Utami dkk., 2009 (batch; kompos berbasis kotoran kambing) Utami dkk., 2009 (sirkulasi)		<b>Penelitian ini, 2009 (batch; kompos berbasis kotoran sapi)</b> Utami dkk., 2009 (batch; kompos berbasis kotoran kambing) Utami dkk., 2009 (sirkulasi)	Utami dkk., 2009 (batch; kompos berbasis kotoran kambing)
	<b>NO</b>	Yang, 2007 Barnes, 1994	Yang, 2007	Yang, 2007 Barnes, 1994	Yang, 2007	
	<b>Konsentrasi Gas Polutan</b>	<b>Ketinggian Medium</b>	<b>Penambahan Nutrisi</b>	<b>Kandungan Oksigen</b>	<b>Laju Alir</b>	<b>Kandungan Air</b>

**Parameter Operasi**

**Gambar 2.17** Mapping State of The Art biofilter terhadap gas NO<sub>x</sub>

Tabel 2.9 di bawah ini menunjukkan ringkasan terhadap berbagai penelitian biofiltrasi yang telah diuraikan di atas.

**Tabel 2.9** Ringkasan berbagai penelitian biofiltrasi

<b>Peneliti</b>	<b>Polutan</b>	<b>Medium Filter</b>	<b>Hasil</b>	<b>Efisiensi Tertinggi</b>
Hong dan Park (2004)	Amonia	50% kompos dan 50% kulit kelapa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- MC dan rasio C dan N tidak berubah secara signifikan selama proses <i>composting</i></li> <li>- pH, densitas, abu, EC, dan massa yang tidak mengalami perubahan secara signifikan selama proses biofiltrasi.</li> <li>- Kedalaman media biofilter 500 mm merupakan hal yang kritis untuk menurunkan konsentrasi amonia menjadi 0 ppm.</li> </ul>	100%
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} \text{ medium jam}^{-1}</math></li> <li>- <math>EC_{maks}</math> toluena <math>20 \text{ g m}^{-3} \text{ medium jam}^{-1}</math></li> <li>- pH media yang diukur menurun sedikit demi sedikit</li> <li>- Nitrogen dapat menjadi nutrisi pembatas jika jumlah yang memadai tidak tersedia dalam biofilter</li> </ul>	100%  40%-100%

Bina et.al (2004)	Stirene	Kompos yang dicampur sobekan plastik (75:25, v/v)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>EC_{maks}</math> 81 g m<sup>-3</sup> jam<sup>-1</sup> dengan laju <i>loading</i> sekitar 120 g m<sup>-3</sup> jam<sup>-1</sup></li> <li>- Semakin besar konsentrasi masukan, maka efisiensi biofilter akan meningkat tetapi jangan sampai ada efek inhibitatif pada aktivitas biomassa sepanjang medium filter.</li> <li>- Semakin kecil EBRT, maka kinerja biofilter dan kapasitas eliminasi semakin baik</li> </ul>	84%  EBRT 30 s, efisiensi reduksi ≈100% pada laju <i>loading</i> 80 g m <sup>-3</sup> jam <sup>-1</sup> .
Pagans et.al. (2005).	Amonia	Kompos (fraksi organik sampah padat, lumpur pembuangan air, dan bagian dari hewan yang terbuang seperti bangkai dan bulu) dan <i>bulking agent</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- OFMSW (5:1), <math>EC_{maks}</math> 829 mg NH<sub>3</sub> m<sup>-3</sup> biofilter jam<sup>-1</sup></li> <li>- OFMSW (1:1), <math>EC_{maks}</math> 7170 mg NH<sub>3</sub> m<sup>-3</sup> biofilter jam<sup>-1</sup></li> <li>- DS, <math>EC_{maks}</math> 6580 mg NH<sub>3</sub> m<sup>-3</sup> biofilter jam<sup>-1</sup></li> <li>- AP (hari 0-4), <math>EC_{maks}</math> 61300 mg NH<sub>3</sub> m<sup>-3</sup> biofilter jam<sup>-1</sup></li> <li>- AP (hari (4-9), <math>EC_{maks}</math> 21700 mg NH<sub>3</sub> m<sup>-3</sup> biofilter jam<sup>-1</sup></li> </ul>	98,8% 95,9% 99,4% 89,5% 46,7%



		(cacahan sampah) = 1:1, 5:1 (v/v)		
Torkian et.al (2005)	Trietilamin (TEA)	Kompos tersebut dan bulking agent serpihan kayu, 60:40 (v/v)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>EC_{maks}</math> yaitu <math>72 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}</math> pada laju <i>loading</i> <math>114 \text{ g m}^{-3} \text{ jam}^{-1}</math> (suhu <math>30 \pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}</math>)</li> <li>- <math>EC_{maks}</math> <math>61,5 \text{ g m}^{-3} \text{ jam}^{-1}</math> pada laju <i>loading</i> <math>90,5 \text{ g m}^{-3} \text{ jam}^{-1}</math> (<math>23 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pada permulaan biofiltrasi (sekitar 2 minggu), adsorpsi mungkin merupakan mekanisme utama untuk memindahkan TEA, tetapi setelah selang waktu 25 hari dari awal operasi, efisiensi menurun dari 100 menjadi 42% dan kemudian meningkat kembali menjadi sekitar 100% selama periode 11 hari.</li> </ul>
Baquerizo et. al (2005)	Amonia	Serat Kelapa	Model biofiltrasi amonia untuk menggambarkan reduksi amonia dalam bioreaktor fasa gas dengan	

			memprediksi profil reduksi dan konsentrasi keluaran amonia pada kondisi operasi yang menghambat dan yang tidak menghambat.	
Pandey et.al (2006)	Piridin	Kompos kotoran sapi dan serpihan kayu, rasio 1:1 (v/v) , diperkaya bakteri <i>Pseudomonas pseudoalcaligenes-KPN</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kelembaban optimal 68%</li> <li>- EBRT efektif 28,5 s</li> <li>- <i>Loading</i> 434 g piridin m<sup>-3</sup> h<sup>-1</sup>.</li> </ul>	(>99%)
Yang et.al (2007)	NO	Kompos dan serpihan kayu	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Semakin tinggi kolom biofilter, semakin tinggi efisiensi reduksi NO</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</li> </ul>	

			anaerobik - Efisiensi reduksi NO anaerobik > aerobik	60% aerobik 99 % anaerobik
Gabriel et.al (2007)	Amonia	Medium filter serat kelapa	- $EC_{maks}$ 12 g $[NH_3] m^{-3} jam^{-1}$ (transien) - $EC_{maks}$ 33,3 g $[NH_3] m^{-3} jam^{-1}$ (steady)	80% 100%
Kim et.al (2007)	Amonia	Biomedia yang dienkapsulasi dengan sodium alginat dan polivinil alkohol (PVA) membentuk PVA cryogels (kubus)	- <i>Loading</i> amonia 4,5 g $m^{-3} jam^{-1}$ - $EC_{maks}$ yaitu 5,5 g $m^{-3} h^{-1}$ pada laju <i>loading</i> 7,5 g $m^{-3} jam^{-1}$	100%
Taghipour et al. (2007)	$NH_3$	Kompos, lumpur teraktivasi, dan plastik keras	- Efisiensi reduksi biofilter meningkat secara perlahan-lahan hingga hari ke-10, setelah itu sistem menjadi stabil - Konsentrasi amonium pada material isian kecuali pada hari pertama operasi menurun dan konsentrasi nitrat meningkat secara perlahan selama biofiltrasi	97,9%

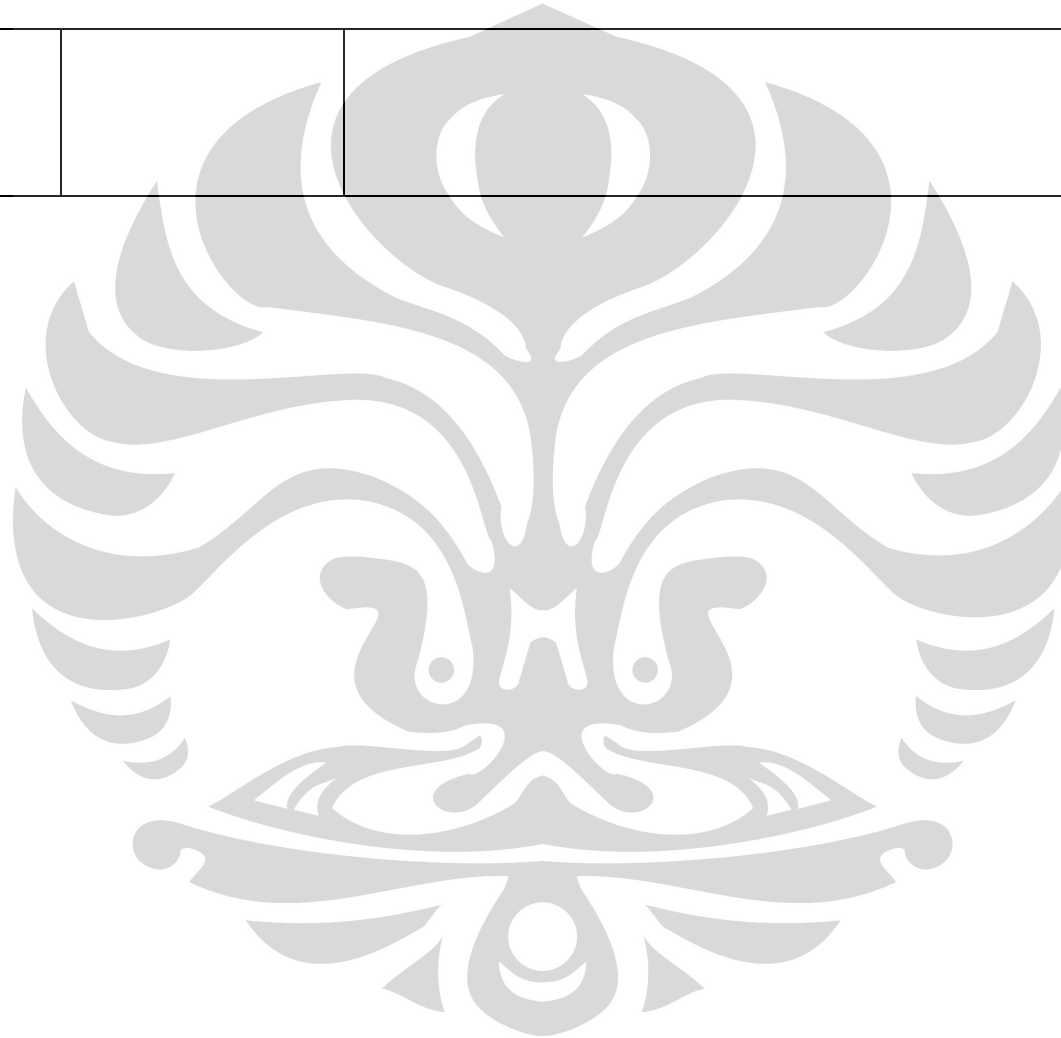
Chen et.al (2008)	VOCs (VFAs, fenolik, senyawa sulfur indolik)	Kayu keras (HW) Kayu pohon cedar (WC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Semakin besar kelembaban media filter, maka efisiensi reduksi akan semakin baik pada ketiga senyawa VOC (VFAs, fenolik, indolik)</li> <li>- Efisiensi reduksi pada semua kelembaban terlihat lebih baik pada WC</li> <li>- Tidak ada pengaruh EBRT terhadap efisiensi reduksi</li> </ul>	74 % WC, EBRT 5,5: 92,6% HW, EBRT 5,5: 86,4%
Dumont et.al (2008)	H <sub>2</sub> S	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material sintetik UP20</li> <li>- Kulit kayu pohon cemara</li> <li>- Campuran pozzolan dan UP20 (80/20, v/v).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Laju <i>loading</i> 10 g m<sup>3</sup> jam<sup>-1</sup></li> <li>- Efisiensi reduksi dengan medium biofilter UP20</li> <li>- Efisiensi reduksi dengan medium filter kulit kayu pohon cemara</li> <li>- Efisiensi reduksi dengan medium filter campuran pozzolan dan UP20</li> </ul>	>93% 69% 74%
Utami dkk. (2009)	N <sub>2</sub> O (sistem aliran sirkulasi)	Serpihan kayu dan pupuk kandang	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada panjang biofilter tertinggi 50 cm</li> <li>- Efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada laju alir gas N<sub>2</sub>O tertinggi 200 cc/menit</li> </ul>	67,86% 72,02%

			- Penambahan nutrisi menghasilkan efisiensi reduksi tertinggi	91,49%
Utami, dkk. (2009)	N <sub>2</sub> O (sistem aliran <i>batch</i> selama 9 jam)	Kompos organik (bahan kotoran kambing)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada laju alir gas N<sub>2</sub>O terkecil 72 cc/menit</li> <li>- Efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada kandungan air 60 % (w/w) berat kompos</li> <li>- Penggunaan nutrisi baik alami maupun sintetik dapat meningkatkan efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O</li> <li>- 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</li> </ul>	<p>56,7%</p> <p>70,13%</p> <p>75,9%</p>
<b>Riset saat ini (2009)</b>	N <sub>2</sub> O (sistem aliran <i>batch</i> selama 9 jam)	Kompos organik (bahan kotoran sapi)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada laju alir gas N<sub>2</sub>O 88 cc/menit</li> <li>- Efisiensi reduksi tertinggi pada kedalaman medium filter 50 cm</li> <li>- Sifat (densitas, pH, <i>water content</i>, porositas)</li> </ul>	<p>61,3 %</p> <p>61,35%</p> <p>- Densitas: 0,5554 g/mL</p>

			<p>kompos awal dan kompos akhir tiap variasi</p> <p>- Karakteristik (area permukaan spesifik, diameter pori, dan kandungan unsur-unsur dalam kompos) medium filter berupa kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pH kompos awal: 8,1 pH kompos akhir variasi laju alir: 7,6 pH kompos akhir variasi kedalaman medium: 7,1</li> <li>- <i>Water content</i> kompos awal: 57,72% <i>Water content</i> kompos akhir variasi laju alir: 65,10% <i>Water content</i> kompos akhir variasi kedalaman medium: 63,65%</li> <li>- Porositas kompos awal: 80,2%</li> <li>- Area permukaan spesifik kompos berbasis kotoran sapi:</li> </ul>
--	--	--	--	--

			<p>- Perbandingan hasil efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O yang diperoleh melalui biofiltrasi dengan menggunakan medium filter berupa kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing</p>	<p>3,957 m<sup>2</sup>/g</p> <p>Diameter pori kompos berbasis kotoran sapi: 1,8.10<sup>1</sup> Å</p> <p>- Rasio C/N kompos berbasis kotoran sapi: 12,93</p> <p>Rasio C/N kompos berbasis kotoran kambing: 17,44</p> <p>- Efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O pada kompos berbasis kotoran sapi pada laju alir 88 cc/menit, kedalaman medium 50 cm: 61,35%</p> <p>Efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O pada kompos berbasis kotoran kambing pada</p>
--	--	--	--	--

				laju alir 88 cc/menit, kedalaman medium 50 cm: 56,5%
--	--	--	--	--

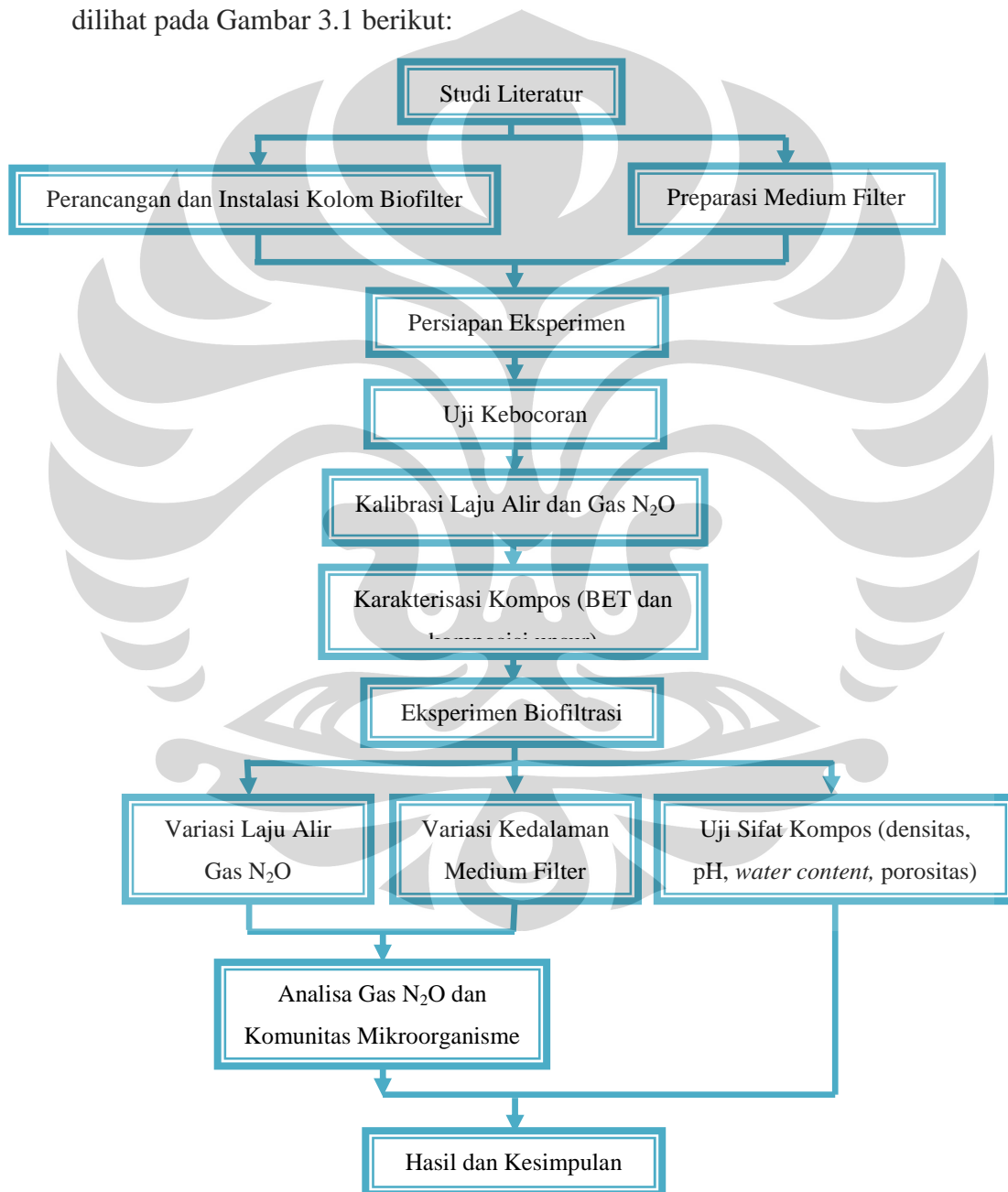




## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (Lab. RPKA) dan Laboratorium Teknologi Bioproses Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, Depok. Diagram alir penelitian secara umum dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut:



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian secara umum

Tahap pertama penelitian diawali dengan studi literatur berupa studi jurnal-jurnal publikasi baik nasional maupun internasional mengenai biofiltrasi. Tahap berikutnya adalah melakukan perancangan dan instalasi kolom biofilter. Peralatan biofilter yang digunakan pada penelitian ini adalah peralatan skala laboratorium yang telah digunakan oleh Utami dkk. (2009). Namun, alat ini ditambahkan dengan manometer air tipe U dengan tujuan untuk mengukur *pressure drop* yang terjadi sepanjang kolom biofilter. Langkah selanjutnya pada tahap ini adalah preparasi kompos sebagai medium filter. Preparasi diawali dengan pembuatan kompos di Sekolah Alam, Ciganjur. Kemudian dilakukan langkah preparasi lanjutan yaitu dengan mengeringkan kompos yang telah jadi. Pengeringan dilakukan pada suhu 33°C dengan humiditas ruang 70%, lalu dilakukan pengayakan guna mendapatkan partikel kompos yang seragam.

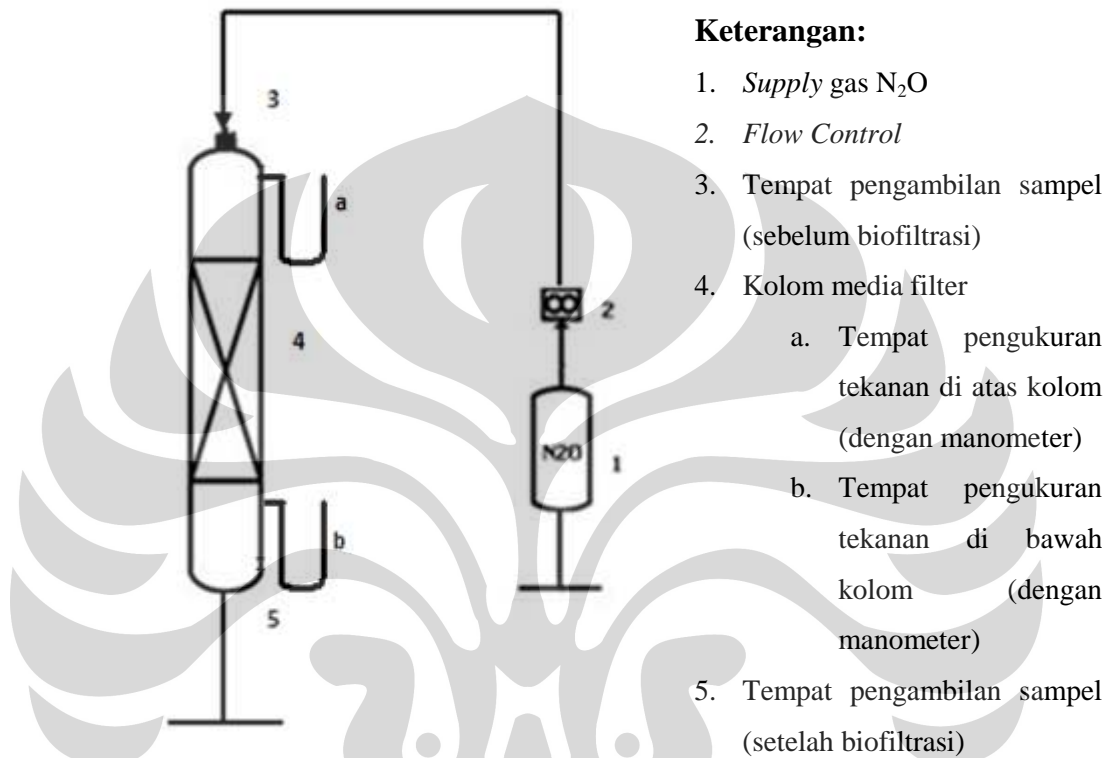
Tahap ketiga adalah persiapan eksperimen. Tahapan ini berawal dari uji kebocoran alat yang bertujuan untuk memastikan bahwa konsentrasi N<sub>2</sub>O berkurang karena proses adsorpsi dan degradasi, bukan karena kebocoran. Selanjutnya, dilakukanlah kalibrasi laju alir gas N<sub>2</sub>O pada *flowmeter* dan kalibrasi gas N<sub>2</sub>O untuk mengetahui laju alir aktual dari gas yang dialirkan ke dalam sistem biofilter dan luas *peak* N<sub>2</sub>O pada volum sampel N<sub>2</sub>O standar.

Tahap berikut adalah uji karakteristik kompos melalui uji BET dan uji komposisi unsur-unsur yang terdapat dalam kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing. Setelah itu, dilakukanlah eksperimen biofiltrasi yang bertujuan untuk mereduksi N<sub>2</sub>O dengan mengevaluasi pengaruh variasi laju alir gas N<sub>2</sub>O dan pengaruh variasi kedalaman medium terhadap performansi biofilter serta terhadap pertumbuhan mikroorganisme dalam kompos. Gas yang keluar dari medium filter dianalisis dengan kromatografi gas (GC) dan kompos akan diteliti perkembangan populasi mikroorganismenya dengan menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC) dan uji SEM (*Scanning Electron Microscope*). Pada tahap ini juga akan dilakukan uji sifat fisika dan kimia kompos, baik sebelum maupun setelah melalui biofiltrasi. Uji sifat fisik dan kimia yang dilakukan antara lain meliputi pengukuran densitas, pH, *water content*, dan porositas kompos. Tahap terakhir adalah perolehan hasil dan pengambilan kesimpulan.

## 3.2 Peralatan dan Bahan Penelitian

### 3.2.1 Peralatan

Desain peralatan biofilter yang akan digunakan disesuaikan dengan kebutuhan dan skala penelitian yaitu skala laboratorium. Diagram skematik dari biofilter yang digunakan pada eksperimen ditunjukkan pada Gambar 3.2 berikut.



**Gambar 3.2** Diagram skematik biofilter

Perincian keseluruhan peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah:

**Tabel 3.1** Rincian peralatan yang digunakan dalam penelitian

No.	Alat	Fungsi
1.	Sistem Biofilter	Tempat dilakukan pengujian biofiltrasi gas N <sub>2</sub> O
2.	Tampah	Tempat mengeringkan dan menjemur kompos
3.	Ayakan/ Saringan	Mengayak kompos dan menghasilkan partikel kompos yang homogen
4.	Ember	Wadah untuk kompos yang telah diayak (sebelum dimasukkan ke dalam kolom biofilter)
5.	<i>Perforated Plates</i>	Alat untuk mendistribusikan gas secara merata di dalam kolom biofilter
6.	Corong Plastik	Alat untuk memasukkan kompos ke dalam kolom biofilter
7.	<i>Bubble soap</i>	Alat untuk kalibrasi laju alir
9.	<i>Gas Sampling</i>	Tempat pengambilan sampel gas N <sub>2</sub> O pada saat kalibrasi volum
10.	<i>Gas Chromatograph (GC)</i>	Menganalisa konsentrasi N <sub>2</sub> O dalam sampel
11.	<i>Syringe</i>	Mengambil gas sampel
12.	Timbangan	Menimbang berat
13.	Tabung Reaksi	Tempat pengenceran larutan
14.	Cawan Petri	Tempat medium agar
15.	Autoklaf	Mensterilisasi alat dan bahan yang akan digunakan pada metode TPC
16.	<i>Transfer Box</i>	Tempat melakukan metode TPC
17.	Bunsen	Memanaskan peralatan yang akan digunakan agar tetap steril
18.	Inkubator	Menginkubasi bakteri
19.	<i>Hot Plate</i>	Mencampur, memanaskan, dan menghomogenisasi larutan agar
20.	<i>Micropipet</i>	Mengambil larutan dalam jumlah sedikit
21.	Oven	Mensterilisasi alat yang akan digunakan pada metode TPC
22.	pH meter dan pH indikator	Mengukur pH pada kompos
23.	Cawan keramik	Wadah untuk memanaskan kompos dalam oven
24.	Kaca arloji	Wadah untuk menimbang sampel (kompos maupun nutrien agar)
25.	Erlenmeyer	Wadah untuk menampung cairan

### 3.2.2 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi gas sampel berupa campuran N<sub>2</sub>O dalam udara, kompos sebagai bahan pengisi biofilter, nutrisi agar, dan *aquadest*. Perincian bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- **Kompos** yang terdiri dari bahan organik berupa kotoran sapi dan *bulking agent* berupa *cocopeat* dan sekam beras.
- **Gas sampel N<sub>2</sub>O**, dimana gas yang akan digunakan untuk pengujian ini merupakan gas N<sub>2</sub>O dengan konsentrasi sebesar 15000 ppm dalam udara.
- **Nutrien agar** sebagai media agar untuk perhitungan bakteri.
- **Aquadest** sebagai pelarut kompos dalam pengukuran pH serta sebagai pelarut nutrisi agar.

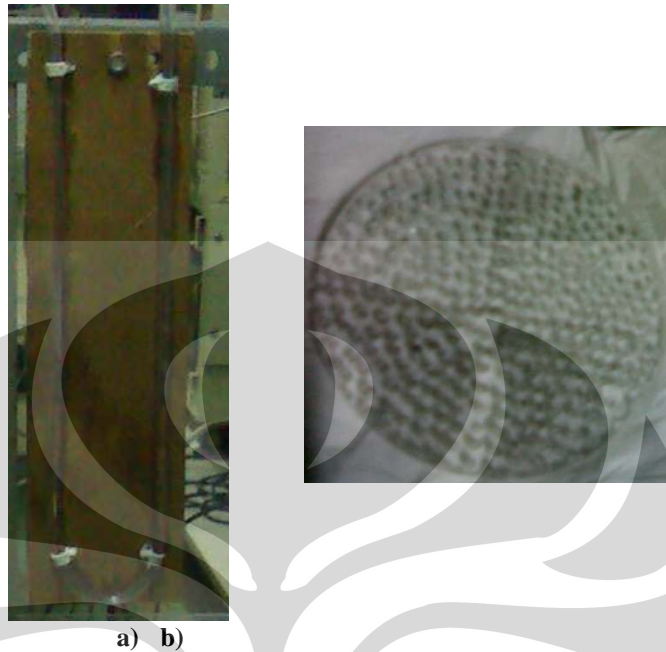
### 3.3 Prosedur Penelitian

#### 3.3.1 Perancangan dan Instalasi Sistem Biofilter

Peralatan biofilter yang digunakan dalam penelitian ini adalah peralatan pada penelitian biofiltrasi sebelumnya oleh Utami dkk. (2009) yang terbuat dari bahan *acrylic* dengan dimensi tinggi kolom 120 cm, diameter luar 8 cm, dan diameter dalam 7,35 cm. Material tersebut dipilih agar dapat mencegah kebocoran seefektif mungkin. Sementara itu, perpipaan dan persambungan pada sistem biofilter terbuat dari *stainless steel* yang memiliki sambungan seminimal mungkin. Penggunaan *stainless steel* sebagai material pada sistem biofilter bertujuan untuk mencegah terjadinya korosi (Yang et al., 2007).

Peralatan biofilter ini juga dilengkapi dengan manometer air tipe U pada bagian atas dan bagian bawah kolom biofilter yang berfungsi sebagai pengukur tekanan untuk mengetahui *pressure drop* yang terjadi di dalam kolom biofilter. Selain itu, untuk memastikan adanya redistribusi gas yang merata di dalam kolom, maka digunakanlah *perforated plates* dari bahan *acrylic* yang diberi lubang-lubang dengan ukuran diameter tiap lubang adalah 2 mm. *Perforated plates* ini digunakan jika kedalaman medium filter  $\geq 80$  cm dan diletakkan pada setengah

kedalaman medium filter yang digunakan. Manometer air tipe U dan *perforated plates* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.3 a) dan b).



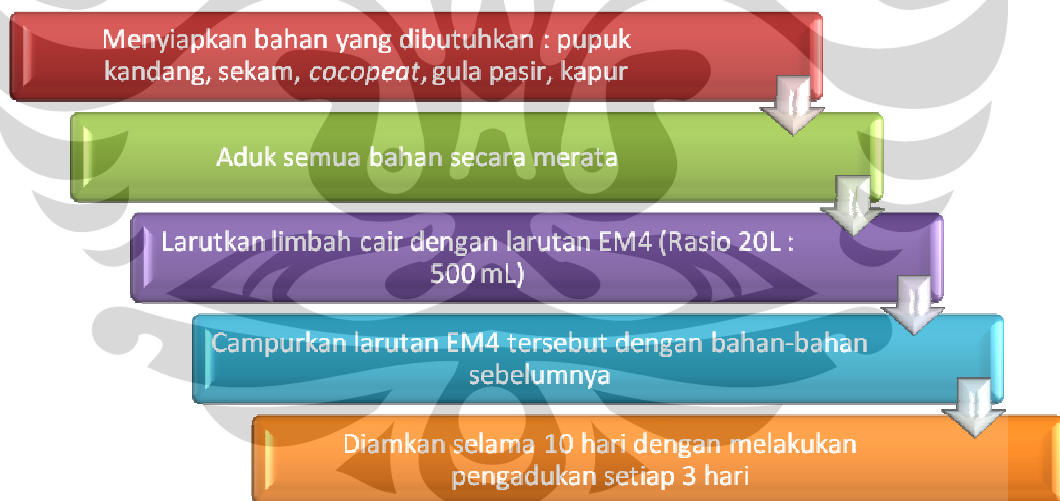
**Gambar 3.3** a) Manometer air tipe U, b) *Perforated plates*

### 3.3.2 Preparasi Medium Filter

Medium filter yang digunakan untuk biofiltrasi ini adalah kompos yang terdiri dari bahan organik berupa kotoran sapi dan *bulking agent* berupa *cocopeat* (sabut kelapa yang telah dikeringkan dan dihancurkan), gula pasir, kapur, dan sekam beras. Kompos yang digunakan berasal dari "Green Lab" Sekolah Alam, Ciganjur. Persiapan kompos sebagai medium filter ini dilakukan dengan pengeringan dan pengayakan, dimana ayakan yang digunakan memiliki 100 *Mesh*. Salah satu tujuan dari pengayakan adalah untuk menghasilkan partikel medium filter yang homogen sehingga dapat mengurangi *pressure drop*. Adapun perincian prosedur pembuatan kompos dapat dilihat pada Gambar 3.4, sesuai dengan langkah-langkah berikut.

- Menyiapkan bahan-bahan yang digunakan berikut:
  - Pupuk kandang dari kotoran sapi: bahan dasar pembuatan kompos

- Sekam dan *cocopeat*: sebagai *bulking agent* kompos. Bahan tersebut dapat meningkatkan adanya ruang kosong, mencegah pematatan, dan memperbesar ventilasi pada sistem biofilter
  - Gula pasir: sebagai sumber glukosa
  - Kapur/kapstan: meningkatkan pH pupuk
  - Dedak: sumber protein mikroba
  - Larutan EM4: membunuh bakteri yang tidak menguntungkan
- Membuat komposisi pembuatan kompos dari bahan-bahan di atas dengan rasio (kg) = 5 pupuk kandang: 2 sekam: 2 *cocopeat*: 2 dedak: 1 gula pasir: ¼ kapur.
  - Mencampur komponen di atas, lalu mengaduknya dengan larutan EM4 (*Effective Microorganism*) 500 mL dan 20 liter air limbah. Penggunaan EM4 bertujuan sebagai bioaktivator untuk mempercepat pengomposan.
  - Setelah dicampur, kompos disekap di dalam terpal selama 10 hari dan dilakukan pengadukan setiap 3 hari dalam 10 hari tersebut.



**Gambar 3.4** Diagram prosedur pengomposan

Persiapan kompos yang sudah jadi untuk medium filter dilakukan dengan pengeringan dan pengayakan, dimana ayakan yang digunakan memiliki ukuran diameter lubang sekitar 2 mm. Salah satu tujuannya adalah untuk menghasilkan partikel medium filter yang homogen sehingga dapat mengurangi *pressure drop*.

Gambar 3.5 adalah diagram prosedur preparasi kompos yang sudah jadi sebelum dimasukkan ke dalam kolom biofilter untuk digunakan dalam biofiltrasi.



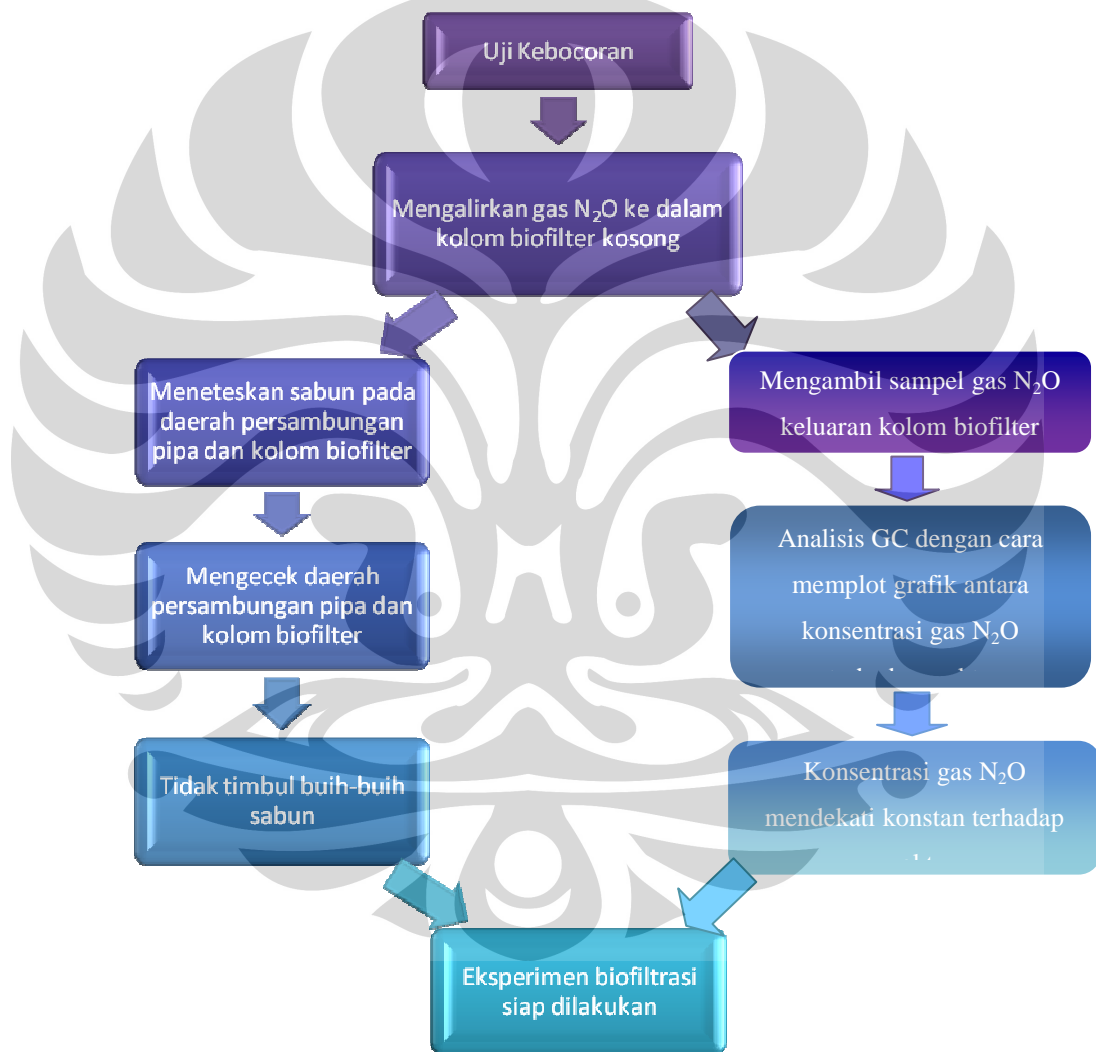
**Gambar 3.5** Skema prosedur preparasi kompos yang sudah jadi sebelum biofiltrasi dilakukan

### 3.3.3 Uji Kebocoran Alat dan Uji Blangko

Uji kebocoran pada biofilter dilakukan untuk menghindari ketidakakuratan data percobaan sehingga diperoleh hasil yang baik. Dengan adanya uji kebocoran, maka dapat dipastikan bahwa konsentrasi gas  $N_2O$  berkurang karena proses adsorpsi dan degradasi, bukan karena kebocoran. Cara yang dilakukan untuk menguji kebocoran adalah dengan meneteskan sabun pada daerah persambungan pipa, kemudian mengalirkan udara dari kompresor ke dalam kolom biofilter. Kebocoran pada sistem biofilter dapat diketahui melalui munculnya gelembung/buih sabun pada daerah kebocoran tersebut. Jika diketahui terjadi kebocoran pada selang atau sambungan pipa, maka dilakukan isolasi/perbaikan pada bagian yang bocor. Sedangkan jika kebocoran terjadi pada komponen/alat tertentu seperti kolom biofilter atau tempat pengambilan sampel maka dilakukan penggantian dengan komponen yang baru untuk menjaga agar sistem tetap berjalan dengan baik.



Selain dengan menggunakan sabun, uji kebocoran juga dapat dilakukan melalui uji blangko. Uji blangko dilakukan dengan cara mengalirkan gas  $N_2O$  ke dalam kolom biofilter kosong, lalu sampel gas  $N_2O$  keluaran kolom biofilter tersebut diambil dan dilakukan analisis pada kromatografi gas. Dari hasil kromatografi gas, diplot grafik antara konsentrasi gas  $N_2O$  terhadap waktu. Jika tidak terjadi kebocoran pada alat biofiltrasi ini, maka akan dihasilkan suatu grafik dimana konsentrasi gas  $N_2O$  mendekati konstan terhadap waktu. Tahapan pengerjaan uji kebocoran alat biofilter dapat dilihat pada Gambar 3.6.



**Gambar 3.6** Skema uji kebocoran alat dengan uji sabun (rute kiri) dan uji blangko (rute kanan)

Uji blangko dilakukan untuk memastikan bahwa terjadinya kenaikan luas di bawah *peak* hasil analisis GC dikarenakan oleh tidak adanya biofiltrasi oleh kompos. Jika selama waktu tertentu tidak terjadi penurunan konsentrasi gas hasil

analisis GC, maka dapat disimpulkan bahwa penurunan konsentrasi saat memakai medium filter merupakan hasil dari biofiltrasi.

### 3.3.4 Kalibrasi Laju Alir dan Gas N<sub>2</sub>O

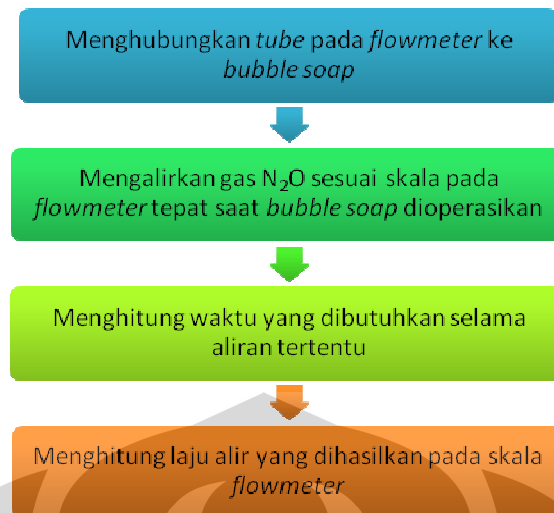
Sebelum digunakan untuk eksperimentasi biofiltrasi, *flowmeter* yang digunakan harus dikalibrasi. Tujuan dari proses kalibrasi ini adalah mendapatkan laju alir aktual (sesungguhnya) dari gas yang dialirkan ke dalam sistem biofilter. Hal ini dikarenakan laju alir yang diset pada *flowmeter* belum tentu menghasilkan laju alir yang sama, tergantung pada jenis *flowmeter* serta jenis gas yang digunakan.

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

- Menghubungkan *tube* pada *flowmeter*, dimana *tube* bagian bawah dihubungkan ke gas N<sub>2</sub>O sedangkan *tube* bagian atas dihubungkan ke kolom biofilter, dimana keluaran kolom berhubungan dengan *bubble soap*.
- Mengalirkan gas N<sub>2</sub>O sesuai dengan laju alir yang diset pada *flowmeter*, sambil menekan pipet pada botol gelembung gas tepat ketika gas dialirkan, sampai terlihat ada gelembung sabun yang berjalan di sepanjang botol.
- Menghitung dan mencatat waktu yang dibutuhkan gelembung sabun untuk mencapai skala dari 0 sampai 5 cc, untuk berbagai kondisi laju alir yang diset pada *flowmeter*.
- Menghitung laju alir aktual dengan persamaan berikut.

$$Q \left( \frac{\text{cc}}{\text{menit}} \right) = \frac{5 \text{ cc}}{t(\text{s})} \times \frac{60 \text{ s}}{\text{menit}} \dots \dots \dots (3.1)$$

Diagram alir prosedur kalibrasi laju alir dapat dilihat pada Gambar 3.7.



**Gambar 3.7** Diagram alir prosedur kalibrasi laju alir

Selanjutnya, dilakukan kalibrasi gas  $N_2O$  dengan tujuan untuk mengetahui volum dan konsentrasi aktual gas  $N_2O$ , serta waktu retensi dan letak *peak* udara dan gas  $N_2O$ . Langkah-langkah yang dilakukan pada uji kalibrasi gas  $N_2O$  ini adalah sebagai berikut:

- Mengalirkan gas  $N_2O$  ke dalam *gas sampling*.
- Sampel diambil dari *gas sampling* dengan menggunakan *syringe*, dimana volum gas yang diambil divariasikan dari 0,1; 0,3; 0,7; dan 1,0 mL.
- *Syringe* diinjeksikan ke dalam *Gas Chromatography* (GC) yang akan mendeteksi keberadaan gas beserta konsentrasinya.
- Membuat plot grafik antara luas *peak*  $N_2O$  terhadap volum gas  $N_2O$ .

Pengambilan data pada kalibrasi gas  $N_2O$  dilakukan sebanyak dua kali/ duplikasi dengan tujuan untuk memastikan keakuratan hasil yang diperoleh.

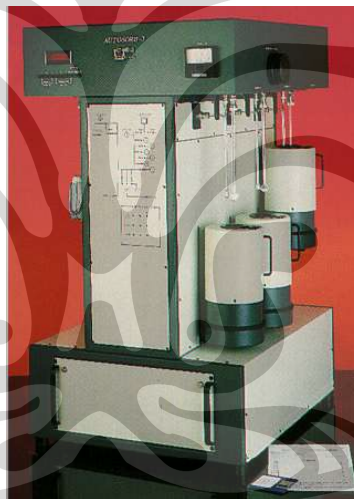
### 3.3.5 Pengujian Karakteristik Kompos

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

rumah tangga, serta *bulking agent* berupa sekam dan *cocopeat*. Adapun tujuan dari uji BET adalah untuk mengetahui area permukaan spesifik dan diameter pori dari medium filter yang digunakan. Sementara itu, tujuan dari uji komposisi unsur-unsur di dalam kompos adalah untuk membandingkan karakteristik dari kedua medium kompos tersebut.

### 3.3.5.1 Uji BET

Uji BET dilakukan dengan menggunakan alat *Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption* yang dilakukan oleh laboran di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (Lab. RPKA). Hasil yang diharapkan dari uji BET ini adalah area permukaan spesifik dan diameter pori dari medium yang diuji. Alat yang digunakan untuk uji BET (Autosorb-6B) dapat dilihat pada Gambar 3.8.



**Gambar 3.8** *Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption*

### 3.3.5.2 Uji Komposisi Unsur-unsur di dalam Kompos

Uji komposisi unsur-unsur di dalam kompos dilakukan terhadap kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing. 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 oleh Laboratorium Sucofindo, Cibitung.

### 3.4 Pengujian Kinerja Biofilter

Pada tahapan ini, ada tiga bagian besar pengujian yang akan dilakukan yakni pengujian dalam hal kemampuan mereduksi gas  $N_2O$  dan dalam hal perkembangan jumlah mikroba sebelum dan setelah biofiltrasi pada kompos, serta pengujian sifat fisik dan kimia kompos sebelum dan setelah biofiltrasi. Pengujian kinerja biofilter pada penelitian ini dilakukan melalui eksperimen dengan sistem aliran *batch* terhadap variasi yang akan dilakukan. Variasi yang dilakukan antara lain adalah variasi faktor operasi seperti laju alir gas  $N_2O$  dan variasi kedalaman medium filter.

Pengambilan data pada uji kinerja biofilter dilakukan dengan memperhatikan prinsip randomisasi dan replikasi. Adapun prosedur yang dilakukan pada eksperimen biofiltrasi gas  $N_2O$  dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

#### 3.4.1 Variasi Laju Alir Gas $N_2O$

- 1) Melakukan pengukuran densitas, uji pH, *water content*, dan porositas pada kompos sebelum digunakan sebagai medium filter biofiltrasi.
- 2) Menyiapkan dan menimbang medium filter yaitu kompos yang telah dikeringkan dan diayak dengan saringan berdiameter 2 mm ( $w = 945$  g).
- 3) Memasukkan medium filter tersebut ke dalam kolom biofilter dan mengukur kedalaman medium filter tersebut.
- 4) Mengalirkan gas sampel dengan kandungan  $N_2O$  sebesar 15000 ppm dalam udara dengan variasi laju alir sebagai berikut: 73,48 ; 88,08 ; 103,26 ; 128,01 ; 185,89 ; 233,3 cc/menit untuk dilakukan biofiltrasi.
- 5) Membaca perbedaan tekanan kolom (bagian atas dan bawah kolom) yang terukur pada manometer air sebelum dan setelah biofiltrasi.
- 6) Mengambil gas sampel yang telah dibiofiltrasi dengan *syringe* untuk dianalisis pada kromatografi gas.
- 7) Mengambil sampel kompos setelah biofiltrasi dimana laju alir menghasilkan % RE optimum untuk kemudian diuji melalui TPC (*Total Plate Count*) dan SEM (*Scanning Electron Microscope*), serta untuk uji pH, *water content*, dan porositas.

### 3.4.2 Variasi Kedalaman Medium Filter

- 1) Menyiapkan dan menimbang medium filter yaitu kompos yang telah dikeringkan dan diayak dengan saringan berdiameter 2 mm ( $w = 945$  g).
- 2) Memvariasikan kedalaman medium filter dengan variasi penambahan berat medium sebesar 189 g (60 cm), 378 g (70 cm), 567 g (80 cm), dan 945 g (100 cm).
- 3) Memasukkan medium filter tersebut ke dalam kolom biofilter dan mengukur kedalaman medium filter tersebut.
- 4) Menggunakan *perforated plates* untuk ketinggian medium  $\geq 80$  cm dengan posisi *perforated plates* pada setengah massa medium filter yang digunakan.
- 5) Mengalirkan gas sampel ke dalam kolom biofilter dengan laju alir optimal yang telah diperoleh pada eksperimen pertama.
- 6) Membaca perbedaan tekanan kolom (bagian atas dan bawah kolom) yang terukur pada manometer air sebelum dan setelah biofiltrasi.
- 7) Mengambil gas sampel yang telah dibiofiltrasi dengan *syringe* untuk dianalisis pada kromatografi gas.
- 8) Mengambil sampel kompos setelah biofiltrasi dimana kedalaman medium filter menghasilkan % RE optimum untuk kemudian diuji melalui TPC (*Total Plate Count*) dan SEM (*Scanning Electron Microscope*), serta untuk uji pH, *water content*, dan porositas.

### 3.4.3 Pengujian Sifat Fisik dan Kimia Kompos

Seperti telah disebutkan sebelumnya, pengujian sifat fisik dan kimia kompos yang dilakukan antara lain adalah perhitungan densitas kompos, pengukuran pH, pengukuran *water content* kompos, dan porositas kompos. Prosedur yang dilakukan pada uji sifat fisik dan kimia kompos antara lain adalah sebagai berikut.

#### 3.4.3.1 Perhitungan densitas kompos

- 1) Menyiapkan dan menimbang *beaker glass* kosong berukuran 50 mL.

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

#### 3.4.3.2 Pengukuran pH

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

#### 3.4.3.3 Pengukuran *water content* kompos

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

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

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

#### 3.4.3.4 Pengukuran porositas kompos

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

$$\emptyset = \frac{V_{\text{kompos}}}{V_{\text{kolom}}} = \frac{V_{\text{kompos}}}{\pi \times \text{jari-jari}_{\text{tabung}}^2 \times \text{tinggi}_{\text{tabung}}} \dots \dots \dots (3.3)$$

### 3.5 Data Penelitian

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

1. Konsentrasi gas N<sub>2</sub>O sebelum dan sesudah dilakukan biofiltrasi.
2. Jumlah mikroorganisme yang terdapat pada medium filter sebelum dan setelah dilakukan biofiltrasi.
3. Sifat fisik dan kimia kompos sebelum dan setelah biofiltrasi yang meliputi densitas, pH, *water content*, dan porositas.
4. Area permukaan spesifik dan diameter pori dari medium filter yang diuji.
5. Komposisi unsur-unsur yang terdapat di dalam kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing.



### 3.6 Pengukuran dan Analisis

#### 3.6.1 Analisis Gas N<sub>2</sub>O

Konsentrasi efluen gas N<sub>2</sub>O kemudian diukur dengan menggunakan kromatografi gas (GC) jenis TCD. Spesifikasi kromatografi gas (GC) yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 3.2 Spesifikasi kromatografi gas dalam penelitian

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

Data yang diambil adalah luas *peak* dari gas N<sub>2</sub>O yang datanya akan diplot terhadap waktu. Prosedur pengoperasian GC dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Diagram alir prosedur pengoperasian GC

### 3.6.2 Analisis perkembangan bakteri

Perkembangan bakteri 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*).

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

Metode yang digunakan untuk melakukan analisis komunitas mikroorganisme pada sampel kompos dalam biofiltrasi adalah metode *Total Plate Count* (TPC). *Total Plate Count* dilakukan sebelum dan sesudah proses biofiltrasi untuk menguji seberapa besar aktivitas degradasi dengan mengetahui jumlah bakteri awal dan akhirnya. Teknik *Total Plate Count* (TPC) mempunyai keterbatasan, 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 dilakukan pada uji degradasi bakteri adalah 1:10 hingga 1:10<sup>9</sup> agar keakuratan perhitungan jumlah koloni bakteri dapat terjaga. Langkah-langkah pengencerannya adalah sebagai berikut.

- Mengambil sampel kompos sebanyak 9,7 g dan melarutkannya ke dalam *aquadest* sebanyak 90 mL untuk membuat rasio dilusi 1:10.
- Mengambil sampel kompos tersebut sebanyak 1 mL kemudian menambahkan air *aquadest* sebanyak 9 mL untuk membuat rasio dilusi 1:100.
- Mengambil 1 mL larutan dilusi 1:100 kemudian menambahkan *aquadest* sebanyak 9 mL untuk membuat rasio dilusi 1:1000.
- Mengulangi langkah di atas hingga diperoleh larutan dilusi kompos dengan rasio dilusi 1:10<sup>9</sup>.
- Menguji larutan-larutan tersebut dengan metode *Total Plate Count* hingga perhitungan jumlah bakteri.

Adapun langkah-langkah dalam pembuatan medium agar adalah sebagai berikut.

- Melarutkan bubuk nutrien agar sebanyak 2,3 g kemudian menambahkan air *aquadest* sebanyak 100 mL.
- Mendidihkan larutan tersebut dengan agitasi pada *hot plate* hingga larutan homogen.
- Mendinginkan larutan tersebut selama 1 menit.
- Mensterilisasi dengan autoklaf sebelum digunakan selama 15 menit.

Langkah-langkah pelaksanaan metode *Total Plate Count* adalah sebagai berikut.

- Mengambil dan memasukkan larutan dilusi yang sesuai sebanyak 1 mL (kocok larutan sebelumnya) ke dalam cawan petri.
- Menuangkan larutan agar ke dalam cawan petri sebanyak 15 mL.
- Memutar cawan petri membentuk angka “8” sehingga larutan dilusi dan larutan agar dapat tersebar secara merata pada cawan petri.
- Memasukkan cawan petri ke dalam inkubator dengan suhu 35°C selama dua hari.
- Menghitung jumlah koloni yang ada pada cawan petri dengan bantuan mikroskop atau kaca pembesar. Perhitungan jumlah bakteri per g dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

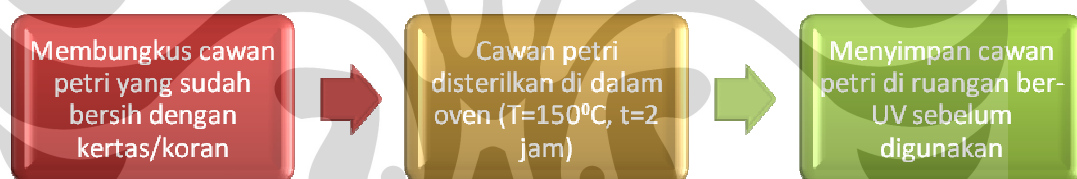
$$\Sigma \text{bakteri} \left( \frac{\text{CFU}}{\text{g}} \right) = \frac{\text{Jumlah koloni bakteri (CFU)}}{\text{Volume pengenceran} \cdot \text{volume sampel pada cawan petri (mL)}} \times \frac{90 \text{ mL}}{\text{massa sampel kompos awal (g)}} \quad (3.4)$$

Dalam metode TPC, setiap alat dan bahan yang akan digunakan harus berada dalam keadaan steril dan aseptis agar bakteri yang terdapat pada sampel yang akan diujicoba tidak terkontaminasi. 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 autoklaf. Metode sterilisasi ini memiliki suhu efektif 121°C pada tekanan tinggi dengan

waktu standar 15 menit. Cara ini dipakai untuk melakukan sterilisasi bahan-bahan yang digunakan untuk uji TPC. Hal ini disebabkan 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 150°C selama 2 jam. Alat yang digunakan pada metode ini adalah oven. Metode ini biasanya digunakan untuk mensterilisasi alat-alat laboratorium. Berikut adalah penjabaran dari kedua metode sterilisasi yang digunakan.

- **Sterilisasi Alat**

Pada metode analisis TPC, digunakan cawan petri sebagai tempat medium agar untuk mengetahui jumlah bakteri yang ada. Penggunaan cawan petri harus dalam kondisi steril. Gambar 3.10 adalah metode sterilisasi cawan petri yang akan dilakukan.



Gambar 3.10 Metode sterilisasi cawan petri

- **Sterilisasi Bahan**

Bukan hanya alat saja yang harus steril pada metode TPC ini, melainkan segala bahan yang digunakan selain sampel yang diuji juga harus berada dalam keadaan steril sehingga dapat dipastikan bahwa jumlah mikroba yang terhitung dalam metode TPC berasal dari sampel yang akan diuji dan tanpa adanya kontaminasi. Gambar 3.11 di bawah ini menunjukkan metode sterilisasi terhadap bahan-bahan yang akan digunakan.



**Gambar 3.11** Metode sterilisasi bahan-bahan yang akan digunakan

- **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 dan penggunaan alkohol terlebih dahulu. Pada langkah ini sampel yang akan diuji dipindahkan ke medium agar yang sudah dibuat.

### 3.6.2.2 Uji SEM (Scanning Electron Microscope)

SEM merupakan salah satu jenis mikroskop elektron yang dapat digunakan untuk melihat permukaan sampel dengan cara *scanning*. Sampel akan di-*scan* dengan tumbukan energi tinggi dari elektron-elektron yang bergerak secara acak. Kemudian, elektron-elektron akan berinteraksi dengan atom dan membuat sampel menghasilkan sinyal yang mengandung informasi mengenai topografi permukaan sampel, komposisi, dan properti lainnya seperti konduktivitas elektrik. Oleh karena itu, peningkatan jumlah mikroba sebelum dan setelah biofiltrasi dapat diperkuat dari hasil uji kompos menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) untuk melihat morfologi kompos.

Uji SEM terhadap sampel kompos dilakukan di Laboratorium Metalurgi Puspipstek, Serpong dengan menggunakan *Analytical Scanning Electron Microscope JEOL JSM-6390A*. Pertama-tama, sampel kompos di-*coating* terlebih dahulu selama 30 detik dengan menggunakan platina. Hal ini perlu dilakukan karena sampel kompos bersifat non-konduktif. Gambar 3.12 di bawah ini menunjukkan alat yang digunakan dalam proses *coating* sampel kompos.



**Gambar 3.12** Alat yang digunakan dalam proses *coating*



## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas berbagai hasil dan analisa terhadap setiap langkah yang dilakukan dalam penelitian sehingga diperoleh suatu kesimpulan yang sesuai dengan tujuan penelitian. Pembahasan akan dimulai dari tahap perancangan dan instalasi sistem biofilter, tahap preparasi medium filter, tahap persiapan eksperimen, dan tahap eksperimen biofiltrasi.

#### 4.1 Perancangan dan Instalasi Sistem Biofilter

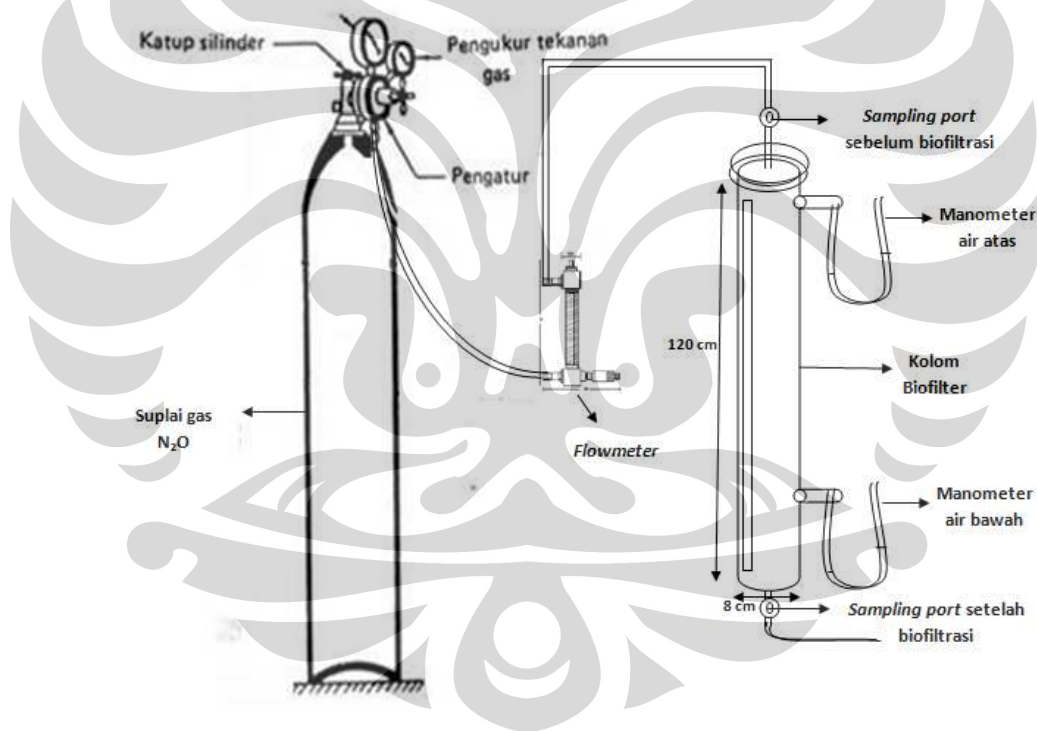
Peralatan biofilter yang digunakan dalam penelitian ini sama dengan peralatan biofilter yang digunakan oleh Utami dkk. (2009), dimana sistem aliran biofiltrasi beroperasi secara *batch*. Peralatan biofilter ini terbuat dari *acrylic* dengan dimensi tinggi kolom 120 cm, diameter dalam 7,35 cm, dan tebal bahan 0,325 cm. Adapun sistem biofilter yang digunakan dalam penelitian terdiri dari tabung gas N<sub>2</sub>O sebagai sumber gas polutan yang akan dibiofiltrasi, *flowmeter* sebagai pengatur laju alir gas N<sub>2</sub>O, kolom biofilter sebagai tempat terjadinya biofiltrasi, 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 (Pagans, 2005).

Pada penelitian ini, peralatan biofilter telah dilengkapi dengan manometer air tipe U pada bagian atas dan bawah kolom biofilter yang berfungsi sebagai pengukur tekanan untuk mengetahui *pressure drop* yang terjadi di dalam kolom biofilter. Hal ini mengingat *pressure drop* berhubungan dengan adanya resistansi aliran gas yang melewati medium filter (Kinney et.al., 1996; Mohseni et.al., 1998). Resistansi aliran gas terjadi karena akumulasi pertumbuhan mikroorganisme selama biofiltrasi yang menyebabkan terjadinya perubahan pada karakteristik medium seperti reduksi pori interpartikel dan kompaksi medium filter alami.

Selain itu, peralatan biofilter ini juga ditambahkan dengan *perforated plates* dengan tujuan untuk memastikan adanya redistribusi gas yang merata di

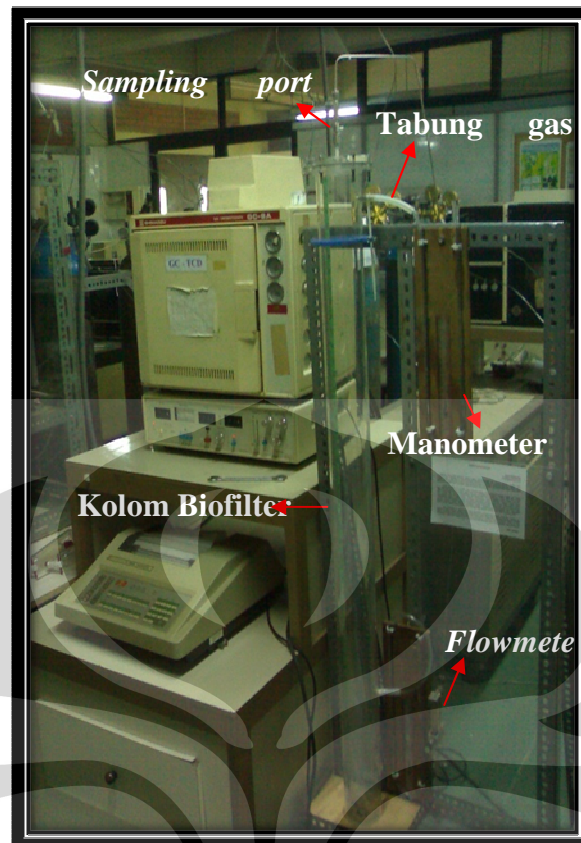
dalam kolom biofilter sehingga distribusi gas dalam kolom lebih homogen (Taghipour et al.,2007; Hong dan Park, 2004; Liu et al.,2004). *Perforated plates* digunakan pada kedalaman medium filter  $\geq 80$  cm dan dipasang pada setengah kedalaman medium dengan menggunakan basis massa medium filter. *Perforated plates* ini terbuat dari bahan *acrylic* yang diberi lubang-lubang dengan ukuran diameter tiap lubang adalah 2 mm (Bina et al., 2004).

Selanjutnya, perancangan alat biofilter dilakukan berdasarkan skema alat yang telah dipaparkan pada Bab 3 sehingga diperoleh disain kolom biofilter yang sesuai dengan keperluan penelitian. Gambar 4.1 berikut menunjukkan hasil perancangan alat biofilter dalam bentuk 3 dimensi, sedangkan Gambar 4.2 menunjukkan peralatan biofilter yang digunakan dalam penelitian.



**Gambar 4.1** Hasil perancangan alat biofilter dalam bentuk 3 dimensi





Gambar 4.2 Peralatan biofilter yang digunakan dalam penelitian

#### 4.2 Preparasi Medium Filter

Medium filter yang digunakan dalam penelitian ini adalah medium filter alami, yaitu kompos karena kompos diketahui memiliki retensi air yang baik dan kandungan zat organik yang cocok dalam mereduksi gas  $N_2O$ . Selain itu diketahui pula bahwa nutrisi pada kompos terbentuk melalui mineralisasi dan tersebar ke dalam *biofilm* untuk menggantikan nutrisi yang telah dikonsumsi oleh mikroba (Liu et al., 2004).

Adapun bahan organik yang terkandung dalam kompos dapat berasal dari limbah/hasil pertanian dan non-pertanian (limbah kota dan limbah industri) (Kurnia et al., 2001). Limbah yang berasal dari hasil pertanian dapat berupa sisa tanaman (jerami atau brangkas), sisa hasil pertanian (sekam padi, kulit kacang tanah, ampas tebu, atau belotong), pupuk kandang (kotoran sapi, kerbau, ayam, itik, atau kuda), ataupun pupuk hijau.

Dalam penelitian biofiltrasi ini, bahan organik penyusun kompos yang dipilih adalah kotoran sapi. Alasan pemilihan ini disebabkan karena kotoran sapi

memiliki kandungan air yang sangat besar yaitu sekitar 60–85%, dimana hal ini sangat penting bagi kelangsungan hidup dan metabolisme mikroorganisme serta dapat turut memberikan kontribusi pada kapasitas *buffer* medium filter (Van Lith et al., 1997). Kandungan kelembaban yang kurang dapat mengakibatkan kekeringan dan menimbulkan celah pada medium 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 medium filter, menghambat laju reaksi, adanya tekanan balik karena pengurangan volum ruang kosong, dan gas *channeling* dalam medium filter.

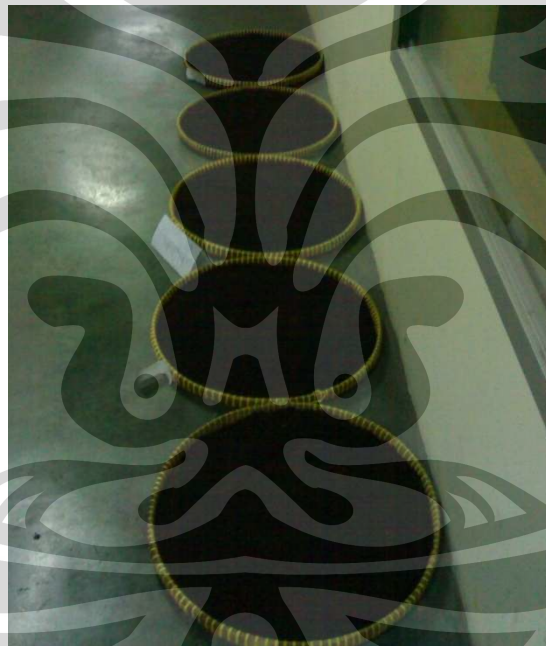
Kelebihan lain dari kompos kotoran sapi adalah aksesibilitas kotoran sapi di petani/ peternak lebih tinggi apabila dibandingkan dengan kotoran ternak lainnya (<http://www.pustaka-deptan.go.id/publikasi/wr276057.pdf>). Adanya penambahan *bulking agent* seperti serbuk gergaji, serutan kayu atau jerami, *cocopeat*, maupun sekam beras dapat membantu penyerapan kelebihan air dan mengatur keseimbangan rasio C/N pada kompos berbahan organik kotoran sapi. Mikroba akan menggunakan unsur C untuk mendapatkan energi, serta memanfaatkan unsur N, P, dan K untuk pertumbuhan, metabolisme, dan reproduksinya (Biddlestone dkk., 1994).

Tahap preparasi medium filter dibagi menjadi dua bagian, yaitu pembuatan medium filter (kompos) dan persiapan lanjutan untuk menjadikan kompos yang sudah ada menjadi medium filter pada biofiltrasi. Adapun persiapan lanjutan tersebut meliputi kegiatan pengeringan kompos pada suhu ruang dan pengayakan kompos. Pengeringan kompos dilakukan di dalam ruang tertutup dengan temperatur ruang sekitar 33°C dan humiditas ruangan 70%.

Proses pengeringan dilakukan dengan menggunakan tampah yang terbuat dari bambu sehingga memudahkan proses pengeringan kompos dibanding dengan menggunakan wadah dengan bahan dasar plastik. Proses pengeringan kompos ini dilakukan selama tujuh hari hingga dihasilkan kompos yang agak kering dan

dilakukan pengadukan pada hari yang kelima agar pengeringan terjadi secara merata. Tujuan dilakukannya pengeringan adalah untuk mendapatkan medium filter dengan kelembaban yang sesuai untuk pertumbuhan mikroorganisme pendegradasi polutan. Kelembaban yang direkomendasikan untuk medium filter organik berkisar antara 40-60% (berdasarkan berat) (Van Lith et al., 1997).

Setelah proses pengeringan berakhir, dilakukan pengayakan terhadap kompos tersebut dengan menggunakan ayakan berdiameter 2 mm. Pengayakan ini bertujuan untuk menghasilkan partikel kompos yang homogen dan untuk mencegah hambatan dari medium filter (Yang, 2007). Proses pengeringan kompos di dalam tampah dapat dilihat pada Gambar 4.3. Sementara itu, proses pengadukan dan pengayakan kompos dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan 4.5.



**Gambar 4.3** Proses pengeringan kompos dengan kondisi  $T = 33$



**Gambar 4.4** Proses pengadukan kompos



**Gambar 4.5** Proses pengayakan kompos

Hasil medium biofilter 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 berupa kompos tidak perlu diberi perlakuan pemanasan seperti pada zeolit karena akan membunuh mikroba yang terdapat pada kompos dan menjadikan pH kompos menjadi sangat basa (pH 10-11). Mikroba tidak dapat bekerja dengan baik pada rentang pH ini, sehingga prosedur ini hanya dilakukan jika kondisi tanah bersifat sangat asam, misalnya tanah gambut dari rawa.

### 4.3 Persiapan Eksperimen

#### 4.3.1 Uji Kebocoran dan Uji Blangko

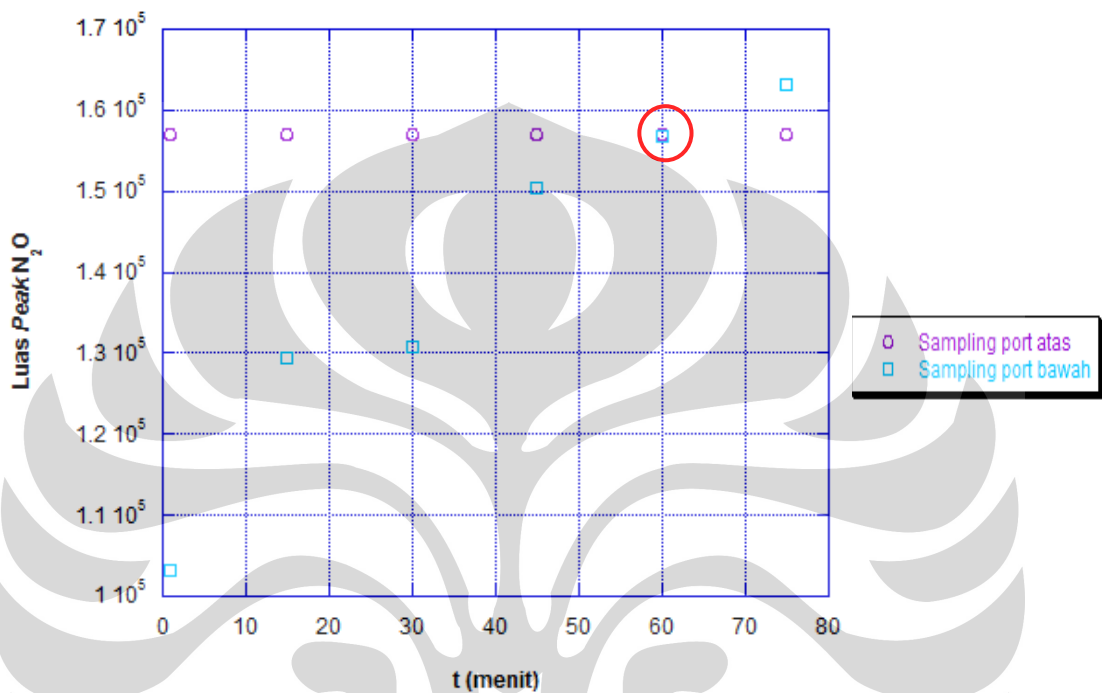
Uji kebocoran dilakukan untuk memastikan bahwa penurunan luas di bawah *peak* saat uji kinerja biofilter disebabkan oleh biofiltrasi akibat adanya adsorpsi dan degradasi, bukan karena kebocoran. Uji kebocoran juga dilakukan untuk menghindari ketidakakuratan alat. Pengujian kebocoran alat dilakukan dengan meneteskan air sabun pada sambungan-sambungan pipa dan daerah 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. Gambar 4.7 a) menunjukkan kebocoran yang terjadi pada bagian atas perpipaan kolom biofilter, sedangkan Gambar 4.7 b) menunjukkan tidak adanya kebocoran pada bagian tersebut setelah sambungan diperbaiki.



a) b)

**Gambar 4.7** a) Terjadi kebocoran pada bagian atas kolom biofilter, b) Tidak terjadi kebocoran

Uji kebocoran juga dilakukan melalui uji blangko dengan cara mengalirkan gas  $N_2O$  ke dalam kolom biofilter kosong, kemudian dicek luas *peak*  $N_2O$  pada *sampling port* atas dan *sampling port* bawah setiap 15 menit. Gambar 4.8 menunjukkan hasil uji blangko tersebut.



Gambar 4.8 Uji blangko biofilter

Data untuk uji blangko dapat dilihat pada Lampiran 1. Berdasarkan Gambar 4.8 di atas, dapat dilihat bahwa konsentrasi  $N_2O$  pada *sampling port* bawah terus meningkat dari menit ke-1 hingga mencapai sekitar menit ke-60. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi gas di dalam kolom biofilter belum homogen hingga sekitar menit ke-60. Artinya, gas  $N_2O$  memerlukan waktu untuk berdistribusi di dalam kolom biofilter dari *inlet* hingga menuju *sampling port* bawah. Setelah mencapai sekitar menit ke-60, maka konsentrasi gas  $N_2O$  di dalam kolom selama waktu pengamatan dapat dikatakan konstan. Hal ini dapat terlihat dengan membandingkan grafik tersebut dengan grafik konsentrasi gas  $N_2O$  yang diperoleh pada *sampling port* atas. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa alat biofilter tidak bocor dan siap digunakan dalam penelitian dan terjadinya penurunan konsentrasi saat penelitian nanti bukan disebabkan oleh adanya

kebocoran. Sesuai dengan Gambar 4.8 di atas, apabila konsentrasi (luas *peak*) di atas dan di bawah sama, maka dapat dikatakan bahwa tidak terjadi biofiltrasi tanpa adanya medium filter. Dengan demikian dapat diasumsikan bahwa berkurangnya konsentrasi gas N<sub>2</sub>O terjadi karena adanya fenomena adsorpsi dan degradasi gas oleh medium biofilter.

#### 4.3.2 Kalibrasi Laju Alir dan Gas N<sub>2</sub>O

Sebelum digunakan untuk eksperimen biofiltrasi, *flowmeter* yang digunakan harus dikalibrasi terlebih dahulu. Tujuan dari proses kalibrasi ini adalah mendapatkan laju alir aktual (sesungguhnya) dari gas yang dialirkan ke dalam sistem biofilter. Hal ini dikarenakan laju alir yang diset pada *flowmeter* belum tentu menghasilkan laju alir yang sama, tergantung pada jenis *flowmeter* serta jenis gas yang digunakan. Proses kalibrasi ini dilakukan dengan menggunakan *bubble soap* yaitu suatu alat berupa botol kaca berisi sabun yang digunakan untuk mengukur laju alir aktual dari *flowmeter*.

Kalibrasi dilakukan dengan cara mengalirkan gas N<sub>2</sub>O melalui *bubble soap*, kemudian menekan pipet pada *bubble soap* sampai terlihat ada gelembung sabun yang bergerak ke atas di sepanjang *bubble soap*. Selanjutnya, pengukuran dilakukan dengan cara menghitung lamanya waktu yang dibutuhkan oleh gelembung sabun tersebut untuk mencapai skala dari 0 sampai 5 cc. Lamanya waktu dapat diukur dengan menggunakan *stopwatch*. Kalibrasi ini dilakukan pada berbagai kondisi laju alir yang diset pada *flowmeter* sehingga diketahui laju alir aktualnya. Setelah memperoleh lamanya waktu yang dibutuhkan, laju alir aktual dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.1 berikut:

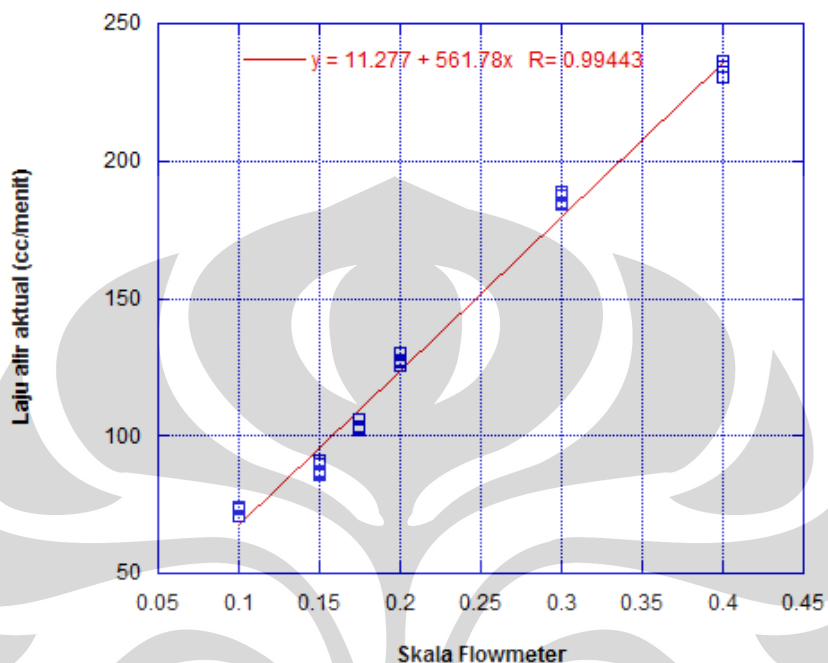
$$Q \left( \frac{\text{cc}}{\text{menit}} \right) = \frac{5 \text{ cc}}{t(\text{s})} \times \frac{60 \text{ s}}{\text{menit}} \dots \dots \dots (3.1)$$

dengan: Q = laju alir aktual (cc/menit)

t = waktu yang dibutuhkan oleh gelembung sabun untuk mencapai skala dari 0 sampai 5 cc (detik)

Pengambilan data pada uji kalibrasi laju alir ini dilakukan secara replikasi dengan tujuan untuk menjaga keakuratan data. Data yang diperoleh untuk

kalibrasi laju alir gas  $N_2O$  pada *flowmeter* dapat dilihat pada Lampiran 2. Selanjutnya, data-data tersebut diplot antara laju alir aktual yang diperoleh dalam perhitungan terhadap skala yang tertera pada *flowmeter* ke dalam bentuk grafik seperti yang terlihat pada Gambar 4.9 berikut ini.



Gambar 4.9 Kalibrasi laju alir gas  $N_2O$  pada *flowmeter*

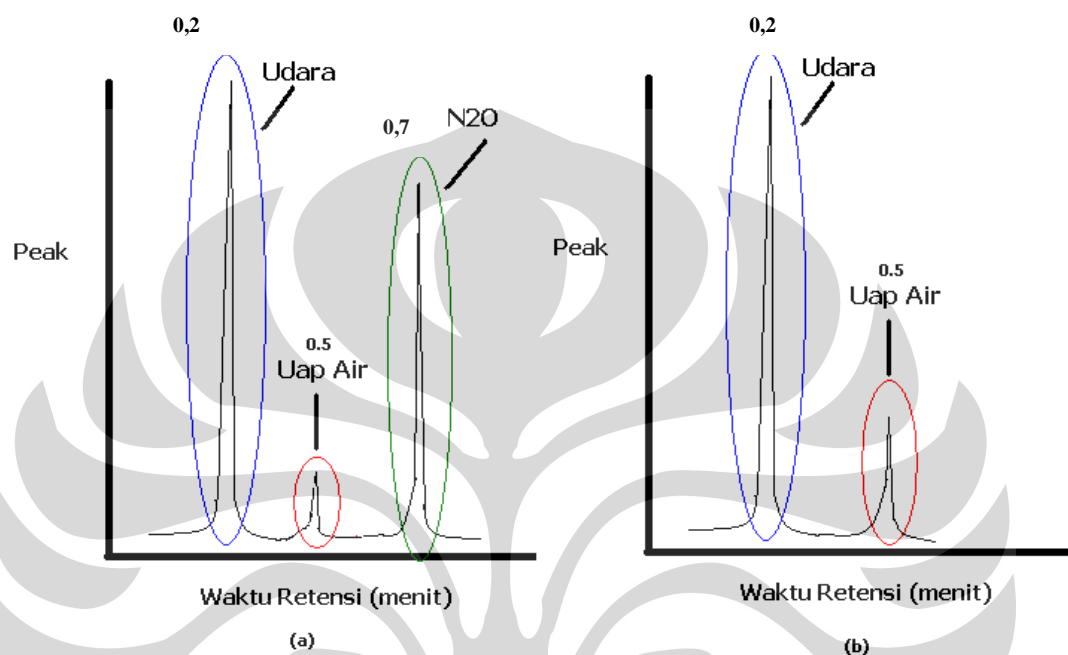
Dari Gambar 4.9, dapat dilihat bahwa grafik kalibrasi laju alir gas  $N_2O$  pada *flowmeter* memiliki kecenderungan garis linear. Apabila diberi *trendline* garis linear, maka koefisien korelasinya adalah 0,994. Suatu grafik dapat dikatakan memiliki kecenderungan linear apabila  $R^2 \geq 0,90$ . Maka dapat disimpulkan bahwa kalibrasi laju alir gas  $N_2O$  pada *flowmeter* ini dapat digunakan dalam penelitian biofiltrasi selanjutnya.

Setelah melakukan kalibrasi laju alir gas  $N_2O$  pada *flowmeter*, dilakukan pula kalibrasi gas  $N_2O$  dengan tujuan untuk mengetahui letak *peak*  $N_2O$ , waktu retensi udara dan gas  $N_2O$ , serta volum dan konsentrasi aktual gas  $N_2O$ . Konsentrasi gas sampel  $N_2O$  belum dapat diketahui sehingga untuk sementara gas  $N_2O$  dianggap 100% dengan menyesuaikannya terhadap luas *peak* yang tertera dari pembacaan GC.

Kalibrasi gas  $N_2O$  ini dilakukan dengan cara mengalirkan gas  $N_2O$  ke dalam *gas sampling*, kemudian sampel diambil dari *gas sampling* dengan



menggunakan *syringe*. Selanjutnya, *syringe* diinjeksikan ke dalam *Gas Chromatography* (GC) yang akan mendeteksi keberadaan gas beserta konsentrasinya. Hasil yang terbaca berupa *peak* dengan luas dan waktu tertentu. Contoh pembacaan hasil kromatograf pada sampel gas  $N_2O$  dengan volum 1,0 mL dapat dilihat pada Gambar 4.10 berikut ini.

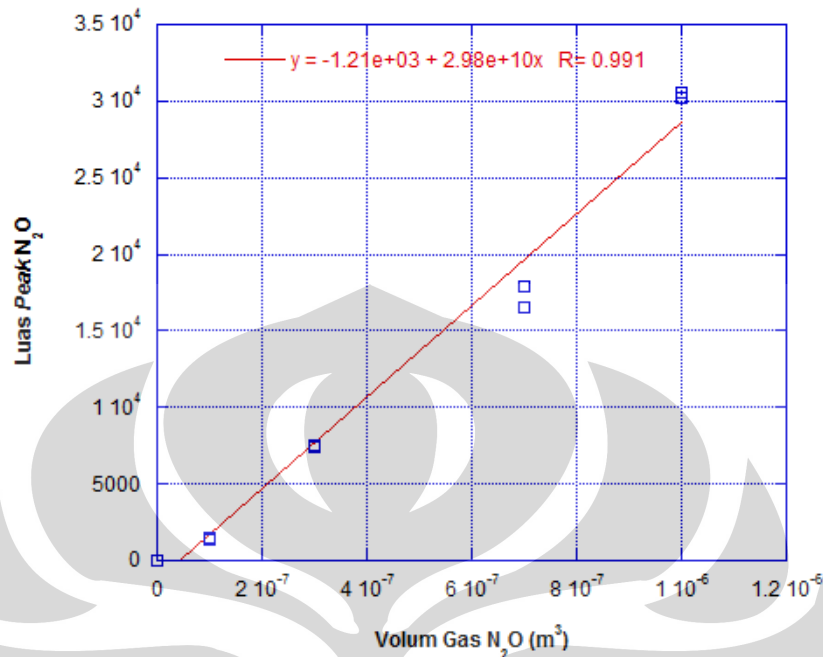


**Gambar 4.10** Sampel grafik yang terdeteksi pada a) Gas  $N_2O$ , b) Udara bebas oleh GC

Letak *peak*  $N_2O$  dapat diketahui dengan membandingkan grafik gas  $N_2O$  (Gambar 4.10 a) dan grafik udara bebas (Gambar 4.10 b) karena gas  $N_2O$  yang digunakan merupakan gas  $N_2O$  dengan konsentrasi 15000 ppm dalam udara. Pada Gambar 4.10 b) di atas, dapat dilihat bahwa pada grafik udara bebas hanya terdapat dua *peak*, yaitu *peak* udara dan uap air. Sementara itu, pada grafik  $N_2O$  terdapat tiga *peak*. Berdasarkan hal ini, maka dapat dikatakan bahwa *peak* ketiga adalah *peak* gas  $N_2O$  yang terletak setelah *peak* udara dan uap air.

Setelah mengetahui letak *peak*  $N_2O$ , dilakukanlah variasi terhadap volum gas  $N_2O$  yang diambil dari dalam *gas sampling* yaitu sebesar 0,1; 0,3; 0,7; dan 1,0 mL. Pengambilan data pada kalibrasi gas  $N_2O$  dilakukan sebanyak dua kali/duplikasi dengan tujuan untuk memastikan keakuratan hasil yang diperoleh. Data yang diperoleh dari hasil kalibrasi gas  $N_2O$  dapat dilihat pada Lampiran 3. Kemudian, data kalibrasi tersebut diplot antara luas *peak*  $N_2O$  terhadap volum gas

N<sub>2</sub>O dalam *syringe* sehingga diperoleh grafik seperti terlihat pada Gambar 4.11 berikut.



Gambar 4.11 Kalibrasi gas N<sub>2</sub>O

Berdasarkan grafik yang diperoleh, dapat dilihat bahwa grafik kalibrasi gas N<sub>2</sub>O juga memiliki kecenderungan garis linear, dengan persamaan garis  $y = 3.10^{10}x - 1211$ . Apabila diberi *trendline* garis linear, maka koefisien korelasinya adalah 0,991. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa kalibrasi gas N<sub>2</sub>O ini dapat digunakan dalam penelitian biofiltrasi selanjutnya untuk mengetahui volum dan konsentrasi gas N<sub>2</sub>O aktual.

#### 4.3.3 Uji Waktu Tinggal

Uji waktu tinggal dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan EBRT (*Empty Bed Residence Time*) seperti tertulis pada Persamaan 2.1. EBRT dapat didefinisikan sebagai volum total kolom biofilter kosong dibagi dengan laju alir udara kontaminan, dimana kolom biofilter yang digunakan memiliki tinggi 120 cm dan diameter dalam 7,35 cm. EBRT yang terlalu rendah berarti laju alir gas tinggi, *pressure drop* tinggi, dan konsumsi energi besar. Namun, EBRT yang terlalu tinggi membutuhkan medium filter dengan volum yang banyak dan biaya kapital yang tinggi. Dalam perhitungan EBRT untuk penelitian ini, laju alir gas yang digunakan adalah laju alir gas N<sub>2</sub>O paling kecil dengan tujuan untuk

mengetahui waktu maksimum yang dibutuhkan oleh gas N<sub>2</sub>O untuk mengalir di dalam kolom biofilter kosong. Hasil EBRT yang diperoleh adalah sebagai berikut:

$$EBRT = \frac{\pi \times (3,675\text{cm})^2 \times 120\text{cm}}{73,481 \text{ cc/menit}} = 69,29 \text{ menit} = 1,155 \text{ jam}$$

Pengujian waktu tinggal juga dilakukan secara eksperimental seperti pada saat uji blangko, yaitu dengan cara mengalirkan gas N<sub>2</sub>O pada laju alir terkecil ke dalam kolom biofilter kosong, kemudian *syringe* diinjeksikan pada *sampling port* bawah. Selanjutnya, *syringe* tersebut diinjeksikan ke dalam *Gas Chromatography* (GC) yang akan mendeteksi keberadaan gas beserta konsentrasinya. Pengukuran lamanya waktu yang dibutuhkan oleh gas N<sub>2</sub>O mulai dari gas tepat dialirkan ke dalam kolom hingga gas tersebut diperoleh pada *sampling port* bawah dapat dibandingkan dengan hasil perhitungan EBRT di atas. Namun, fakta menunjukkan bahwa gas N<sub>2</sub>O tersebut telah dapat terdeteksi pada *sampling port* bawah beberapa menit setelah gas tepat dialirkan ke dalam kolom biofilter. Meskipun demikian, konsentrasi gas N<sub>2</sub>O yang diperoleh belum sama seperti konsentrasi gas N<sub>2</sub>O yang masuk dari atas tabung. Hal ini dapat dibuktikan dengan membandingkan luas *peak* gas N<sub>2</sub>O antara *sampling port* atas dan bawah.

Berdasarkan Gambar 4.8 (Sub Bab 4.3.1) dapat dilihat bahwa luas area *peak* keluaran N<sub>2</sub>O akan mendekati luas area *peak* masukan N<sub>2</sub>O sekitar menit ke 60 atau 1 jam. Hal tersebut memperkuat hasil perhitungan EBRT yang dilakukan. Uji blangko dilakukan setiap 15 menit. Oleh karena itu, mungkin pada menit ke-69 (menit yang tidak dilakukan pengamatan) luas *peak* N<sub>2</sub>O *sampling port* bawah telah sama dengan nilai luas *peak* N<sub>2</sub>O *sampling port* atas atau dengan kata lain pada menit ke-69, gas N<sub>2</sub>O telah mengalir ke dalam kolom hingga menuju *sampling port* bawah dan terdistribusi secara merata di dalam kolom.

#### 4.3.4 Uji Karakteristik Kompos

Pengujian karakteristik yang dilakukan meliputi uji BET dan uji komposisi unsur-unsur yang terdapat di dalam kompos. Pengujian komposisi unsur-unsur yang terdapat di dalam kompos ini dilakukan terhadap kompos yang terdiri dari bahan organik berupa kotoran sapi dan *bulking agent* berupa *cocopeat* dan sekam beras, serta terhadap kompos yang digunakan pada penelitian sebelumnya dimana

bahan organik yang digunakan adalah kotoran kambing dan sampah rumah tangga, serta *bulking agent* berupa sekam dan *cocopeat* (Utami dkk., 2009).

#### 4.3.4.1 Uji BET

Uji BET dilakukan dengan menggunakan alat *Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption* yang dilakukan di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (Lab. RPKA) terhadap medium filter yang akan digunakan dalam biofiltrasi, yaitu kompos berbasis kotoran sapi. Tabel 4.1 berikut menunjukkan hasil yang diperoleh dari uji BET terhadap medium filter tersebut.

**Tabel 4.1** Hasil uji BET kompos berbasis kotoran sapi

Karakteristik Medium Filter	Kompos Berbasis Kotoran Sapi
Multipoint BET	3,957 m <sup>2</sup> /g
DA Method Pore Diameter	1,8.10 <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, karakterisasi pori dilakukan berdasarkan ukurannya, dimana 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 disebut mesopori (*Autosorb-6B Manual Book*).

Berdasarkan hasil BET yang diperoleh, diketahui bahwa ukuran diameter pori adalah 18Å. Maka, radius pori dari medium kompos berbasis kotoran sapi adalah 9Å. Oleh karena itu, pori-pori medium kompos ini dapat didefinisikan 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/P<sub>0</sub> dan jumlah adsorbat mendekati nilai batas 1. Batas pengertian adsorbat lebih

ditentukan oleh volum mikropori yang tersedia dibandingkan dengan area permukaan internal.

Area permukaan spesifik yang besar merupakan karakteristik favorit untuk aplikasi biofiltrasi (Zilli et al., 1996). Pada setiap kasus, ukuran pori-pori yang kecil dari medium filter dapat mendorong pertumbuhan biomassa di sepanjang permukaan medium, sehingga pengurangan area permukaan spesifik memungkinkan terjadinya degradasi polutan. Diameter pori medium yang lebih kecil dan homogen juga menyebabkan permukaan bahan yang dapat dijadikan substrat bagi aktivitas mikroba lebih luas (Suriawira, 2002).

#### 4.3.4.2 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<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, Sulfur (S), dan karbon organik dari kedua jenis kompos tersebut. Uji komposisi unsur ini dilakukan di Laboratorium Sucofindo, Cibitung. Tabel 4.2 di bawah ini menunjukkan perbandingan komposisi unsur yang terdapat pada kompos berbasis kotoran kambing dan kompos berbasis kotoran sapi.

**Tabel 4.2** Perbandingan komposisi unsur yang terdapat pada kompos berbasis kotoran kambing dan kompos berbasis kotoran sapi

Parameter	Kompos berbasis kotoran kambing	Kompos berbasis kotoran sapi	Metode
	Komposisi (%berat kering)	Komposisi (% berat kering)	
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	30,17	15,39	Kurmies

(C)			
Rasio C/N	17,44	12,93	

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.

Salah satu aspek paling penting dari total keseimbangan nutrisi adalah rasio karbon organik terhadap total nitrogen (C/N). Rasio C/N optimum yang terkandung dalam material awal adalah sekitar 25-30 untuk sebagian besar jenis limbah. Mikroorganisme hidup menggunakan sekitar 30 bagian karbon terhadap setiap bagian nitrogen untuk metabolisme. Sementara itu, sekitar 20 bagian karbon dioksidasi menjadi CO<sub>2</sub> (ATP) dan 10 bagian digunakan untuk mensintesis protoplasma. Jika jumlah karbon terhadap nitrogen terlalu besar (rasio C/N tinggi), maka aktivitas biologis berkurang. Pada operasi pengomposan, dibutuhkan waktu yang sangat lama untuk mengurangi C/N ke tingkat yang lebih cocok (Golueke, 1977).

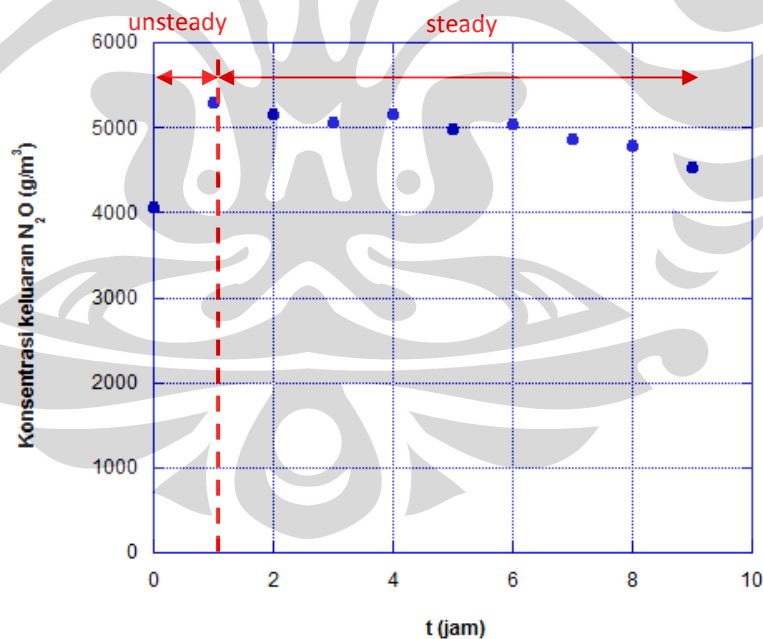
#### 4.4 Uji Kinerja Biofilter

Pengujian kinerja biofilter dilakukan melalui eksperimen dengan menggunakan sistem aliran *batch* selama 9 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 laju alir gas N<sub>2</sub>O dan variasi kedalaman medium filter terhadap performansi biofilter dalam mereduksi N<sub>2</sub>O serta terhadap pertumbuhan mikroorganisme di dalam kompos. Selain itu juga akan dilakukan uji sifat fisik dan kimia terhadap kompos yang digunakan dalam penelitian ini antara lain densitas, pH, *water content*, dan porositas. Pengambilan data pada uji kinerja biofilter dilakukan dengan memperhatikan prinsip replikasi.

#### 4.4.1 Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N<sub>2</sub>O

Uji kinerja biofilter dalam mereduksi N<sub>2</sub>O dapat dianalisis melalui hasil biofiltrasi pada laju alir 73,48 cc/menit dengan kedalaman medium filter 50 cm. 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, dimana massa medium yang sama akan menghasilkan kedalaman medium yang berbeda.

Hasil uji kinerja biofilter dalam mereduksi N<sub>2</sub>O ditunjukkan oleh adanya penurunan luas di bawah *peak* untuk setiap waktu tertentu. Penurunan luas ini akan sebanding dengan penurunan konsentrasi (Harris, 1995). Dalam penelitian ini, pengamatan biofiltrasi dilakukan setiap jam selama 9 jam dengan menggunakan GC. Gambar 4.12 adalah grafik uji biofiltrasi yang dilakukan pada panjang biofilter 49,7 cm dan laju alir gas N<sub>2</sub>O 73,48 cc/menit.



**Gambar 4.12** Uji kinerja biofilter dalam mereduksi N<sub>2</sub>O

(h = 49,7 cm; Q = 73,48 cc/menit, medium kompos kering)

Dengan cara perhitungan yang dapat dilihat pada Lampiran 4, dapat dilihat pada Gambar 4.12 bahwa konsentrasi N<sub>2</sub>O berkurang setiap jamnya. Pada Gambar

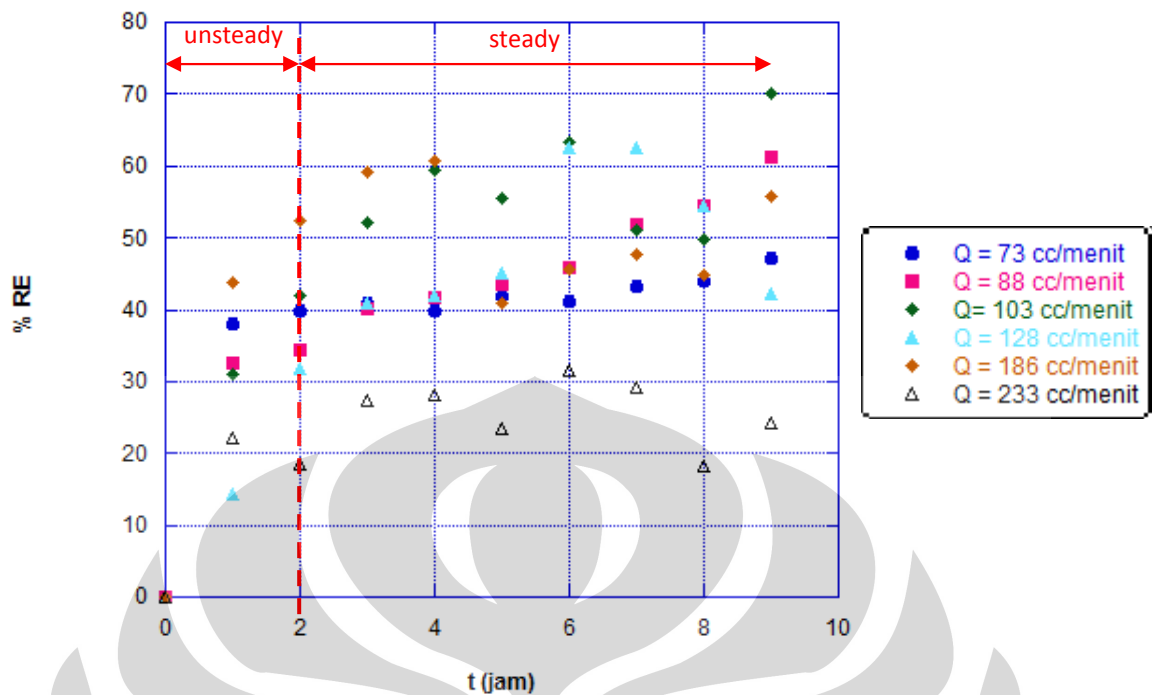
4.12 dihasilkan suatu profil hubungan antara konsentrasi keluaran  $N_2O$  selama 9 jam yang naik pada awal percobaan, kemudian turun secara perlahan-lahan. Hal ini disebabkan oleh belum homogenya gas  $N_2O$  yang mengalir di dalam medium filter sehingga dihasilkan kondisi *unsteady*. Setelah melewati jam pertama, konsentrasi keluaran  $N_2O$  akan turun perlahan-lahan. Hal ini dapat terjadi karena adanya daya adsorpsi kompos yang dilewati gas  $N_2O$ . Grafik ini juga menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak yang terjadi antara kompos dan gas  $N_2O$ , maka konsentrasi  $N_2O$  yang dihasilkan akan semakin rendah.

Ketika medium filter kompos dialiri kontaminan, terjadi kontak antara fasa gas sebagai kontaminan, fasa cair dan *biofilm* sebagai permukaan medium filter, dan fasa padat sebagai partikel padatan medium filter. Transformasi kontaminan dari fasa gas ke air dan padat pada partikel kompos adalah langkah dasar dari perlakuan degradasi kontaminan dengan adsorpsi. Molekul kontaminan dengan mudah terlarut di fasa cair bukan hanya akan didegradasi oleh mikroba tetapi juga diadsorpsi oleh permukaan medium filter pada lapisan *biofilm*. Oleh karena itu, konsentrasi suatu adsorbat akan menurun karena diserap oleh adsorben hingga pada waktu tertentu sebelum mengalami kesetimbangan adsorpsi.

#### **4.4.2 Pengaruh Laju Alir terhadap Peningkatan Efisiensi Reduksi $N_2O$**

Penelitian variasi laju alir gas  $N_2O$  terhadap reduksi  $N_2O$  dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh laju alir gas polutan terhadap peningkatan efisiensi reduksi  $N_2O$  yang dihasilkan. Laju alir akan divariasikan sesuai dengan kemampuan *flowmeter* pada alat biofilter. Variasi laju alir gas  $N_2O$  yang digunakan dalam penelitian ini antara lain adalah 73, 88, 103, 128, 186, dan 233 cc/menit. Adapun kedalaman medium filter yang digunakan dalam penelitian ini adalah 50 cm karena kedalaman ini merupakan kedalaman optimum dalam mereduksi  $N_2O$  pada penelitian sebelumnya di Departemen Teknik Kimia UI (Utami dkk., 2009). Perlu diperhatikan bahwa kedalaman medium yang akan digunakan berbasis pada massa medium filter sebesar 945 g untuk kedalaman 50 cm (Utami dkk., 2009). Hasil dari uji performansi biofilter dalam mereduksi  $N_2O$  terhadap variasi laju alir dapat dilihat pada Gambar 4.13 berikut.





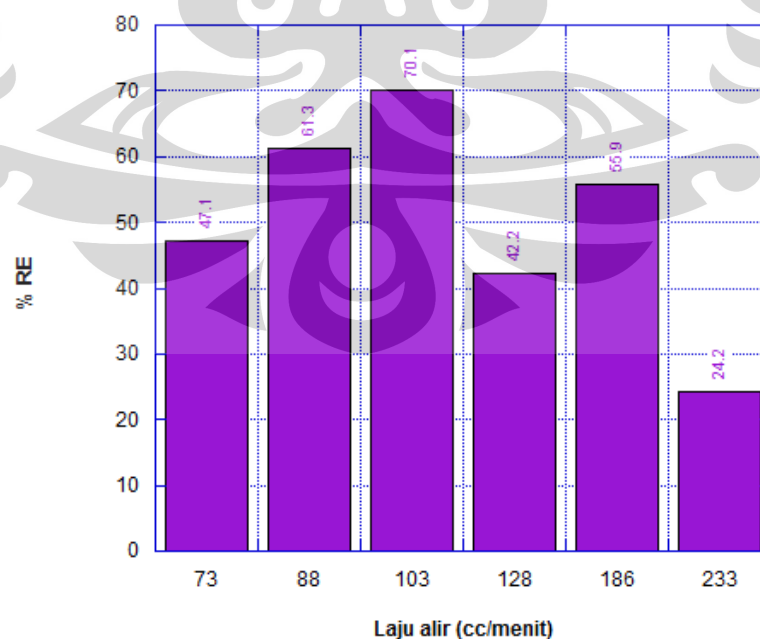
**Gambar 4.13** Profil variasi laju alir terhadap efisiensi reduksi  $N_2O$   
( $h = 49,7$  cm,  $m = 945$  g, medium filter = kompos kering)

Dalam penelitian ini, pengamatan biofiltrasi dilakukan setiap jam selama 9 jam dengan menggunakan GC. Berdasarkan Gambar 4.13 di atas, dapat dilihat bahwa efisiensi reduksi  $N_2O$  cenderung meningkat setiap jamnya meskipun hal ini tidak terjadi pada jam ke-0 hingga jam ke-2 karena pada waktu ini gas  $N_2O$  yang mengalir di dalam medium filter belum homogen sehingga dihasilkan kondisi *unsteady*. Fenomena yang terjadi pada Gambar 4.13 adalah adanya daya adsorpsi kompos yang dilewati gas  $N_2O$ . Grafik ini juga menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak yang terjadi antara kompos dan gas  $N_2O$ , maka efisiensi reduksi  $N_2O$  yang dihasilkan akan semakin tinggi. Hal ini merupakan fenomena yang terjadi pada setiap laju alir.

Seharusnya, 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. Namun, berdasarkan grafik pada Gambar 4.13 dapat diketahui bahwa efisiensi reduksi  $N_2O$  yang dihasilkan dalam penelitian ini tidak sesuai dengan pernyataan di atas.

Jika dikaitkan dengan kurva terobosan adsorpsi pada umumnya, maka konsentrasi suatu adsorbat akan menurun karena diserap oleh adsorben hingga waktu tertentu sebelum mengalami kesetimbangan adsorpsi. Dengan demikian, konsentrasi  $N_2O$  akan menurun karena teradsorp oleh medium biofilter pada setiap interval waktu tertentu sebelum medium biofilter mengalami penenuhan. Penurunan konsentrasi  $N_2O$  akan diiringi dengan peningkatan efisiensi reduksinya.

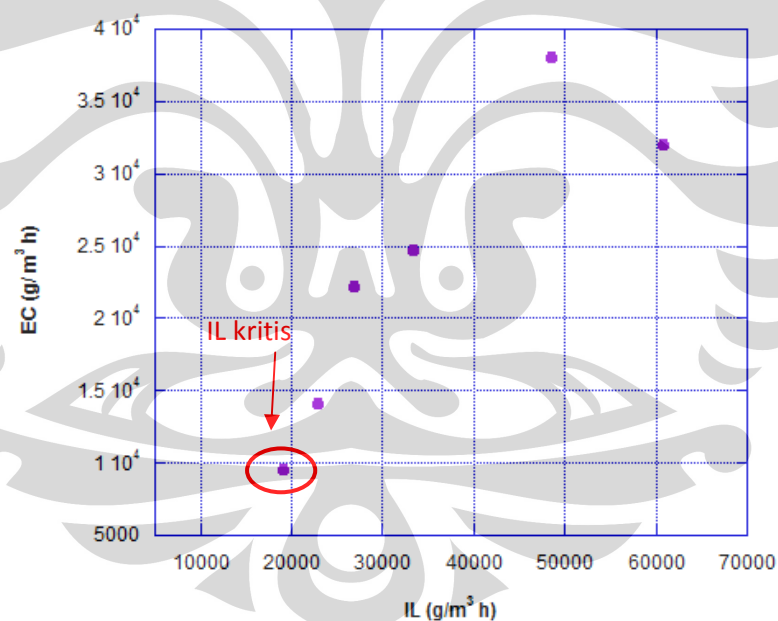
Penurunan konsentrasi  $N_2O$  yang dihasilkan pada penelitian ini juga semakin rendah untuk laju alir yang semakin besar. Hal ini dikarenakan laju alir tersebut sangat besar sehingga waktu tinggal di dalam medium filter tidak lama. Berdasarkan pernyataan di atas, maka seharusnya laju alir yang semakin 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 (Shareefdeen, 2005). Akibatnya, penurunan konsentrasi yang dihasilkan tidak sebesar pada laju alir 88 cc/menit. Gambar 4.14 di bawah ini menunjukkan efisiensi reduksi  $N_2O$  yang diperoleh pada jam ke-9 biofiltrasi pada setiap variasi laju alir.



**Gambar 4.14** Grafik batang perbandingan efisiensi reduksi pada uji variasi laju alir gas  $N_2O$  ( $h = 49,7$  cm, medium kering,  $t = 9$  jam)

Pada Gambar 4.14 dapat dilihat bahwa efisiensi reduksi tertinggi yang 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 (Gambar 4.13). Oleh karena itu, laju alir gas  $N_2O$  optimal yang dipilih adalah 88 cc/menit dengan efisiensi reduksi sebesar 61,3%.

*Elimination Capacity* (EC) merupakan kapasitas reduksi aktual di dalam biofilter. Umumnya, nilai EC lebih rendah dibandingkan IL dan nilainya akan sama dengan IL ketika efisiensi reduksi sebesar 100% diperoleh. Grafik yang menunjukkan hubungan antara *Elimination Capacity* (EC) dan *Inlet Loading* (IL) yang diperoleh pada penelitian variasi laju alir ini digambarkan pada Gambar 4.15.



**Gambar 4.15** Grafik *Elimination Capacity* (EC) terhadap *Inlet Loading* (IL) pada variasi laju alir

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa kapasitas eliminasi yang dihasilkan tidak sama dengan IL dan nilainya lebih rendah dari nilai IL. Apabila nilai IL ditingkatkan, suatu titik akan tercapai dimana laju IL massa keseluruhan akan melebihi kapasitas eliminasi keseluruhan dan menghasilkan efisiensi reduksi lebih rendah dari 100%. Titik ini disebut dengan IL kritis atau EC kritis dan dapat

dilihat pada Gambar 4.15 di atas. Dalam penelitian dengan variasi laju alir ini, nilai IL sudah tidak dapat ditingkatkan lagi karena laju IL massa keseluruhan telah melebihi kapasitas eliminasi keseluruhan. Oleh karena itu, efisiensi reduksi yang diperoleh lebih rendah dari 100%.

Pada biofilter, sintesis biomassa memudahkan terjadinya akumulasi 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 dapat menyebabkan terjadinya *channeling* dan peningkatan *pressure drop*. Tabel 4.3 di bawah ini menunjukkan *pressure drop* terukur pada kolom biofilter yang terjadi selama penelitian variasi laju alir terhadap efisiensi reduksi gas N<sub>2</sub>O.

**Tabel 4.3** *Pressure drop* terukur pada kolom biofilter selama penelitian variasi laju alir

Laju Alir (cc/menit)	<i>Pressure Drop</i> Awal (t=0, cm H <sub>2</sub> O)	<i>Pressure Drop</i> Akhir (t=9, cm H <sub>2</sub> O)	<i>Pressure Drop</i> Total (cm H <sub>2</sub> O)
73	0	0,1	0,1
88	0,1	0,3	0,2
103	0,1	0,1	0
128	0,1	0	0,1
186	0,3	2,1	1,8
233	0	0,1	0,1

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).

Pada Tabel 4.3 di atas, terlihat bahwa *pressure drop* yang terjadi pada setiap laju alir tidaklah signifikan, kecuali *pressure drop* pada laju alir 186 cc/menit. *Pressure drop* menunjukkan peningkatan sebanyak 18 mm H<sub>2</sub>O karena adanya *clogging* secara bertahap dan kompaksi partikel kompos. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya anomali pada profil penurunan konsentrasi N<sub>2</sub>O, dimana penurunan konsentrasi langsung terjadi setelah gas dialirkan ke dalam tabung biofilter pada jam ke-0.

Kedalaman medium filter yang diharapkan dalam penelitian ini adalah 50 cm. Namun, berdasarkan hasil pengamatan diketahui bahwa kedalaman medium yang diperoleh hanyalah 49,7 cm. Perbedaan kedalaman medium filter antara yang diharapkan dan yang diperoleh disebabkan oleh perbedaan jenis medium filter yang digunakan. Seperti telah disebutkan sebelumnya, medium filter yang berbeda akan memiliki kedalaman medium yang berbeda pada massa medium filter yang sama. Dapat dikatakan bahwa medium filter yang digunakan dalam penelitian ini memiliki porositas yang lebih kecil dibandingkan dengan medium filter pada penelitian sebelumnya (Utami dkk., 2009) sehingga medium filter menjadi lebih padat dan kedalaman medium filter lebih kecil dari 50 cm.

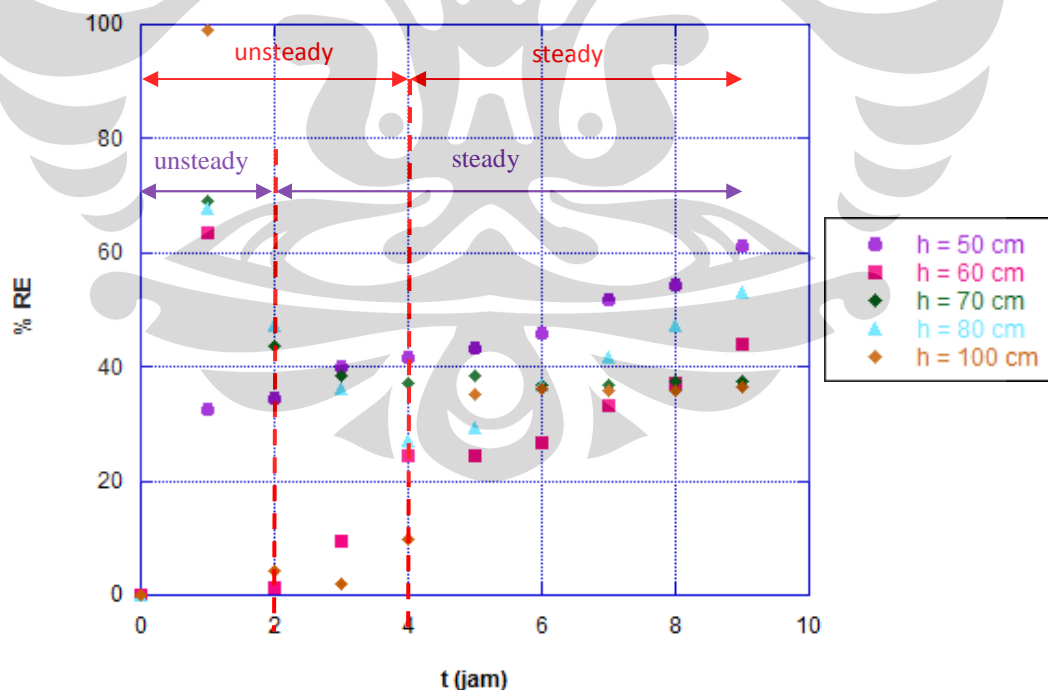
#### **4.4.3 Pengaruh Kedalaman Medium Filter terhadap Performansi Biofilter dalam Mereduksi N<sub>2</sub>O**

Penelitian variasi kedalaman medium filter terhadap reduksi N<sub>2</sub>O dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh kedalaman medium filter terhadap performansi biofilter dalam mereduksi N<sub>2</sub>O. 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 medium filter. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa kolom biofilter yang semakin tinggi akan menghasilkan performansi reduksi yang lebih tinggi pula.

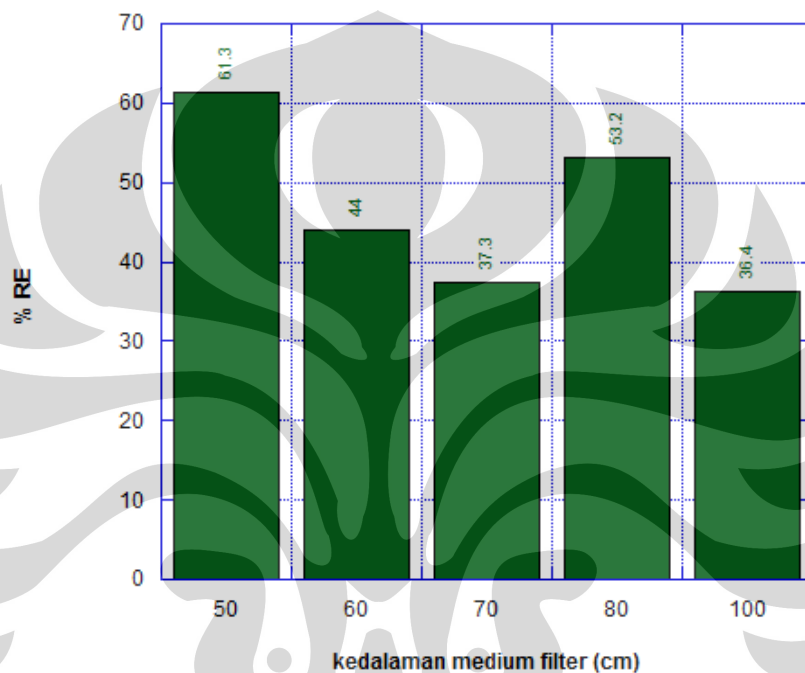
Pada penelitian ini, variasi kedalaman medium filter yang akan diuji coba adalah kedalaman 60, 70, 80, dan 100 cm dan dilakukan secara acak, dengan menggunakan laju alir optimum yang telah diperoleh pada percobaan sebelumnya yaitu 88 cc/menit. Namun, sama halnya dengan uji variasi laju alir, basis kedalaman medium filter yang digunakan adalah massa medium sebesar 945 g untuk kedalaman medium 50 cm (Utami et al., 2009).

Pada penggunaan kedalaman medium filter  $\geq 80$  cm, digunakan *perforated plates* dengan tujuan untuk memastikan adanya redistribusi gas yang merata di dalam kolom biofilter sehingga distribusi gas dalam kolom lebih homogen. *Perforated plates* dipasang pada setengah bagian massa medium di dalam kolom biofilter. Hasil dari uji performansi biofilter dalam mereduksi  $N_2O$  terhadap variasi kedalaman medium filter dapat dilihat pada Gambar 4.16 berikut.



**Gambar 4.16** Profil variasi kedalaman medium filter terhadap efisiensi reduksi  $N_2O$   
(medium filter = kompos kering)

Fenomena yang terjadi pada Gambar 4.16 di atas adalah reduksi  $N_2O$  karena dipengaruhi oleh kedalaman medium filter. Seharusnya, kedalaman medium filter yang semakin besar akan membuat waktu adsorpsi gas  $N_2O$  oleh kompos semakin lama, sehingga semakin banyak konsentrasi  $N_2O$  yang dapat direduksi dan % RE semakin tinggi. Efisiensi reduksi  $N_2O$  dari masing-masing kedalaman medium filter pada jam ke-9 dapat dilihat pada Gambar 4.17.



**Gambar 4.17** Perbandingan efisiensi reduksi pada uji variasi kedalaman medium filter (medium kering,  $t = 9$  jam)

Berdasarkan Gambar 4.16 di atas dan hasil efisiensi reduksi  $N_2O$  yang diperoleh pada Gambar 4.17, terlihat adanya penyimpangan hasil pada kedalaman medium filter yang lebih besar, dimana pada kedalaman tersebut efisiensi reduksi yang dihasilkannya lebih rendah dibandingkan dengan efisiensi reduksi pada kedalaman 50 cm. Hal ini tidak sesuai dengan pernyataan Yang et al. (2007) yang menyatakan bahwa kolom biofilter yang semakin tinggi akan menghasilkan performansi reduksi yang lebih tinggi pula.

Efisiensi reduksi  $N_2O$  yang dihasilkan pada kedalaman 50 cm lebih tinggi apabila dibandingkan dengan efisiensi reduksi yang dihasilkan pada kedalaman yang lebih tinggi. Hal ini dapat dijelaskan dengan memperhatikan Gambar 4.16,

dimana waktu yang diperlukan oleh gas  $N_2O$  untuk homogen di dalam kolom biofilter hingga mencapai kondisi *steady* pada kedalaman 50 cm hanya berlangsung hingga jam ke-2. Sementara itu, pada kedalaman  $\geq 60$  cm waktu yang diperlukan oleh gas  $N_2O$  untuk homogen hingga mencapai kondisi *steady* adalah 4 jam. Adapun sistem aliran biofiltrasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah sistem *batch* yang berlangsung selama 9 jam. Oleh karena itu, agar dapat mengevaluasi efisiensi reduksi  $N_2O$  yang dihasilkan oleh kedalaman medium filter  $\geq 60$  cm diperlukan waktu pengamatan yang lebih lama karena gas  $N_2O$  memerlukan waktu yang lebih lama untuk mencapai keadaan stabil. Tabel 4.4 di bawah ini menunjukkan kondisi *pressure drop* yang terjadi selama penelitian mengenai variasi kedalaman medium filter terhadap performansi biofilter dalam mereduksi  $N_2O$ .

**Tabel 4.4** Kondisi *pressure drop* yang terjadi selama penelitian variasi kedalaman medium filter

<b>Kedalaman Medium (cm)</b>	<b><i>Pressure Drop</i> Awal (t=0, cm H<sub>2</sub>O)</b>	<b><i>Pressure Drop</i> Akhir (t=9, cm H<sub>2</sub>O)</b>	<b><i>Pressure Drop</i> Total (cm H<sub>2</sub>O)</b>
60	0	0,1	0,1
70	0,1	0,9	0,8
80	0	0,1	0,1
100	0,1	0	0,1

Setelah beberapa lama waktu operasi, *clogging/ channeling* akan terjadi di dalam medium filter, dan biasanya disebabkan oleh kompaksi medium yang disebabkan oleh laju alir gas atau pun pembentukan sejumlah besar biomassa. Proses untuk mencegah biofilter dari *clogging/ channeling* meliputi pendekatan fisika/ mekanik, kimia, dan biologi. Pada Tabel 4.4 di atas, terlihat bahwa *pressure drop* yang terjadi pada tiap kedalaman medium filter tidaklah signifikan, kecuali pada kedalaman 70 cm dimana *pressure drop* yang dihasilkan dapat mencapai 8 mm H<sub>2</sub>O. Hal inilah yang menyebabkan rendahnya efisiensi reduksi  $N_2O$  yang dihasilkan oleh karena adanya kompaksi pada medium filter sehingga laju alir gas di dalam kolom akan terhambat dan menyebabkan berkurangnya



adsorpsi yang terjadi pada gas  $N_2O$  oleh medium filter. Tabel 4.5 berikut menunjukkan kedalaman medium filter yang terbaca pada kolom biofilter.

**Tabel 4.5** Kedalaman medium filter yang terbaca pada kolom biofilter

<b>Kedalaman medium</b>	<b>Kedalaman medium dalam kolom (cm)</b>	<b>Perbandingan kedalaman</b>
60 cm	63,4	1,057
80 cm (dengan <i>perforated plates</i> )	82	1,025
100 cm (dengan <i>perforated plates</i> )	99	0,99
70 cm	69,2	0,989

Berdasarkan data kedalaman medium filter pada Tabel 4.5 di atas, dapat diketahui bahwa pada kedalaman medium 100 cm dan 70 cm terjadi kompaksi medium karena kedalaman medium filter lebih rapat daripada yang diharapkan. Selain itu, kompaksi yang terjadi turut mengganggu penggunaan *perforated plates* pada kedalaman 100 cm karena *perforated plates* yang digunakan letaknya menjadi tidak rata dan adanya kompaksi membuat lubang-lubang pada *perforated plates* tersumbat oleh medium filter itu sendiri. Hal inilah yang mengakibatkan rendahnya efisiensi reduksi yang dihasilkan pada kedalaman medium 100 cm.

#### 4.4.4 Pengujian Sifat Fisik dan Kimia Kompos

Pengujian sifat fisik dan kimia kompos yang dilakukan antara lain meliputi perhitungan densitas kompos, pengukuran pH, pengukuran *water content* kompos, dan perhitungan porositas kompos. Uji sifat ini dilakukan sebelum dan setelah biofiltrasi dilakukan pada medium filter. Tabel 4.6 menunjukkan karakteristik dari medium kompos sebelum dan setelah biofiltrasi selama 9 jam.

Tabel 4.6 Karakteristik kompos sebelum dan setelah biofiltrasi selama 9 jam

Data	Densitas (g/mL)	Porositas	pH	Water Content
<b>Sebelum Biofiltrasi</b>				
<b>Kompos Awal</b>	0,5554	80,2%	8,1	57,72%
<b>Setelah Biofiltrasi</b>				
<b>Kompos variasi laju alir</b>	0,5554	-	7,6	65,10%
<b>Kompos variasi kedalaman medium</b>	0,5554	-	7,1	63,65%

Keterangan: porositas kompos setelah biofiltrasi variasi laju alir dan kedalaman medium tidak dapat dihitung karena kurangnya data massa kompos setelah biofiltrasi selama 9 jam.

Sebagian besar mikroorganisme memiliki 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  $H_2S$  dan senyawa terklorinasi (Devanny et al., 1999). Banyak bakteri memiliki pH optimum antara 6 dan 8 (Leson and Winer, 1991; Ottengraf, 1986), tetapi  $H_2S$  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 medium filter pada saat memulai biofiltrasi, dan ketika *buffer* tersebut telah habis, maka medium filter diganti dengan yang baru. Berdasarkan Tabel 4.6 di atas, dapat diketahui bahwa nilai pH sebelum biofiltrasi akan berkurang pada saat setelah biofiltrasi, atau dengan kata lain pH kompos setelah biofiltrasi menjadi lebih asam meskipun penurunan pH yang terjadi sedikit sekali. Hal ini disebabkan oleh terjadinya proses biodegradasi yang menghasilkan produk akhir asam. Meskipun demikian, pengasaman dari medium tidak berpengaruh pada efisiensi reduksi yang dihasilkan (Dumont et al, 2008).

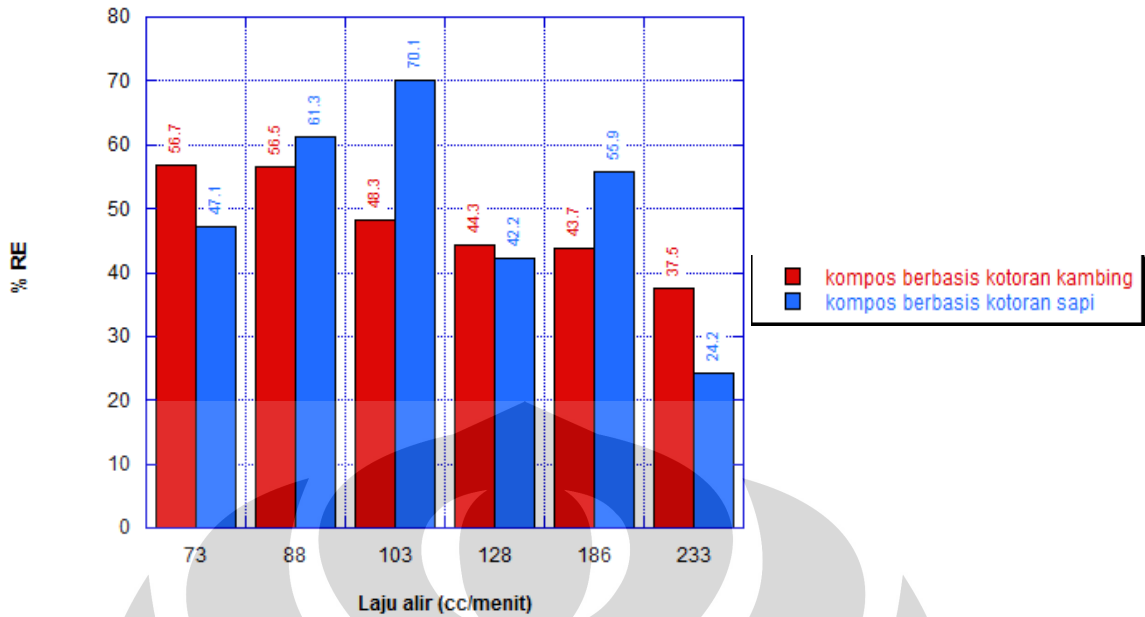
Sementara itu, adanya porositas dan luas permukaan yang besar dapat mendukung terjadinya adsorpsi kontaminan maupun untuk pertumbuhan mikroba. Namun, porositas kompos setelah biofiltrasi akan berkurang dibandingkan

kompos awal karena telah terjadi kompaksi medium akibat adanya aliran gas polutan di dalam medium filter.

Adanya peningkatan kandungan *moisture* (MC) atau *water content* dari nilai awal 57,72% menjadi nilai akhir 65,1% pada akhir variasi laju alir dan 63,65% pada akhir variasi kedalaman medium filter disebabkan oleh adanya absorpsi *moisture* dari gas keluaran. Diketahui bahwa gas keluaran dari pengomposan biasanya bersifat *saturated* (Pagans, 2005). Dari data yang diperoleh dalam penelitian, hanya sedikit perbedaan yang terjadi antara sifat awal dan akhir selama biofiltrasi yaitu pH, porositas, *water content*, dan rasio C/N. Namun, perubahan yang terjadi tidaklah signifikan mengingat penggunaan media biofilter kompos yang sama untuk setiap variasi yang dilakukan.

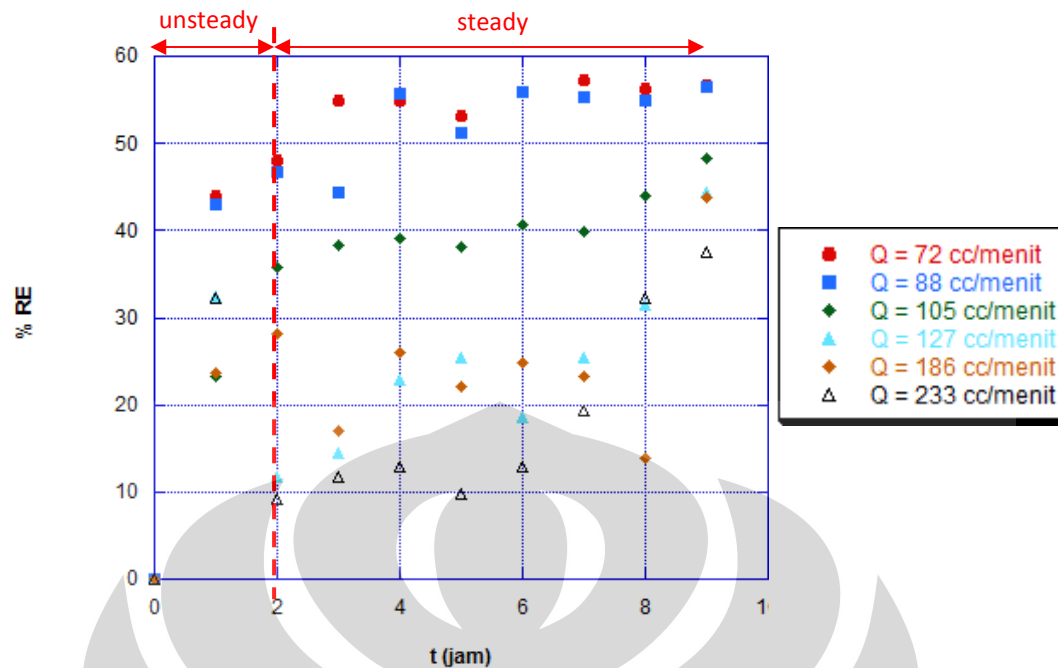
#### **4.4.5 Perbandingan Hasil Efisiensi Reduksi N<sub>2</sub>O antara Kompos Berbasis Kotoran Sapi dengan Kompos Berbasis Kotoran Kambing (Utami dkk., 2009)**

Berdasarkan hasil penelitian biofiltrasi variasi laju alir yang dilakukan dengan menggunakan medium filter berupa kompos berbasis kotoran sapi, dapat dibuat perbandingan antara efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O yang dihasilkannya terhadap penelitian biofiltrasi dengan menggunakan kompos berbasis kotoran kambing (Utami dkk, 2009). Gambar 4.18 di bawah ini menggambarkan grafik perbandingan efisiensi reduksi N<sub>2</sub>O yang dihasilkan oleh kedua medium filter tersebut.



**Gambar 4.18** Grafik perbandingan efisiensi reduksi  $N_2O$  yang dihasilkan oleh kompos berbasis kotoran kambing dan kompos berbasis kotoran sapi (variasi laju alir, medium kering,  $t = 9$  jam)

Berdasarkan Gambar 4.18 di atas, dapat dilihat bahwa rata-rata efisiensi reduksi  $N_2O$  yang dihasilkan pada jam ke-9 oleh kompos berbasis kotoran sapi cenderung lebih baik dibandingkan dengan kompos berbasis kotoran kambing. Namun, pengambilan kesimpulan bahwa kompos berbasis kotoran sapi merupakan medium filter yang lebih baik dalam mereduksi  $N_2O$  dibandingkan dengan kompos berbasis kotoran kambing tidak dapat dilakukan begitu saja karena diperlukan pula pengamatan terhadap profil efisiensi reduksi dan kapasitas eliminasinya. Efisiensi reduksi dan kapasitas eliminasi digunakan untuk mendeskripsikan performansi biofilter. Namun, kapasitas eliminasi merupakan indikator performansi yang lebih baik bagi sistem biofiltrasi karena dapat menunjukkan besarnya bagian polutan yang terbiodegradasi (Torkian, 2005). Gambar 4.19 berikut menunjukkan profil efisiensi reduksi  $N_2O$  yang dihasilkan oleh kompos berbasis kotoran kambing.

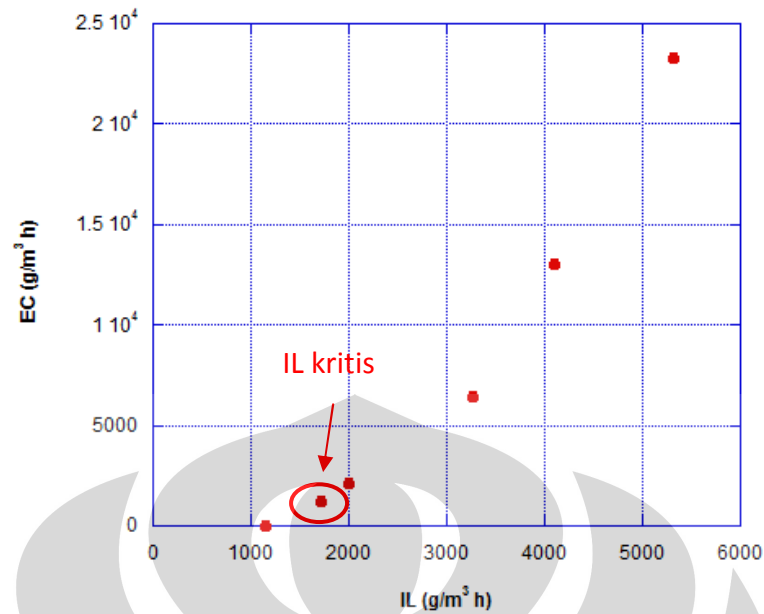


**Gambar 4.19** Profil variasi laju alir terhadap efisiensi reduksi  $N_2O$  pada kompos berbasis kotoran kambing

( $h = 50$  cm,  $m = 945$  g, medium filter = kompos kering)

Dengan membandingkan profil efisiensi reduksi kedua medium kompos tersebut (Gambar 4.13 dan Gambar 4.19), diketahui bahwa kompos berbasis kotoran kambing memerlukan waktu sama dengan kompos berbasis kotoran sapi untuk mencapai kondisi *steady* ( $t = 2$  jam). Namun, kenaikan efisiensi reduksi pada kompos berbasis kotoran kambing lebih stabil dibandingkan pada kompos berbasis kotoran sapi.

Sementara itu, berdasarkan hasil perbandingan kapasitas eliminasi yang dihasilkan oleh kedua medium tersebut (Gambar 4.15 dan Gambar 4.20), diketahui bahwa pada pemakaian kompos berbasis kotoran kambing, IL masih dapat terus ditingkatkan hingga mencapai titik IL kritis sedangkan pada kompos berbasis kotoran sapi, peningkatan IL tidak dapat terus dilakukan. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas eliminasi yang dapat dihasilkan oleh kompos berbasis kotoran kambing lebih besar daripada kompos berbasis kotoran sapi.



**Gambar 4.20** Grafik *Elimination Capacity* (EC) terhadap *Inlet Loading* (IL) pada kompos berbasis kotoran kambing

Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa kompos berbasis kotoran kambing merupakan medium filter yang lebih baik dalam mereduksi gas  $N_2O$ . Hal ini juga dapat dibuktikan oleh tingginya rasio C/N kompos berbasis kotoran kambing yang dapat dilihat pada sub-sub-bab 4.3.4.2, dimana rasio C/N ini akan mempengaruhi kinerja medium filter dalam mereduksi gas polutan.

#### 4.4.6 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*).

##### 4.4.6.1 Metode TPC (Total Plate Count)

TPC (*Total Plate Count*) merupakan salah satu metode analisis yang bertujuan untuk mengetahui jumlah koloni mikroba pada suatu sampel. TPC adalah salah satu teknik perhitungan mikroba dengan menggunakan nutrisi agar (NA) sebagai medium mikroorganisme yang akan dihitung. Hasil dari perhitungan TPC akan direpresentasikan dalam satuan *Colony Forming Units* (CFU) per gram kompos yang diuji.

Dalam metode TPC, setiap alat dan bahan yang akan digunakan harus selalu berada dalam keadaan steril dan aseptis agar mikroorganisme yang terdapat pada sampel yang akan diuji coba tidak terkontaminasi. 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 autoklaf. Metode sterilisasi ini memiliki suhu efektif 121°C pada tekanan tinggi dengan waktu standar 15 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 150°C 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 mikroba 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 pemanasan terlebih dahulu.

Selain sterilisasi alat dan bahan serta teknik transfer aseptis, metode TPC juga meliputi dilusi/pengenceran, pembuatan nutrien agar (NA) sebagai medium mikroba, serta inkubasi sampel TPC dengan suhu 34-35°C selama 2 hari. Adapun inkubasi dilakukan dengan tujuan untuk menunggu pertumbuhan koloni mikroba pada medium agar sebelum dilakukan perhitungan. Setelah metode TPC selesai dilakukan, maka sampel yang telah dihitung harus disterilisasi kembali dengan menggunakan autoklaf untuk membunuh mikroba yang terdapat pada sampel.

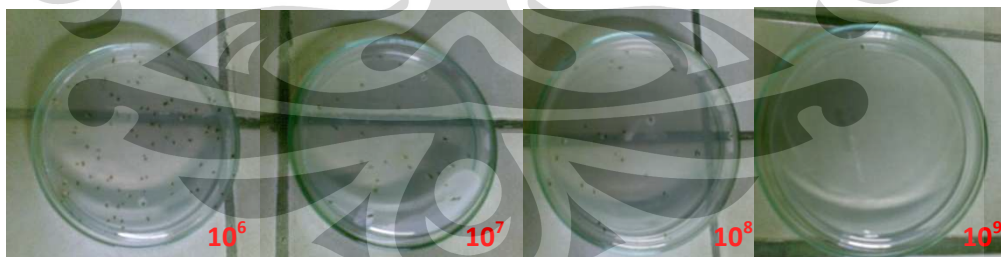
Gambar 4.22 hingga Gambar 4.24 di bawah ini menunjukkan hasil uji TPC yang dilakukan pada kompos awal sebelum biofiltrasi yang digunakan dalam penelitian, kompos setelah biofiltrasi dengan variasi laju alir, dan kompos setelah biofiltrasi dengan variasi kedalaman medium filter. Sementara itu, Gambar 4.21 menunjukkan hasil uji blangko medium agar. Hal ini penting untuk dilakukan pada awal TPC untuk mengetahui ada tidaknya kontaminan dalam nutrisi agar.



**Gambar 4.21** Uji Blangko Medium Agar

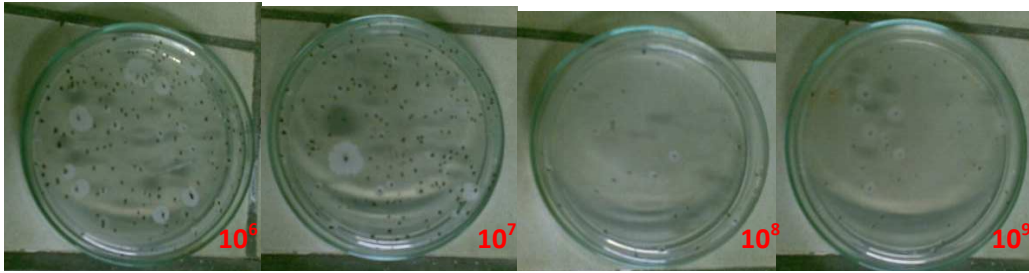


**Gambar 4.22** Hasil uji TPC pada kompos awal sebelum biofiltrasi



**Gambar 4.23** Hasil uji TPC pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi laju alir (medium kering)





**Gambar 4.24** Hasil uji TPC pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi kedalaman medium filter (medium kering)

Gambar-gambar di atas adalah hasil uji TPC yang dilakukan dengan empat kali pengenceran sampel kompos ( $10^6$ ,  $10^7$ ,  $10^8$ ,  $10^9$ ) yang diuji dengan metode duplikasi dan didapat jumlah rata-rata koloni mikroorganisme dari pengujian ini. Pada hasil uji TPC ini dapat dilihat perbedaan jumlah mikroorganisme sebelum dan sesudah dilakukan biofiltrasi secara visual. Seharusnya, jumlah koloni setelah biofiltrasi lebih banyak daripada sebelum dilakukan biofiltrasi karena adanya energi (ATP) yang berasal dari transformasi polutan udara yang mengalir pada biofilter (Shuler & Kragi, 1992). 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 lebih sedikit.

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 autotrofi yang menurunkan energi dari oksidasi molekul dan menggunakan  $\text{CO}_2$  sebagai sumber karbon.

Berdasarkan hasil perhitungan TPC yang telah dilakukan (Lampiran 7), diketahui bahwa jumlah mikroorganisme setelah biofiltrasi dengan variasi

laju alir lebih sedikit sekitar 18% dibandingkan dengan jumlah mikroorganisme pada kompos awal sebelum biofiltrasi. Hal ini disebabkan oleh adanya kontaminasi yang terjadi pada larutan dilusi  $10^9$  pada saat TPC kompos awal sebelum biofiltrasi sehingga jumlah mikroorganisme meningkat. Kontaminasi yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 4.25 di bawah ini. Sementara itu, jumlah mikroba hasil TPC dapat dilihat pada Tabel 4.7 dengan cara perhitungan yang dijelaskan pada Lampiran 7.



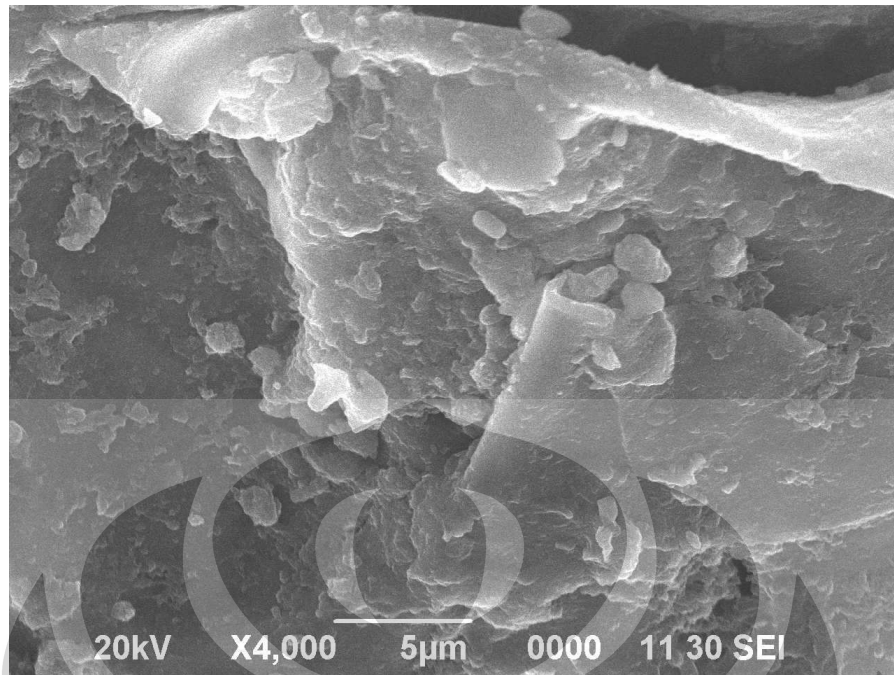
**Gambar 4.25** Kontaminasi pada larutan dilusi  $10^9$  pada saat TPC kompos awal

**Tabel 4.7** Hasil uji TPC sebelum dan setelah biofiltrasi

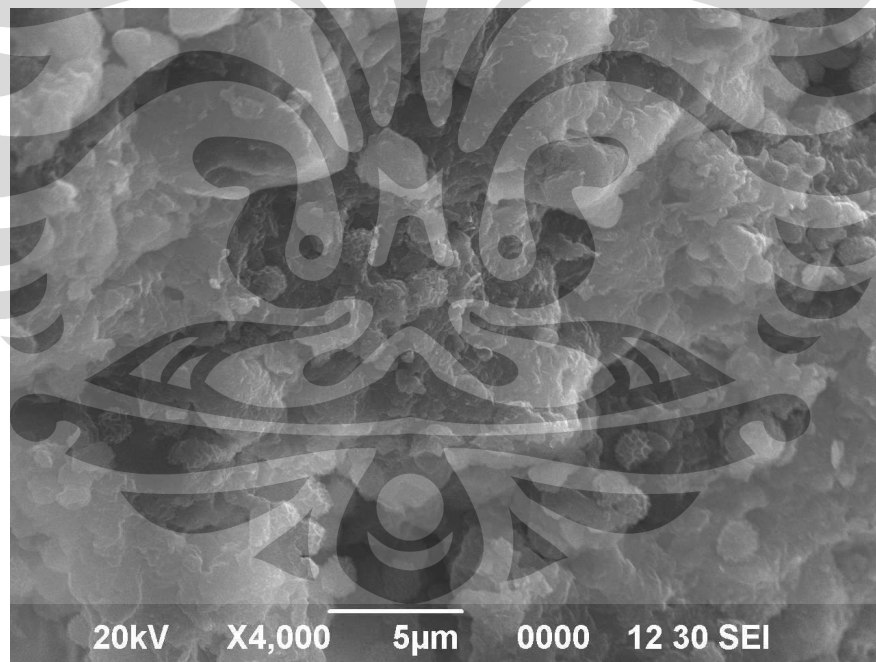
Sampel Uji TPC	$\Sigma$ Mikroorganisme (CFU/g)
Kompos Awal Sebelum Biofiltrasi	$1,35 \cdot 10^{11}$
Kompos Setelah Biofiltrasi Seluruh Variasi Laju Alir	$2,37 \cdot 10^{10}$
Kompos Setelah Biofiltrasi Seluruh Variasi Kedalaman Medium Filter	$1,45 \cdot 10^{11}$

#### 4.4.6.2 Uji SEM (Scanning Electron Microscope)

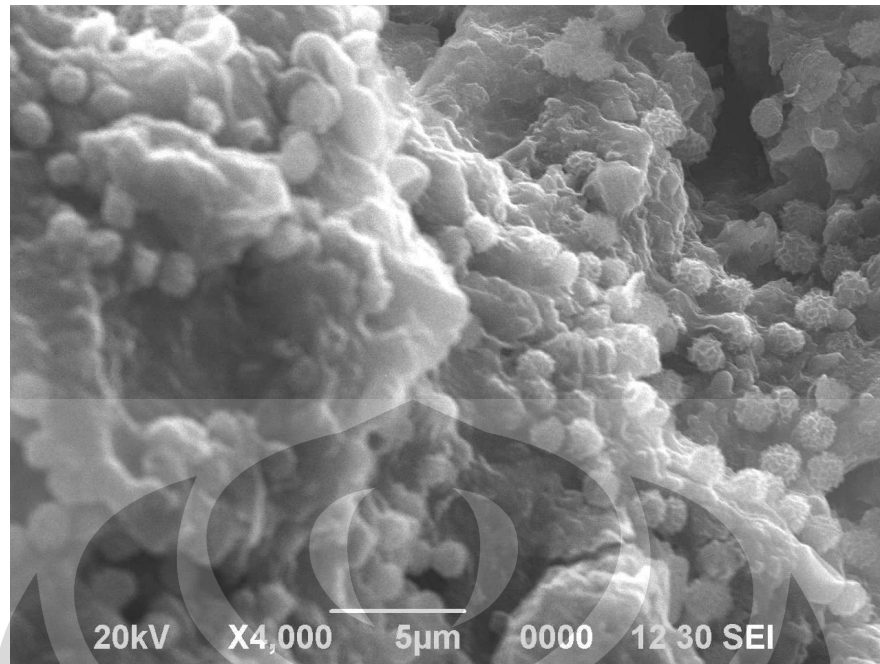
Jumlah mikroorganisme sebelum dan setelah biofiltrasi juga dapat diamati melalui hasil uji kompos dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) untuk melihat morfologi kompos. Gambar 4.26 hingga Gambar 4.28 di bawah ini menunjukkan jumlah mikroorganisme yang terlihat pada medium filter yang diuji dengan menggunakan SEM.



**Gambar 4.26** Hasil Uji SEM pada kompos awal sebelum biofiltrasi



**Gambar 4.27** Hasil Uji SEM pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi laju alir



**Gambar 4.28** Hasil Uji SEM pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi kedalaman medium filter

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 laju alir dan variasi kedalaman medium filter. 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 degradasi dalam reduksi polutan di dalam kinerja biofilter.

## BAB 5

### KESIMPULAN

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

- Efisiensi reduksi optimum dicapai pada laju alir 88 cc/menit sebesar 61,3%.
- Kedalaman 50 cm merupakan kedalaman medium filter optimum dalam mereduksi  $N_2O$  dengan efisiensi reduksi sebesar 61,3 %.
- pH medium awal sebelum biofiltrasi akan berkurang pada saat setelah biofiltrasi karena terjadi proses biodegradasi yang menghasilkan produk akhir asam.
- Porositas kompos setelah biofiltrasi akan berkurang dibandingkan kompos awal karena telah terjadi kompaksi medium akibat adanya aliran gas polutan di dalam medium filter.
- Kandungan moisture (MC) atau water content mengalami peningkatan dari nilai awal 57,72% menjadi nilai akhir 65,1% pada akhir variasi laju alir dan 63,65% pada akhir variasi kedalaman medium filter disebabkan oleh adanya absorpsi moisture dari gas keluaran.
- Radius pori dari medium kompos berbasis kotoran sapi adalah  $9\text{\AA}$  dan didefinisikan sebagai mikropori.
- Rasio C/N kompos berbasis kotoran sapi lebih rendah dibandingkan kompos berbasis kotoran kambing.
- Efisiensi reduksi  $N_2O$  yang dihasilkan pada jam ke-9 oleh kompos berbasis kotoran sapi cenderung lebih baik dibandingkan dengan kompos berbasis kotoran kambing.
- Kinerja biofilter dalam mereduksi  $N_2O$  hingga mencapai efisiensi reduksi optimum diperoleh pada laju alir 88 cc/menit dan kedalaman medium 50 cm.

## DAFTAR REFERENSI

- American Public Health Association (APHA). 1995. *Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th ed.* Washington, DC: Author.
- Anonim. *Pajanan (exposure)*. [www.udarakota.bappenas.go.id](http://www.udarakota.bappenas.go.id). (Diakses tanggal 28 Desember 2008).
- Anonim. *NOx Removal*. [www.NoxRemoval.com/index](http://www.NoxRemoval.com/index). (Diakses tanggal 28 Desember 2008).
- Anonim. *Dampak dari pencemaran udara*. <http://udarakota.bappenas.go.id/view.php?page=dampak>. (Diakses tanggal 8 Desember 2008).
- Asian Least Cost Greenhouse Gas Abatement Strategy. 1997. *Mengurangi emisi gas rumah kaca*. <http://www.pelangi.or.id/publikasi/megrk-bab1.htm>. (Diakses tanggal 8 Desember 2008).
- Badan Standardisasi Nasional. 2000. *Pupuk NPK padat*. SNI 02-2803-2000. [http://websisni.bsn.go.id/index.php?/sni\\_main/sni/detail\\_sni/3187](http://websisni.bsn.go.id/index.php?/sni_main/sni/detail_sni/3187). (Diakses tanggal 27 Desember 2009).
- Balai Penelitian Tanah. 2005. Pupuk organik tingkatkan produksi pertanian. Dalam *Warta Penelitian dan Pengembangan Pertanian* (Vol. 27, No.6). Bogor.
- Barnes, J.M., W.A. Apel, and K.B. Barrett. 1994. Removal of nitrogen oxides from gas stream using biofiltration. *J. Hazard. Matter*.
- Bitton, G. 1994. *Wastewater Microbiology*. New York : JohnWiley & Sons.
- Chung, Y.C., Huang, C., Tseng, C.P., Pan, J.R. 2000. Biotreatment of H<sub>2</sub>S and NH<sub>3</sub> containing waste gases by co-immobilized cells biofilter. *Chemosphere* 41, 329–336.
- Chung, Y.C., Huang, C., Tseng, C.P. 2001. Biological elimination of H<sub>2</sub>S and NH<sub>3</sub> from waste gases by biofilter packed with immobilized heterotrophic bacteria. *Chemosphere* 43, 1043–1050.
- Deviny, J.S., M.A. Deshusses, and T.S. Webster. 1999. *Biofiltration for air pollution control*. Lewis publishers.

- EPA. 1983. *Proses design manual and application of municipal Sludge*. US EPA Cincinnanti: Author.
- EPA. 2003. *Using bioreactors to control air pollution*. US North Carolina: Author.
- Frietag, A., and E. Block. 1990. Energy conversation in nitrobacter. *FEMS Microbiology Letters*, Vol.60, pp 157-162.
- Garcia C, Hernandez T, Costa F, Ceccanti B. 1994. Biochemical parameters in soils regenerated by the addition of organic wastes. *Wastes Management and Res.* 12:457-466.
- Gaur, A.R. 1983. *Manual of rural composting*. FAO USA.
- Govind, R. 1998. Biofiltration: An innovative technology for The future. *Paper submitted to Environmental Progress*.
- Hirai et al. 1999. Comparison of biological removal characteristic of H<sub>2</sub>S and NH<sub>3</sub> using for kind of inorganic carrier.
- Hong, Jih Yung. 2003. Manure compost biofilter. *Bioindustrial Machinery Engineering*, Sonchon National University.
- Houghton, C., Cain, R.B. 1972. Microbial metabolism of the pyridine ring. *Biochem. J.* 130, 879–893.
- Hudepohl, Nate J. 1999. Biofilter technology for NO<sub>x</sub> control. University of California, Davis.
- Jin, Y., M.Veiga, and C.Kennes. 2005. Bioprocesses for the removal of nitrogen oxides from polluted air. *J. Chem. Technol, Biotechnol*, Vol. 80, pp 483–494.
- Kardono, K., E.R. Allen. 1995. Elimination of benzene using a compost biofilter. *88th Annual AWMA Meeting & Exhibition*, 95-TP9C.01.
- Kurnia, U. dkk. 2001. *Perkembangan dan penggunaan pupuk organik di Indonesia*. Jakarta: Direktorat Pupuk dan Pestisida, Direktorat Jendral Bina Sarana Pertanian.
- Lackey, L., T. Holt. 1996. Not for the birds. *WEF Industrial Wastewater*, Vol. 4, pp 31–33.
- Liang, Y. et al. 2000. Long term results of ammonia removal and transformation by biofiltration. *J. Hazard. Mater*, Vol. 80, pp 259-269.

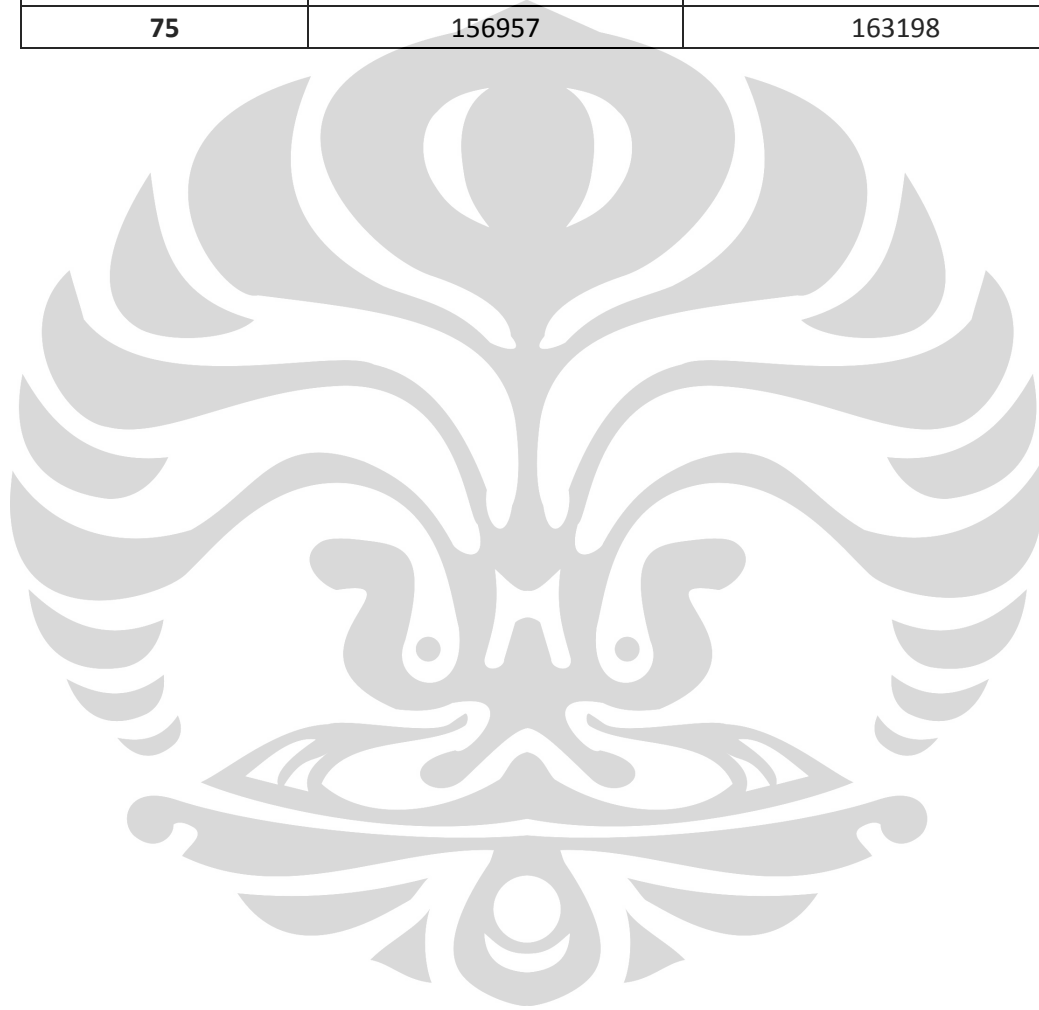
- Liu, Yonghui, et al. 2004. Removal of ternary VOCs in air streams at high loads using a compost-based biofilter. Dalian University of Technology, China.
- Morgenroth, E. et al. 1995. Nutrient limitation in a compost biofilter degrading hexane. *88th Annual AWMA Meeting & Exhibition*, 95-TP9C.05.
- Nicolai, R.E., K.A. Janni. 2001. Biofilter media mixture ratio of wood chips and compost treating swine odors. *Water Sci. Technol*, Vol. 44, pp 261-267.
- Ottengraph, S.P.P. 1977. Theoretical model for a submerged biological filtration. *Biotechnol. Bioeng.* 19, 1411–1418.
- Pohan, M. Yusuf Hanafiah, Faisal Yunus, dan Wiwien Heru Wiyono. 2003. *Asma dan polusi udara*. Jakarta: Bagian Pulmonologi dan Ilmu Kedokteran Respirasi, Fakultas Kedokteran Universitas Indonesia, Rumah Sakit Persahabatan.
- Ramírez-Lopez E et al. 2003. Characterization of five agricultural byproducts as potential biofilters carriers. *Bioresource Technology*, 88, 259–263
- Remde, A., F.Slemder and R. Canrad. 1989. Microbial production and uptake of nitric oxide in soil. *FEMS Microbial Ecology*, Vol.62, pp 221-230.
- Rosmarkam, Afandie dan Nasih Widya Yuwono. 2002. *Ilmu kesuburan tanah*. Yogyakarta: Kanisius.
- Schlegelmilch, M., J. Streese, and R. Stegmann. 2005. Odour management and treatment technologies: an overview. *Waste Manage*, Vol. 25 pp 928–939.
- Schuster, M., and R. Conrad. 1992. Metabolism of Nitric Oxide and Nitrous Oxide during Nitrification and Denitrification in Soil at different Incubation Condition. *FEMS Microbial Chemoautotrof*, Vol. 101, pp 133-143.
- Setyorini, Diah et al. 2006. *Pupuk organik dan pupuk hayati*. Jakarta: Direktorat Pupuk dan Pestisida, Direktorat Jendral Bina Sarana Pertanian.
- Sheridan, B.A., T.P. Curran, and V.A. Dodd. 2002. Assessment of the influence of media particle size on the biofiltration of odorous exhaust ventilation air from piggery facility, *Bioresour. Technol*, Vol. 84, pp 129-143.
- Shihabudheen, M.M, Ligy Philip. 2004. *Biofiltration : A natural way of Pollutants removal from flue gases*. Madras: Indian Institute of Technology.



- Suriawiria, H Unus. 2006. *Pupuk organik kompos dari sampah*. Bandung: Humaniora Utama Press.
- Utami dkk. 2009, Agustus. *Pengaruh parameter operasi dalam proses biofiltrasi N<sub>2</sub>O dengan medium filter berbasis kompos*. Makalah dipresentasikan pada Proceeding Seminar Tjipto Utomo 2009, Kampus ITENAS Bandung.
- Utami dkk. 2009, Juni. *Biosorption study for the removal of nitrous oxide gas using compost biofilter*. Makalah dipresentasikan pada International Symposium On Environmental Science and Technology, Shanghai.
- Van Groenestijn, J W. 2005. Biotechniques for air pollution control: past, present and future trends. *In: Proceedings of the International Congress on Biotechniques for Air Pollution Control*, pp 3–12. A Corun˜ a, Spain.
- Yang, Wan-Fa et al. 2007. The effect of selected parameters on the nitric oxide removal by biofilter. National Taiwan University, Taiwan.
- Ye, R. W. 1994. Denitrification: production and consumption of nitric oxide. *Applied Environmental Microbiology*, Vol. 60, pp 1053-1058.
- Zilli, M. et al. 1993. Phenol removal from waste gases with a biological filter by *Pseudomonas putida*. *Biotechnol. Bioeng.* Vol. 41, pp 693–699.
- Zilli, M. et al. 2001. Toluene and styrene removal from air in biofilter. *Process Biochem*, Vol. 37, pp 423–429.

**Lampiran 1. Data Hasil Uji Blangko**

t (menit)	Luas Area Peak N <sub>2</sub> O	
	<i>Sampling port atas</i>	<i>Sampling port bawah</i>
1	156957	103164
15	156957	129456
30	156957	130905
45	156957	150478
60	156957	156775
75	156957	163198



**Lampiran 1. Data Hasil Kalibrasi Laju Alir Gas N<sub>2</sub>O**

Skala <i>Flowmeter</i>	Volume pada <i>bubble soap</i> (cc)	t (detik)	Q (cc/menit)	Q rata-rata (cc/menit)
<b>0,1</b>	5	4,23	70,922	73,481
	5	4,07	73,710	
	5	4,03	74,442	
	5	4,04	74,257	
	5	4,05	74,074	
<b>0,15</b>	5	3,5	85,714	88,077
	5	3,48	86,207	
	5	3,3	90,909	
	5	3,43	87,464	
	5	3,33	90,090	
<b>0,175</b>	5	2,9	103,448	103,255
	5	2,83	106,007	
	5	2,94	102,041	
	5	2,92	102,740	
	5	2,94	102,041	
<b>0,2</b>	5	2,35	127,660	128,008
	5	2,36	127,119	
	5	2,31	129,870	
	5	2,39	125,523	
	5	2,31	129,870	
<b>0,3</b>	5	1,63	184,049	185,893
	5	1,63	184,049	
	5	1,59	188,679	
	5	1,6	187,500	
	5	1,62	185,185	
<b>0,4</b>	5	1,28	234,375	233,302
	5	1,3	230,769	
	5	1,27	236,220	
	5	1,28	234,375	
	5	1,3	230,769	

### Lampiran 3. Data Hasil Kalibrasi Gas N<sub>2</sub>O

Volume gas N <sub>2</sub> O dalam syringe	Waktu Retensi			Luas Area <i>Peak</i>		
	Udara	Uap air	N <sub>2</sub> O	Udara	Uap air	N <sub>2</sub> O
1,00E-06	0,252		0,798	2797804		30187
1,00E-06	0,237		0,793	2734313		30529
7,00E-07	0,235		0,787	1165827		17940
7,00E-07	0,24		0,772	1165322		16570
3,00E-07	0,235		0,797	297415		7444
3,00E-07	0,24		0,797	298773		7534
1,00E-07	0,243		0,798	95558		1365
1,00E-07	0,25		0,81	94697		1440
0,00E+00	0	0	0	0	0	0
0,00E+00	0	0	0	0	0	0

**Keterangan :**

Kandungan uap air tidak terdeteksi pada hasil kalibrasi karena konsentrasinya sangat kecil.

Waktu Retensi Udara = 0,2415 menit

Waktu Retensi N<sub>2</sub>O = 0,794 menit

## Lampiran 2. Data Hasil Uji Variasi Laju Alir

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/m<sup>3</sup>
- 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. Laju alir = 73,481 cc/menit (h = 49,7 cm, kompos kering = 945 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (g)	Konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE
	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	0,202		0,772	3844673		140673	96,4521		3,5291	4,72947E-06	0,008569794	8569,7936	
0	0,2	0,6	0,767	3748113	59613	66196	96,7212	1,5383	1,7082	2,2469E-06	0,004071383	4071,3828	0
1	0,213	0,615	0,782	3595758	48101	86626	96,3167	1,2885	2,3204	2,9279E-06	0,005305355	5305,3548	38,09238533
2	0,21	0,61	0,773	3530613	28266	84260	96,893	0,7757	2,3124	2,84903E-06	0,005162448	5162,4484	39,75994474
3	0,217	0,617	0,78	3430678	21501	82768	96,9889	0,6079	2,3399	2,7993E-06	0,005072332	5072,3316	40,81150799
4	0,205	0,603	0,767	3501370	12785	84131	97,3066	0,3553	2,3381	2,84473E-06	0,005154657	5154,6568	39,85086409
5	0,215	0,612	0,775	3332551	12686	81303	97,257	0,3702	2,3727	2,75047E-06	0,004983846	4983,8456	41,84404161
6	0,202	0,598	0,762	3354342	11450	82128	97,2773	0,3321	2,3818	2,77797E-06	0,005033676	5033,6756	41,2625807
7	0,195	0,595	0,76	3393466	7421	79255	97,5094	0,2132	2,2773	2,6822E-06	0,004860146	4860,1464	43,28747427
8	0,185	0,582	0,745	3399332	5148	78072	97,6103	0,1478	2,2418	2,64277E-06	0,004788693	4788,6932	44,12125398
9	0,198	0,583	0,75	3165149	6069	73851	97,5372	0,187	2,2758	2,50207E-06	0,004533745	4533,7448	47,09621945

(Lanjutan)

b. Laju alir = 88,077 cc/menit (h = 49,7 cm, kompos kering = 945 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (g)	Konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE
	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	0,223		0,865	4195722		150450	96,5271		3,4613	5,05537E-06	0,009160324	9160,3244	
0	0,22	0,658	0,85	4238309	420587	43694	90,1216	8,9432	0,9291	1,49683E-06	0,002712262	2712,262	0
1	0,217	0,642	0,815	4605385	166768	101180	94,4072	3,4186	2,0741	3,41303E-06	0,006184416	6184,4164	32,48692808
2	0,198	0,597	0,76	3897335	38685	98204	96,6068	0,9589	2,4343	3,31383E-06	0,006004666	6004,666	34,4491992
3	0,193	0,573	0,732	3640520	28416	89658	96,166	0,7506	2,3684	3,02897E-06	0,005488488	5488,4876	40,08413501
4	0,195	0,588	0,748	3511398	13815	87357	97,1749	0,3823	2,4175	2,95227E-06	0,005349507	5349,5072	41,60133456
5	0,19	0,578	0,737	3531779	9314	84523	97,391	0,2568	2,3308	2,8578E-06	0,005178334	5178,3336	43,4699758
6	0,168	0,558	0,712	3234914	8598	80957	97,0482	0,2579	2,4287	2,73893E-06	0,004962947	4962,9472	45,82127244
7	0,167	0,51	0,652	2922392	6495	71897	97,3876	0,2164	2,3959	2,43693E-06	0,004415723	4415,7232	51,79512202
8	0,167	0,503	0,642	2897549	6063	67908	97,5107	0,204	2,2853	2,30397E-06	0,004174788	4174,7876	54,42533018
9	0,188	0,565	0,717	3223374	5319	57410	97,9455	0,1616	1,7445	1,95403E-06	0,003540708	3540,7084	61,34734704

(Lanjutan)

c. Laju alir = 103,255 cc/menit (h = 49,7 cm, kompos kering = 945 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (g)	Konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE
	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	0,197	0,625	0,803	3633858	55	86748	97,6427	0,0015	2,3309	2,93197E-06	0,005312724	5312,7236	
0	0,173	0,537	0,685	2895804	22950	40009	97,8024	0,7751	1,3513	0,000001374	0,002489688	2489,688	0
1	0,192	0,578	0,737	3194401	29077	59571	97,2998	0,8857	1,8145	2,02607E-06	0,003671233	3671,2328	30,8973499
2	0,198	0,59	0,75	3206985	10295	49802	98,1039	0,3149	1,5235	1,70043E-06	0,003081185	3081,1852	42,0036608
3	0,188	0,542	0,688	2854185	4432	40887	98,4067	0,1528	1,4097	1,40327E-06	0,002542719	2542,7192	52,13906479
4	0,192	0,597	0,76	3329515	3959	34396	98,811	0,1175	1,0208	1,1869E-06	0,002150663	2150,6628	59,51863937
5	0,162	0,513	0,658	2365816	2832	37930	98,3062	0,1177	1,5761	1,3047E-06	0,002364116	2364,1164	55,50085835
6	0,17	0,508	0,648	2262440	2293	30956	98,5517	0,0999	1,3484	1,07223E-06	0,001942887	1942,8868	63,42955241
7	0,167	0,505	0,647	2286014	2562	41718	98,0626	0,1099	1,7896	1,43097E-06	0,002592912	2592,9116	51,19430644
8	0,167	0,503	0,643	2275757	2474	42888	97,9112	0,1065	1,8452	1,46997E-06	0,00266358	2663,5796	49,86414125
9	0,177	0,517	0,653	2685963	2522	25088	98,8784	0,0929	0,9236	8,76633E-07	0,00158846	1588,4596	70,10084244

(Lanjutan)

d. Laju alir = 128,008 cc/menit (h = 49,7 cm, kompos kering = 945 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (g)	Konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE
	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	0,168		0,683	2850306		66567	97,7179		2,2821	2,25927E-06	0,004093791	4093,7912	
0	0,17	0,532	0,683	2184566	236920	41715	88,6881	9,6184	1,6935	1,43087E-06	0,00259273	2592,7304	0
1	0,182	0,553	0,703	3090032	18846	56917	97,6068	0,5953	1,7979	1,9376E-06	0,003510931	3510,9312	14,23765824
2	0,162	0,507	0,648	2642226	5209	45093	98,1318	0,1935	1,6747	1,54347E-06	0,002796762	2796,7616	31,68284694
3	0,203	0,68	0,86	4433024	4646	38849	98,9287	0,1037	0,867	1,33533E-06	0,002419624	2419,624	40,89527575
4	0,157	0,505	0,647	2709542	2447	38042	98,5148	0,089	1,3962	1,30843E-06	0,002370881	2370,8812	42,08592759
5	0,147	0,468	0,607	2250717	1487	35995	98,3619	0,065	1,5731	1,2402E-06	0,002247242	2247,2424	45,10608162
6	0,183	0,542	0,685	3063960	1821	24084	99,1616	0,0589	0,7795	8,43167E-07	0,001527818	1527,818	62,67963056
7	0,185	0,535	0,678	2998842	1944	24148	99,0183	0,0642	0,7973	8,453E-07	0,001531684	1531,6836	62,58520464
8	0,187	0,548	0,693	3084958	2231	29688	98,8403	0,0715	0,9512	1,02997E-06	0,0018663	1866,2996	54,41146095
9	0,175	0,507	0,643	2794279	1787	37986	98,5966	0,0631	1,3404	1,30657E-06	0,002367499	2367,4988	42,16855027



(Lanjutan)

e. Laju alir = 185,892 cc/menit (h = 49,7 cm, kompos kering = 945 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (g)	Konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE
	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	0,175	0,575	0,728	3629901	360	72890	98,0219	0,0097	1,9683	2,47003E-06	0,0044757	4475,7004	
0	0,182	0,597	0,753	3840420	30191	64421	97,5956	0,7672	1,6371	2,18773E-06	0,003964173	3964,1728	0
1	0,173	0,545	0,692	3409914	5404	40519	98,6712	0,1564	1,1725	0,000001391	0,002520492	2520,492	43,68497051
2	0,178	0,522	0,66	2936354	2801	34088	98,7593	0,0942	1,1465	1,17663E-06	0,00213206	2132,0596	52,36366581
3	0,188	0,547	0,692	3103931	2108	29077	98,8544	0,0671	0,9261	1,0096E-06	0,001829395	1829,3952	59,12605768
4	0,18	0,537	0,682	3158825	2020	27955	99,0017	0,0633	0,8762	9,722E-07	0,001761626	1761,6264	60,64020728
5	0,182	0,528	0,672	3157205	1977	42658	98,3756	0,0616	1,3292	1,4623E-06	0,002649688	2649,6876	40,79836979
6	0,188	0,537	0,68	3086396	1845	39004	98,4387	0,0588	1,2440	1,3405E-06	0,002428986	2428,986	45,72947733
7	0,192	0,563	0,715	3291076	2157	37614	98,806	0,0648	1,1293	1,29417E-06	0,00234503	2345,03	47,60529548
8	0,18	0,507	0,64	2774609	1523	39690	98,5364	0,0541	1,4095	1,36337E-06	0,00247042	2470,4204	44,80371385
9	0,178	0,515	0,653	2984910	1393	31485	98,9105	0,0462	1,0433	1,08987E-06	0,001974838	1974,8384	55,87643891

(Lanjutan)

f. Laju alir = 233,301 cc/menit (h = 49,7 cm, kompos kering = 945 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (g)	Konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE
	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	0,197		0,708	4675586		93303	98,0435		1,9565	3,15047E-06	0,005708646	5708,6456	
0	0,18	0,545	0,702	2939760	375565	61359	87,0606	11,1223	1,8171	2,08567E-06	0,003779228	3779,228	0
1	0,218	0,693	0,842	9106910	8621	72310	99,1192	0,0938	0,787	2,4507E-06	0,004440668	4440,6684	22,21152422
2	0,157	0,542	0,697	3411242	3785	75695	97,7231	0,1084	2,1685	2,56353E-06	0,004645122	4645,1224	18,63004423
3	0,14	0,508	0,655	3132924	2235	67421	97,7362	0,0697	2,1033	2,28773E-06	0,004145373	4145,3728	27,38430285
4	0,16	0,508	0,65	3096089	1875	66801	97,83	0,0593	2,1108	2,26707E-06	0,004107925	4107,9248	28,04029033
5	0,15	0,503	0,655	2769958	1703	71205	97,4354	0,0599	2,5047	2,41387E-06	0,004373926	4373,9264	23,38066318
6	0,162	0,508	0,647	3222429	1514	63523	98,0217	0,0461	1,9323	2,1578E-06	0,003909934	3909,9336	31,50855958
7	0,173	0,513	0,657	3105063	1407	65682	97,8851	0,0444	2,0706	2,22977E-06	0,004040337	4040,3372	29,22424191
8	0,093	0,5	0,662	2026195	1261	76012	96,3264	0,0599	3,6137	2,5741E-06	0,004664269	4664,2692	18,29464418
9	0,168	0,518	0,663	3373809	1414	70464	97,9139	0,041	2,045	2,38917E-06	0,00432917	4329,17	24,16467402

### Lampiran 3. Pengolahan Data Perhitungan EC (*Elimination Capacity*) vs *Inlet Loading*

Langkah perhitungan EC vs *Inlet Loading*:

- Menentukan konsentrasi masukan N<sub>2</sub>O untuk seluruh laju alir (t = 0).
- Mencari konsentrasi keluaran N<sub>2</sub>O untuk tiap laju alir (t=9).
- Menghitung volum medium filter yang digunakan, dengan diameter dalam 7,35 cm dan kedalaman medium filter 49,7 cm.
- Menghitung *Inlet Loading* dengan menggunakan Persamaan 2.4.
- Menghitung EC dengan menggunakan Persamaan 2.6.

Q (cc/menit)	Q (m <sup>3</sup> /hr)	C in (g/m <sup>3</sup> )	C out (g/m <sup>3</sup> )	<i>Inlet Loading</i> (g/m <sup>3</sup> .h)	EC (g/m <sup>3</sup> .h)
73	0,0044	9160,3244	4533,7448	19036,37453	9614,648807
88	0,0053	9160,3244	3540,7084	22947,95834	14077,96364
103	0,0062	9160,3244	1588,4596	26859,54215	22201,92352
128	0,0077	9160,3244	2367,4988	33378,84849	24752,03788
186	0,0112	9160,3244	1974,8384	48503,63921	38046,92992
233	0,0140	9160,3244	4329,17	60759,93515	32044,78523

### Lampiran 6. 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/m<sup>3</sup>
- 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 60 cm (Q = 88 cc/menit, massa = 1134 g, h = 63,4 cm)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (g)	Konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE
	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	0,192	0,562	0,708	3339816	5204	94661	97,0967	0,1513	2,752	3,19573E-06	0,005790669	5790,6688	
0	0,2	0,552		2777331	629129		81,5313	18,4687		4,03667E-08	7,31444E-05	73,1444	0
1	0,188	0,543	0,702	3038910	516290	33683	84,6756	14,3858	0,9385	1,16313E-06	0,002107598	2107,5976	63,60355474
2	0,19	0,552	0,703	3219714	137831	93515	93,2964	3,9939	2,7097	3,15753E-06	0,00572145	5721,4504	1,195343792
3	0,192	0,557	0,707	3281994	66639	85492	95,57	1,9405	2,4895	2,8901E-06	0,005236861	5236,8612	9,563793391
4	0,19	0,555	0,703	3297343	42449	71224	96,4332	1,2415	2,083	2,4145E-06	0,004375074	4375,074	24,44613652
5	0,185	0,557	0,707	3288644	28497	71188	97,0226	0,8407	2,1002	2,4133E-06	0,0043729	4372,8996	24,48368658
6	0,2	0,56	0,71	3334736	21220	69191	97,337	0,6194	2,0196	2,34673E-06	0,004252281	4252,2808	26,56667223
7	0,192	0,553	0,702	3349501	15552	62699	97,5216	0,4528	1,8255	2,13033E-06	0,003860164	3860,164	33,33820093
8	0,2	0,562	0,71	3380086	12480	59101	97,9262	0,3616	1,7122	2,0104E-06	0,003642845	3642,8448	37,0911215
9	0,185	0,56	0,708	3297577	11562	52434	98,0963	0,3439	1,5598	1,78817E-06	0,003240158	3240,158	44,04518525

(Lanjutan)

b. Kedalaman 80 cm ( $Q = 88$  cc/menit, massa = 1512 g,  $h = 82$  cm, dengan *perforated plate*)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (g)	Konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE
	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	0,192		0,708	3366234		96614	97,21		2,79	3,26083E-06	0,00590863	5908,63	
0	0,188	0,555	0,702	3305567	90664	17696	96,8259	2,6557	0,5183	6,30233E-07	0,001141983	1141,9828	0
1	0,192	0,555	0,707	3410079	69006	30437	97,1665	1,9663	0,8673	1,05493E-06	0,001911539	1911,5392	67,64835165
2	0,198	0,567	0,717	3340753	38048	50369	97,3866	1,1091	1,4683	1,71933E-06	0,003115432	3115,432	47,27319192
3	0,185	0,558	0,708	3367565	25806	61216	97,3755	0,7462	1,7701	2,0809E-06	0,003770591	3770,5908	36,18502428
4	0,193	0,565	0,717	3386978	17888	70241	97,464	0,5147	2,0212	2,38173E-06	0,004315701	4315,7008	26,95936622
5	0,198	0,567	0,717	3344100	16386	67984	97,5391	0,4779	1,9829	2,3065E-06	0,004179378	4179,378	29,26654741
6	0,185	0,562	0,712	3318463	13569	60562	97,5705	0,399	1,7807	2,0591E-06	0,003731089	3731,0892	36,85356504
7	0,198	0,568	0,718	3321415	11866	55845	97,7582	0,3492	1,6437	1,90187E-06	0,003446182	3446,1824	41,67544084
8	0,197	0,565	0,715	3391614	10245	50507	98,2403	0,2968	1,463	1,72393E-06	0,003123767	3123,7672	47,13212369
9	0,2	0,563	0,713	3355777	9363	44600	98,4174	0,2746	1,308	1,52703E-06	0,002766984	2766,9844	53,17045745

(Lanjutan)

c. Kedalaman 100 cm ( $Q = 88$  cc/menit, massa = 1890 g,  $h = 99$  cm, dengan *perforated plate*)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (g)	Konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE
	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	0,198	0,565	0,715	3356592	23567	118231	95,9468	0,6737	3,3796	3,9814E-06	0,007214297	7214,2968	
0	0,183	0,54		3018144	569998		84,1144	15,8856		4,03667E-08	7,31444E-05	73,1444	0
1	0,19	0,545		3052682	624204		83,0236	16,9764		4,03667E-08	7,31444E-05	73,1444	98,98611879
2	0,188	0,55	0,705	3203942	348080	112984	87,4198	9,4974	3,0828	3,8065E-06	0,006897378	6897,378	4,392927111
3	0,177	0,547	0,698	3336052	142815	115906	92,7798	3,9719	3,2235	3,9039E-06	0,007073867	7073,8668	1,946551464
4	0,19	0,558	0,708	3471022	64651	106616	95,2978	1,775	2,9272	3,59423E-06	0,006512751	6512,7508	9,724385057
5	0,188	0,555	0,705	3453866	43325	76108	96,6576	1,2125	2,1299	2,5773E-06	0,004670068	4670,0676	35,26648917
6	0,192	0,56	0,71	3448954	32972	74942	96,966	0,927	2,107	2,53843E-06	0,004599641	4599,6412	36,2426952
7	0,19	0,558	0,708	3511038	30143	75549	97,0777	0,8334	2,0889	2,55867E-06	0,004636304	4636,304	35,73449875
8	0,185	0,563	0,715	3586270	28437	75500	96,9147	0,7685	2,0403	2,55703E-06	0,004633344	4633,3444	35,77552285
9	0,192	0,558	0,708	3561928	23702	74794	97,0085	0,6455	2,037	2,5335E-06	0,004590702	4590,702	36,36660471

(Lanjutan)

d. Kedalaman 70 cm ( $Q = 88$  cc/menit, massa = 1323 g,  $h = 69,2$  cm)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Massa N <sub>2</sub> O (g)	Konsentrasi N <sub>2</sub> O (g/m <sup>3</sup> )	% RE
	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	0,192		0,702	3451700		120843	96,6175		3,3825	4,06847E-06	0,007372062	7372,0616	
0	0,187	0,55	0,7	3497537	83701	9076	96,8124	2,3169	0,2512	3,429E-07	0,000621335	621,3348	0
1	0,192	0,562	0,715	3391959	73647	36445	96,8564	2,103	1,0407	1,2552E-06	0,002274422	2274,4224	69,148082
2	0,198	0,563	0,715	3367507	47023	67549	96,7097	1,3504	1,9399	0,000002292	0,004153104	4153,104	43,66427975
3	0,192	0,563	0,713	3386173	28544	73724	97,0684	0,8182	2,1134	2,49783E-06	0,004526074	4526,074	38,60504367
4	0,2	0,568	0,718	3375139	19139	75485	96,6953	0,5483	2,1626	2,55653E-06	0,004632438	4632,4384	37,16223966
5	0,198	0,565	0,715	3374942	15392	73831	97,4244	0,4443	2,1313	2,5014E-06	0,004532537	4532,5368	38,51737755
6	0,19	0,565	0,718	3471738	15049	76005	97,4443	0,4224	2,1333	2,57387E-06	0,004663846	4663,8464	36,73619873
7	0,198	0,573	0,725	3425428	13023	75833	97,1281	0,3693	2,1502	2,56813E-06	0,004653458	4653,4576	36,87711996
8	0,177	0,558	0,71	3458198	11991	75282	97,5151	0,3381	2,1228	2,54977E-06	0,004620177	4620,1772	37,32855949
9	0,19	0,56	0,712	3449274	11637	75259	97,5426	0,3291	2,1283	0,000002549	0,004618788	4618,788	37,34740361

### Lampiran 7. Pengolahan Data Hasil *Total Plate Count* (TPC)

Berikut ini adalah langkah-langkah perhitungan uji TPC.

- Melakukan pengeceran sebesar  $10^6$ ,  $10^7$ ,  $10^8$ ,  $10^9$ .
- Menghitung jumlah koloni bakteri dalam setiap cawan petri pada pengenceran tertentu.
- Menghitung jumlah bakteri pada setiap sampel dengan persamaan berikut:

$$\Sigma \text{bakteri} \left( \frac{\text{CFU}}{\text{g}} \right) = \frac{\text{Jumlah koloni bakteri}}{\text{Volume pengeceran} \cdot \text{volume sampel pada cawan petri}} \times \frac{90 \text{ mL}}{\text{massa sampel kompos awal}}$$

- Percobaan ini dilakukan secara replikasi. Oleh karena itu, jumlah bakteri dihitung rata-ratanya untuk tiap sampel.

Contoh perhitungan:

- Untuk pengeceran  $10^6$ :

$$\Sigma \text{bakteri} \left( \frac{\text{CFU}}{\text{g}} \right) = \frac{9}{10^{-6} \cdot 0,1 \text{ mL}} \times \frac{90 \text{ mL}}{9,7} = 8,35 \cdot 10^7$$

- Untuk pengeceran  $10^7$ :

$$\Sigma \text{bakteri} \left( \frac{\text{CFU}}{\text{g}} \right) = \frac{6,5}{10^{-7} \cdot 0,1 \text{ mL}} \times \frac{90 \text{ mL}}{9,7} = 6,03 \cdot 10^9$$



(Lanjutan)

- Untuk pengenceran  $10^8$ :

$$\Sigma \text{bakteri} \left( \frac{\text{CFU}}{\text{g}} \right) = \frac{0}{10^{-8} \cdot 1 \text{ mL}} \times \frac{90 \text{ mL}}{9,7} = 0$$

- Untuk pengenceran  $10^9$ :

$$\Sigma \text{bakteri} \left( \frac{\text{CFU}}{\text{g}} \right) = \frac{58}{10^{-9} \cdot 1 \text{ mL}} \times \frac{90 \text{ mL}}{9,7} = 5,38 \cdot 10^{11}$$

Rata-rata jumlah bakteri dari seluruh pengenceran =  $1,35 \cdot 10^{11}$  CFU/g

a. Kompos sebelum biofiltrasi

Volume Pengenceran	Pengenceran	Jumlah Koloni	Rata-rata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Rata-rata jumlah (CFU/g)
1.00E+06	1.00E-06	14	9	8.35E+07	<b>1.35E+11</b>
1.00E+06	1.00E-06	4			
1.00E+07	1.00E-07	1	6.5	6.03E+08	
1.00E+07	1.00E-07	12			
1.00E+08	1.00E-08	0	0	0.00E+00	
1.00E+08	1.00E-08	0			
1.00E+09	1.00E-09	47	58	5.38E+11	
1.00E+09	1.00E-09	69			

Universitas Indonesia

(Lanjutan)

b. Kompos kering setelah biofiltrasi pada akhir variasi laju alir

Volume Pengenceran	Pengenceran	Jumlah Koloni	Rata-rata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Rata-rata jumlah (CFU/g)
1.00E+06	1.00E-06	93	100.5	9.32E+08	<b>2.37E+10</b>
1.00E+06	1.00E-06	108			
1.00E+07	1.00E-07	74	55	5.10E+09	
1.00E+07	1.00E-07	36			
1.00E+08	1.00E-08	37	50.5	4.69E+10	
1.00E+08	1.00E-08	64			
1.00E+09	1.00E-09	1	4.5	4.18E+10	
1.00E+09	1.00E-09	8			
Uji blanko		1			

(Lanjutan)

c. Kompos kering setelah biofiltrasi pada akhir variasi kedalaman medium filter

Volume Pengenceran	Pengenceran	Jumlah Koloni	Rata-rata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Rata-rata jumlah (CFU/g)
1.00E+06	1.00E-06	117	152.5	1.41E+09	<b>1.45E+11</b>
1.00E+06	1.00E-06	188			
1.00E+07	1.00E-07	154	172	1.59E+10	
1.00E+07	1.00E-07	190			
1.00E+08	1.00E-08	26	21.5	1.99E+10	
1.00E+08	1.00E-08	17			
1.00E+09	1.00E-09	69	58.5	5.42E+11	
1.00E+09	1.00E-09	48			
Uji blanko		6			

## Lampiran 8. Dokumentasi TPC

Gambar 1 hingga Gambar 8 merupakan visual dari prosedur analisis mikroba melalui metode TPC (*Total Plate Count*) seperti yang telah jelaskan sebelumnya (Bab 3).



**Gambar 1.** Cawan petri



**Gambar 2.** Nutrien agar yang digunakan



**Gambar 3.** Nutrien agar dilarutkan di atas *magnetic stirrer*

(Lanjutan)



**Gambar 4.** Proses sterilisasi dengan autoklaf



**Gambar 5.** *Transfer box* untuk memasukan sampel pada medium dengan kondisi steril dan aseptis



**Gambar 6.** Transfer aseptis

(Lanjutan)



**Gambar 7.** Inkubator



**Gambar 8.** Sterilisasi sampel yang telah dianalisis