



UNIVERSITAS INDONESIA

**EVALUASI KINERJA MEDIUM BERBASIS KOMPOS
KOTORAN SAPI SEBAGAI FILTER PADA BIOFILTRASI
DINITROGEN MONOKSIDA**

SKRIPSI

**SHILFA FILAYURI
0606076816**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**EVALUASI KINERJA MEDIUM BERBASIS KOMPOS
KOTORAN SAPI SEBAGAI FILTER PADA BIOFILTRASI
DINITROGEN MONOKSIDA**

SKRIPSI

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

**SHILFA FILAYURI
0606076816**

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

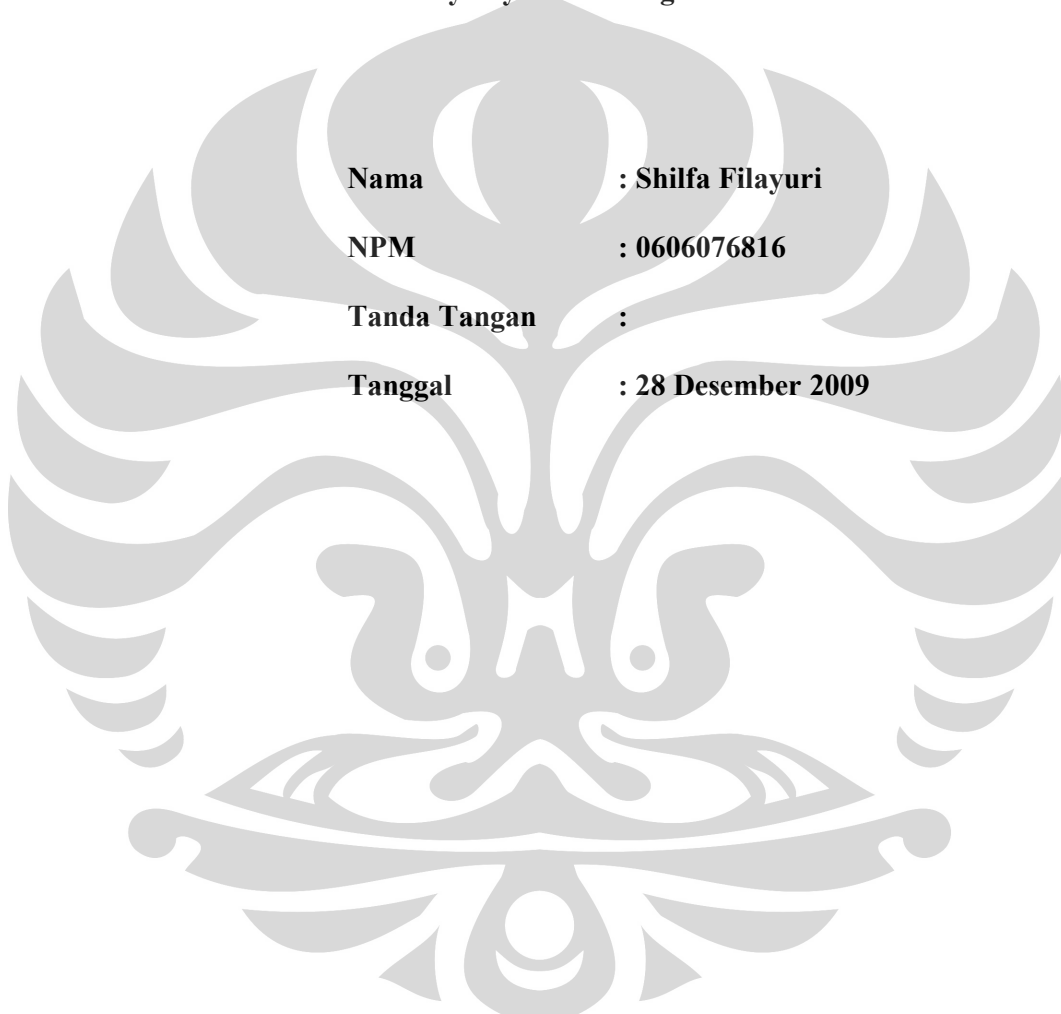
**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Shilfa Filayuri

NPM : 0606076816

Tanda Tangan :

Tanggal : 28 Desember 2009



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Shilfa Filayuri
NPM : 0606076816
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Evaluasi Kinerja Medium Berbasis Kompos Kotoran Sapi
Sebagai Filter Pada Biofiltrasi Dinitrogen Monoksida

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 Allah S.W.T, 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. dan Ir. Rita Arbianti, M.Si. selaku dosen pembimbing dan kepala Lab Dasar Proses Kimia yang telah memberikan izin pada penggunaan lab tersebut.
2. Dr. Heri Hermansyah, ST., M.Eng. selaku ketua riset grup bioproses yang telah banyak mendukung kami dalam melakukan penelitian dan penyusunan skripsi ini.
3. Kang Jajat, Mbak Fita, Mas Eko dan Mang Ijal sebagai teknisi laboratorium yang telah membantu saya secara teknis.
4. Orang tua dan kakak saya tercinta yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral.
5. Sahabat satu penelitian biofilter Cynthia yang selalu menyemangati saya dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Sahabat saya Yunita, Sifa, Emil, Aulia, Dian yang telah banyak memberikan dukungan dalam penyusunan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Allah S.W.T berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu

Depok, 28 Desember 2008

Penulis

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

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

Nama : Shilfa Filayuri
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
NPM : 0606076816
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

“Evaluasi Kinerja Medium Berbasis Kompos Kotoran Sapi Sebagai Filter Pada Biofiltrasi Dinitrogen Monoksida”

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Nonesklusif 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 : 28 Desember 2009
Yang menyatakan

(Shilfa Filayuri)

ABSTRAK

Nama : Shilfa Filayuri
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Evaluasi Kinerja Medium Berbasis Kompos Kotoran Sapi
Sebagai Filter Pada Biofiltrasi Dinitrogen Monoksida

Gas N_2O merupakan gas kontributor efek rumah kaca setelah CO_2 , CH_4 , dan uap air yang banyak dihasilkan sektor pertanian. Teknologi pengelolaan gas buang berbasis biologis yang memperoleh dukungan luas sebagai teknologi pengendalian gas buang ekonomis adalah biofiltrasi. Biofiltrasi melibatkan mikroorganisme terimobilisasi dalam biofilm pada pori-pori medium filter untuk mendegradasi polutan. Sejumlah faktor perlu dikontrol sehingga mikroba dapat mengabsorb dan mendegradasi gas buang secara efisien. Penelitian ini menginvestigasi parameter kedalaman medium filter dan kandungan air medium filter untuk mendapatkan efisiensi reduksi N_2O tinggi pada 9 jam biofiltrasi *batch*. Medium filter kompos dianalisis dengan *Total Plate Count* (TPC) dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk mengetahui perkembangan mikroorganisme setelah biofiltrasi. Jumlah mikroorganisme setelah biofiltrasi meningkat berdasarkan TPC dan hasil SEM. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi reduksi N_2O optimal didapatkan pada ketinggian 50 cm dan kandungan air 50% berat kompos dengan efisiensi reduksi sebesar 61,35% dan 61%.

Kata kunci:
Biofilter, kompos berbasis kotoran sapi, N_2O

ABSTRACT

Name : Shilfa Filayuri
Study Program : Chemical Engineering
Title : Performance Evaluation of Cow Manure Compost Based
Medium as Filter on Nitrous Oxide Biofiltration

N₂O is contributor to the greenhouse effect as CO₂, CH₄, and water vapor that most produced by agricultural sector. Biofiltration is biological waste gas management technology that being regarded as an economical exhaust gas control technology. Biofiltration involving microorganisms that immobilize in biofilms on medium filter pore to degrade pollutants. A number of factors need to be controlled so that the microbes can degrade and absorb exhaust gas efficiently. This study investigates medium filter depth and medium filter water content to obtain high reduction efficiency of N₂O in 9 hours batch biofiltration. Compost filter medium analyzed with Total Plate Count (TPC) and *Scanning Electron Microscope* (SEM) to see microorganisms growth after biofiltration. The number of microorganisms increased after biofiltration based on TPC results and Scanning Electron Microscope. The results showed the optimum efficiency of N₂O reduction obtained at an medium filter depth 50 cm and water content 50% compost weight with efficiency 61.35% and 61%.

Key words:
Biofilter, cow manure based compost, N₂O

DAFTAR ISI

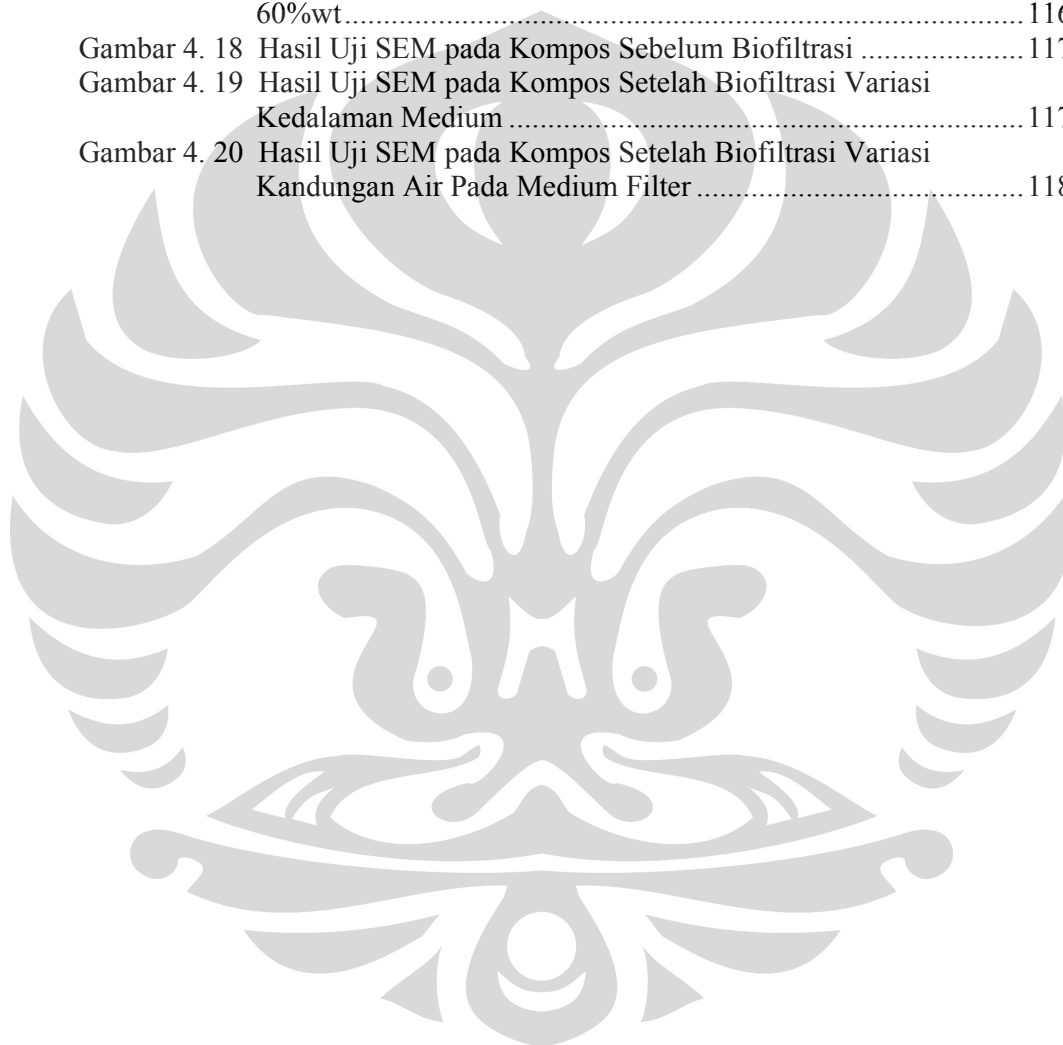
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN.....	v
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	6
1.5 Sistematika Penulisan.....	6
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Dinitrogen Monoksida.....	7
2.2 Biofilter	11
2.2.1 Deskripsi Proses Biofiltrasi.....	13
2.2.2 Mekanisme Biofiltrasi	14
2.2.3 Reduksi NO _x Pada Biofiltrasi.....	19
2.2.4 Terminologi Biofilter.....	20
2.2.5 Karakteristik Performa Biofilter.....	21
2.2.6 Kelebihan dan Kekurangan Biofiltrasi	23
2.2.7 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Biofiltrasi.....	24
2.3 Medium Filter Kompos.....	30
2.4 State of The Art Biofiltrasi	33
2.4.1 Biofiltrasi dengan Medium Alami.....	33
2.4.1.1 Biofiltrasi Amonia	33
2.4.1.2 Biofiltrasi Senyawa yang Mengandung Sulfur, Nitrogen	39
2.4.1.3 Biofiltrasi <i>Volatile Organic Compound</i>	41
2.4.1.4 Biofiltrasi NO _x	43
2.4.1.5 Biofiltrasi Nox di Universita Indonesia	45
2.4.2 Biofiltrasi dengan Medium Sintetik.....	47
2.4.2.1 Biofiltrasi Amonia.....	48
2.4.2.2 Biofiltrasi H ₂ S.....	50
2.4.3 Biofiltrasi dengan Medium Alami dan Sintetik	50
2.4.3.1 Biofiltrasi Amonia.....	50
2.4.3.2 Biofiltrasi yang Mengandung Sulfur, Nitrogen	53
2.4.3.3 <i>Biofiltrasi Volatile Organic Compound</i>	57

BAB 3. METODE PENELITIAN.....	67
3.1 Diagram Alir Penelitian	67
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	69
3.2.1 Alat	69
3.2.2 Bahan	71
3.3 Prosedur Penelitian	72
3.3.1 Instalasi Manometer Sistem Biofilter	72
3.3.2 Preparasi Medium Filter	72
3.4 Uji Sifat Kompos.....	75
3.5 Uji Kebocoran Alat.....	77
3.6 Kalibrasi Laju Alir dan Gas N ₂ O	78
3.7 Eksperimen Biofiltrasi	79
3.7.1 Variasi Kedalaman Medium Filter	80
3.7.2 Variasi Kandungan Air	80
3.8 Data Penelitian.....	81
3.5 Pengukuran dan Analisis.....	81
3.5.1 Analisis Gas N ₂ O.....	81
3.5.2 Analisis perkembangan bakteri dengan TPC (<i>Total Plate Count</i>).....	82
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	85
4.1 Instalasi Manometer Pada Sistem Biofilter	85
4.2. Preparasi Medium Filter.....	87
4.3 Uji Kebocoran dan Uji Blangko.....	89
4.4 Kalibrasi <i>Flowmeter</i>	91
4.5 Uji Waktu Tinggal.....	93
4.6. Kalibrasi Gas N ₂ O.....	94
4.7. Uji Karakteristik Kompos Berbasis Kotoran Sapi.....	95
4.7.1 Uji Kandungan Elemen C,N,P,K,S Kompos.....	96
4.7.2 Uji Luas Permukaan Medium Filter Kompos	98
4.8. Sifat Medium Kompos Sebelum dan Sesudah Biofiltrasi	99
4.9. Uji Kinerja Biofilter	100
4.9.1 Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N ₂ O	100
4.9.2 Pengaruh Kedalaman Medium Terhadap Reduksi N ₂ O	102
4.9.3 Pengaruh Kandungan Air Medium Terhadap Reduksi N ₂ O.....	106
4.9.4 Hasil Uji Perkembangan Mikroba pada Kompos.....	111
BAB 5. KESIMPULAN.....	119
DAFTAR REFERENSI.....	120
LAMPIRAN	129

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1	Kenaikan Suhu Permukaan Bumi Akibat Pemanasan Global	1
Gambar 1. 2	Emisi N ₂ O di dunia	3
Gambar 2. 1	Struktur Molekul Gas Dinitrogen Monoksida	7
Gambar 2. 2	Emisi Gas Rumah Kaca Global Dari Berbagai Sektor Pada Tahun 2000	10
Gambar 2. 3	Skema Unit Biofiltrasi Konvensional	14
Gambar 2. 4	Degradasi Polutan Pada Biofiltrasi Oleh Mikroorganisme	16
Gambar 2. 5	Proses Adsorpsi Pada Biofilter	17
Gambar 2. 6	Aliran Kontaminan Udara Dalam Biofilter	18
Gambar 2. 7	Model Gas Transsfer	18
Gambar 2. 8	Jalur Metabolisme Nitrogen	20
Gambar 2. 9	Tipe Kurva EC vs Loading	23
Gambar 2.10	Konsentrasi Amonia Sepanjang Kolom	38
Gambar 2.11	Profil EC dan RE Untuk Konsentrasi Amonia Masukan 45,120, dan 240 ppmv	39
Gambar 2. 12	Pall Rings	48
Gambar 2. 13	<i>Mapping State of The Art Biofilter</i>	65
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian Biofiltrasi.....	67
Gambar 3. 2	Diagram Skematik Desain Biofilter Skala Laboratorium.....	71
Gambar 3. 3	Diagram Prosedur Pengomposan.....	73
Gambar 3. 4	Bahan yang Digunakan Dalam Pengomposan	71
Gambar 3. 5	Pembuatan Kompos Campuran Bahan-bahan Kompos dan Pengadukan	74
Gambar 3. 6	Penambahan EM4	74
Gambar 3. 7	Penutupan dengan Terpal Selama 10 hari	75
Gambar 3. 8	Diagram Alir Prosedur Kalibrasi Laju Alir	78
Gambar 3. 9	Diagram Alir Prosedur Sterilisasi Alat.....	83
Gambar 3.10	Diagram Alir Prosedur Sterilisasi Bahan	83
Gambar 4. 1	Sistem Biofilter Skala Laboratorium Pada Penelitian Ini.....	86
Gambar 4. 2	Proses pengeringan kompos dengan kondisi T= 33 ^o C	88
Gambar 4. 3	Uji Kebocoran dan Blangko Biofilter	90
Gambar 4. 4	Kalibrasi Flowmeter.....	92
Gambar 4. 5	Sampel Grafik yang Terdeteksi Pada Gas N ₂ O dan Udara	94
Gambar 4. 6	Hasil Kalibrasi N ₂ O.....	95
Gambar 4. 7	Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N ₂ O.....	101
Gambar 4. 8	Profile Efisiensi Reduksi N ₂ O Pada Variasi Kedalaman Medium Filter	103
Gambar 4. 9	Perbandingan Efisiensi Reduksi Pada Uji Variasi Kedalaman Medium Filter Kompos	105
Gambar 4. 10	<i>Pressure Drop</i> Kolom Biofilter Pada Variasi Kedalaman Medium Filter	106
Gambar 4. 11	Profil Efisiensi Reduksi N ₂ O Pada Variasi Kandungan Air Dalam Kompos.....	107

Gambar 4. 12 Efisiensi Reduksi Pada Uji Variasi Kandungan Air Pada Kompo	109
Gambar 4. 13 Perbandingan Efisiensi Reduksi Pada Uji Variasi Kandungan Air Pada Kompos Berbasis Kotoran Sapi dan Kambing	110
Gambar 4. 14 Medium Agar Sebelum Digunakan Uji TPC.....	113
Gambar 4. 15 Hasil Uji TPC pada Kompos Sebelum Biofiltrasi	113
Gambar 4. 16 Hasil Uji TPC pada Kompos Kering Setelah Biofiltrasi Variasi Kedalaman Medium Filter	113
Gambar 4. 16 Hasil Uji TPC Sebelum dan Sesudah Biofiltrasi	111
Gambar 4. 17 Hasil Uji TPC pada Kompos dengan Penambahan Air 50%wt dan 60%wt.....	116
Gambar 4. 18 Hasil Uji SEM pada Kompos Sebelum Biofiltrasi	117
Gambar 4. 19 Hasil Uji SEM pada Kompos Setelah Biofiltrasi Variasi Kedalaman Medium	117
Gambar 4. 20 Hasil Uji SEM pada Kompos Setelah Biofiltrasi Variasi Kandungan Air Pada Medium Filter	118



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Sifat-sifat Kimia N ₂ O	8
Tabel 2. 2	Data Potensi Pemanasan Global.....	8
Tabel 2. 3	Emisi GRK Indonesia Tahun 1994	9
Tabel 2. 4	Perbandingan Desain Biofilter Beserta Keuntungannya	13
Tabel 2. 5	Mikroorganisme yang Mungkin Ada Dalam Kompos.	32
Tabel 2. 6	Sifat-sifat Medium Filte Pada Penelitian Pagans et.al (2005).....	36
Tabel 2. 7	Emisi Amonia Kumulatif, Loading, Kapasitas Eliminasi, dan RE ...	36
Tabel 2. 8	Tahap Operasi Biofilter Pada Penelitian Liu et.al (2004).....	42
Tabel 2. 9	Pengaruh Sumber Karbon Eksternal Pada Penghilangan NO.....	45
Tabel 2.10	Perbandingan Kinerja Biofiltrasi Amonia Dengan Medium Kompos	52
Tabel 2.11	Parameter Operasi Biofilter Berbasis Kompos Pada Penelitian Ying Chien Chung.....	55
Tabel 2.12	Rangkuman <i>State of The Art</i> Biofiltrasi.....	59
Tabel 3. 1	Peralatan yang Digunakan dalam Penelitian.....	70
Tabel 3. 2	Spesifikasi kromatografi gas dalam penilitian.	82
Tabel 4. 1	Perbandingan Kandungan Elemen Utama Pada Medium Kompos Pada Penelitian Utami et.al (2009) dan Pada Penelitian Saat ini.....	96
Tabel 4. 2	Jenis dan Kandungan air pada beberapa kotoran ternak.....	97
Tabel 4. 3	Ketersediaan Kotoran Ternak di Indonesia Pada Tahun 2002	98
Tabel 4. 4	Hasil Uji Karakteristk Luas Permukaan dengan BET	99
Tabel 4. 5	Sifat Medium Kompos Sebelum dan Setelah Biofiltrasi.....	99
Tabel 4. 6	Kedalaman Medium Filter Kompos Dalam Kolom Pada Penambahan Fraksi Air	108
Tabel 4. 7	Hasil Uji TPC Sebelum dan Setelah Biofiltrasi Pada Variasi Kedalaman Medium.....	114
Tabel 4. 8	Hasil Uji TPC pada Variasi Kandungan Air.....	115

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Hasil Kalibrasi N ₂ O.....	129
Lampiran 2. Data Hasil Kalibrasi <i>Flowmeter</i>	130
Lampiran 3. Data Hasil Uji Kebocoran dan Uji Blangko	131
Lampiran 4. Data Hasil Uji Kinerja Biofilter	132
Lampiran 5. Data Hasil Uji Variasi Kedalaman Medium	134
Lampiran 6. Data Hasil Uji Variasi Kandungan Air pada Kompos	141
Lampiran 7. Pengolahan Data Hasil Total Plate Count (TPC).....	145
Lampiran 8. Dokumentasi Eksperimen.....	148

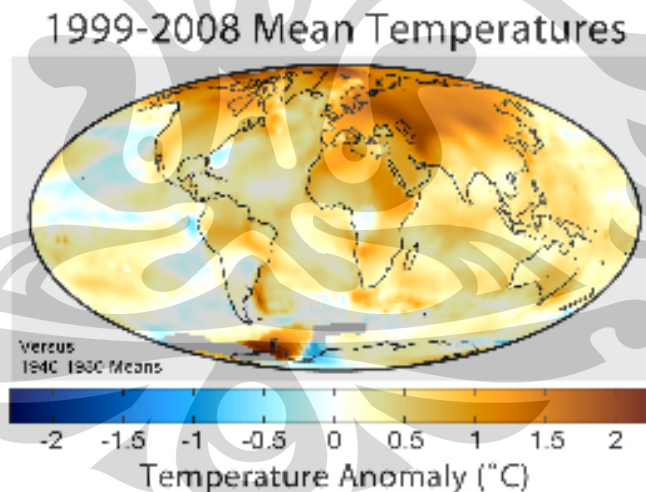


BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Pemanasan global merupakan isu global yang mulai menjadi topik perbincangan dunia sejak diadakannya Konferensi Tingkat Tinggi Bumi di Rio de Janeiro, Brasil, tahun 1992. Selama 30 tahun terakhir, rata-rata temperatur bumi meningkat sebesar $0,55^{\circ}\text{C}$ dan diperkirakan akan terus meningkat antara $1,8^{\circ}\text{C}$ hingga 4°C pada tahun 2100. Menurut IPCC (*Intergovernmental On Panel Climate Change*), jika laju emisi gas rumah kaca ini dibiarkan terus tanpa terdapat tindakan untuk menguranginya, maka suhu global rata-rata akan meningkat dengan laju $0,30^{\circ}\text{C}$ setiap 10 tahun. Peningkatan suhu rata-rata permukaan bumi dari tahun 1999-2008 ditunjukkan oleh Gambar 1.1. Sepertinya peningkatan 1°C tidaklah terlalu berarti. Tetapi peristiwa yang terjadi pada zaman es ternyata ditandai dengan berubahnya suhu hanya $0,12^{\circ}\text{C}$ - $0,24^{\circ}\text{C}$.



Gambar 1.1. Kenaikan Suhu Permukaan Bumi Tahun 1999-2008 Akibat Pemanasan Global

Sumber: http://en.wikipedia.org/wiki/Global_warming

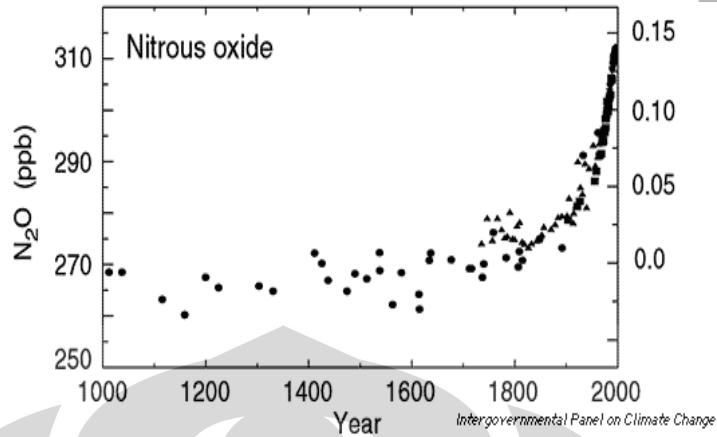
Pemanasan Global yang terjadi akan diikuti dengan perubahan iklim yang ditandai dari meningkatnya curah hujan di beberapa bagian bumi, sementara

bagian lainnya mengalami musim kering yang berkepanjangan. Hal ini terjadi karena ada perubahan suhu udara dan curah hujan yang terjadi secara bertahap dalam jangka waktu puluhan tahun.

Pemanasan global tersebut disebabkan oleh adanya efek rumah kaca yaitu peristiwa terperangkapnya radiasi matahari di atmosfer bumi karena adanya **gas rumah kaca (GRK)** yang berada di atmosfer.

Gas N_2O merupakan salah satu dari enam jenis gas yang digolongkan sebagai GRK Dalam Konvensi PBB mengenai Perubahan Iklim (*United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC*). Gas N_2O merupakan gas nomor 4 yang berkontribusi dalam efek rumah kaca setelah CO_2 , CH_4 , dan uap air. Lebih dari 100 tahun, N_2O mempunyai indeks potensi pemanasan global 310 kali per unit berat lebih besar dari CO_2 (en.wikipedia.org/wiki/Nitrous_oxide, 2009).

Dinitrogen Monoksida (N_2O) dapat dihasilkan dari proses alami dan kegiatan manusia. Secara alami, N_2O diproduksi dari sejumlah besar kegiatan mikroba dalam tanah dan air. Kegiatan pertanian seperti penanganan limbah binatang dan penyuburan tanah dapat memicu bakteri untuk memproduksi N_2O lebih banyak. Sektor peternakan dan perindustrian seperti pada produksi nylon, asam adipat, asam nitrat serta pembakaran bahan bakar pada mesin pembakaran internal juga menghasilkan N_2O . Sektor pertanian menyumbang 86% dari total emisi N_2O yang dihasilkan. Menurut *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) konsentrasi N_2O di atmosfer mengalami kenaikan sebesar 46 ppb (17%) sejak 1750 dan terus meningkat. Gambar 1.2 menunjukkan grafik emisi N_2O di dunia.



Gambar 1.2. Emisi N₂O di Dunia

Sumber: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

Pengontrolan emisi N₂O sangat diperlukan sebagai salah satu cara untuk mengendalikan emisi gas rumah kaca. Banyak teknologi pengendalian NO_x seperti *selective catalytic reduction* (SCR) dan *selective non-catalytic reduction* (SNCR) yang telah diaplikasikan untuk mengontrol emisi NO_x pada beberapa industri. Tetapi, proses-proses tersebut membutuhkan suhu yang tinggi, penggunaan katalis, biaya instalasi dan operasi yang tinggi, serta menghasilkan limbah lain yang membutuhkan biaya untuk penanganannya (Jin et al., 2005). Adanya kelemahan dari segi ekonomi dan teknik dari metode SCR dan SNCR, memotivasi peneliti untuk mengembangkan proses baru yang efektif dan dengan biaya yang ekonomis untuk menghilangkan NO_x dari gas buangan.

Penghilangan gas buang secara biologis dinilai sebagai suatu teknik yang sangat baik untuk pengendalian emisi konsentrasi rendah dari gas buang, senyawa organik dan inorganik volatil (Shoda, 1991). Salah satu teknologi pengelolaan gas buang berbasis biologis yang banyak digunakan saat ini adalah biofiltrasi. Biofiltrasi telah memperoleh dukungan secara luas sebagai teknologi pengendalian polusi udara yang ekonomis untuk perlakuan aliran gas buang yang mengandung konsentrasi rendah dari senyawa organik dan inorganik volatil (Kennes dan Veiga, 2001). Biofiltrasi melibatkan mikroorganisme terimobilisasi dalam bentuk biofilm pada pori-pori medium filter. Polutan ditransfer dari aliran

udara ke dalam *biofilm* yang tumbuh pada medium filter dan akan terdegradasi oleh mikroorganisme.

Banyak material seperti *peat*, kompos, tanah, daun, kulit kayu telah digunakan sebagai medium filter dengan tambahan material pendukung inert untuk mengurangi pengurangan tekanan (Chung et.al., 2004). Bila dibandingkan dengan medium filter lainnya, kompos kotoran sapi tak mahal, mudah diperoleh, dan mengandung komunitas mikroba kompleks. Nutrisi tambahan juga tidak diperlukan untuk biofilter karena kompos memiliki jumlah signifikan nitrogen organik dan mikronutrisi lain (Pagans et.al., 2005). Barnes et.al. (1995) telah melakukan biofiltrasi dengan kompos sebagai medium filter untuk mereduksi NO_x dengan efisiensi reduksi mencapai 95%. Liang et.al (2000) menginvestigasi penghilangan amonia jangka panjang menggunakan biofilter kompos dan memperoleh efisiensi penghilangan di atas 95% dengan *loading* masukan dari 0.33 sampai 16.25 mg NH₃ kg media⁻¹ jam⁻¹ dan *empty bed residence time* (EBRT) dari 31.8 samapi 78 s.

Pada rangkaian proses biofiltrasi, kesuksesan dari proses biodegradasi secara total ditentukan oleh aktivitas mikroba dalam medium filter. Karena itu, medium filter pada biofilter haruslah didesain untuk menyediakan lingkungan yang baik bagi pertumbuhan mikroba dan aliran gas yang melalui medium filter. Sejumlah faktor perlu dikontrol sehingga mikroba dapat mengabsorb dan mendegradasi gas buang secara efisien. Temperatur, kandungan kelembaban, pH, laju alir, nutrisi, besarnya kandungan polutan, dan mikrobiologi biofilter adalah sejumlah faktor yang mempengaruhi efisiensi biofiltrasi.

Pada penelitian ini akan digunakan medium filter berupa kompos kotoran sapi yang dicampur dengan *bulking agent* sebagai medium filter dalam proses biofiltrasi N₂O. *Bulking agent* digunakan untuk menghindari penurunan tekanan yang tinggi, hambatan dan *chanelling* serta untuk meningkatkan daya tahan (Nicolai dan Janni, 2001, Liang et.al., 2000). Sejumlah parameter operasi diteliti dalam penelitian ini untuk mendapatkan kondisi biofilter dengan efisiensi reduksi N₂O yang tinggi. Parameter operasi yang diteliti adalah kedalaman medium filter dalam kolom biofilter dan kandungan air pada medium filter terhadap kinerja biofilter. Pertumbuhan dan perkembangan mikroba pada kompos serta sifat dan

karakteristik kompos sebagai medium filter biofiltrasi juga akan diteliti pada setiap setiap parameter tersebut.

1.2 Perumusan Masalah

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

1. Bagaimana meningkatkan efisiensi reduksi N_2O pada biofiltrasi menggunakan medium filter berbasis kompos kotoran sapi dengan mengatur sejumlah parameter operasi seperti kedalaman medium filter, dan kandungan air pada medium filter?
2. Bagaimana pengaruh parameter operasi (kedalaman medium filter, dan kandungan air pada medium filter) terhadap perkembangan dan pertumbuhan mikroba pada kompos serta terhadap sifat dan karakteristik kompos sebagai medium filter?
3. Apakah biofilter dengan menggunakan medium filter berbasis kompos kotoran sapi efektif dalam menurunkan konsentrasi gas N_2O berdasarkan penurunan konsentrasi maksimum yang dihasilkan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah :

1. Menentukan kondisi optimal parameter operasi biofiltrasi (kedalaman medium filter, dan kandungan air pada medium filter) sehingga dapat dihasilkan efisiensi penghilangan N_2O yang tinggi.
2. Mengkaji pengaruh parameter operasi (kedalaman medium filter, dan kandungan air pada medium filter) terhadap efisiensi penghilangan N_2O .
4. Mengkaji pengaruh parameter operasi (kedalaman medium filter, dan kandungan air pada medium filter) terhadap pertumbuhan perkembangan mikroba pada kompos serta terhadap sifat dan karakteristik kompos sebagai medium filter

1.4 Batasan Masalah

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

1. Medium filter yang digunakan adalah kompos dengan sumber bahan organik kotoran sapi lokal.
2. Tinggi, diameter luar , dan diameter dalam kolom biofilter berturut-turut adalah 120 cm, 8 cm, dan 7,35 cm.
3. Gas NO_x yang dipakai adalah gas N₂O dalam udara dengan konsentrasi 15000 ppm.
4. Peralatan biofilter yang digunakan untuk penelitian merupakan peralatan dalam skala kecil.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam seminar ini adalah sebagai berikut:

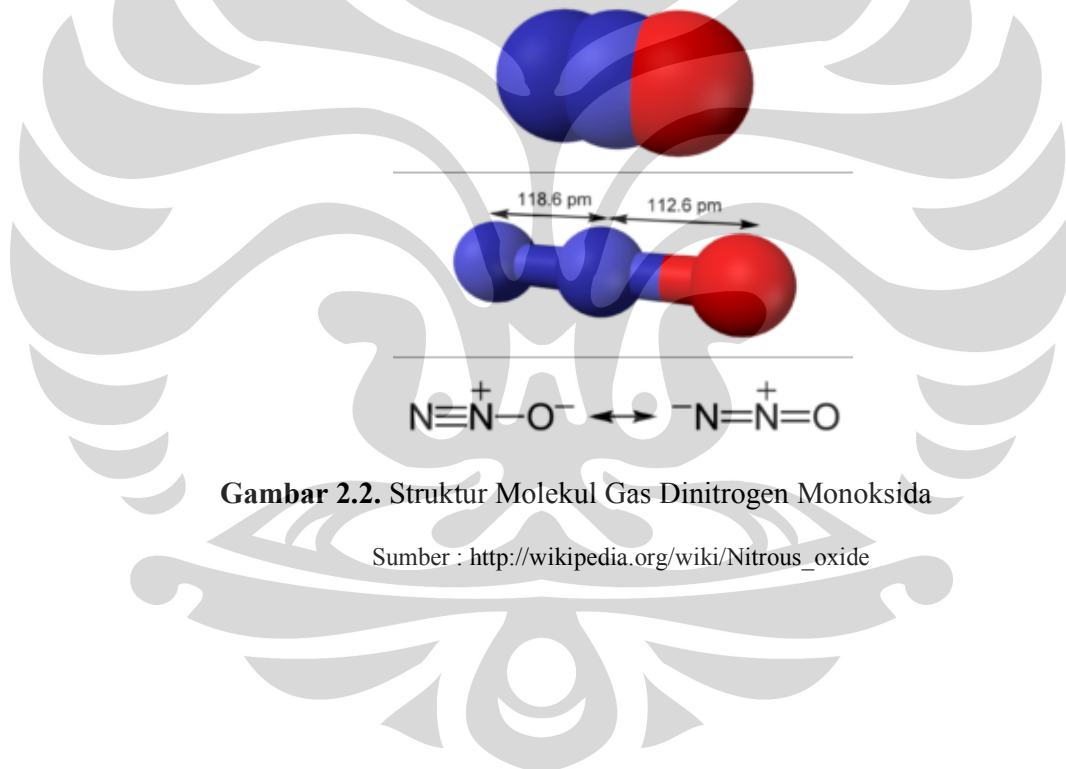
- **BAB 1 : PENDAHULUAN**
Bab ini menguraikan mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan yang digunakan dalam penelitian ini.
- **BAB 2 : TINJAUAN PUSTAKA**
Bab ini berisikan studi literatur secara umum dan secara khusus mengenai hal-hal yang berkaitan dengan penelitian seperti biofiltrasi, mekanisme biofiltrasi, dan jurnal-jurnal internasional yang terkait dengan biofilter.
- **BAB 3 : METODOLOGI PENELITIAN**
Bab ini membahas diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan, prosedur kerja, variabel penelitian serta cara pengambilan data dan pengolahan data yang diperoleh.
- **BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN**
Berisikan hasil dan pembahasan dari kalibrasi laju alir dan N₂O, uji kebocoran, uji blangko, uji kemampuan alat biofilter dalam mereduksi. N₂O dengan variasi kedalaman medium filter dan kandungan air pada medium filter.
- **BAB V : KESIMPULAN**
Berisikan kesimpulan dari hasil penelitian dan pembahasan.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gas Dinitrogen Monoksida (N₂O)

Dinitrogen Monoksida yang secara umum dikenal sebagai gas ketawa adalah senyawa kimia dengan rumus kimia N₂O. Pada temperatur ruang, gas ini tidak berwarna, tidak mudah terbakar, hampir tidak berbau. Gas N₂O disebut sebagai gas ketawa karena efek euforia yang ditimbulkannya ketika menghirup gas tersebut. Gambar 2.1 memperlihatkan struktur molekul gas N₂O. Sedangkan sifat kimia gas N₂O dapat dilihat pada Tabel 2.1.



Gambar 2.2. Struktur Molekul Gas Dinitrogen Monoksida

Sumber : http://wikipedia.org/wiki/Nitrous_oxide

Tabel 2.1. Sifat-sifat Kimia N₂O

Sifat	
Rumus Molekul	N ₂ O
Massa Molar	44.0128 g/mol
Penampilan	Tak berwarna
Densitas	1222.8 kg m ⁻³ (liquid) 1.8 kg m ⁻³ (gas STP)
Titik Leleh	-90.86 °C, 182 K, -132 °F
Titik Didih	-88.48 °C, 185 K, -127 °F
Struktur	
Bentuk Molekul	Linear
Momen Dipol	0.165 D
Termokimia	
Entalpi pembentukan ΔH_f° 298	+82.05

Sumber: http://wikipedia.org/wiki/Nitrous_oxide

Gas N₂O bereaksi dengan ozon di stratosfer. Gas N₂O merupakan gas rumah kaca utama. Selama lebih dari 100 tahun, gas N₂O mempunyai efek gas rumah kaca 310 kali dari efek gas rumah kaca yang ditimbulkan Karbon dioksida (CO₂). Data potensi pemanasan global untuk gas N₂O dan senyawa lainnya dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Data Potensi Pemanasan Global

Spesi	Rumus Kimia	Waktu hidup (tahun)	Potensi Pemanasan Global (Waktu)		
			20 tahun	100 tahun	500 tahun
Karbon Dioksida	CO ₂	Variabel	1	1	1
Metana	CH ₄	12±3	56	21	6.5
Dinitrogen Monoksida	N ₂ O	120	280	310	170
HFC-23	CHF ₃	264	9100	11700	9800
HFC-32	CH ₂ F ₂	5.6	2100	650	200
HFC-41	CH ₃ F	3.7	490	150	45
HFC-43-10mee	C ₃ H ₂ F ₁₀	17.1	3000	1300	400
HFC-125	C ₂ HF ₅	32.6	4600	2800	920
HFC-134	C ₂ H ₂ F ₄	10.6	2900	1000	310
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	14.6	3400	1300	420

Sumber: http://unfccc.int/ghg_data/items/3825

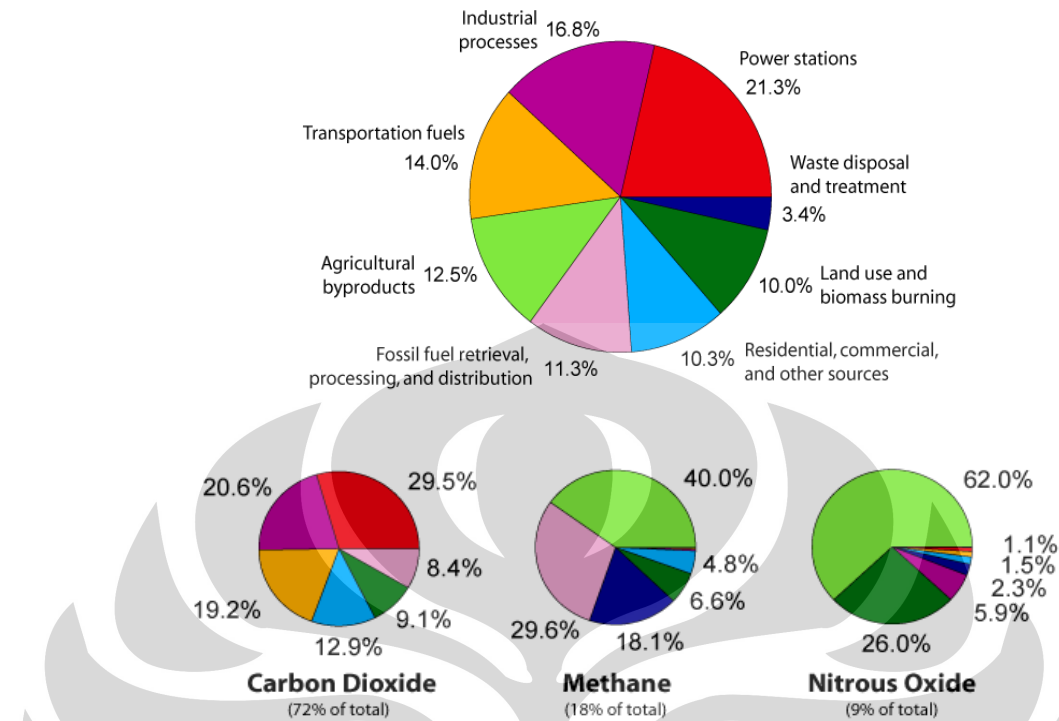
Dalam konsentrasi yang kecil, gas N_2O merupakan gas nomor 4 yang paling berkontribusi pada pemanasan global setelah Karbon dioksida, metana, dan uap air. Gas nitrogen oksida lain juga memberikan dampak terhadap pemanasan global secara tidak langsung, dengan kontribusi terhadap produksi ozon troposferik pada pembentukan smog.

Dinitrogen Monoksida (N_2O) dapat dihasilkan dari proses alami dan kegiatan manusia. Secara alami, N_2O diproduksi dari sejumlah besar kegiatan mikroba dalam tanah dan air. Kegiatan pertanian seperti penanganan limbah binatang dan penyuburan tanah dapat memicu bakteri untuk memproduksi N_2O lebih banyak. Sektor peternakan dan perindustrian seperti pada produksi nylon, asam adipat, asam nitrat serta pembakaran bahan bakar pada mesin pembakaran internal juga menghasilkan N_2O . Sektor pertanian menyumbang 86% dari total emisi N_2O yang dihasilkan. Tabel 2.3 dan Gambar 2.2 menunjukkan kegiatan pertanian merupakan penyumbang emisi N_2O terbesar di Indonesia dan di dunia.

Tabel 2.3. Emisi GRK Indonesia Tahun 1994

Sumber	CO ₂ (kT)	CH ₄ (kT)	N ₂ O (kT)
Total Energi	170,02	2,40	5,72
Proses Industri	19,12	-	0,51
Pertanian	-	3,24	52,86
Perubahan Tata guna lahan dan kehutanan	559,47	367	2,52
Sampah	-	402	-
Total	748,61	774,64	61,61

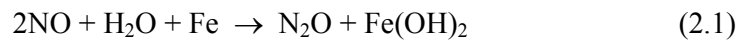
Sumber: KLH, Indonesia: The First National Communication, 1999.



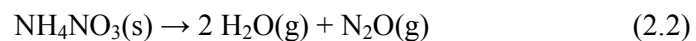
Gambar 3.2. Emisi Gas Rumah Kaca Global Dari Berbagai Sektor Pada Tahun 2000

Sumber: http://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_gas

N₂O pertama kali ditemukan pada tahun 1793 oleh ilmuwan Inggris Josept Priestley. Priestley membuat N₂O dengan memanaskan amonium nitrat dengan adanya besi, kemudian melewatkan gas NO yang dihasilkan dari pemanasan melalui air untuk menghilangkan produk samping yang beracun. Reaksi yang terjadi yaitu



Saat ini gas N₂O dapat dibuat melalui beberapa cara. Cara yang paling umum adalah dengan memanaskan secara hati-hati amonium nitrat yang akan terdekomposisi menjadi gas N₂O dan uap air.



Reaksi ini terjadi pada suhu antara 170-240 °C, suhu dimana amonium nitrat menjadi bersifat mudah meledak dan pengoksidasi kuat. Di atas suhu 240 °C reaksi eksotermis terjadi dan dapat mempercepat terjadinya ledakan. Oleh karena itu, campuran tersebut harus didinginkan untuk mencegah ledakan.

Gas N₂O digunakan dalam bidang pembedahan dan kedokteran gigi sebagai anestetik dan analgesik. Dari tiga zat anestetik yang telah ditemukan (kloroform, eter, dan dinitrogen monoksida), gas dinitrogen monoksida yang masih digunakan. Walaupun efek anestetiknya kurang kuat untuk pembedahan, tetapi sangat ideal untuk anestetik pada bidang kedokteran gigi.

Gas N₂O juga digunakan sebagai pengoksidasi dalam motor roket dan balap motor untuk meningkatkan tenaga keluaran mesin. Sebagai pengoksidasi dalam motor roket, gas N₂O memiliki beberapa kelebihan yaitu tidak beracun, mudah dalam penyimpanan dan aman dibawa dalam penerbangan karena bersifat stabil pada suhu ruang. Gas N₂O juga digunakan sebagai roket monopropelan. Dengan adanya katalis, N₂O akan terdekomposisi secara eksotermis menjadi nitrogen dan oksigen pada suhu kira-kira 1300 °C



Jika reaksi ini terjadi pada ruang pembakaran mobil, 3 mol gas akan dihasilkan dari 2 mol N₂O. Hal tersebut akan menambah dorongan ekstra pada piston. Selain itu, peningkatan oksigen akan membuat pembakaran jadi lebih efisien dan nitrogen akan meningkatkan tekanan silinder.

Pada suhu ruang, N₂O tidak terlalu reaktif dengan banyak zat seperti logam-logam alkali, dan halogen. Oleh karena itu N₂O secara luas digunakan sebagai zat pendorong pada kaleng aerosol sebagai pengganti CFCs.

2.2 Biofilter

Sistem perlakuan secara fisika-kimia didasarkan pada teknik secara fisika-kimia seperti adsorpsi, absorpsi, penggosokan, dan kondensasi untuk mengendalikan emisi gas buang ternyata tak efektif, energi intensif, banyak menggunakan zat kimia atau proses operasi yang kompleks (Khan dan Ghosal, 2000; Burgess et.al,2001). Teknologi tradisional perlakuan gas buang seperti

adsorpsi karbon, penggosokan basah, dan insinerasi juga memiliki biaya yang tinggi dan dihasilkannya produk samping (Chung et.al., 1998).

Sistem perlakuan gas buang secara biologis dinilai efektif dalam penanganan kontaminan konsentrasi rendah dengan laju alir tinggi (Kennes dan Thalasso, 1998; Devinny et.al, 1999; Rene et.al., 2005). Salah satu perlakuan secara biologis yang telah diakui paling efisien adalah biofiltrasi. Biofiltrasi merupakan teknologi perlakuan gas buang secara biologis yang dapat menjadi alternatif dan paling sering digunakan sebagai teknologi pengendalian gas buang.

Kelebihan biofiltrasi dibanding metode pengendalian gas buang lainnya yaitu mempunyai efisiensi tinggi dalam penghilangan polutan, biaya instalasi dan operasi yang rendah, kondisi operasi yang aman, konsumsi energi yang rendah, tak menghasilkan produk sampingan dan mengkonversi banyak campuran organik dan inorganik menjadi produk oksidasi yang tak berbahaya (Sheridan et.al., 2002, Devinny et.al., 1999). Selain itu, desainnya yang sederhana juga disebutkan sebagai alasan dari kepopuleran biofilter (Zilli et.al., 2001).

Saat ini biofiltrasi telah diaplikasikan pada skala industri secara luas seperti pada pengolahan air bersih, industri pestisida kimia, makanan, cat, industri resin, industri farmasi, industri kertas, industri pembuatan kompos, dekontaminasi tanah, dll (Rappert dan Muller, 2005; Kennes dan Veiga, 2004). Untuk mendukung aplikasi lainnya, maka diperlukan penelitian skala pilot untuk optimisasi parameter operasi (media filter, laju alir, konsentrasi, laju pemberian air, nutrisi, dll).

Berbagai desain Biofilter dapat disesuaikan sesuai kebutuhan dalam mereduksi kontaminan yang ada. Terdapat berbagai jenis Biofilter yang dapat digunakan dalam mereduksi polutan. Berikut ini adalah table jenis tipe Biofilter beserta kelebihanannya.

Tabel 2.4. Perbandingan design biofilter beserta keuntungannya

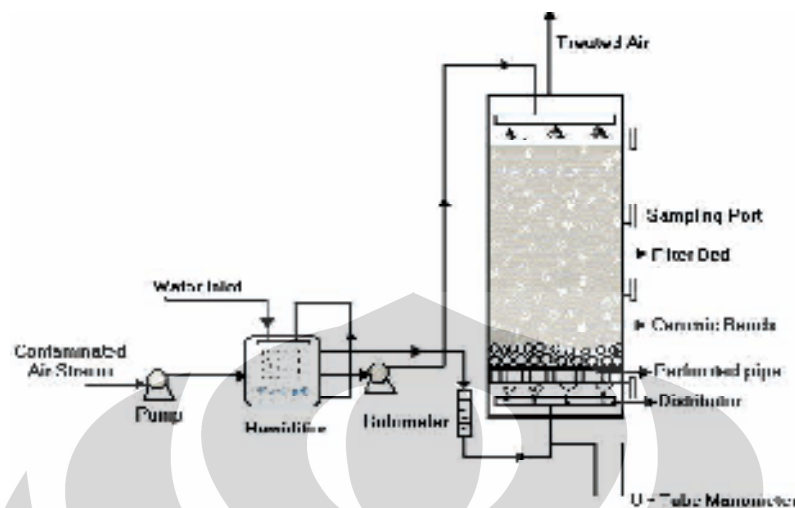
Jenis- jenis Tipe Biofilter	Keuntungan
Biofilter terbuka (kompos)	Sederhana, biaya modal yang rendah
Biofilter terbuka dengan peningkatan kualitas medium filter	Memiliki ketahanan terhadap pemadatan medium filter, penurunan tekanan yang lebih rendah
Biofilter tertutup (Tipe container)	Pengontrolan proses yang lebih baik, kontak aliran dengan medium filter lebih baik.
Biofilter modular multilayer	Proses kontrol secara keseluruhan, meningkatkan efisiensi reduksi polutan per unit volum

Sumber : Devinny et al., 1999

2.2.1 Deskripsi Proses Biofiltrasi

Gambar 2.3 adalah suatu skema dari suatu unit biofilter konvensional yang terdiri dari tempat yang mengandung mikroba pendegradasi kontaminan dan sejumlah air yang tersuspensi dalam medium filter. Matriks pendukung seperti kompos, potongan kayu, sabut kelapa, gambut, bulu, dll menyediakan kapasitas yang tinggi untuk retensi kelembaban, waktu kestabilan yang sama, penurunan tekanan yang rendah untuk gas melewati media.

Udara terkontaminasi dilembabkan dengan menggunakan alat humidifikasi dan dipompa menuju medium filter. Kontaminan pada aliran udara akan diabsorb dan digunakan untuk metabolisme mikroba. Udara yang telah dibiofiltrasi dialirkan ke atmosfer melalui bagian atas biofilter. Biofiltrasi yang beroperasi saat ini dapat mereduksi gas buang dan VOC secara efektif dengan efisiensi lebih besar dari 90%.



Gambar 2.3. Skema Dari Unit Biofiltrasi Konvensional

Sumber: Shareefdeen, Zarook., Singh Ajay. (2005). *Biotechnology for Odor and Air Pollution Control*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer.

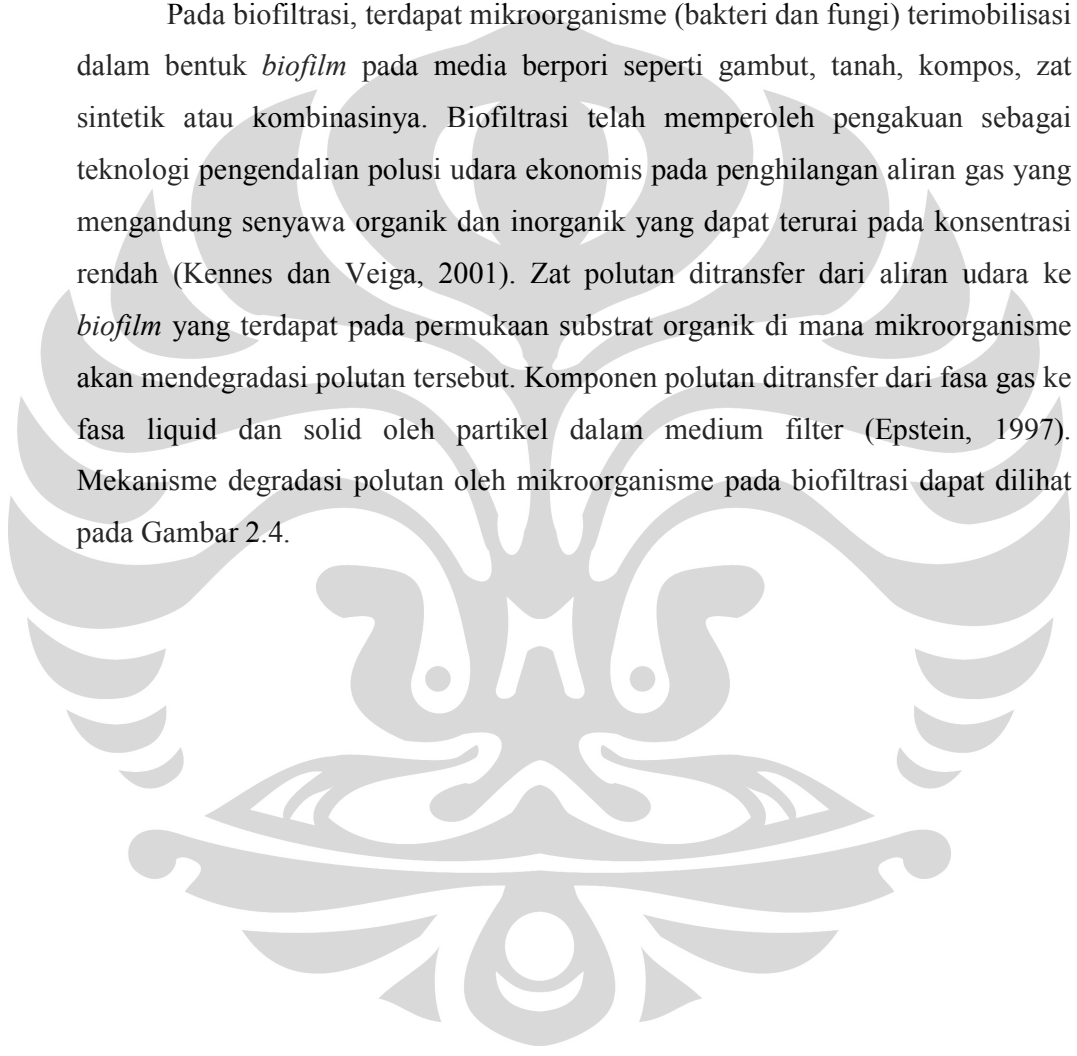
2.2.2 Mekanisme Biofiltrasi

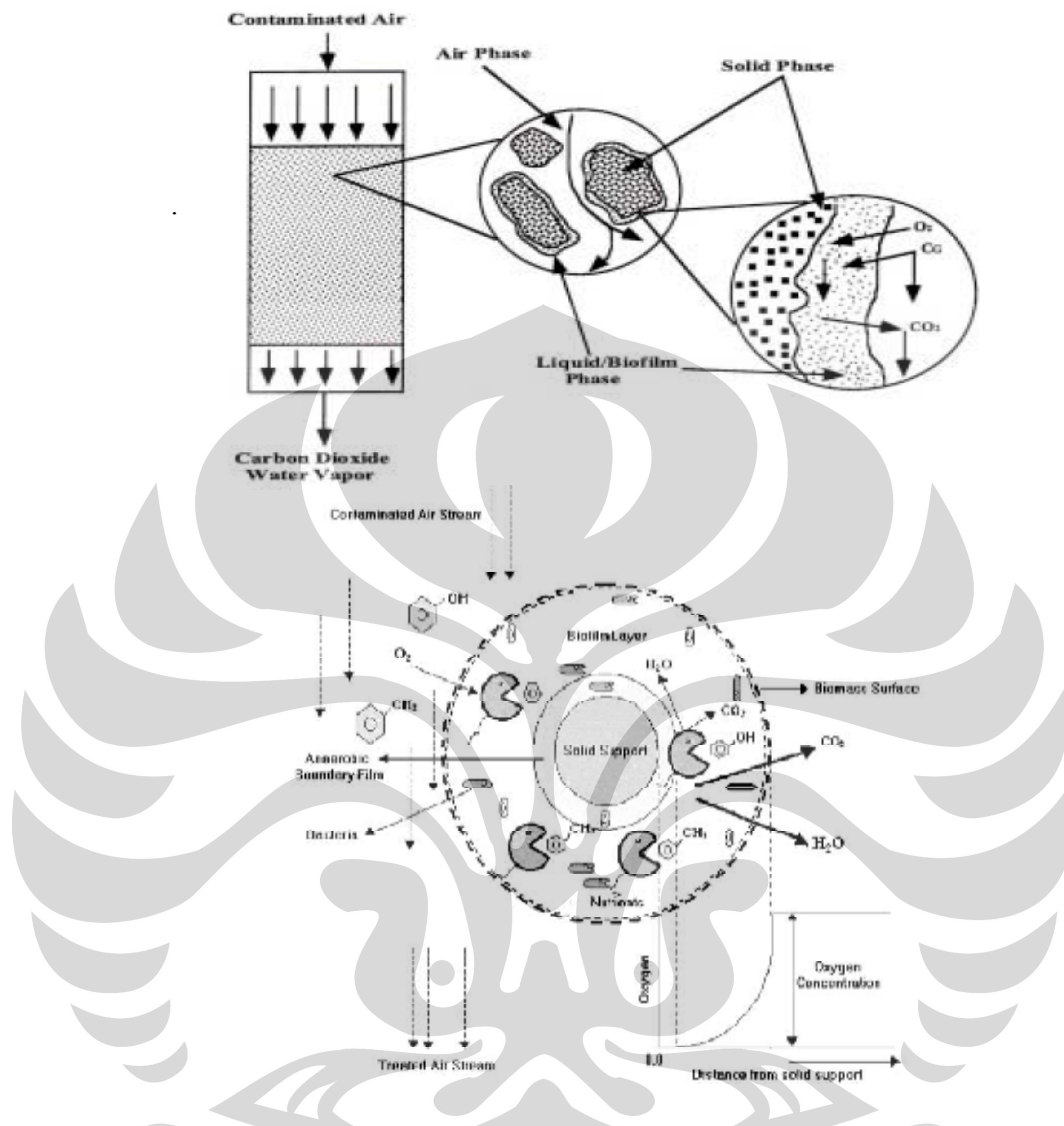
Prinsip dari biofiltrasi secara relatif mudah; aliran udara yang terkontaminasi dilewatkan melalui medium yang berpori dimana terimobilisasi mikroorganisme yang dapat mendegradasi polutan. Ketika udara terkontaminasi melalui medium, kontaminan dalam aliran udara terabsorpsi oleh biofilm dan kontaminan ini akan teroksidasi untuk menghasilkan biomassa, CO_2 , H_2O , NO_3^- , dan SO_4^{2-} .

Biofiltrasi merupakan proses dua fasa yang terdiri dari transfer senyawa dari fasa udara ke fasa air dan oksidasi senyawa terabsorpsi oleh mikroorganisme yang ada pada medium filter. Kontaminan terlarut ditransportasikan dengan difusi dan adveksi dalam udara. Ketika udara mengalir di sekitar partikel, transfer massa kontinyu terjadi antara fasa gas dan *biofilm*. Ketika melewati medium filter, kontaminan akan terabsorpsi baik ke dalam medium filter atau ke biomassa. Laju biodegradasi dari kontaminan ini dibatasi oleh laju transfer massa dari fasa gas ke biofilm dan laju difusi dalam biomassa.

Secara umum, laju degradasi untuk berbagai senyawa kimia tergantung pada kompleksitas kimianya. Semakin rendah laju biodegradasi, semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk mendegradasi target polutan. *Biofilm* menyediakan nutrisi penting untuk aktivitas biologis, menjaga kelembaban untuk pertumbuhan bakteri, bertindak sebagai inter-fasa untuk transport massa, dan menerima berbagai macam produk samping reaksi.

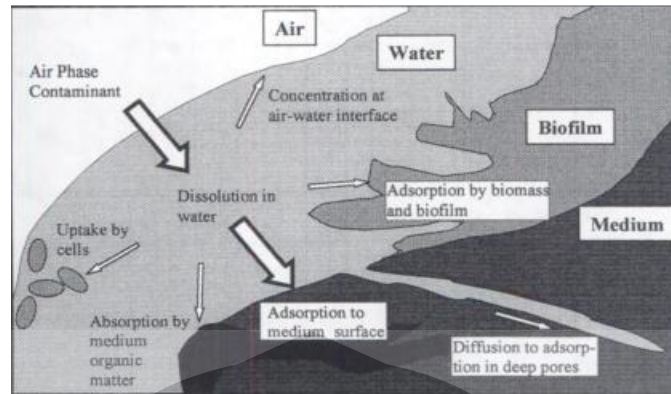
Pada biofiltrasi, terdapat mikroorganisme (bakteri dan fungi) terimobilisasi dalam bentuk *biofilm* pada media berpori seperti gambut, tanah, kompos, zat sintetik atau kombinasinya. Biofiltrasi telah memperoleh pengakuan sebagai teknologi pengendalian polusi udara ekonomis pada penghilangan aliran gas yang mengandung senyawa organik dan inorganik yang dapat terurai pada konsentrasi rendah (Kennes dan Veiga, 2001). Zat polutan ditransfer dari aliran udara ke *biofilm* yang terdapat pada permukaan substrat organik di mana mikroorganisme akan mendegradasi polutan tersebut. Komponen polutan ditransfer dari fasa gas ke fasa liquid dan solid oleh partikel dalam medium filter (Epstein, 1997). Mekanisme degradasi polutan oleh mikroorganisme pada biofiltrasi dapat dilihat pada Gambar 2.4.





Gambar 2.4. Degradasi Polutan Pada Biofiltrasi Oleh Mikroorganisme

Sumber: Shareefdeen, Zarook., Singh Ajay. 2005. Biotechnology for Odor and Air Pollution Control. Verlag Berlin Heidelberg: Springer.

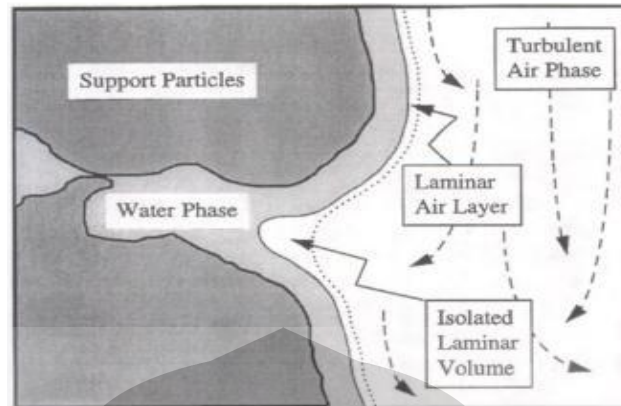


Gambar 2.5. Proses adsorpsi pada biofilter

Sumber : Devinny et.al, 1999

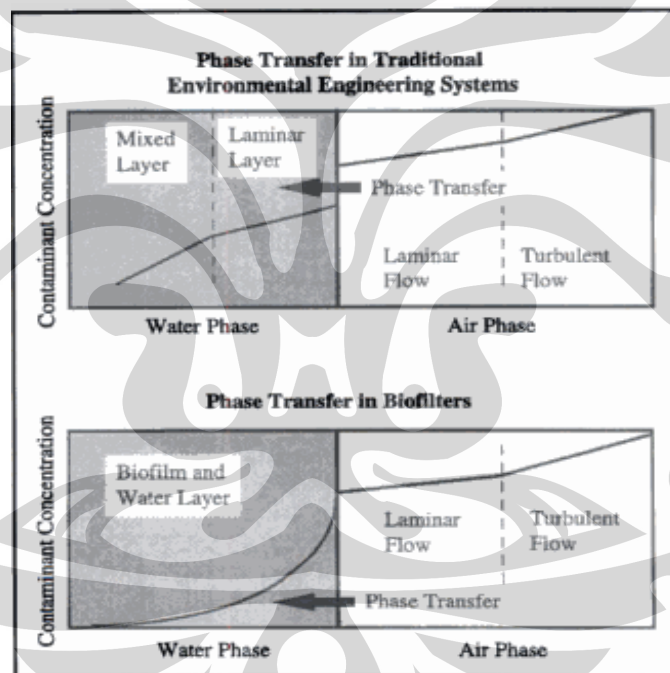
Gambar 2.5 menggambarkan proses yang terjadi dalam medium filter ketika dialiri kontaminan. Pada proses ini terjadi kontak antara fasa gas sebagai kontaminan, fasa cair dan *biofilm* sebagai permukaan medium filter dan fasa padat sebagai partikel padatan medium filter. Transformasi kontaminan dari fasa gas ke air dan padat pada partikel kompos adalah langkah dasar dari perlakuan degradasi kontaminan dengan adsorpsi.

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 2.5 di atas. Disamping itu, di daerah cair inilah kontaminan mengalami disolusi dan teradsorpsi pada lapisan *biofilm* dan sebagian terabsorpsi oleh bahan medium organik. Beberapa kontaminan juga ada yang berdifusi masuk ke bagian dalam dari poros medium filter untuk diadsorpsi.



Gambar 2.6. Aliran kontaminan udara dalam biofilter

Sumber: Deviny et.al, 1999



Gambar 2.7. Model gas transfer

Sumber: Deviny et.al, 1999

Pada Gambar 2.6 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 maksimal. Gambar 2. 7 menunjukkan hasil perbandingan

penggunaan biofilter dan teknologi sistem lingkungan lain terhadap efektifitas penurunan konsentrasi kontaminan. Pada Biofilter dihasilkan penurunan konsentrasi kontaminan secara signifikan terjadi pada lapisan biofilm (Deviny et.al, 1999).

Fenomena adsorpsi pada biofilter merupakan mekanisme yang sulit dipahami tetapi sangat penting untuk 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.

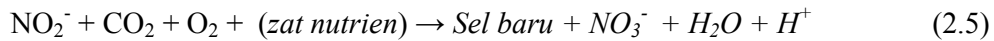
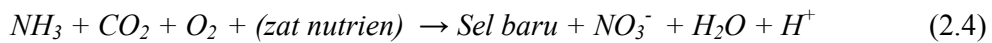
2.2.3 Reduksi NO_x Pada Biofiltrasi

Biofilter secara potensial merupakan metode penghilangan NO_x dari aliran gas. Nitrifikasi mikoba, respirasi NO_x, asimiliasi, dan denitrifikasi merupakan metode menjanjikan dalam menghilangkan NO_x dari aliran udara dalam biofilter. Transformasi mikroba dari nitrogen ada 5 macam :

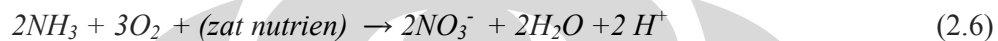
1. Respirasi atau denitrifikasi, penggunaan senyawa nitrogen atau ion sebagai terminal akseptor nitrogen yang memiliki kegunaan yang sama dengan oksigen.
2. Nitrifikasi, penggunaan senyawa nitrogen sebagai sumber energi.
3. Asimilasi, penggabungan senyawa nitrogen atau ion ke dalam jaringan sel baru.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

Kumpulan bakteri yang mampu mereduksi senyawa nitrogen (misalnya NH₃, NO₂⁻) sebagai sumber energi, dan CO₂ sebagai sumber karbon, dalam dua tahap proses yang dikenal sebagai nitrifikasi. Tahap pertama, oksidasi dari amonia menjadi ion nitrit, dibawa oleh 4 genus bakteri yang memiliki nama *Nitroso* sebagai bagian dari nama (misal *Nitrosomonas europea*, *Nitrosococcus mobilis*), sedangkan tahap kedua dibawa oleh 3 genus bakteri yang memiliki nama *Nitro*

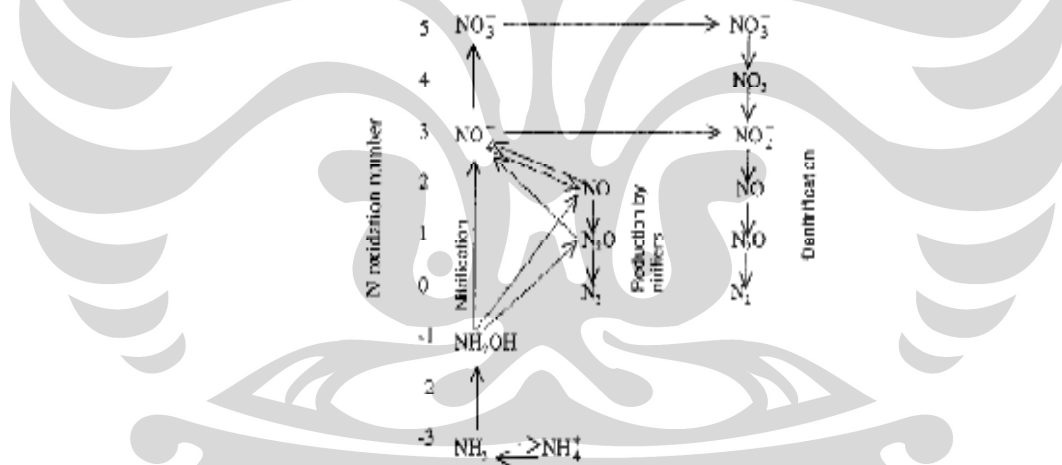
sebagai bagian dari namanya (misal *Nitrobacter*, *Nitrospira*) seperti ditunjukkan pada reaksi di bawah ini:



Stoikiometri dari transformasi pada persamaan (2.4) dan (2.5) tidak diberikan karena variasi pada kondisi lingkungan. Akan tetapi produksi sel selalu rendah pada kedua reaksi dan pendekatan terbaik diberikan pada persamaan (2.6) dan (2.7).



Nitrifikasi terjadi pada kondisi aerobik, dengan aktivitas optimal pada suhu mesofilik dan netral terhadap pH alkalin, tanpa pertumbuhan atau aktivitas pada pH asam (Hudepohl, 1999).



Gambar 2.8. Jalur Metabolisme Nitrogen

Sumber: Hudepohl, 1999

2.2.4 Terminologi Biofilter

Untuk mendeskripsikan mekanisme mengenai biofiltrasi secara jelas, terminologi umum yang berhubungan dengan biofilter akan dijelaskan pada bagian ini. Berikut ini beberapa terminologi yang berkaitan dengan biofiltrasi (Devinny et al., 1999).

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

EBRT (*Empty Bed Residence Time*) berhubungan dengan laju alir pada kolom kosong biofilter. EBRT dapat diartikan sebagai jumlah volum total kolom biofilter kosong dibagi dengan laju alir udara kontaminan.

$$EBRT = \frac{V}{Q} \quad (2.8)$$

Dimana: V = volum kolom biofilter kosong (m³, ft³, dll)

Q = laju alir udara kontaminan (m³/jam, scfm, dll)

EBRT (*Empty Bed Residence Time*) dapat ditaksir sebagai waktu treatment aktual.

- **Loading massa**

Loading massa (baik permukaan maupun volum) adalah massa dari udara yang terkontaminasi yang memasuki biofilter setiap unit area atau volum pada medium filter per satuan waktu. Pada biofiltrasi proses aliran yang memasuki medium filter akan konstan dan massa *loading* sepanjang kolom medium filter akan menurun sebagai udara kontaminan yang akan tereduksi. Oleh karena itu, untuk massa *loading* secara menyeluruh pada sebuah sistem dapat dirumuskan pada persamaan berikut:

$$\text{Massa loading (permukaan)} = \frac{Q \cdot C}{A} \quad (2.9)$$

$$\text{Massa loading (Volumetric)} = \frac{Q \cdot C}{V} \quad (2.10)$$

2.2.5 Karakteristik Performa Biofilter

Untuk menentukan kinerja dari suatu biofilter terdapat suatu alat pengukuran agar dapat menentukan karakteristik dari performa biofilter. Berikut ini adalah parameter untuk menentukan kinerja biofilter (Deviny et al., 1999).

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

Efisiensi kapasitas reduksi pada biofiltrasi digunakan untuk mendeskripsikan hasil kerja suatu biofilter. RE (*Removal Efficiency*) adalah fraksi kontaminan

yang dapat dihilangkan oleh biofilter dan dapat ditinjau sebagai suatu persentase.

$$\text{Removal Efficiency (RE)} = \left(\frac{C_i - C_o}{C_i} \right) \times 100 \% \quad (2.11)$$

Dimana: C_i = konsentrasi kontaminan yang masuk (ppmv, g m^{-3})

C_o = konsentrasi kontaminan yang keluar (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 m^3 dari medium filter setiap jam. Secara keseluruhan EC (*Elimination Capacity*) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\text{Elimination capacity} = \frac{(C_i - C_o) \times Q}{V} \quad (2.12)$$

Bukan hanya efisiensi penghilangan gas polutan saja yang dapat menentukan kinerja dari biofilter karena hal tersebut berkaitan dengan konsentrasi kontaminan, laju alir, dan dimensi biofilter dan kondisi operasi yang digunakan.

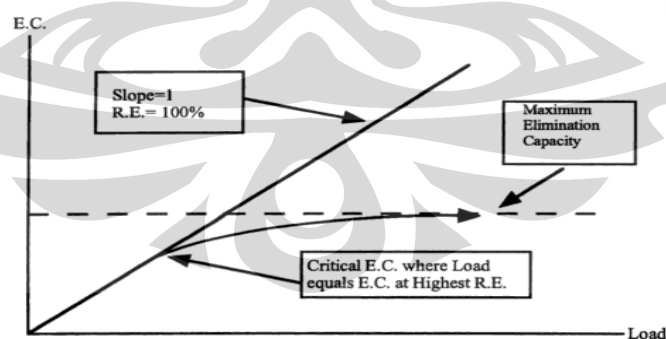


Figure 1.7 Typical elimination capacity vs. load curve. Elimination capacity is always equal to or less than the load. The ratio between elimination capacity and load is the removal efficiency of the system.

Gambar 2.9. Tipe Kurva EC vs Loading

Sumber: Deviny et al., 1999

Dari Gambar 2.9 di atas dapat dikatakan belum mencapai maksimum apabila hasil EC belum mendekati konstan selama kenaikan nilai *loading* pada suatu biofilter. Rasio antara EC (*Elimination Capacity*) dan *loading* adalah RE (*Removal Efficiency*) suatu biofilter.

2.2.6 Kelebihan dan Kekurangan Biofiltrasi

Biofilter merupakan teknologi yang memiliki sejumlah kelebihan dibandingkan metode tradisional dalam pengontrolan polusi udara.

Kelebihan biofiltrasi yaitu:

1. Biofiltrasi memiliki efisiensi yang tinggi dalam menghilangkan polutan, biaya investasi dan operasi lebih rendah dari proses oksidasi termal dan kimia (Govind, 1999), kondisi operasi yang aman (biofilter beroperasi pada suhu dan tekanan ruang), rendah konsumsi energi, tak menghasilkan limbah lain yang berbahaya bagi tanah, udara, air.
2. Unit biofilter dapat didesain untuk secara fisik dapat digunakan pada skala industri. Unit biofilter dapat didesain dalam berbagai macam bentuk dan ukuran. Biofilter dapat didesain dengan medium yang tersusun untuk meminimisasi kebutuhan ruang dan dapat dibuat paralel.
3. Biofiltrasi dapat menghilangkan gas buang, senyawa beracun, dan VOC dengan efisiensi di atas 90% untuk kontaminan konsentrasi rendah (<1000 ppm). Biofiltrasi mampu mengkonversi banyak senyawa organik dan anorganik menjadi produk oksidasi yang tak berbahaya seperti biomass, CO₂, H₂O, NO₃⁻, dan SO₄²⁻ (Sheridan et.al., 2002; Devinny et.al., 1999).
4. Biofilter mempunyai porositas tinggi, ketersediaan nutrisi tinggi, kapasitas retensi kelembaban tinggi dan kapasitas penyangga tinggi untuk menjaga pertumbuhan mikroba pada material pendukung yang sesuai (Devinny et.al., 1999; Kennes dan Veiga, 2001; Dastous et.al., 2005).
5. Berbagai macam media, mikroba, dan kondisi operasi dapat digunakan

Disamping kelebihannya, biofiltrasi juga memiliki kekurangan yaitu:

1. Biofiltrasi tidak dapat secara sukses menghilangkan beberapa senyawa organik, terutama yang memiliki adsorpsi rendah atau laju degradasi rendah. Ini biasanya berlaku untuk VOC terklorinasi.

2. Gas polutan dengan emisi senyawa kimia tinggi membutuhkan unit biofilter besar atau area terbuka untuk menginstalasi sistem biofiltrasi.
3. Gas polutan dengan emisi yang sering berfluktuasi dapat menyebabkan kerusakan pada populasi mikroba biofilter dan kinerja keseluruhan.
4. Adanya periode aklimasi pada populasi mikroba selama berminggu-minggu atau bahkan berbulan-bulan, terutama saat kontaminan adalah VOC.
5. Biofilter yang mengandung konsentrasi mikroorganisme dalam jumlah yang tinggi dapat melepaskan mikroorganisme tersebut ke atmosfer (Martens et.al., 2001)

2.2.7 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kinerja Biofiltrasi

Pada biofiltrasi, sejumlah faktor dikontrol sehingga mikroba dapat mengabsorb dan mendekomposisi secara efisien. Temperatur, kandungan kelembaban, pH, laju alir, besarnya kandungan polutan, dan struktur fisika biofilter adalah faktor yang mempengaruhi efisiensi biofiltrasi. Berikut adalah faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja biofilter:

- **Medium filter**

Medium filter merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi kinerja biofilter. Medium filter yang baik adalah medium filter yang memiliki luas permukaan yang tinggi untuk pertumbuhan *biofilm*, mempunyai kestabilan fisis jangka panjang, penurunan tekanan rendah, retensi kelembaban baik, memiliki kapasitas buffer baik, dan ketersediaan nutrisi. Tipe dari medium filter juga mempengaruhi stabilitas jangka panjang dan kinerja biofilter (Kennes dan Thalasso, 1998; Rene et.al., 2005).

Medium filter biofilter yang umum digunakan yaitu gambut (Togashi et.al., 1986), kompos (Rene et.al., 2005), karbon teraktivasi (Aizpuru et.al., 2003), tanah, potongan kayu (Carlson dan Leiser, 1981; Kurita dan Kamata, 1990), dan batu lava (Prado et.al., 2005). Tetapi, bila dibandingkan dengan medium filter lainnya, kompos tak mahal, mengandung komunitas mikroba kompleks, dan banyak tersedia. Nutrisi tambahan tak diperlukan untuk biofilter karena kompos memiliki jumlah signifikan nitrogen organik dan mikronutrisi lain (Pagans et.al.,

2005). Kompos dapat dicampur dengan *bulking agent* untuk menghindari penurunan tekanan yang tinggi, hambatan dan saluran alir dan untuk meningkatkan daya tahan (Nicolai dan Janni, 2001; Liang et.al., 2000).

▪ **Kelembaban**

Kelembaban merupakan suatu faktor kritis pada keefektifan biofilter karena mikroorganisme membutuhkan air untuk aktivitas metabolis. Kandungan kelembaban yang sedikit dapat menyebabkan keringnya medium filter yang dapat menimbulkan celah pada medium filter dan menyebabkan terjadinya *channeling*. Kelembaban yang sedikit juga berakibat pada berkurangnya kadar air bagi mikroorganisme dan menyebabkan penurunan laju biodegradasi polutan. Sebaliknya, terlalu banyak air atau kelembaban yang tinggi akan menghalangi transfer oksigen dan polutan hidrofobik ke dalam *biofilm*, munculnya zona anaerobik dalam medium filter, menghambat laju reaksi, adanya tekanan balik karena pengurangan volume ruang kosong, dan gas *channeling* dalam medium filter.

Kelembaban optimal akan bervariasi dengan medium filter yang berbeda, tergantung pada luas permukaan, porositas, dan faktor lainnya (Hodge et.al., 1991). Biofiltrasi beroperasi paling efisien pada kandungan kelembaban antara 50-70% dan suhu antara 15 dan 35°C (Janni dan Nicolai, 2000). Kelembaban yang direkomendasikan untuk medium filter organik berkisar antara 40-60% (berdasarkan berat) (Van Lith et al., 1997), namun tidak ada informasi mengenai kandungan kelembaban optimal untuk medium sintetis. Tingkat kelembaban dalam biofilter biasanya dijaga melalui pra-humidifikasi aliran gas masukan atau menyediakan alat untuk langsung memberikan air ke dalam medium filter seperti dengan menggunakan penyemprot air.

Kelembaban dijaga untuk pertumbuhan mikroorganisme yang tumbuh pada permukaan dan celah pada medium filter serta kondisi lingkungan yang tepat. Kelembaban biofilm merupakan salah satu langkah yang penting untuk menjaga performa biofilter sebagai aktivitas biologis yang meningkat seiring dengan aktivitas air (A_w).

- **Temperatur**

Temperatur merupakan salah satu variabel yang paling penting dalam menentukan laju pertumbuhan mikrobial dan jenis spesies dalam komunitas mikrobial (Wani et al., 1997). Kontrol temperatur adalah suatu hal yang penting dalam biofiltrasi untuk mencegah adanya gangguan termal. 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 medium (Corsi & Seed, 1995).

Seiring meningkatnya temperatur, metabolisme dan laju pertumbuhan sel juga meningkat, akan tetapi kemampuan biosorpsi menurun (McNevin & Barford, 2000). Namun, di atas temperatur kritis tertentu, inaktivasi beberapa protein penting dan penghentian pertumbuhan secara mendadak akan terjadi.

Temperatur optimum untuk berbagai spesies memiliki jangkauan yang luas, tetapi sebagian besar aplikasi biofilter telah dilakukan pada temperatur dalam rentang *mesophilic* (20-45 °C), dengan temperatur 35-37 °C dianggap sebagai temperatur optimum (Swanson & Loehr, 1997; Wani et al., 1997). Aktivitas biologis bakteri akan menjadi dua kali lipat untuk kenaikan suhu sebesar 10 °C dan mencapai suhu optimum sekitar 37 °C untuk bakteri mesofilik. Temperatur yang direkomendasikan untuk biofiltrasi yaitu antara 15 dan 40 °C (Lesson dan Winter, 1991; Bohn, 1992).

Baru-baru ini, beberapa studi mengenai operasi *thermophilic* (45-75 °C) juga telah dilaporkan (Dhamwichukorn et al., 2001). Sementara itu, Giggey et al. (1994) melaporkan bahwa biofilter yang mereduksi gas-gas belerang dan *terpenes* menunjukkan performa yang baik pada musim dingin dengan temperatur ambient di bawah 0 °C bersama dengan salju. Namun, Shareefdeen et al. (2004) mencatat penurunan reduksi H₂S 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. Akan tetapi, hal ini akan meningkatkan biaya operasi.

- **Kandungan Oksigen**

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

▪ pH

Mikroorganisme mempunyai kisaran pH optimum spesifik untuk melakukan aktivitasnya. 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. Medium filter kompos secara umum memiliki pH antara 7 dan 8.

▪ 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 bioreaktor. Oleh karena itu, selain karbon dan energi dari degradasi kontaminan, mikroba juga memerlukan nutrisi utama untuk memperpanjang hidup. Medium filter alami seperti kompos, memiliki kandungan nutrisi untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme, tetapi pada medium filter sintetik atau buatan nutrisi harus disediakan.

Karbon dan energi yang dibutuhkan oleh mikroorganisme dapat berasal dari gas kontaminan, sementara kontaminan lainnya seperti nitrogen, fosfor, mineral, dan *trace element* harus disediakan untuk mikroorganisme dalam biofilter agar didapatkan kinerja yang baik (Auria et.al, 1996).

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. Nutrien 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 nutrien dari medium juga harus diperiksa secara periodik dengan mengumpulkan sampel untuk laboratorium dengan tujuan untuk analisis.

- **Penurunan Tekanan**

Pada biofilter, adanya 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 dibandingkan keadaan awal pada biofilter dan hal ini akan memudahkan terjadi perubahan karakteristik dari medium filter dalam mereduksi kontaminan. Selain itu, apabila keadaan medium filter menjadi padat, maka akan dapat meningkatkan *pressure drop*.

Secara umum, berdasarkan penelitian ada hubungan yang linear antara *pressure drop* yang meningkat dengan laju alir (Yang & Allen, 1994). Selain itu pada laju alir tertentu, *pressure drop* akan meningkat secara eksponensial terhadap meningkatnya biomassa (Morgan-Sagastume et al. 2003) dan ukuran partikel yang semakin kecil khususnya untuk ukuran partikel yang lebih kecil dari 1 mm.

- **Kedalaman Medium**

Kedalaman medium bervariasi mulai kurang dari 0,5 m sampai 2,5 m. Kedalaman kira-kira 1 m adalah kedalaman yang umum digunakan karena mempunyai waktu tinggal yang cukup dan meminimisasi area yang dibutuhkan. (Shareefdeen et.al., 2005). Penggunaan kedalaman yang lebih tinggi untuk

menghasilkan laju *loading* yang tinggi dapat digunakan, namun cara ini akan meningkatkan *headloss* pada sistem. Selain itu, peningkatan ketinggian medium filter juga berpotensi membuat medium filter pada bagian paling bawah menjadi padat (kompaksi) sehingga dapat mengakibatkan timbulnya penurunan tekanan yang tinggi.

▪ **Biofilter Mikrobiologi**

Bohn (1992) mengestimasi bahwa populasi mikroba dalam biofilter dapat mencapai 1 miliar mikroorganisme per gram material organik. Beberapa jenis mikroorganisme seperti bakteri, actinomycetes, dan fungi (Ottengraf, 1987) diketahui sebagai pendegradasi polutan udara dalam biofilter. Komposisi dari komunitas mikroba dalam biofilter tergantung pada kondisi fisika dan kimia medium filter. Keanekaragaman mikroorganisme merupakan fungsi dari komposisi aliran gas masukan dan medium filter.

Medium filter alami seperti kompos mengandung sejumlah mikroorganisme untuk menginisiasi biodegradasi kontaminan. Pada tahap awal dibutuhkan waktu untuk mikroorganisme 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. Untuk senyawa organik yang mudah didegradasi, periode aklimatisasi biasanya kurang dari 10 hari dan untuk senyawa yang sulit didegradasi dan untuk kontaminan dimana mikroorganisme hanya sedikit ada dalam medium filter, periode aklimatisasi dapat menjadi lebih lama (Ottengraf, 1986; Lesson dan Winter, 1991). Jika medium filter diinokulasikan dengan kultur spesifik yang diketahui dapat mendegradasi kontaminan tertentu, maka waktu adaptasi dapat berkurang menjadi hanya beberapa hari. Mikroorganisme dapat hidup dalam waktu yang cukup lama jika biofilter tidak digunakan yaitu hingga 2 bulan, jika nutrisi yang cukup tersedia dari medium filter (Lesson dan Winter, 1991).

2.3 Medium Filter Kompos

Kestabilan jangka panjang dan kinerja biofilter dipengaruhi oleh sifat dan karakteristik dari medium pendukung (Kennes dan Thalasso, 1998; Rene et.al.,

2005). Kelembaban medium filter menyediakan kondisi fisika dan kimia yang tepat untuk transfer kontaminan dari udara ke fasa liquid dan biodegradasi dalam lapisan biofilm.

Medium biofilter contohnya material berbasis kompos, material berbasis potongan kayu, sabut kelapa, gambut, dan campuran dari material-material tersebut. Medium filter yang umum digunakan yaitu gambut (Togashi et.al., 1986), kompos (Rene et.al., 2005), karbon teraktivasi (Aizpuru et.al., 2003), tanah, serpihan kayu (Carlson dan Leiser, 1981; Kurita dan Kamata, 1990), dan batu lava (Prado et.al., 2005).

Media juga bertindak sebagai sumber nutrisi untuk populasi mikroba. Faktanya, beberapa media kekurangan nutrisi yang dibutuhkan dan membutuhkan penambahan nutrisi (seperti nitrogen dan fosfor) untuk mempertahankan kehidupan mikroba.

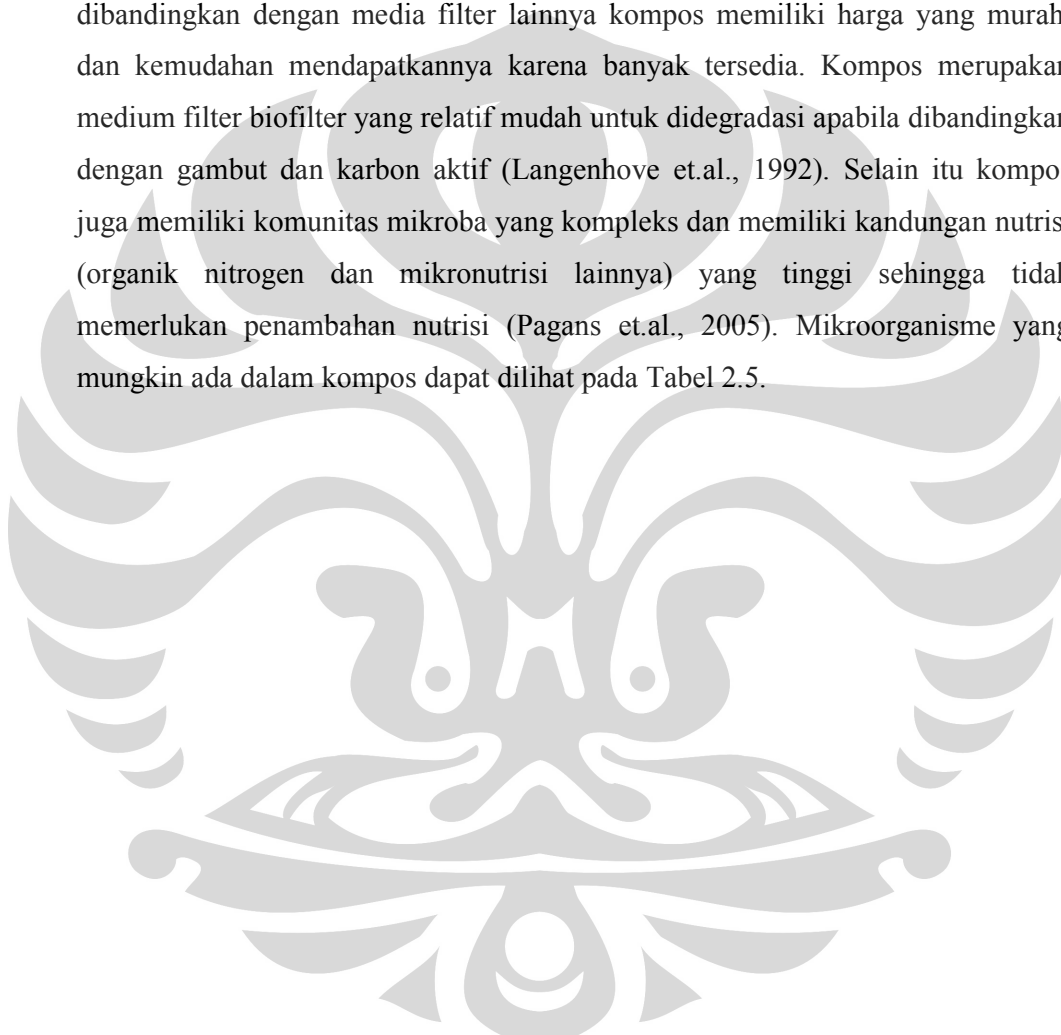
Semua tipe dari media yang disebutkan di atas telah sukses untuk mendegradasi banyak polutan udara berbahaya (*Hazardous Air Pollutans*) dengan tingkat degradasi yang baik. Beberapa hal yang harus diperhatikan saat memilih media filter yang tepat yaitu:

1. Memiliki ukuran partikel yang sesuai
2. Memiliki kemampuan menyimpan kelembaban untuk menopang lapisan biofilm
3. Memiliki pori-pori yang tepat dan luas permukaan besar, baik untuk absorpsi kontaminan dan pertumbuhan mikroba
4. Memiliki kapasitas penyangga pH tinggi
5. Memiliki kemampuan menyimpan dan menyediakan nutrisi untuk mikroba
6. Resistansi rendah terhadap laju alir
7. Karakteristik Fisika seperti kestabilan fisika dan kemudahan penanganan
8. Secara kimia bersifat inert dan stabil

Salah satu material yang disebutkan di atas yaitu **kompos**. **Kompos** adalah hasil penguraian parsial/tidak lengkap dari campuran bahan-bahan organik yang dapat dipercepat secara artifisial oleh populasi berbagai macam mikroba dalam kondisi lingkungan yang hangat, lembab, dan aerobik atau anaerobik.

Berdasarkan dari analisis lima eksperimen biofiltrasi dengan menggunakan lima jenis medium filter, yaitu serbuk kayu, *sawdust*, kompos, dan kompos yang dicampurkan dengan serbuk kayu diperoleh hasil bahwa medium filter yang menggunakan kompos efisiensi penghilangan gas polutan lebih tinggi. Hal ini dimungkinkan karena adanya aktivitas mikroba di dalam kompos (Hong, 2003).

Kompos telah digunakan secara luas sebagai media biofilter dan apabila dibandingkan dengan media filter lainnya kompos memiliki harga yang murah, dan kemudahan mendapatkannya karena banyak tersedia. Kompos merupakan medium filter biofilter yang relatif mudah untuk didegradasi apabila dibandingkan dengan gambut dan karbon aktif (Langenhove et.al., 1992). Selain itu kompos juga memiliki komunitas mikroba yang kompleks dan memiliki kandungan nutrisi (organik nitrogen dan mikronutrisi lainnya) yang tinggi sehingga tidak memerlukan penambahan nutrisi (Pagans et.al., 2005). Mikroorganisme yang mungkin ada dalam kompos dapat dilihat pada Tabel 2.5.



Tabel 2.5. Mikroorganisme yang Mungkin Ada Dalam Kompos

Kelompok Organisme	Organisme	Jumlah/gr kompos
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: <http://id.wikipedia.org/wiki/kompos>

Kandungan pada setiap kompos beraneka ragam dan efeknya berpengaruh pada performa kinerja biofilter. Stabilitas kompos merupakan kunci dari parameter yang membuat masa penggunaan biofilter dapat tahan lama. Sejauh ini, panas yang dihasilkan pada reaksi biooksidasi merupakan salah satu faktor penyebab keringnya kompos sehingga dapat menyebabkan terjadinya asidifikasi dan perkembangbiakan jamur. Kompos dapat dikatakan stabil apabila memiliki karakteristik dari oksigen dan perkembangbiakan jamur.

Medium biofilter harus memiliki daya adsorpsi yang baik, pH yang tepat, struktur dan poros yang baik, serta pemadatan pada medium yang rendah (Leson dan Winer, 1991). Beberapa kelompok bakteri berfungsi untuk mendegradasi polutan dalam biofilter. Umumnya kelompok bakteri yang terkandung dalam kompos atau *peat* dalam mereduksi polutan adalah spesies dari genus *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Bacillus*, *Corynebacterium*, *Sphingomonas*, *Xanthomonas*, *Nocardia*, *Mycobacterium*, *Rhodococcus*, *Xanthobacter*, *Clostridium* dan *Enterobacter* (Kennes & Veiga, 2001)

Namun kompos juga memiliki kekurangan yaitu adanya efek penuaan karena mineralisasi mikroba, adanya penambahan tekanan balik karena kepadatan gradual (MacNevin dan Barford, 2000; Dehganzadeh et.al., 2005).

Kompos dapat dicampur dengan *bulking agent* seperti potongan kayu, bulu, atau material sintetik untuk menghindari penurunan tekanan yang tinggi, hambatan dan *chanelling* serta untuk meningkatkan daya tahan (Nicolai dan Janni, 2001; Liang et.al., 2000). Campuran kompos dan potongan kayu telah

secara luas digunakan karena bahan-bahan tersebut harganya murah dan banyak tersedia (Zeisig dan Munchen,1987; Nicolai and Janni, 1998 dan 1999; Von Bernuth et al., 1999). Nicolai dan Janni (2001) merekomendasikan penggunaan 30:70 sampai 50:50 persen berat antara kompos dan potongan kayu pada biofilter. Biofilter dengan 50% potongan kayu dan 50% pupuk kompos (persen berat) mempunyai efisiensi penghilangan sebesar 100% pada kedalaman media 400-600 mm dengan kontaminan amonia (Hong et.al., 2002).

Meskipun beberapa media memiliki rasio komposisi yang sama antara kompos dan potongan kayu, beberapa media filter tersebut mungkin memiliki penurunan tekanan yang berbeda tergantung pada distribusi ukuran partikelnya.

2.4 State Of The Art Biofiltrasi

Biofilter telah digunakan untuk mengolah berbagai macam gas buang pada pengolahan air limbah sejak tahun 1950-an dan saat ini digunakan pada pengolahan gas buang secara luas termasuk senyawa organik volatil (*Volatile Organic Compound/VOC*) seperti yang dilakukan oleh Deviny et.al, 1999, dan senyawa inorganik berbau seperti NH_3 , H_2S , dan amin dengan menggunakan medium alam, sintetik, ataupun campuran keduanya.

2.4.1 Biofiltrasi dengan Medium Alami

Pemilihan medium filter yang tepat merupakan faktor kunci dalam biofiltrasi karena aktivitas dan perkembangan mikroba pendegradasi polutan dipengaruhi oleh kondisi medium filter. Medium alami seperti tanah, gambut, kompos telah digunakan secara luas sebagai medium filter pada biofiltrasi berbagai senyawa polutan seperti NO_x , NH_3 , VOC karena secara alamiah pada medium tersebut telah terdapat mikroba yang dapat melakukan biodegradasi polutan. Selain itu, medium alami tersebut cenderung mudah didapat dan harganya terjangkau.

2.4.1.1 Biofiltrasi Amonia

Proses Biofiltrasi merupakan suatu teknik reduksi bau yang dapat diadaptasikan untuk mengurangi emisi dari proses pembuatan kompos (Hong et

al., 2000). Suatu proses pembuatan kompos merupakan suatu proses alternatif yang dapat mengkonversi sejumlah komponen sampah organik menjadi zat yang relatif stabil dan bisa digunakan untuk penyubur tanah. Namun, proses pembuatan kompos juga memiliki efek yang negatif bagi lingkungan karena dapat menghasilkan gas buang (Pagans, et.al., 2005). Amonia merupakan suatu gas buang yang menjadi masalah utama pada proses pembuatan kompos. Amonia merupakan suatu produk samping dari proses pembuatan kompos secara aerobik dengan material C/N rendah. Amonia yang diemisikan menimbulkan bau yang mengganggu dan hujan asam (Buijsman et.al., 1987). Biofilter memiliki kemampuan menghilangkan amonia sekitar 95-98% dengan menggunakan berbagai macam medium filter baik organik maupun inorganik (Busca dan Pistarino, 2003). Untuk mendukung aplikasi biofilter sebagai teknik reduksi bau pada proses pembuatan kompos maka diperlukan penelitian skala pilot untuk optimisasi parameter operasi.

Liang et.al (2000) menginvestigasi penghilangan amonia jangka panjang menggunakan biofilter kompos dan memperoleh efisiensi penghilangan di atas 95% dengan *loading* masukan dari 0.33 sampai 16.25 mg NH₃ kg media⁻¹ jam⁻¹ dan *empty bed residence time* (EBRT) dari 31.8 samapi 78 s. Pada penelitian lain, biofiltrasi dari gas keluaran dalam proses pembuatan kompos menunjukkan reduksi 98% untuk laju *loading* masukan rata-rata 10180 mg NH₃ kg media⁻¹ jam⁻¹ dan EBRT 16 s (Chung et.al., 2003; Park et.al., 2002).

Hong et.al (2002) telah melakukan eksperimen biofiltrasi penghilangan amonia dari proses pembuatan kompos dengan menggunakan medium filter berupa campuran antara 50% serpihan kayu dan 50% pupuk kompos (% berat) dengan kedalaman media pada 400 sampai 500 mm dan menghasilkan efisiensi penghilangan sebesar 100%

Kemudian Hong dan Park (2005) melakukan eksperimen biofiltrasi gas amonia yang juga berasal dari proses pembuatan kompos. Pada penelitian yang dilakukannya Hong dan Park menggunakan tiga buah biofilter dengan medium filter berupa 50% pupuk kompos (*manure compost/MC*) dan 50% kulit kelapa (*coconut peels/CP*) serta kedalaman media 500 mm yang beroperasi pada suhu 15-

21 °C. Sedangkan untuk material pembuatan kompos digunakan campuran pupuk, kulit kelapa, dan gabah dengan rasio berat 10:1:1.

Setelah penelitian dilakukan selama 19 hari, konsentrasi amonia yang dihasilkan pada proses pembuatan kompos antara 33 sampai 190 ppm dan konsentrasi amonia setelah melalui biofilter menjadi 0 ppm. Hong dan Park menyarankan bahwa biofilter dengan kedalaman media 500 mm merupakan hal yang kritis untuk menurunkan konsentrasi amonia menjadi 0 ppm. Hong et al. (2002) melakukan penelitian dan menghasilkan laju penghilangan amonia bervariasi dari 63% sampai 100% pada kedalaman media dari 400 sampai 600 mm.

Biofiltrasi gas buang mengandung amonia dari proses pembuatan kompos juga dilakukan oleh Pagans et.al. (2005). Bahan pembuatan kompos yang digunakan yaitu fraksi organik sampah padat (OFMSW), lumpur dari pembuangan air (DS), dan bagian dari hewan yang terbuang seperti bangkai dan bulu (AP). Bahan-bahan tersebut dicampur dengan *bulking agent* (cacahan sampah) dengan perbandingan rasio volumetrik (*bulking agent*:sampah) 1:1 untuk mencapai nilai porositas dan kelembaban optimal. Pada OFMSW diuji dua rasio volumetrik *bulking agent*:sampah (5:1, 1:1). Gas buang produk samping biofilter dialirkan ke dalam biofilter berisi kompos dengan aliran gas ke bawah. Suhu operasi biofilter antara 15 dan 26 °C. Suhu operasi biofilter optimum untuk penghilangan amonia yaitu 15 dan 35 °C (Haug, 1993). Karena kapasitas adsorpsi dan absorpsi media kompos yang tinggi, dalam biofiltrasi ini tidak terdapat periode aklimasi.

Berikut ini adalah sifat media biofilter sebelum dan sesudah biofiltrasi (Tabel 2.6), serta parameter biofiltrasi yang diperoleh (Tabel 2.7) .

Tabel 2.6. Sifat-sifat Medium Filter Sebelum dan Sesudah Biofiltrasi

Parameter	Sebelum Biofiltrasi	Sesudah Biofiltrasi	Sebab
Kelembaban (%wb)	40,40	60,80	Gas keluaran proses pembuatan kompos (Haug, 1993) jenuh dengan air dan terabsorpsi medium
Kandungan zat organik (%db)	56,69	48,57	-
pH	8,70	8,98	
Konduktivitas Elektrik (mS cm ⁻¹)	3,33	3,95	
Organik-N (%db)	3,46	3,28	
CH ₄ ⁺ -N (%db)	0,33	0,93	
C/N	8,72	6,40	
Indeks Resiprometrik (mg O ₂ g OM ⁻¹ jam ⁻¹)	1,03	1,82	Adanya pertumbuhan biomassa aktif (reaktivasi atau pembentukan koloni baru)

Sumber: pagans et.al., 2005

Tabel 2.7. Emisi Amonia Kumulatif, Laju Loading Masukan, Kapasitas Eliminasi, Efisiensi Penghilangan Global

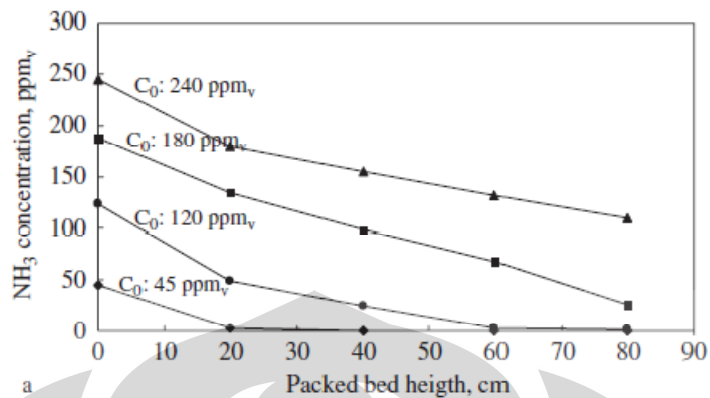
	Emisi NH ₃ kumulatif (mg NH ₃ m ⁻³)		Laju Loading (mg NH ₃ m ⁻³ biofilter jam ⁻¹)	Kapasitas Eliminasi (mg NH ₃ m ⁻³ biofilter jam ⁻¹)	Efisiensi Penghilangan (%)
	Sebelum	Sesudah			
OFMSW (5:1)	773	11,3	846	829	98,8
OFMSW (1:1)	6310	289	7500	7170	95,9
DS	8510	89,2	6670	6580	99,4
AP (hari 0-4)	53400	4580	67100	61300	89,5
AP (hari (4-9))	36100	15300	37500	21700	46,7

Sumber: pagans et.al., 2005

Penurunan Efisiensi penghilangan pada AP pada hari ke 4-9 disebabkan oleh medium filter kompos telah mencapai kapasitas maksimum adsorpsi dan absorpsi amonia atau dapat juga disebabkan oleh terhambatnya aktivitas mikroba karena konsentrasi amonia yang tinggi ($>2000 \text{ mg m}^{-3}$). Hartikainen et al. (1996) menyatakan bahwa toksifikasi biofilter dapat menyebabkan penurunan efisiensi penghilangan ketika konsentrasi amonia gas buang melebihi $45\text{-}50 \text{ mg NH}_3 \text{ m}^{-3}$. Konsentrasi amonia bebas yang tinggi dalam medium filter dapat menghambat aktivitas biologis dalam biofilter (Baquerizo et.al.,2004).

Salah satu hal yang juga harus diperhatikan dalam operasi biofiltrasi adalah adanya fluktuasi pada konsentrasi masukan dan laju alir. Suatu biofilter aktif seharusnya mampu bertahan pada kondisi terjadinya fluktuasi dan tetap mampu menghasilkan penghilangan maksimum pada kontaminan (Rene et.al., 2005). Chen et al. (2004) menginvestigasi respon dua biofilter dengan medium filter campuran kompos/perlit (5:1) dan lumpur kering/karbon teraktivasi granular (5:1) pada variasi laju *loading* masukan, periode biofilter tidak digunakan, konsentrasi masukan untuk menghilangkan gas NH_3 dan dihasilkan bahwa biofilter dapat merespon dengan cepat dan kembali memperoleh laju penghilangan besar secara stabil dalam 6-12 hari.

Selain medium berbasis kompos, serat kelapa biasanya digunakan di Eropa sebagai medium filter biofilter pada proses pembuatan kompos. Gabriel et.al (2007) melakukan biofiltrasi skala pilot dengan menggunakan medium filter serat kelapa. Digunakan 4 tahap kenaikan konsentrasi amonia masukan yaitu 0-45, 45-120, 120-240, 240-180 ppmv. EBRT selalu 36 s dengan laju alir $10,471 \text{ l min}^{-1}$. *Loading* masukan bervariasi dari 3,2 sampai $17,2 \text{ g [NH}_3\text{] m}^{-3} \text{ jam}^{-1}$. Pemberian air dilakukan satu kali sehari dengan laju alir $0,383 \text{ l hari}^{-1}$. Gambar 2.10 adalah hasil eksperimen yang dilakukan oleh Gabriel et.al (2007).

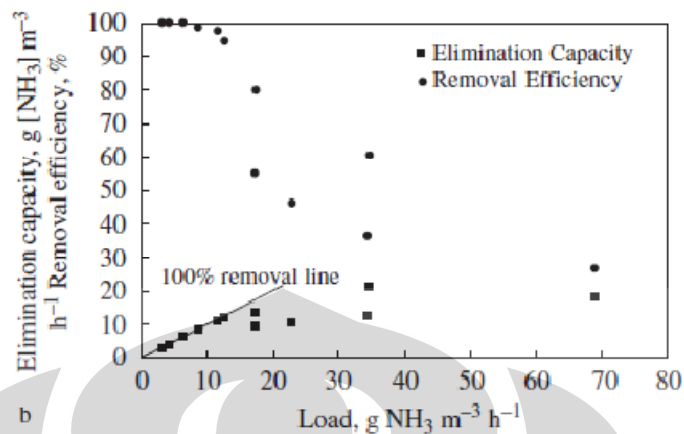


Gambar 2.10. Konsentrasi Amonia Sepanjang Kolom

Sumber: Gabriel et.al., 2007

Penurunan konsentrasi amonia tertinggi terjadi pada kolom biofilter terendah yang mengindikasikan adanya aktivitas biologis pada zona ini. Hal tersebut juga terkait dengan lebih lembabnya medium filter biofilter pada zona ini. Penurunan linear pada konsentrasi amonia mengindikasikan bahwa pengurangan konsentrasi disebabkan oleh aktivitas biologis mikroorganisme daripada transfer massa. Laju penghilangan amonia yang lebih kecil di kolom biofilter terendah saat konsentrasi masukan 180 ppm_v dibandingkan 240 ppm_v menunjukkan adanya hambatan nitrifikasi. Hal tersebut dibuktikan pada analisis *leachate* dimana terjadi peningkatan konsentrasi nitrit dan amonium, tetapi penurunan produksi nitrat setelah konsentrasi masukan amonia 120 ppm_v.

Kapasitas eliminasi (EC) maksimum sekitar 12 g [NH₃] m⁻³ jam⁻¹ pada efisiensi penghilangan (RE) 80% (pada kondisi transien). Peningkatan laju beban masukan tidak akan meningkatkan efisiensi lagi. Gambar 2.11. menunjukkan profil kapasitas eliminasi (EC) dan efisiensi penghilangan (RE) pada penelitian gabriel et.al., 2007.



Gambar 2.11. Profil EC dan RE Untuk Konsentrasi Amonia Masukan 45,120, dan 240 ppmv

Sumber: Gabriel et.al., 2007

Ketika terjadi kenaikan tiba-tiba konsentrasi masukan sampai 120 ppmv (pada kondisi tunak), RE tetap dipertahankan 100%. Hal tersebut karena distribusi air yang baik, menyebabkan absorpsi amonia lebih tinggi, ketahanan terhadap kenaikan konsentrasi inlet masukan lebih baik. Pada saat dilakukan biofiltrasi amonia jangka panjang, terjadi kenaikan konsentrasi amonia masukan menjadi 300 ppmv, EBRT 19 s dan membuat EC 33,3 g [NH₃] m⁻³ jam⁻¹. Pada kondisi ini, biofilter tetap memiliki efisiensi 100%. Biofilter yang tetap memiliki efisiensi tinggi ini disebabkan oleh sistem pemberian air yang tinggi.

2.4.1.2 Biofiltrasi Senyawa Yang Mengandung Sulfur, Nitrogen, dan Asam Lemak

Senyawa piridin juga termasuk senyawa yang mengandung nitrogen dan bersifat toksik, karsinogenik, dan tetratogenik serta merupakan polutan prioritas dalam USEPA (Doughlas, 1976; Verschuren, 1977; Millemann et.al., 1984). Ambang batas piridin sebesar 0,1 ppm (Verschueren, 1977). Teknologi biofilter ternyata juga mampu dalam menghilangkan piridin yang terkandung dalam gas buang. Hal tersebut telah diuji cobakan oleh Pandey et.al (2006) menggunakan biofilter dengan isian kompos kotoran sapi dan serpihan kayu (10 cm x 1 cm dan

tebal 1 mm) dengan rasio 1:1 (v/v) serta diperkaya dengan bakteri *Pseudomonas pseudoalcaligenes-KPN*.

Konsentrasi piridin masukan sebesar 0,5-10 mg/L. Nutrisi diberikan dari atas biofilter untuk menjaga kelembaban medium antara 60% dan 70%. Operasi biofilter dilakukan secara kontinyu selama lebih dari 2 tahun. Hasil yang diperoleh Pandey et.al. (2006) menunjukkan bahwa medium biofilter dengan kelembaban optimal 68% dan EBRT efektif 28,5 s dapat mendegradasi piridin secara efektif (>99%) pada *loading* 434 g piridin m⁻³ h⁻¹.

Sementara itu, biofiltrasi senyawa trietilamin (TEA) dilakukan oleh Torkian et.al (2005). Percobaan dilakukan menggunakan reaktor skala lab. Torkian et.al (2005) menggunakan medium berupa kompos (diameter 2-5 mm) dengan rasio C:N:P yaitu 100:7:2, zat organik, dan pH 6,8. Kompos tersebut dicampur *bulking agent* serpihan kayu (2-5 mm) untuk menghasilkan campuran kompos-serpihan kayu 60:40 v/v. Inokulum berupa lumpur aktif. Percobaan dilakukan dengan menggunakan biofilter tanpa HgCl₂ dan dengan HgCl₂ pada saat awal percobaan. Biofilter yang digunakan divariasikan suhu awalnya yaitu biofilter A, 30±1 °C dan biofilter B, 23±2 °C. Respon biofilter akan dilihat dengan memvariasikan konsentrasi masukan, suhu dan *loading* masukan (organik dan hidraulik). Ketika konsentrasi masukan rendah (<90 ppm), efisiensi penghilangan >90%. Ketika konsentrasi masukan ditingkatkan, maka biofilm akan terpengaruh karena adanya efek *pseudo shock* dan menyebabkan pengurangan efisiensi. Waktu pemulihan biofilter tersebut ketika konsentrasi ditingkatkan akan bertambah dengan bertambahnya konsentrasi masukan karena adanya pengaruh penghambatan pada konsentrasi masukan tinggi.

Beberapa hasil yang diperoleh dari penelitian Torkian et.al (2005) yaitu:

- Kapasitas eliminasi (EC) maksimum pada penghilangan TEA yaitu 72 g m⁻³ h⁻¹ pada laju *loading* masukan 114 g m⁻³ jam⁻¹ (biofilter A) dan 61,5 g m⁻³ jam⁻¹ pada laju *loading* masukan 90,5 g m⁻³ jam⁻¹ (biofilter B)
- Pada kedua biofilter, 75% penghilangan TEA terjadi pada bagian kolom awal biofilter
- Kondisi operasi optimum untuk biokonversi TEA dalam biofilter direkomendasikan sebagai berikut: HRT (*Hydraulic Retention Time*) = 48 s,

Suhu = 30 ± 1 °C, dan maksimum beban masukan untuk efisiensi penghilangan 100% dan 81 ± 14 % yaitu 53 ± 1 g m⁻³ jam⁻¹ dan 71 ± 3 g m⁻³ jam⁻¹.

2.4.1.3 Biofiltrasi *Volatil Organik Compounds* (VOCs)

Menurut *United States Environmental Protection Agency* (US EPA), Senyawa organik volatil adalah senyawa organik (mengandung karbon) yang memiliki tekanan uap melebihi 0,1 mmHg pada kondisi standar (20 °C dan 760 mmHg). VOC teridentifikasi sebagai kontributor utama pada pembentukan *smog* yang dapat menyebabkan masalah pernafasan dan masalah lainnya seperti iritasi mata, sakit kepala, atau kerusakan pada tanaman dan hewan. VOC dapat diemisikan dari industri percetakan, industri kertas, industri farmasi, dan pengilangan. Suatu teknologi yang tepat diperlukan untuk mengurangi emisi VOCs.

Biofiltrasi telah secara luas diaplikasikan dan diketahui efisien dalam mengolah aliran udara yang terkontaminasi VOCs pada konsentrasi rendah. Arnold et.al. (1997) melakukan biofiltrasi stirene dengan medium filter berbasis gambut dengan kapasitas eliminasi sebesar 30 g m⁻³ jam⁻¹ dan efisiensi penghilangan 98%. Jorio et.al. (2000) melakukan biofiltrasi stirene dan menemukan bahwa ketika konsentrasi masukan lebih besar dari 2 g m⁻³, kapasitas eliminasi menurun bersamaan dengan meningkatnya laju alir gas.

Chen et.al (2008) melakukan biofiltrasi terhadap bau yang mengandung VOCs yang berasal dari peternakan babi dengan menggunakan dua medium filter serpihan kayu yang berbeda berupa kayu keras (HW) dan kayu pohon cedar (WC) dengan ukuran 2 inchi (5 cm). Chen menggunakan *microextraction* dan *gas chromatography-mass spectroscopy-olfactory* sebagai teknik analisisnya.

Chen et.al (2008) melakukan investigasi pengaruh kelembaban media (60%, 40%, 20%) pada efisiensi reduksi gas buang dengan kedalaman media 25 cm dan laju alir udara sebesar 2265 L/menit. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa semakin besar kelembaban media filter, maka efisiensi reduksi akan semakin baik pada ketiga senyawa VOC (VFAs, fenolik, indolik). Hal tersebut karena semakin baiknya pertumbuhan bakteri ketika kelembaban dinaikkan. Namun pada senyawa yang mengandung sulfur, efisiensi reduksi menurun ketika

kelembaban naik. Hal tersebut disebabkan terbentuknya zona anaerobik seperti yang dikatakan oleh Deviny et.al (1999).

Secara umum, biofilter WC dapat mencapai efisiensi reduksi tinggi (93,8%, 97,2%, 97,8%, dan 74 % untuk VFAs, fenolik, indolik, dan efisiensi rata-rata keseluruhan) pada kelembaban 40%, dimana efisiensi tersebut baru dicapai HW pada kelembaban 60%.

Selain itu, Chen et.al (2008) juga melakukan pengaruh EBRT terhadap efisiensi reduksi. EBRT yang diteliti yaitu 1,6; 2,5; 2,6; 3,3; 3,6; 4; 5,3; 5,5 ;7,3. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa tidak ada pengaruh EBRT terhadap efisiensi reduksi. Hal tersebut mungkin disebabkan Chen et.al (2008) menggunakan kelembaban medium 60% saat eksperimen. Efisiensi reduksi VOCs baik pada WC maupun HW terlihat bagus.

Liu et.al (2005) melakukan biofiltrasi campuran VOCs etil asetat, isopropanol, dan toluena yang berasal dari industri percetakan dengan menggunakan medium filter berupa campuran kompos, lava, dan sejenis tanah yang mengandung banyak humus. Medium tersebut diinokulasi dengan menggunakan campuran lumpur aktif dari tempat pengolahan air limbah. Kelembaban pada bagian I, II, dan III kolom biofilter (dari atas ke bawah) yaitu 50 -60%, 55-60%, 55-65%. Eksperimen yang dilakukan oleh Liu et.al dilakukan pada 5 kondisi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.8:

Tabel 2.8. Tahap Operasi Biofilter Pada Penelitian Liu et.al (2004)

Periode	V ($\text{m}^3 \text{jam}^{-1}$)	EBRT (s)	Polutan
A	0,1	90	Etil Asetat, Isopropanol
B	0,1	90	Etil Asetat, Isopropanol, toluena
C	0,15	60	Etil Asetat, Isopropanol, toluena
D	0,2	45	Etil Asetat, Isopropanol, toluena
E	0,1	90	Etil Asetat, Isopropanol, toluena

Sumber: Liu et.al., 2005

Liu et al menggunakan konsentrasi masukan etil Asetat dan isopropanol pada tahap B-E sekitar 2,5 dan 1,0 g m⁻³. Sementara konsentrasi masukan toluena sekitar 0,5 g m⁻³. Biofiltrasi dapat menghilangkan etil asetat dan isopropanol dengan efisiensi 100%. Efisiensi tersebut diperoleh ketika *loading* masukan < 200 dan 120 g m⁻³ medium jam⁻¹. Proses biofiltrasi didominasi oleh kedua bagian teratas dari kolom. Kapasitas eliminasi (EC) maksimum etil asetat pada bagian I sekitar 350 g m⁻³ medium jam⁻¹ dan EC isopropanol mencapai 150 g m⁻³ medium jam⁻¹ dengan beban masukan bervariasi dari 160-300 g m⁻³ medium jam⁻¹. Namun pada toluena diperoleh efisiensi bervariasi dari 40%-100% dengan EC maksimum 20 g m⁻³ medium jam⁻¹. Ketika konsentrasi etil asetat dan isopropanol tinggi, dapat menghambat biofiltrasi toluena.

Pada biofiltrasi ini, ketika bagian I biofilter (paling atas) dimana konsentrasi polutan tinggi memburuk maka akan membuat keefektifan biofilter dan efisiensi global biofilter menurun. Hal tersebut dapat disebabkan adanya pematatan/penyumbatan media, menjadi asam, dan keterbatasan nutrisi. pH media biofilter secara bertahap mengalami penurunan. Penurunan pH disebabkan oleh adanya proses nitrifikasi amonium nitrogen (NH₄⁺-N) menjadi nitrat nitrogen (NO₃⁻-N). Ketika media dapat menetralkan proton yang dihasilkan dari biodegradasi dan nitrifikasi maka pH akan konstan, jika tidak dapat, maka pH akan turun.

2.4.1.4 Biofiltrasi NO_x

Saat ini, biofiltrasi diinvestigasi untuk melakukan reduksi pada polutan udara inorganik misalnya NO_x seperti yang dilakukan oleh Yang et.al., 2007 yang meneliti efek dari parameter operasi pada kinerja biofiltrasi penghilangan NO_x. Yang et.al. menggunakan NO sebagai gas polutan yang ingin dibiofiltrasi. Beberapa parameter yang diteliti yaitu konsentrasi NO dan O₂, ketinggian kolom, laju alir, adanya sumber karbon eksternal. Pada penelitian tersebut digunakan medium filter mengandung kompos dan serpihan kayu, konsentrasi NO masukan sebesar 200 ppm, laju alir = 30 L/jam, kandungan oksigen 6%, dan penambahan glukosa sebanyak 1 g/hari. Gas diinjeksikan dari atas kolom dan laju alir gas diatur oleh suatu kontroler. Serpihan-serpihan kayu *Cyatheaceae* yang

ditambahkan ke dalam kompos berfungsi sebagai *bulking agent* untuk meningkatkan adanya ruang kosong, mengurangi kepadatan, dan meningkatkan ventilasi udara dalam sistem. Penelitian yang dilakukan Yang et.al menghasilkan:

1. Pada penelitian yang dilakukan pada kondisi anaerobik, jumlah penghilangan NO bergantung pada tinggi material dalam kolom, semakin tinggi posisi kolom maka semakin baik kinerja penghilangan NO. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kolom biofilter, maka akan semakin tinggi efisiensi penghilangan NO. Semakin banyak gas NO berkontak dengan mikroorganisme denitrifikasi terinokulasi pada media filter, semakin banyak NO yang dihilangkan. Efisiensi penghilangan sebesar 90% dapat dicapai dengan meningkatkan ketinggian kolom ke 6.5 m dengan kondisi oksigen dibawah 6%.
2. Kandungan O₂ dapat menghambat penggunaan NO secara signifikan oleh mikroorganisme. Ketika konsentrasi O₂ meningkat dari 0% ke 6%, efisiensi penghilangan menurun dari 99% ke 55% yang menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi O₂ tidak dapat meningkatkan efisiensi tetapi menghambat kinerja penghilangan NO.
3. Efisiensi penghilangan NO menurun dari 88% ke 40% dengan peningkatan konsentrasi gas NO masukan dari 60 sampai 500 ppm dibawah kondisi anaerobik dan tidak ada glukosa tambahan. Hal tersebut dapat disebabkan oleh kekurangan biomassa. Dengan peningkatan konsentrasi NO masukan, jumlah NO yang dihilangkan oleh mikroorganisme sebanding dengan konsentrasi NO masukan yang meningkat dari 0.1 ke 5.1 $\mu\text{mol}/\text{menit}$. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin banyak NO dapat mempertinggi pertumbuhan organisme dibawah kondisi nutrisi yang kurang.
4. Konsentrasi NO menurun secara signifikan ketika glukosa ditambahkan ke dalam kolom baik pada kondisi aerobik maupun anaerobik (Efisiensi Penghilangan NO anaerobik > aerobik). Tabel 2.9 menunjukkan pengaruh sumber karbon eksternal pada penghilangan NO pada penelitian Yang et.al., 2007 dan Apel et.al., 1995.

Tabel 2.9. Pengaruh Sumber Karbon Eksternal Pada Penghilangan NO

	Kondisi	Laju Alir (ml/menit)	Sumber Karbon Eksternal	Efisiensi Penghilangan (%)	
				Sebelum Ditambahkan	Sesudah Ditambahkan
Apel et.al.,1995	Anaerobik	1000	Molasses (5 ml/hari)	20	90
Yang et.al., 2007	Anaerobik	500	Glukosa (1 g/hari)	21	99
	Aerobik (O ₂)=6%	500		47	60

Sumber: Yang et.al, 2007

2.4.1.5 Biofiltrasi NO_x di Universitas Indonesia

Biofiltrasi senyawa inorganik lainnya seperti N₂O dilakukan oleh Utami et al., (2009) dengan menggunakan medium filter serpihan kayu dan pupuk kandang. Kultur inokulum yang digunakan yaitu campuran air limbah dari kandang binatang dengan medium denitrifikasi. Utami et al., 2009 menginvestigasi pengaruh parameter operasi biofilter yaitu ketinggian kolom, laju alir sirkulasi, dan penggunaan nutrisi terhadap efisiensi penghilangan N₂O. Gas N₂O disirkulasi selama 6 jam menggunakan pompa peristaltik pada kolom biofilter (diameter 8 cm dan tinggi 50 cm) dan sampel gas diambil setiap 1 jam dengan *syringe*. Gas N₂O keluaran biofilter kemudian 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.

Investigasi yang dilakukan Utami et al. (2008) menunjukkan bahwa efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada panjang biofilter tertinggi 50 cm dengan efisiensi reduksi 67,86%. Pada panjang kolom biofilter 50 cm kontak pupuk dan gas N₂O akan terjadi lebih lama serta jumlah mikroba denitrifikasi dalam media biofilter pada panjang kolom tertinggi 50 cm lebih banyak secara kuantitas dibandingkan dengan panjang biofilter yang lainnya.

Pada uji biofiltrasi dengan variasi laju alir sirkulasi pada ketinggian kolom terbaik dihasilkan bahwa efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada laju alir sirkulasi gas N₂O tertinggi 200 cc/menit dengan efisiensi reduksi 70,22%. Hal ini karena frekuensi gas N₂O dalam proses sirkulasi menjadi lebih banyak. Pada laju alir gas sirkulasi N₂O 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 N₂O yang berlaju alir tinggi langsung bersirkulasi masuk ke atas kolom biofiltrasi dengan lebih cepat. Hal ini memungkinkan gas N₂O mengalami proses adsorpsi lebih banyak pada laju alir gas resirkulasi N₂O yang lebih tinggi dibandingkan dengan laju alir resirkulasi gas N₂O 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 %. Josia Simanjuntak (2004) menggunakan nutrisi yang 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.

Pada tahun 2009, Utami et al. (2009) juga melakukan biofiltrasi N₂O tetapi dengan menggunakan sistem batch dan medium filter kompos kotoran kambing dengan penambahan bulking agent *cocopeat* dan sekam. Kolom biofiltrasi yang digunakan berbentuk tabung dengan dimensi panjang 120 cm dan diameter 8 cm dengan bahan dari *acrylic*. Proses biofiltrasi dilakukan dengan cara mengalirkan gas N₂O yang disuplai oleh tabung gas N₂O dari bagian atas kolom (*down flow mode*) selama 9 jam. Sampel gas diambil setiap 1 jam dengan *syringe*. Gas N₂O keluaran biofilter kemudian dianalisa dengan gas *chromatography* (GC).

Utami et al. (2009) menginvestigasi pengaruh faktor operasi seperti laju alir gas N₂O, pengaruh kandungan air pada medium filter terhadap kinerja biofilter serta perbandingan penggunaan nutrisi alami dan sintetis terhadap daya

adsorpsi dan degradasi biofilter dengan menggunakan bakteri penitrifikasi. Hasil yang didapatkan ialah sebagai berikut:

- Pencapaian efisiensi reduksi optimum sebesar 56,7% pada variasi laju alir sebesar 72 cc/menit, sehingga disimpulkan semakin kecil laju alir N_2O maka semakin banyak N_2O yang teradsorp dan terdegradasi oleh medium filter.
- Kandungan air 60% dari berat kompos merupakan kandungan air optimum dalam mereduksi N_2O dengan efisiensi reduksi sebesar 70,13 %
- Penggunaan nutrisi baik alami maupun sintetik dapat meningkatkan efisiensi reduksi N_2O .
- Penambahan *Nitrobacter,sp* dan nutrisi sintetik pada kompos dapat meningkatkan efisiensi reduksi N_2O 2,2% lebih tinggi dibandingkan nutrisi alami.
- Kinerja biofilter pada penelitian ini dalam mereduksi N_2O mencapai efisiensi reduksi sebesar 75,9 % dengan ketinggian medium 50 cm, laju alir N_2O 72 cc/menit, kandungan air 60% dan penambahan nutrisi sintetik serta *Nitrobacter,sp* pada kompos sebagai medium filter.

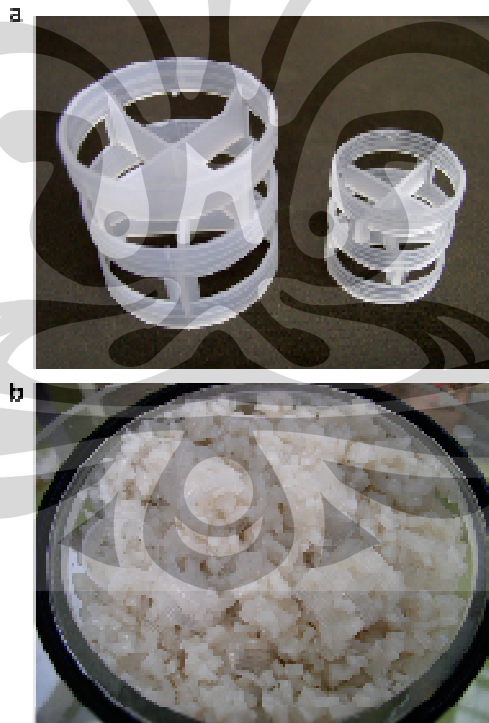
2.4.2 Biofiltrasi dengan Medium Sintetik

Keefektifan dari suatu biofilter tergantung pada aktivitas populasi mikroba dan tipe penyuburan selama tahap inokulasi. Tipe dari matriks pendukung juga memiliki efek pada kestabilan jangka panjang dan kinerja biofilter (Kennes dan Thalasso, 1998; Rene et.al., 2005). Selain medium alami yang dapat digunakan pada biofilter, medium sintetik juga memiliki kemampuan untuk menjadi suatu pilihan medium biofilter yang dapat mereduksi sejumlah polutan. Adanya kelemahan pada medium filter alami seperti perlunya dilakukan penggantian, susah untuk diregenerasi, dan penurunan tekanan yang menyebabkan penurunan efisiensi penghilangan polutan membuat dikembangkannya medium filter sintetik seperti immobilisasi mikroba dalam matriks pendukung seperti *alginate beads* atau material polimerik yang cocok mendapat perhatian pada bidang biofiltrasi baru-baru ini. Pada teknik ini, sel mikroba dimasukkan dalam suatu kapsul dimana transport masuk dan keluar nutrisi, substrat, dan produk akhir melalui difusi melewati membran kapsul. Keuntungan utama dari teknik immobilisasi

dalam biofilter adalah untuk menyediakan konsentrasi sel tinggi, meningkatkan kestabilan genetik, perlindungan dari kerusakan, dan meningkatkan kondisi lingkungan untuk mikroba (gradien nutrisi dan pH). Penggunaan immobilisasi mikroorganisme aerobik dibatasi oleh kondisi operasi dimana oksigen tidak terbatas.

2.4.2.1 Biofiltrasi Amonia

Kim et.al (2007) melakukan biofiltrasi amonia dengan menggunakan bakteri nitrifikasi yang terimmobilisasi pada suatu matriks polimerik. Kim et.al (2007) menggunakan biomedial yang dienkapsulasi dengan sodium alginat dan polivinil alkohol (PVA) membentuk PVA *cryogels* (kubus) yang memiliki konsentrasi 825 mg l^{-1} . Gel kubus ini diisikan ke dalam *pall rings* dan diaktivasi dengan mengalirkan air distilasi sebelum diisi dalam biofilter. *Pall rings* dapat memfasilitasi mereka untuk bertahan dengan tekanan dan meningkatkan ketahanan dan reproduksibilitas seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12. (a) Pall rings komersial dan (b) biofilter dengan isian pall rings yang mengandung sel terimmobilisasi

Sumber: kim et.al., 2007

Percobaan dilakukan selama 84 hari dengan menggunakan konsentrasi NH_3 bervariasi dari 10 sampai 150 ppm. Laju alir diset sehingga *empty bed residence time* (EBRT) memiliki nilai 85,64,51 dan 32 s. Nutrisi secara periodik diberikan dengan menyemprotkannya dari atas biofilter pada laju 500 ml selama 1 menit setiap interval 30 menit. Daur ulang nutrisi dilakukan dan setelah 48 jam diganti dengan nutrisi baru. Kim et.al (2007) mendapatkan hasil bahwa sel terimobilisasi tidak menunjukkan periode aklimasi dan memiliki efisiensi penghilangan amonia tinggi pada awal percobaan kontinyu. Efisiensi penghilangan mendekati 100% ketika *loading* masukan amonia $4,5 \text{ g m}^{-3} \text{ jam}^{-1}$. Di atas nilai tersebut *biofilm* akan terjenuhkan oleh amonia dan di bawah nilai tersebut, batasan dalam difusi akan membatasi penghilangan amonia (Ottengraf, 1986). Kapasitas eliminasi maksimum yaitu $5,5 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ pada laju beban masukan $7,5 \text{ g m}^{-3} \text{ jam}^{-1}$. Penurunan tekanan antara 0,2 dan 1,6 $\text{cm H}_2\text{O m}^{-1}$ pada beban masukan antara 0,05 dan $7,5 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-3} \text{ jam}^{-1}$.

Saat diberikan efek fluktuasi *loading* masukan dengan memvariasikan konsentrasi antara 0,05 dan $6 \text{ g NH}_3 \text{ m}^{-3} \text{ jam}^{-1}$, biofilter ini hanya membutuhkan waktu 4-8 jam untuk kembali menjadi stabil.

Kim et.al (2000) juga melakukan eksperimen pengisolasian *Vibrio alginolyticus* untuk menghilangkan NH_3 . Konsentrasi masukan bervariasi dari 120 sampai 2000 ppm dan menghasilkan kapasitas penghilangan $22,8 \text{ g N kg}^{-1} \text{ material kering hari}^{-1}$.

Chan dan Zheng (2005) menginvestigasi kinerja media sintetik berbasis polivinil alkohol (PVA/*beads* kompos, PVA/*beads* gambut, PVA/kompos kotoran babi) pada biofiltrasi etil asetat. Biofilter mampu menghilangkan etil asetat dengan efisiensi penghilangan 100% dan kapasitas eliminasi maksimum $0,71 \text{ kg etil asetat m}^{-3} \text{ medium jam}^{-1}$.

Sorial et.al (2001) menggunakan pelet celite (6 mm) sebagai material pendukung dan menghasilkan kinerja yang konsisten pada laju *loading* $48 \text{ mol NH}_3 \text{ m}^{-3} \text{ jam}^{-1}$.

Chung dan Huang (1998) mengimobilisasi *Nitrosomonas europaea* untuk menghilangkan NH_3 dengan konsentrasi antara 10 dan 100 ppm. Efisiensi penghilangan yang dihasilkan >97% selama lebih dari 3 bulan.

2.4.2.2 Biofiltrasi H₂S

Shinabe et.al (2000) dan Elias et.al. (2000) telah menunjukkan bahwa bentuk geometri medium filter biofilter yang bagus adalah berbentuk silinder. Oleh karena itu, Dumont et.al (2008) menginvestigasi kinerja suatu medium filter sintetik yang disebut UP20 (mengandung CH₄N₂O, H₃PO₄, CaCO₃ dan bahan pengikat organik) pada biofiltrasi H₂S pada konsentrasi tinggi. Hasil penelitian itu juga dibandingkan dengan kinerja medium filter kulit kayu pohon cemara dan campuran pozzolan dan UP20 yang dibuat dua lapisan (80/20, v/v). Seluruh medium filter tersebut diinokulasi dengan menggunakan lumpur aktif (1,35 g berat kering selama 1 jam dan dilakukan 2 kali selama 2 minggu).

Dumont et.al (2008) menggunakan variasi konsentrasi H₂S untuk menentukan kinerja biofilter optimum selama 95 hari. Kecepatan superfisial pada UP20, kulit kayu pohon cemara dan campuran pozzolan dan UP20 sebesar 65 m jam⁻¹ (0,018 m s⁻¹; laju alir gas 0,5 N m³ jam⁻¹) dengan EBRT 57 s. Penurunan tekanan sepanjang biofilter diukur dengan memvariasikan laju alir gas dari 0,5 ke 4 N m³ jam⁻¹. Setelah 63 hari dilakukan peningkatan laju beban masukan ke 10 g m³ jam⁻¹. Ternyata biofilter UP20 memiliki efisiensi lebih dari 93% dibandingkan dengan kulit kayu pohon cemara sebesar 69% dan campuran pozzolan dan UP20 sebesar 74%. Hal tersebut mengindikasikan kemampuan UP20 untuk menstimulasi aktivitas bakteri karena UP20 dapat melarutkan nutrisi. Pada biofilter UP20, setelah 93 hari ternyata hanya terjadi pengurangan pH dari 8 ke 6 karena sifatnya sebagai penyangga pH yang baik, sementara pada kulit kayu pohon cemara dan campuran pozzolan/UP20 dari 7 ke 3. Penurunan pH pada UP20 dimungkinkan karena pelarutan kalsium karbonat dan fosfat. Tetapi, efisiensi penghilangan tidak terpengaruh.

2.4.3 Biofiltrasi dengan Medium Alami dan Sintetik

Pentingnya medium filter sebagai faktor kunci keefektifan biofilter membuat peneliti terus mengembangkan berbagai medium filter yang memiliki kapasitas eliminasi dan efisiensi penghilangan tinggi. Setelah penggunaan luas medium filter alami dan berkembangnya medium filter sintetik, kini penelitian

telah dikembangkan pada biofiltrasi gas buang dengan medium filter campuran medium alami dan sintetik.

2.4.3.1 Biofiltrasi Ammonia

Taghipour et.al. (2007) melakukan biofiltrasi amonia pada skala *bench* dengan medium filter berupa campuran kompos, lumpur teraktivasi, dan sobekan plastik. Lumpur teraktivasi digunakan untuk mengkultivasi medium kompos tanpa proses penyuburan untuk meningkatkan densitas mikroba dan mempertinggi kehomogenan medium filter. Reaktor diisi dengan menggunakan medium berbasis kompos yang dicampur dengan sobekan plastik (1,0 cm x 0,5 cm) sebagai *bulking agent* untuk mengurangi adanya pengurangan tekanan dan meningkatkan porositas, dan lumpur teraktivasi dengan rasio 3:2:1 (v/v/v) dengan porositas 52%, densitas 0,65, dan pH 7,2.

Setelah inokulasi biofilter dengan lumpur tebal teraktivasi, biofilter dioperasikan dengan laju alir udara (Q) 0.388 m³/jam dengan *empty bed residence time* (EBRT) 60 s dengan laju *loading* (L) masukan 2.15 g NH₃/m³ jam dan diperoleh periode aklimasi selama 10 hari.

Kapasitas eliminasi maksimum pada biofiltrasi tersebut yaitu 9,85 g NH₃/m³ jam dengan laju *loading* masukan yang digunakan ≤ 9,86 g NH₃/m³ jam dan konsentrasi masukan sebesar 236 ppmv. Sementara itu, konsentrasi keluaran NH₃ lebih kecil dari 1 ppmv untuk memenuhi standar emisi. Sebagai perbandingan dengan sistem biofilter berbasis kompos lainnya, Tabel 2.10 menunjukkan perbandingan lamanya periode aklimasi, kapasitas eliminasi maksimum, efisiensi penghilangan, dll. pada beberapa penelitian lain pada biofiltrasi amonia dengan menggunakan medium berbasis kompos.

Tabel 2.10. Perbandingan Kinerja Biofiltrasi Amonia Dengan Medium Berbasis Kompos

Peneliti/Pengarang	Media Isian	Periode Aklimasi (hari)	Kapasitas Eliminasi maksimum	Laju Beban Masukan	Konsentrasi gas masukan	Efisiensi Penghilangan (%)	EBRT (s)	Penurunan Tekanan (Pa/m)
Taghipour et.al (2007)	Kompos, lumpur, sobekan plastik	10	9,85 g NH ₃ /m ³ jam, 9,44 NH ₃ /m ³ jam	≤ 9,86 g NH ₃ /m ³ jam	236 ppmv	99,9	60	36,98
Pinnette et.al (1994)	Kompos, jerami, serpihan kayu	-	1 g NH ₃ /m ³ jam	-	-	-	≥ 30	-
Liang et al.(2000)	-Kompos, karbon teraktivasi (4:1) -Kompos,lumpur teraktivasi, karbon teraktivasi granular (4:4:3)	15	0,02-0,391 g NH ₃ /kg medium hari ⁻¹	0.021-0.392 g NH ₃ kg ⁻¹ media hari ⁻¹	20 dan 500 ppmv	95-99,6	31,9-79	-
Kapahi dan Gross (1995)	Kompos, kulit tiram, dan perlit	-	10,6 g NH ₃ /m ³ jam	-	-	96,4	-	-
Pagans et.al (2005)	Kompos	Tidak ada aklimasi karena absorpsi yang tinggi	0,829-21,7 g NH ₃ /m ³ jam	-	-	46,7-98,8	86	725

Sumber: Taghipour et.al., 2007

Berbagai penelitian mengenai biofiltrasi di atas menyarankan konsentrasi masukan NH_3 sebaiknya lebih kecil dari 200 ppm agar menghasilkan suatu sistem biofiltrasi yang stabil dan konsentrasi keluaran 1 ppmv yang sesuai dengan standar emisi.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Taghipour et.al. (2007) terjadi kenaikan konsentrasi amonium medium pada hari pertama biofiltrasi yang disebabkan oleh absorpsi amonia pada medium filter, tetapi setelah saat itu, konsentrasi amonium menurun. Sedangkan konsentrasi nitrat pada medium mengalami kenaikan selama biofiltrasi dan hal tersebut menunjukkan bahwa amonia yang terabsorpsi pada medium filter dikonversi oleh mikroorganisme nitrifikasi menjadi nitrat setelah periode aklimasi.

Pada penelitian ini juga dihasilkan bahwa EBRT terendah dimana sistem biofiltrasi dapat stabil yaitu pada 30 s dengan rata-rata *loading* $\leq 9,45 \text{ g NH}_3/\text{m}^3$ jam. Liang et al., 2000 melakukan biofiltrasi amonia dengan biofilter berbasis kompos dengan material tambahan karbon teraktivasi menghasilkan EBRT terendah sebesar 32 s, sedangkan Demeestere et.al., 2002 menghasilkan minimum EBRT sebesar 21 s pada biofiltrasi dengan kompos sebagai medium filter.

2.4.3.2 Biofiltrasi Senyawa Yang Mengandung Sulfur, Nitrogen, dan Asam Lemak

Selain Hong dan Park (2004) yang melakukan biofiltrasi gas buang pada proses pembuatan kompos, Ying-Chien Chung (2007) juga melakukan penelitian biofiltrasi tersebut. Namun, Yin-Chien Chung (2007) menggunakan material pembuatan kompos dari dua tempat yang berbeda dan gas buang yang mengandung senyawa nitrogen, sulfur, dan asam lemak rantai pendek dari proses tersebut akan dibiofiltrasi dengan sebuah biofilter. Biofilter menggunakan medium berupa kompos yang dihasilkan dari tempat pembuatan kompos tersebut dan dicampur dengan 10% (w/w) karbon aktif granular (diameter 5 mm) serta dinokulasi dengan lumpur 5% (w/w) dari tempat pengolahan limbah.

Pada penelitian ini juga dilakukan penggantian arah alir gas (dari atas atau dari bawah biofilter) secara mingguan, medium filter juga diberikan nutrisi secara periodik, dan dipasang alat reduksi bioaerosol. Laju alir yang digunakan yaitu

20,34 l/menit dengan *empty bed residence time* (EBRT) sebesar 30 s seperti yang telah disarankan oleh penelitian sebelumnya. Tabel 2.11 menunjukkan parameter operasi biofilter berbasis kompos pada penelitian Ying-Chien Chung



Tabel 2.11. Parameter Operasi Biofilter Berbasis Kompos Pada Penelitian Ying-Chien Chung

Volume Isian (l)	Laju alir gas (l/menit)	Lokasi	Senyawa mengandung nitrogen		Senyawa mengandung sulfur		Asam Lemak	
			Konsentrasi (ppm)	Load Masukan N/(m ³ hari)	Konsentrasi (ppm)	Load Masukan (g-S/(m ³ hari))	Konsentrasi (ppm)	Load Masukan (g-C/(m ³ hari))
10,2	20,34	Hsinchu	0,2-105	0,328-172,3	0,05-0,241	0,188-0,903	2,1-3,6	2,95-5,06
		Miaoli	0,2-68	0,328-111,5	0,13-4,62	0,488-17,33	0,2-1,0	0,28-1,41

Sumber: Ying-Chien Chung, 2007

Berikut ini adalah hasil yang diperoleh oleh Yin-Chien Chung (2007):

1. Senyawa Mengandung Nitrogen

Efisiensi Penghilangan CH_3NH_2 , $(\text{CH}_3)_2\text{NH}$ > 99% sebaik penghilangan amonia. Begitu juga pada penghilangan $(\text{CH}_3)_3\text{N}$ dengan efisiensi penghilangan 95,2% (Hsinchu) dan 96,8% (Miaoli) walaupun $(\text{CH}_3)_3\text{N}$ dikenal sebagai senyawa yang susah didegradasi karena strukturnya yang kompleks dan konsentrasinya yang tinggi. Tidak ditemukan adanya periode aklimasi. Adanya fluktuasi suhu juga tidak mempengaruhi kinerja biofilter.

2. Senyawa Mengandung Sulfur

Efisiensi penghilangan dimetildisulfit yang terdeteksi kandungannya sebesar 0,241 ppm dan bau pada Hsinchu yaitu 90,6% dan 95,3%. Sedangkan efisiensi penghilangan H_2S , CH_3SH , $\text{C}_2\text{H}_5\text{SH}$ yang hanya dideteksi pada Mioali dengan kandungan yang rendah (<5 ppm) sebesar 96,8%.

3. Asam lemak rantai pendek

Biofilter berhasil menghilangkan asam lemak dengan efisiensi penghilangan mencapai 97% dengan konsentrasi asam lemak pada bau sebesar 2,1-3,6 ppm pada Hsinchu dan 0,2-1,0 ppm pada Miaoli

Selain senyawa-senyawa tersebut juga terdeteksi adanya total hidrokarbon (THCs) yang tak terlalu signifikan yaitu 3,5-28. Biofilter yang diuji telah mampu menghilangkan THCs dengan efisiensi 96% (konsentrasi keluaran maksimum 0,8 ppm).

Biofilter yang digunakan oleh Yin-Chien Chung (2007) memiliki pH yang berada pada kisaran pH netral yang menunjukkan kemampuan biofilter ini dapat digunakan untuk penghilangan bau pada proses pembuatan kompos. Kandungan air rata-rata 43% (40-46%) yang sesuai dengan kandungan air yang harus dijaga agar aktivitas bakteri tetap berlangsung (antara 40-60%).

Penggantian arah alir gas (dari atas atau dari bawah biofilter) secara mingguan juga memperkecil penurunan tekanan (antara 20 dan 30 mm $\text{H}_2\text{O}/\text{m}$) yang biasanya bernilai besar pada biofilter medium filter berbasis kompos dengan satu arah aliran saja misalnya aliran ke bawah kolom ($\pm 80,3$ mm $\text{H}_2\text{O}/\text{m}$). Nilai penurunan tekanan pada medium campuran kompos, karbon aktif granular dan lumpur juga lebih kecil dari medium lainnya seperti gambut (74 mm $\text{H}_2\text{O}/\text{m}$),

rock wool (68 mm H₂O/m), *fuyolite* (62 mm H₂O/m), dan keramik (54 mm H₂O/m) di bawah kondisi operasi yang mirip.

Efek negatif dari menggunakan konsentrasi mikroorganisme yang tinggi pada biofilter adalah dapat keluarnya mikroorganisme ke atmosfer yang justru akan membahayakan. Adanya alat reduksi bioaerosol yang dipasang sebelum gas yang telah dibiofiltrasi keluar ke atmosfer menyebabkan reduksi bioaerosol menurun drastis dari 10⁶ CFU/m³ (tanpa menggunakan alat reduksi bioaerosol) menjadi 4,2 x 10³ CFU/m³. Hal ini berarti alat reduksi bioaerosol mempunyai efisiensi penghilangan bioaerosol sebesar 99,6%.

2.4.3.3 Biofiltrasi *Volatil Organic Compounds* (VOCs)

Bina et.al (2004) melakukan biofiltrasi stirene dengan menggunakan medium filter kompos yang dicampur sobekan plastik densitas tinggi sebagai *bulking agent*. Komposisi pencampuran yaitu 75:25 v/v. Sistem biofiltrasi tersebut ditambahkan lumpur tebal teraktivasi dari tempat pengolahan air limbah untuk meningkatkan densitas mikroba dan membuat kompos partikel bercampur dengan *bulking agent*. Bina et.al (2004) meneliti pengaruh laju beban masukan, konsentrasi masukan, dan EBRT pada kinerja biofiltrasi.

Biofiltrasi tersebut menghasilkan aklimasi mikroba tercapai setelah hari ke 57 dengan konsentrasi masukan stirene 65±11 ppm dan waktu kontak 360 s. Di bawah kondisi tunak, efisiensi penghilangan rata-rata sekitar 84% pada laju *loading* 60 dan 80 g m⁻³ jam⁻¹ dengan EBRT 60 s. Kapasitas eliminasi maksimum sebesar 81 g m⁻³ jam⁻¹ dengan laju *loading* masukan sekitar 120 g m⁻³ jam⁻¹. Pengaruh laju beban masukan, konsentrasi masukan, dan EBRT pada kinerja biofilter adalah sebagai berikut:

1. Pengaruh konsentrasi masukan

Semakin besar konsentrasi masukan maka efisiensi biofilter akan meningkat. Namun jika konsentrasi masukan terlalu besar (dalam penelitian ini konsentrasi lebih besar dari 650 ppm dan laju *loading* masukan sampai 160 g m⁻³ jam⁻¹) diketahui terjadi penurunan kinerja biofiltrasi yang terlihat pada penurunan efisiensi sampai 14% pada EBRT 120 s. Hal tersebut disebabkan

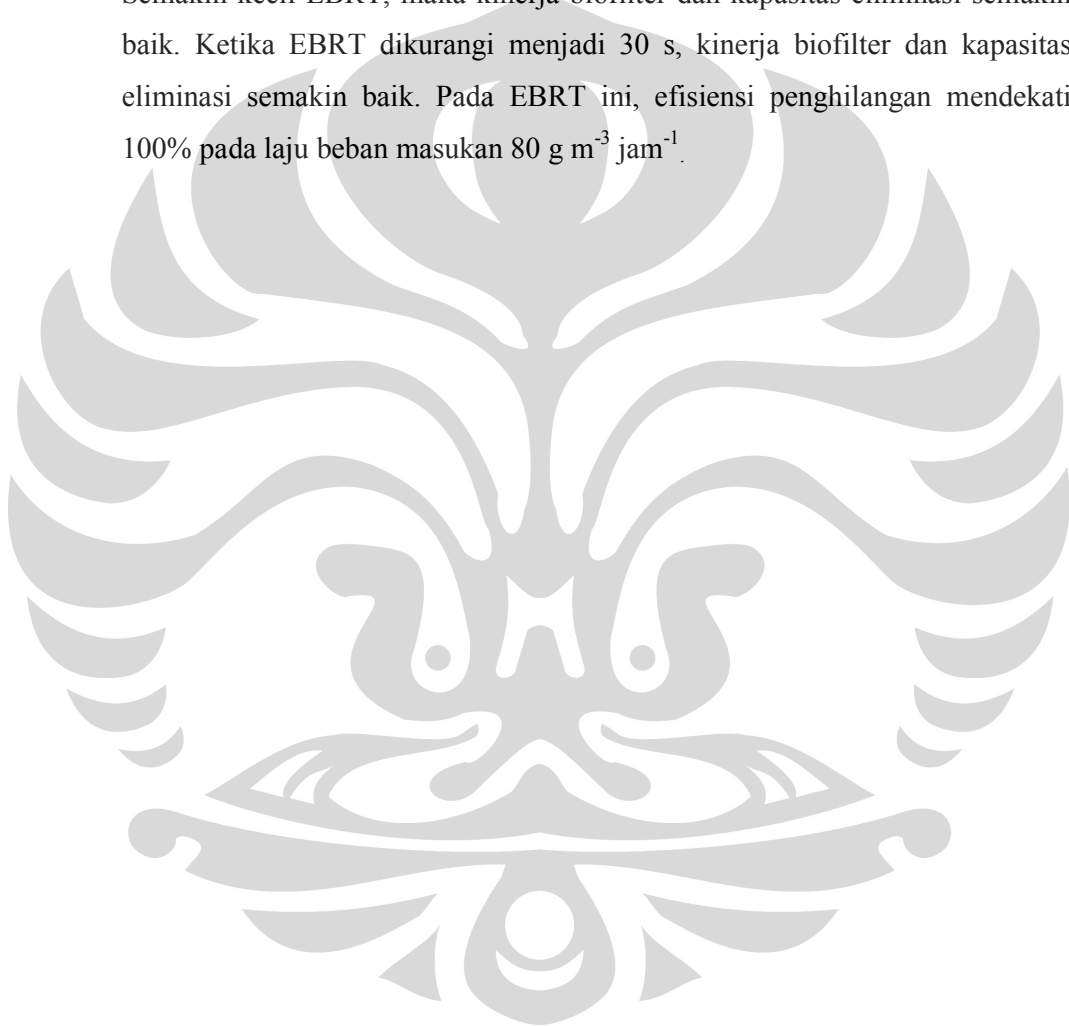
karena adanya efek inhibitatif pada aktivitas biomassa sepanjang medium filter.

2. Pengaruh laju beban masukan

Semakin tinggi laju beban masukan, maka kinerja biofilter akan semakin baik sampai batas terjadinya efek inhibitif pada aktivitas mikroorganisme.

3. Pengaruh EBRT

Semakin kecil EBRT, maka kinerja biofilter dan kapasitas eliminasi semakin baik. Ketika EBRT dikurangi menjadi 30 s, kinerja biofilter dan kapasitas eliminasi semakin baik. Pada EBRT ini, efisiensi penghilangan mendekati 100% pada laju beban masukan $80 \text{ g m}^{-3} \text{ jam}^{-1}$.



Tabel 2.12. Rangkuman State Of the Art Biofiltrasi

Peneliti	Polutan	Medium Filter	Hasil	Efisiensi Tertinggi
Arnold et.al. (1997)	Stirene	berbasis gambut	kapasitas eliminasi (EC) sebesar $30 \text{ g m}^{-3} \text{ jam}^{-1}$	98%
Chung dan Huang (1998)	amonia	imobilisasi <i>Nitrosomonas europea</i>	konsentrasi antara masukan 10 dan 100 ppm. Efisiensi penghilangan yang dihasilkan >97% selama lebih dari 3 bulan	>97%
Liang et.al (2000)	amonia	Kompos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>loads</i> : $0.33 \text{ sampai } 16.25 \text{ mg NH}_3 \text{ kg media}^{-1} \text{ jam}^{-1}$ ▪ <i>empty bed residence time</i> (EBRT) dari 31.8 samapi 78 s 	>95%
Hong et.al (2002)	amonia	campuran 50% serpihan kayu dan 50% pupuk kompos (% berat)	kedalaman media pada 400 sampai 500 mm dan menghasilkan efisiensi penghilangan tertinggi	100%
Hong dan Park (2004)	amonia	50% pupuk kompos dan 50% kulit kelapa	biofilter dengan kedalaman media 500 mm untuk menghasilkan efisiensi 100%	100%
Liu et.al (2004)	VOCs etil asetat, isopropanol, dan toluena	kompos, lava, dan sejenis tanah yang mengandung banyak humus	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduksi Etil Asetat dan Isopropanol, <i>load</i> < 200 dan $120 \text{ g m}^{-3} \text{ medium jam}^{-1}$ ▪ EC_{maks} Toluena $20 \text{ g m}^{-3} \text{ medium jam}^{-1}$ 	100% 40%-100%

Peneliti	Polutan	Medium Filter	Hasil	Efisiensi Tertinggi
Bina et.al (2004)	stirene	kompos yang dicampur sobekan plastik (75:25, v/v)	<ul style="list-style-type: none"> EC_{maks} 81 g m⁻³ jam⁻¹ dengan laju <i>loading</i> sekitar 120 g m⁻³ jam⁻¹ Semakin besar konsentrasi masukan maka efisiensi biofilter akan meningkat tetapi jangsan sampai ada efek inhibitatif pada aktivitas biomassa sepanjang medium filter. Semakin kecil EBRT, maka kinerja biofilter dan kapasitas eliminasi semakin baik 	84% EBRT 30 s, efisiensi penghilangan ≈100% pada laju <i>loading</i> 80 g m ⁻³ jam ⁻¹ .
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> (cacahan sampah) = 1:1, 5:1 (v/v)	<ul style="list-style-type: none"> OFMSW (5:1), EC_{maks} 829 mg NH₃ m⁻³ biofilter jam⁻¹ -OFMSW (1:1), EC_{maks} 7170 mg NH₃ m⁻³ biofilter jam⁻¹ DS, EC_{maks} 6580 mg NH₃ m⁻³ biofilter jam⁻¹ AP (hari 0-4), EC_{maks} 61300 mg NH₃ m⁻³ biofilter jam⁻¹ - AP (hari (4-9), EC_{maks} 21700 mg NH₃ m⁻³ biofilter jam⁻¹ 	98,8 95,9 99,4 89,5 46,7
Torkian et.al (2005)	Trietilamin (TEA)	Kompos tersebut dan <i>bulking agent</i> serpihan kayu, 60:40 (v/v)	<ul style="list-style-type: none"> EC_{maks} yaitu 72 g m⁻³ h⁻¹ pada laju <i>loading</i> 114 g m⁻³ jam⁻¹ (suhu 30±1 °C) EC_{maks} 61,5 g m⁻³ jam⁻¹ pada laju <i>loading</i> 90,5 g m⁻³ jam⁻¹ (23±2 °C) 	

Peneliti	Polutan	Medium Filter	Hasil	Efisiensi Tertinggi
Chan dan Zheng (2005)	etil asetat	media sintetik berbasis alkohol polivinil (PVA/beads kompos, PVA/beads gabut, PVA/kompos babi)	<ul style="list-style-type: none"> EC_{maks} 0,71 kg etil asetat m⁻³ bed.jam⁻¹. 	100%
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"> kelembaban optimal 68% EBRT efektif 28,5 s loading 434 g piridin m⁻³ h⁻¹. 	(>99%)
Ying-Chien Chung (2006)	senyawa nitrogen, sulfur, dan asam lemak rantai pendek	kompos dicampur dengan 10% (w/w) karbon aktif granular (diameter 5 mm) serta dinokulasi dengan lumpur 5% (w/w)	<ul style="list-style-type: none"> CH₃NH₂, (CH₃)₂NH CH₃₃N Dimetildisulfid H₂S, CH₃SH, C₂H₅SH asam lemak - Total hidrokarbon (THCs) 	<ul style="list-style-type: none"> > 99% 96,8% 95,3% 96,8% 97% 96%
Yang et.al (2007)	NO	kompos dan serpihan kayu	<ul style="list-style-type: none"> Semakin tinggi kolom biofilter, semakin tinggi efisiensi penghilangan NO Adanya O₂ dapat menghambat penghilangan NO Efisiensi penghilangan NO menurun dengan peningkatan konsentrasi gas NO masukan Konsentrasi NO menurun ketika glukosa ditambahkan ke baik pada kondisi aerobik maupun anaerobik Efisiensi Penghilangan NO anaerobik > aerobik 	99%

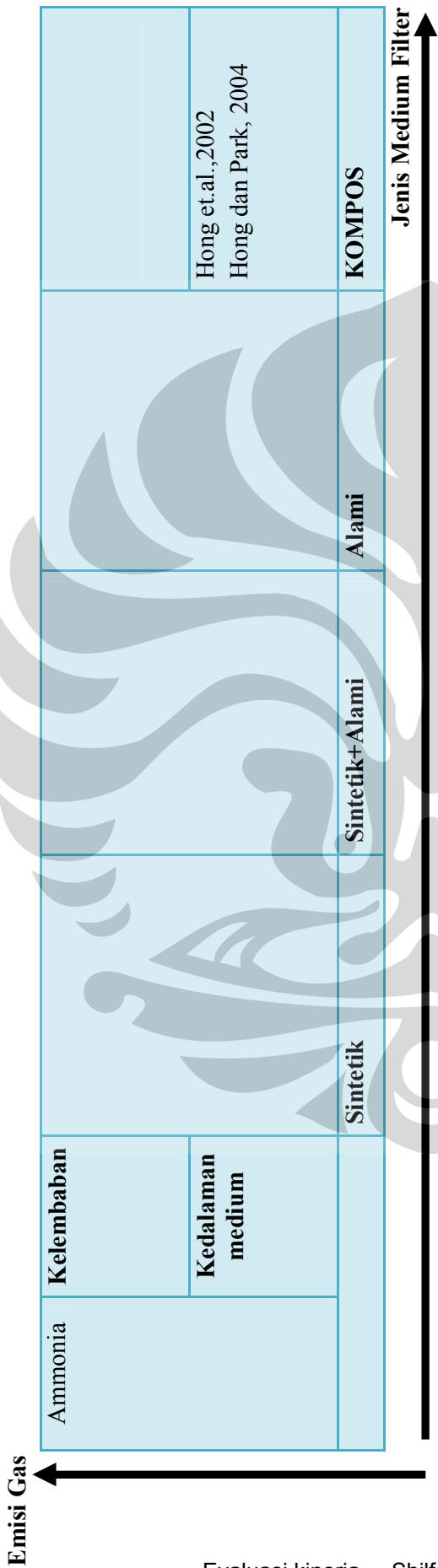
Peneliti	Polutan	Medium Filter	Hasil	Efisiensi Tertinggi
Gabriel et.al (2007)	amoniamonia	medium filter serat kelapa	<ul style="list-style-type: none"> EC_{maks} 12 g [NH₃] m⁻³ jam⁻¹ (transien) EC_{maks} 33,3 g [NH₃] m⁻³ jam⁻¹ (steady) 	80% 100%
Kim et.al (2007)	amoniamonia	biomedia yang dienkapsulasi dengan sodium alginat dan polivinil alkohol (PVA) membentuk cryogels (kubus)	<ul style="list-style-type: none"> loading amonia 4,5 g m⁻³ jam⁻¹ EC_{maks} yaitu 5,5 g m⁻³ h⁻¹ pada laju loading 7,5 g m⁻³ jam⁻¹ 	100%
Taghipour et.al (2007)	amoniamonia	campuran kompos, lumpur teraktivasi, sobekan plastik, 3:2:1 (v/v/v)	<ul style="list-style-type: none"> EC_{maks} yaitu 9,85 g NH₃/m³ jam dengan laju loading yang digunakan ≤ 9,86 g NH₃/m³ jam dan konsentrasi masukan sebesar 236 ppmv EBRT terendah dimana sistem biofiltrasi dapat stabil yaitu pada 30 s dengan rata-rata L ≤ 9,45 g NH₃/m³ jam 	
Chen et.al (2008)	VOCs (VFAs, fenolik, senyawa sulfur indolik)	kayu keras (HW) kayu pohon cedar (WC)	<ul style="list-style-type: none"> semakin besar kelembaban media filter, maka efisiensi reduksi akan semakin baik pada ketiga senyawa VOC (VFAs, fenolik, indolik) efisiensi reduksi pada semua kelembaban terlihat lebih baik pada WC tidak ada pengaruh EBRT terhadap efisiensi reduksi 	74 % WC, EBRT 5,5: 92,6% HW, EBRT 5,5: 86,4%
Dumont et.al (2008)	H ₂ S	- material sintetik UP20 -kulit kayu pohon cemara -campuran pozzolan dan UP20 (80/20, v/v).	<ul style="list-style-type: none"> laju loading 10 g m³ jam⁻¹ biofilter UP20 kulit kayu pohon cemara campuran pozzolan dan UP20 	>93% 69% 74%.

Peneliti	Polutan	Medium Filter	Hasil	Efisiensi Tertinggi
Utami et.al (2009)	N ₂ O	serpihan kayu dan pupuk kandang	<ul style="list-style-type: none"> ▪ efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada panjang biofilter tertinggi 50 cm ▪ efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada laju alir gas N₂O tertinggi 200 cc/menit ▪ Penambahan nutrisi menghasilkan efisiensi reduksi tertinggi 	67,86%. 70,22%. 91,49%,
Utami et.al (2009)	N ₂ O	pupuk kompos berbasis kotoran kambing dengan <i>bulking agent</i> sekam dan <i>cocopeat</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pada variasi laju alir efisiensi reduksi optimum terjadi pada laju alir 72 cc/menit ▪ Pada penambahan fraksi air pada medium filter, efisiensi reduksi optimum terjadi pada kandungan air 60% dari berat kompos . ▪ Penggunaan nutrisi baik alami maupun sintetik dapat meningkatkan efisiensi reduksi N₂O. ▪ Penambahan <i>Nitrobacter,sp</i> dan nutrisi sintetik pada kompos dapat meningkatkan efisiensi reduksi N₂O 2,2% lebih tinggi dibandingkan nutrisi alami. ▪ Efisiensi tertinggi pada penelitian ini terjadi pada ketinggian medium 50 cm, laju alir N₂O 72 cc/menit, kandungan air 60% dan penambahan nutrisi sintetik serta <i>Nitrobacter,sp</i> pada kompos sebagai medium filter. 	56,7% 70,13 %
Shilfa Filayuri	N ₂ O	pupuk kompos berbasis	Diteliti:	75,9%

(2009)		kotoran sapi dengan <i>bulking agent</i> sekam dan <i>cocopeat</i>	- pengaruh ketinggian pada laju alir optimum - pengaruh penambahan air pada laju alir optimum	
--------	--	--	--	--

Emisi Gas		Kandungan air		PENELITIAN INI (<i>batch</i>), 2009 Utami, et.al 2009 (batch kolom tanpa manometer)
		Kedalaman medium		
N ₂ O	Kandungan air			PENELITIAN INI (<i>batch</i>), 2009 Utami, et.al 2009 (Sirkulasi) Utami, et.al 2009 (batch kolom tanpa manometer)
	Kedalaman medium			
NO	Kandungan air			Yang et.al., 2007
	Kedalaman medium			
VOCs	Kandungan air	Chen et.al., 2008		
	Kedalaman Medium			
	Kelembaban			
Piridin	Kedalaman Medium			Pandey et.al., 2006

Jenis Medium Filter →

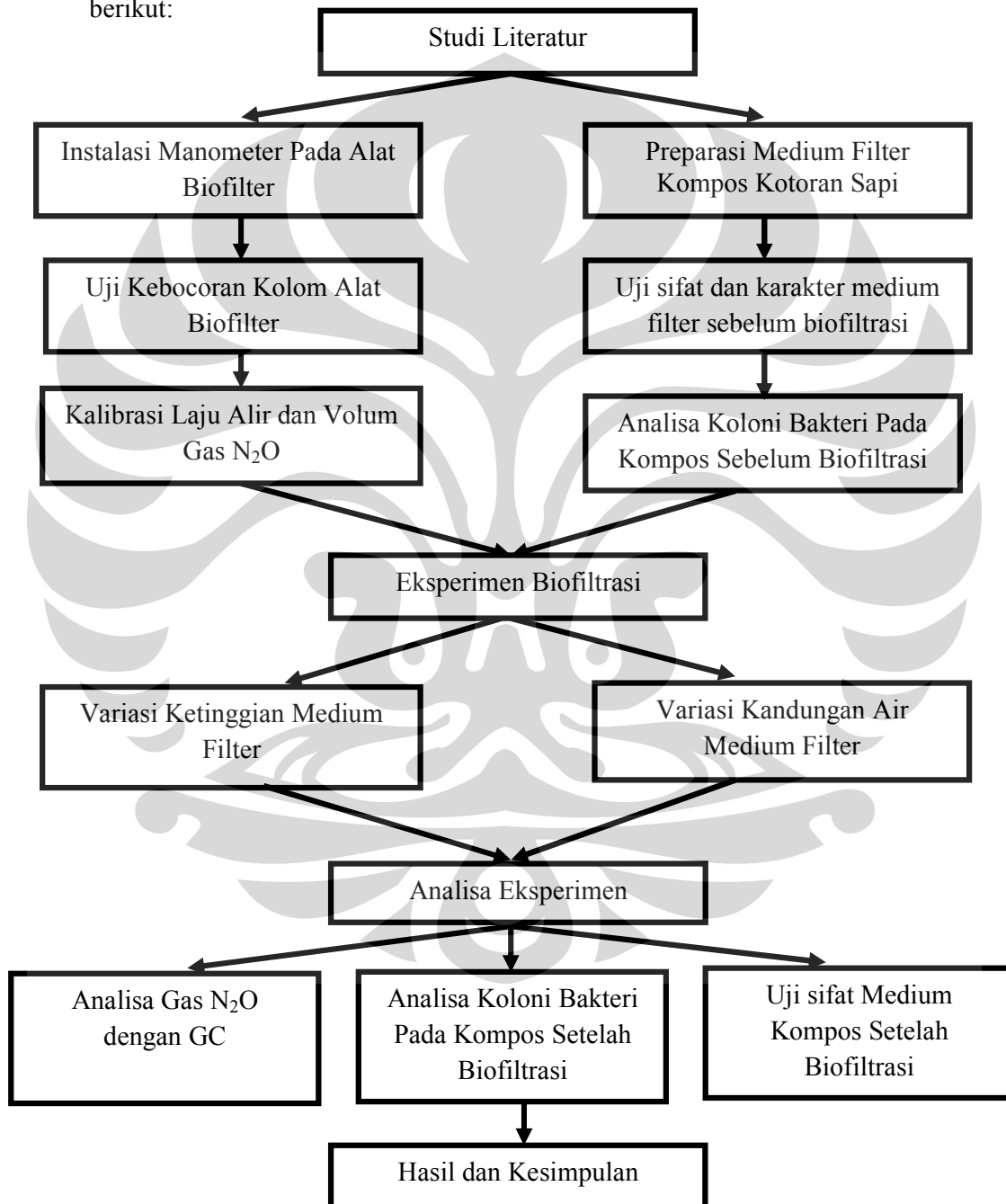


Gambar 2.13. Mapping State of The Art Biofilter

BAB 3
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Rancangan Penelitian

Diagram alir dari penelitian biofiltrasi ditunjukkan oleh Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian Biofiltrasi

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari jurnal publikasi nasional maupun internasional mengenai biofiltrasi. Alat biofilter yang digunakan merupakan alat skala laboratorium dan terbuat dari bahan *acrylic* dengan dimensi kolom panjang 120 cm dan diameter dalam 7,35 cm. Manometer air juga digunakan pada alat biofilter untuk melihat penurunan tekanan sepanjang kolom biofilter.

Langkah selanjutnya adalah preparasi medium filter. Preparasi diawali dengan pembuatan kompos dengan sumber bahan organik kotoran sapi yang akan digunakan sebagai medium filter. Medium filter kompos dibuat di Sekolah Alam, Ciganjur. Kompos dipilih sebagai medium filter karena kompos telah digunakan secara luas sebagai media biofilter dan apabila dibandingkan dengan media filter lainnya kompos memiliki harga yang murah, dan kemudahan mendapatkannya karena banyak tersedia. Selain itu kompos juga memiliki komunitas mikroba yang kompleks dan memiliki kandungan nutrisi (organik nitrogen dan mikronutrisi lainnya) yang tinggi sehingga tidak memerlukan penambahan nutrisi (Pagans et.al., 2005).

Proses preparasi medium kompos dilanjutkan dengan pengeringan kompos pada suhu dan kelembaban ruang yaitu 33 °C dengan humiditas ruang 70%. Setelah kompos kering, dilakukan pengayakan guna mendapatkan partikel kompos yang seragam.

Kompos yang akan digunakan sebagai medium filter kemudian dikarakterisasi untuk mengetahui karakteristik kompos seperti kandungan air, pH, porositas, luas permukaan, kandungan C, N, P, K, dan S. Hal tersebut juga dilakukan setelah kompos digunakan sebagai medium filter biofiltrasi.

Sebelum memulai eksperimen, dilakukan uji kebocoran pada alat biofilter yang berguna untuk memastikan bahwa tidak terjadi kebocoran pada biofilter sehingga konsentrasi gas N_2O berkurang karena proses adsorpsi dan degradasi, bukan karena kebocoran. Selain itu, dilakukan kalibrasi flowmeter yang akan digunakan dan volume gas N_2O sebelum dilakukan percobaan. Tujuan dari proses kalibrasi ini adalah untuk mendapatkan laju alir sesungguhnya dari gas yang dialirkan ke dalam sistem biofilter, serta luas area N_2O pada volume sampel N_2O standar.

Percobaan biofiltrasi dilakukan untuk mereduksi gas N_2O menggunakan biofilter. Evaluasi kinerja biofilter dengan medium filter pupuk kompos berbasis kotoran sapi dilakukan dengan memvariasikan sejumlah parameter operasi biofiltrasi seperti kedalaman medium filter dan kelembaban medium filter melalui penambahan fraksi air.

Gas keluaran kolom biofilter setiap jam selama 9 jam biofiltrasi kemudian dianalisa konsentrasinya dengan *gas chromatography* (GC) untuk mengetahui efisiensi penghilangan gas N_2O . Kompos sebelum dan sesudah biofiltrasi juga diteliti perkembangan koloni mikroorganismenya dengan menggunakan metode *total plate count* dan analisa *Scanning Electron Microscope* (SEM). Setelah itu dilakukan analisa hasil melalui pembahasan untuk mencapai suatu kesimpulan.

3.2 Alat dan Bahan

Pada penelitian biofiltrasi N_2O menggunakan medium filter kompos berbasis kotoran sapi, digunakan sejumlah alat dan bahan sebagai berikut.

3.2.1 Alat

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian biofiltrasi ditunjukkan pada Tabel 3.1 yaitu:

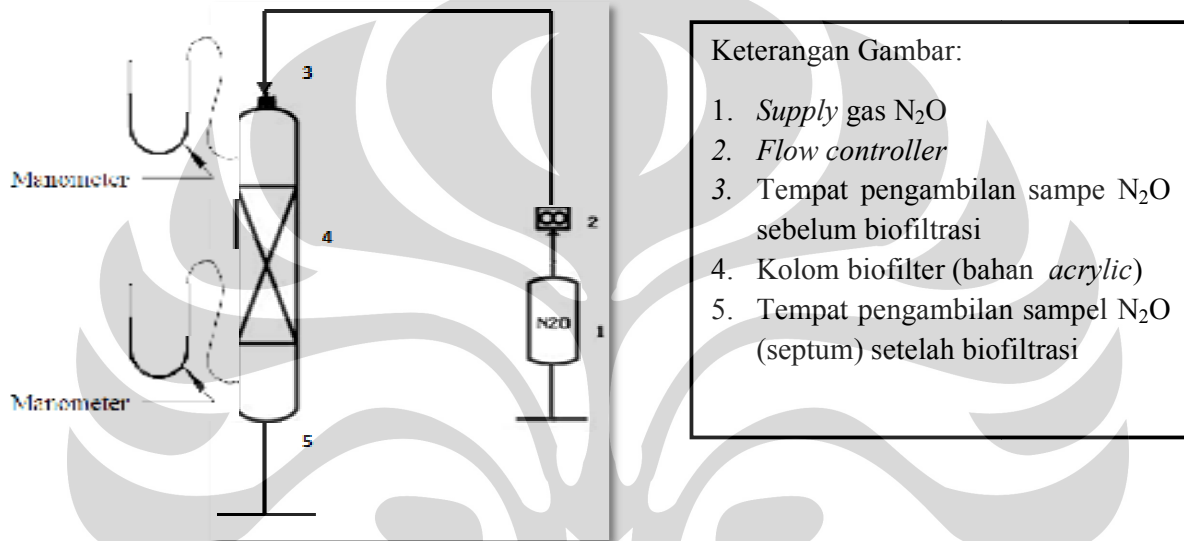
Tabel 3.1. Alat yang Digunakan Pada Penelitian Biofiltrasi

No.	Alat	Fungsi
1.	Sistem Biofilter	Tempat dilakukan pengujian biofiltrasi gas N ₂ O
2.	Tampah	Tempat mengeringkan dan menjemur kompos
3.	Ember	Wadah untuk kompos yang telah diayak (sebelum dimasukkan ke dalam kolom biofilter)
4.	<i>Perforated Plate</i>	Alat untuk membuat terjadinya distribusi gas merata di dalam kolom biofilter
5.	Gelas ukur	Alat untuk mengambil larutan dalam jumlah tertentu
6.	Erlenmeyer	Wadah pencampuran nutrient agar dan air
7.	Spatula kaca/pengaduk	Mengaduk nutrien agar dan aquadest
8.	Kaca Arloji	Tempat untuk menimbang nutrien agar
9.	<i>Bubble soap</i>	Kalibrasi laju alir
10.	<i>Gas Trap</i>	Tempat gas N ₂ O pada saat kalibrasi volum
11.	<i>Gas Chromatograph (GC)</i>	Menganalisa konsentrasi N ₂ O dalam sampel
12.	<i>Syringe</i>	Mengambil gas sampel
13.	Cawan Petri Steril	Perhitungan populasi/koloni bakteri
14.	Tabung Reaksi	Tempat pengenceran larutan
15.	Timbangan	Mengukur berat kompos dan air
16.	Panci Presto	Sterilisasi sampel
17.	Bunsen	Sterilisasi transfer sampel
18.	Transfer box	Tempat transfer sampel pada kondisi steril
19.	Inkubator	Inkubasi bakteri
20.	<i>Hot Plate</i>	Memanaskan medium agar untuk TPC
21.	Mikropipet	Mengambil sejumlah volume larutan yang kecil (1000 µl)
22.	Oven	Mensterilisasi alat-alat yang akan digunakan pada metode TPC

Komponen-komponen dalam sistem biofilter yang terdiri dari:

1. Suplai gas N_2O
2. *Flow controller*
3. Kolom biofilter (bahan *acrylic*)
4. Tempat pengambilan sampel N_2O (septum)
5. Manometer air tipe U

Skema desain biofilter yaitu:



Gambar 3.2. Diagram Skematik Desain Biofilter Skala Laboratorium

3.3.2 Bahan

Berikut ini perincian bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Kompos, digunakan sebagai medium filter sekaligus sebagai tempat hidup bakteri.
2. Gas N_2O , dimana gas yang akan digunakan untuk pengujian ini merupakan gas N_2O dan udara dengan konsentrasi N_2O sebesar 15.000 ppm dalam udara.
3. *Aquadest*, sebagai penambah kandungan air dalam medium filter yang berfungsi untuk meningkatkan kelembaban sehingga bakteri pada medium filter dapat berkembang dengan lebih baik.
4. Nutrient agar sebagai medium agar untuk perhitungan bakteri.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Instalasi Manometer Sistem Biofilter

Sistem biofilter yang digunakan terdiri dari bagian utama berupa kolom biofilter yang terbuat dari bahan *acrylic* dengan dimensi tinggi 120 cm dan diameter dalam 7,35 cm. Untuk melihat penurunan tekanan sepanjang kolom, maka diinstal manometer air tipe U pada kolom biofilter. Manometer tipe U diinstal pada bagian atas dan bawah kolom.

Sedangkan untuk memastikan adanya distribusi radial gas yang homogen dalam kolom, maka digunakan *perforated plates* dari bahan *acrylic* yang beri lubang-lubang dengan diameter lubang 2 mm. *Perforated plates* digunakan jika kedalaman medium filter ≥ 80 cm. *Perforated plates* dipasang pada $\frac{1}{2}$ massa kompos yang digunakan sebagai medium filter.

Sampling port yang digunakan untuk tempat pengambilan sampel gas N_2O , terdapat pada bagian atas kolom (sebelum gas N_2O masuk kolom) dan bagian bawah kolom (setelah gas N_2O keluar kolom).

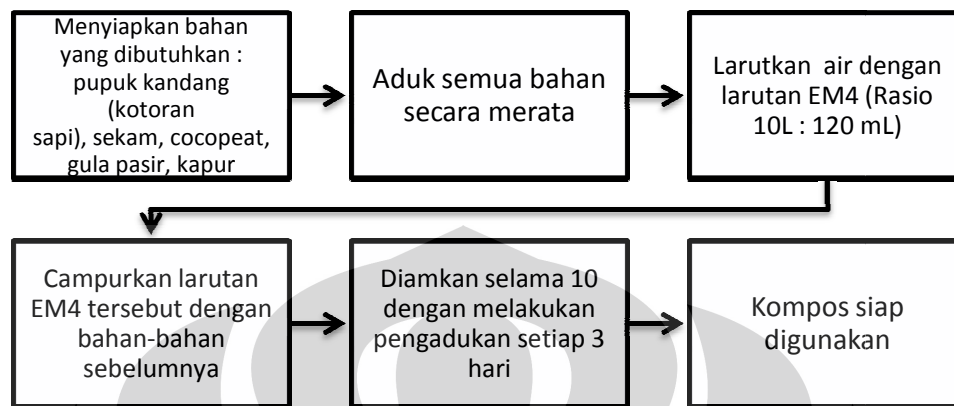
Gas N_2O yang mengalir ke kolom biofilter berasal dari tabung N_2O dengan konsentrasi 15000 ppm N_2O dalam udara. Jadi N_2O mengalir ke dalam kolom biofilter karena adanya perbedaan tekanan. Tekanan N_2O pada tabung diatur sebesar 1 bar. Gas N_2O keluaran biofiltrasi kemudian mengalir ke atmosfer melalui selang keluaran.

3.3.2 Preparasi Medium Filter

Medium filter yang digunakan untuk biofiltrasi ini adalah kompos. Kompos yang digunakan berasal dari "Green Lab" Sekolah Alam, Ciganjur. Kandungan kompos terdiri dari:

- Pupuk kandang : sebagai bahan dasar pembuatan kompos. Pupuk kandang yang digunakan adalah kotoran sapi.
- Sekam dan cocopeat (sabut kelapa yang telah dikeringkan dan dihancurkan): sebagai *bulking agent* kompos. Bahan tersebut dapat meningkatkan adanya ruang kosong, mencegah pemadatan, dan memperbesar ventilasi pada sistem biofilter
- Gula pasir : sebagai sumber glukosa
- Kapur : untuk meningkatkan pH pupuk

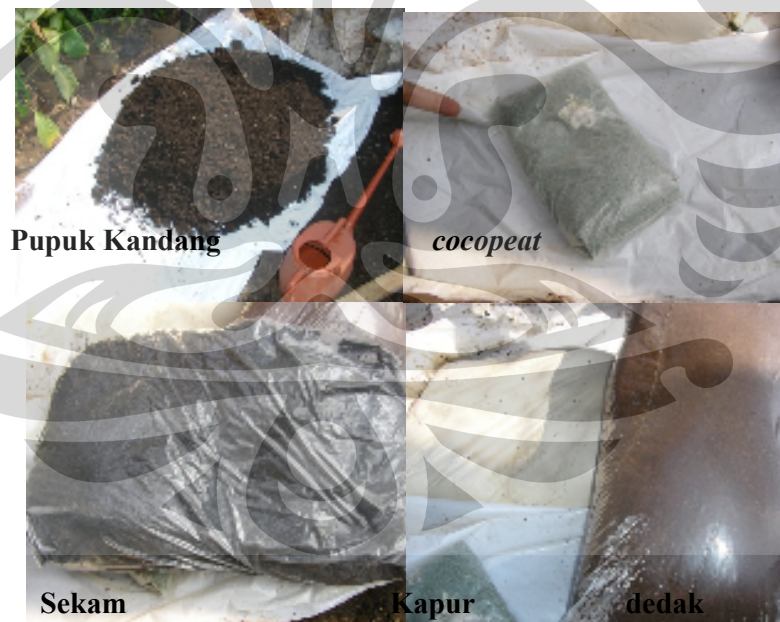
- Dedak : sebagai protein mikroba



Gambar 3.3. Diagram Prosedur Pengomposan

Adapun perincian prosedur pembuatan kompos sebagai berikut:

- Menyiapkan bahan-bahan yang digunakan berikut yaitu pupuk kandang, sekam dan *cocopeat*, gula pasir, kapur, dan dedak



Gambar 3.4. Bahan yang Digunakan Dalam Pengomposan

- b. Membuat komposisi pembuatan kompos dari bahan-bahan diatas dengan rasio (kg) = 2 pupuk kandang: 2 sekam : 2 *cocopeat* : 2 dedak : 1 gula pasir : $\frac{1}{4}$ kapur dan melakukan pengadukan.



Gambar 3.5. Pembuatan Komposisi Campuran Bahan-bahan Kompos dan Pengadukan

- c. Mencampur komponen diatas di aduk dengan larutan EM4 (*Effective Microorganism*) 120 ml, dengan penambahan 10 liter air limbah. Penggunaan EM4 sebagai bioaktivator untuk mempercepat pengomposan



Gambar 3.6. Penambahan EM4

- d. Setelah dicampur, kompos disekap di dalam terpal selama 10 hari dengan dilakukan pengadukan setiap 3 hari dalam 10 hari tersebut



Gambar 3.7. Penutupan dengan Terpal Selama 10 hari

Persiapan kompos yang sudah jadi untuk medium filter ini dilakukan dengan pengeringan dan pengayakan. Pengeringan kompos dilakukan dengan meletakkan kompos didalam tampah (digunakan 5 tampah) dan menjemur kompos pada suhu dan kelembaban ruang (27°C dan 70%). Pengeringan bertujuan untuk mendapatkan medium filter kompos dengan kelembaban yang optimal bagi proses biofiltrasi

Pada proses pengayakan digunakan ayakan yang memiliki diameter lubang sekitar 2 mm. Tujuan pengayakan adalah untuk menghasilkan partikel medium filter yang homogen sehingga dapat mengurangi *pressure drop* dan mencegah adanya *filter blocking*. Setelah proses preparasi medium selesai dilakukan, maka kompos dapat langsung digunakan atau disimpan di dalam wadah berupa ember pada suhu dan kelembaban ruang.

3.4 Uji Sifat Kompos Sebelum dan Sesudah Biofiltrasi

Kompos sebelum dan sesudah digunakan sebagai medium filter biofilter diambil sampelnya dan dilakukan pengujian untuk mengetahui sifat medium kompos yang terdiri dari kelembaban, pH, dan porositasnya.

Berikut adalah prosedur uji kelembaban kompos

1. Memanaskan keramik di dalam oven pada $T=105^{\circ}\text{C}$ selama 2 jam
2. Memasukkan ke desikator selama 5 menit

3. Menimbang berat keramik
4. Menimbang sampel kompos sebanyak 5 gram
5. Meletakkan sampel kompos di keramik dan dipanaskan lagi dalam oven pada $T=105\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 2 jam
6. Memasukkan ke desikator selama 5 menit
7. Menimbang berat keramik dan kompos
8. Menghitung kelembaban kompos dengan persamaan:

$$\begin{aligned} \text{massa kompos akhir} = & \\ & (\text{massa}_{\text{keramik kosong oven}} + \text{massa}_{\text{kompos sebelum di oven}}) - \\ & (\text{massa}_{\text{keramik+kompos setelah di oven}}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\text{Air yang menguap} = \text{massa kompos awal} - \text{massa kompos akhir} \quad (3.2)$$

$$\% \text{kandungan air pada kompos} = \frac{\text{air yang menguap}}{\text{massa kompos awal}} \times 100\% \quad (3.3)$$

Prosedur uji pH sebagai berikut :

1. Menimbang sampel kompos sebanyak 5 gram
2. Melarutkannya dengan 50 ml air aquades
3. Mengaduk campuran tersebut
4. Melakukan uji pH dengan pH meter dan pH indikator

Prosedur uji porositas sebagai berikut :

1. Meletakkan sejumlah kompos dalam gelas beaker 50 ml (sampai benar-benar penuh)
2. Menimbang berat kompos dalam gelas beaker (m_{kompos})
3. Menghitung densitas kompos dengan persamaan

$$\rho_{\text{kompos}} = \frac{m_{\text{kompos}}}{v_{\text{kompos}} (50 \text{ ml})} \quad (3.4)$$

4. Menimbang massa kompos yang akan digunakan sebagai medium filter
5. Menghitung volume kompos yang akan digunakan sebagai medium filter

$$v_{\text{kompos}} = \frac{m_{\text{kompos medium filter}}}{\rho_{\text{kompos}}} \quad (3.5)$$

6. Menghitung porositas kompos dengan persamaan

$$\emptyset = \frac{v_{\text{kompos}}}{v_{\text{tabung}}} = \frac{v_{\text{kompos}}}{\pi \times \text{jari-jari}_{\text{tabung}}^2 \times \text{tinggi}_{\text{tabung}}} \quad (3.6)$$

3.5 Uji Kebocoran Alat

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. Uji kebocoran dilakukan dengan dua cara yaitu pengujian dengan menggunakan sabun dan melalui uji blangko. Prosedur uji kebocoran dengan menggunakan sabun yaitu :

- Meneteskan sabun pada daerah persambungan pipa
- Mengalirkan udara kompressor ke dalam sistem biofilter
- Mengecek ada tidaknya gelembung buih sabun, jika ada artinya terdapat kebocoran
- Merekatkan kembali sambungan antar perpipaan dan *sampling port* jika terdapat kebocoran yang ditandai dengan timbulnya buih-buih sabun
- Mengecek kembali dengan sabun jika tidak ada buih, maka alat siap digunakan

Sedangkan prosedur uji kebocoran dengan cara uji blangko yaitu sebagai berikut:

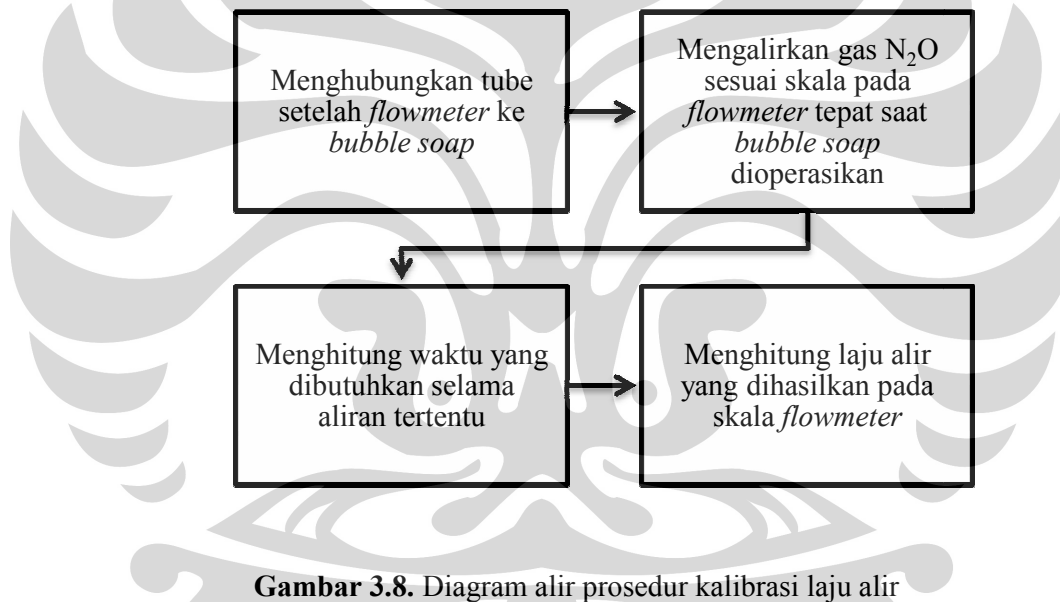
- Mengalirkan gas N_2O ke dalam kolom biofilter tanpa diisi dengan medium filter
- Mengambil sampel gas N_2O keluaran kolom biofilter
- Melakukan analisis pada kromatografi gas
- Mengeplot grafik antara luas *peak* N_2O dengan waktu yang dibutuhkan.
- Jika tidak terjadi kebocoran pada alat biofiltrasi, maka akan dihasilkan suatu grafik dimana luas area N_2O setelah melewati kolom biofilter (*sampling port* bawah) mendekati konstan setelah menit tertentu.

Uji blangko dilakukan juga untuk memastikan bahwa terjadinya penurunan luas area N_2O (setelah melewati kolom) hasil analisis GC dikarenakan adanya biofiltrasi oleh medium filter kompos. Jika sesudah selang waktu tertentu (telah melewati *empty bed residence time*), tidak terjadi tidak terjadi penurunan konsentrasi gas N_2O setelah melewati kolom biofilter, maka penurunan konsentrasi saat memakai medium filter kompos merupakan hasil dari proses biofiltrasi.

3.6 Kalibrasi Laju Alir dan Gas N₂O

Laju alir yang diset pada *flowmeter* belum tentu menghasilkan laju alir yang sama, tergantung pada jenis *flowmeter* serta jenis gas yang digunakan. Oleh karena itu, *flowmeter* yang digunakan harus dikalibrasi terlebih dahulu sebelum digunakan untuk eksperimentasi biofiltrasi. Tujuan dari proses kalibrasi ini adalah mendapatkan laju alir aktual (sesungguhnya) dari gas yang dialirkan ke dalam sistem biofilter.

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



Prosedur kalibrasi *flowmeter* secara detail adalah sebagai berikut:

1. Menghubungkan *tube* pada *flowmeter* dengan gelembung gas, *tube* bagian bawah dihubungkan ke *bubble soap* sedangkan *tube* bagian atas dihubungkan ke *flowmeter*.
2. Mengalirkan gas N₂O 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

3. Menghitung dan mencatat waktu yang dibutuhkan gelembung sabun untuk mencapai skala dari 0 sampai 10 cc, untuk berbagai kondisi laju alir yang diset pada *flowmeter*.
4. Menghitung laju alir aktual dengan persamaan berikut.

$$Q \left(\frac{\text{cc}}{\text{menit}} \right) = \frac{5 \text{ cc} \times 60 \frac{\text{s}}{\text{menit}}}{t \text{ s}} \quad (3.7)$$

Selain kalibrasi laju alir, kalibrasi udara dan gas N₂O juga dilakukan dengan tujuan mengetahui konsentrasi awal dan waktu retensi gas N₂O di mana harus diketahui berapa luas area dari gas N₂O sebelum diisi biofilter. Konsentrasi gas sampel N₂O belum dapat diketahui sehingga untuk sementara gas N₂O dianggap 100%. Cara pengukuran uji kalibrasi gas yaitu sebagai berikut :

1. Mengalirkan gas N₂O ke dalam *gas trap* yang kemudian ditutup dengan rapat.
2. Sampel diambil dari *gas trap* dengan menggunakan *syringe* kaca.
3. *Syringe* kaca kemudian diinjeksikan ke dalam *Gas Chromatography* (GC) yang akan mendeteksi keberadaan gas beserta konsentrasinya.
4. Memvariasikan volum gas (0,1; 0,3; 0,7; 1,0 ml) di dalam *syringe*
5. Membuat plot antara volum gas N₂O terhadap luas *peak* area N₂O sehingga didapat garis linear.
6. Kalibrasi gas N₂O dilakukan dengan pengambilan data sebanyak dua kali (metode replikasi) untuk memastikan keakuratan hasil kalibrasi gas N₂O.

3.7 Eksperimen Biofiltrasi

Pengujian kinerja biofilter pada penelitian ini dengan melakukan eksperimen dengan sistem aliran *batch* (sekali jalan) terhadap variasi yang akan dilakukan. Variasi yang dilakukan antara lain: faktor operasi seperti kedalaman medium filter dan penambahan fraksi air pada medium filter terhadap kinerja biofilter yaitu daya adsorpsi dan degradasi biofilter.

Pada tahapan ini, ada dua bagian besar pengujian yang akan dilakukan yakni pengujian dalam hal kemampuan mereduksi gas N₂O dan dalam hal perkembangan jumlah mikroba sebelum dan setelah biofiltrasi pada kompos.

Pengambilan data pada uji kinerja biofilter dilakukan dengan memperhatikan prinsip randomisasi dan replikasi. Adapun prosedur yang

dilakukan pada eksperimen dengan biofiltrasi gas N₂O dalam penelitian ini sebagai berikut :

3.7.1 Variasi Kedalaman Medium Filter

- a. Melakukan uji sifat dan karakter kompos sebelum digunakan sebagai medium filter biofiltrasi seperti densitas, kandungan air, porositas, pH, luas permukaan, kandungan C, N, P, K, dan S
- b. Menyiapkan medium filter yaitu kompos yang telah dipreparasi
- c. Menimbang kompos yang dibutuhkan sesuai dengan variasi kedalaman medium filter: 60 cm (1134 gram); 70 cm (1323 gram); 80 cm (1512); 100 (1890) cm. Ekperimen biofiltrasi yang dilakukan berdasarkan massa
- d. Memasukkan medium filter tersebut ke dalam kolom biofilter
- e. Menggunakan *perforated plate* untuk kedalaman medium ≥ 80 cm dengan posisi perforated plate berada pada $\frac{1}{2}$ massa medium filter yang digunakan
- f. Mengalirkan gas sampel dengan kandungan N₂O sebesar 15.000 ppm dalam udara dengan laju alir paling efektif untuk dilakukan biofiltrasi.
- g. Membaca perbedaan tekanan kolom (bagian atas dan bawah kolom) yang terukur pada manometer air sebelum dan setelah biofiltrasi
- h. Mengambil gas sampel yang telah dibiofiltrasi dengan *syringe* untuk dianalisis pada kromatografi gas.
 - a. Mengambil sampel kompos setelah dilakukan biofiltrasi untuk uji TPC (*Total Plate Count*, uji kandungan air, uji pH, uji porositas, dan analisa SEM

3.7.2 Variasi Kandungan Air Dalam Medium Filter

- a. Melakukan uji sifat dan karakter kompos sebelum digunakan sebagai medium filter biofiltrasi seperti densitas, kandungan air, porositas, pH, luas permukaan, kandungan C, N, P, K, dan S
- b. Menyiapkan medium filter yaitu kompos yang telah dipreparasi
- c. Menimbang kompos yang dibutuhkan dan menambahkan air pada kompos dengan variasi kandungan air: 30, 50, 60, dan 70 % berat kompos.
- d. Memasukkan medium filter tersebut ke dalam kolom biofilter dengan kedalaman yang menghasilkan efisiensi paling efektif.

- e. Mengalirkan gas sampel dengan kandungan N_2O sebesar 15.000 ppm dalam udara dengan laju alir paling efektif untuk dilakukan biofiltrasi.
- f. Membaca perbedaan tekanan kolom (bagian atas dan bawah kolom) yang terukur pada manometer air sebelum dan setelah biofiltrasi
- g. Mengambil gas sampel yang telah dibiofiltrasi dengan *syringe* untuk dianalisis pada kromatografi gas.
- h. Mengambil sampel kompos setelah dilakukan biofiltrasi untuk uji TPC (*Total Plate Count*, uji kandungan air, uji pH, dan analisa SEM

3.8 Data Penelitian

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

1. Konsentrasi gas N_2O sesudah dilakukan biofiltrasi.
2. Jumlah koloni mikroorganisme pada medium filter sebelum dan setelah dilakukan biofiltrasi untuk melihat pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme di dalam medium filter.
3. Data sifat dan karakteristik medium filter sebelum dan sesudah biofiltrasi selama 9 jam seperti densitas, pH, porositas, kandungan air, luas permukaan, kadar C,N,P,K, dan S
4. Hasil analisa dengan *scanning electron microscope* (SEM) pada kompos sebelum biofiltrasi

3.9 Pengukuran dan Analisis

3.9.1 Analisis Gas N_2O

Konsentrasi gas N_2O masukan dan keluaran kolom biofilter 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.

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

Data yang diambil adalah luas *peak* dari gas N₂O yang datanya akan diplot terhadap waktu. Prosedur pengoperasian kromatografi gas yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

1. Purgings GC
2. Mengalirkan gas *carrier* helium
3. Menyalakan GC
4. Memanaskan GC pada temperatur detektor :130°C dan injektor : 100°C
5. Mengatur temperatur operasi, detektor : 100°C dan injektor : 60°C
6. Mengatur arus GC ke 180 mA
7. Menyalakan *printer* kromatografi
8. Mengatur parameter operasi (attenuasi 7)
9. GC siap dipakai

3.9.2 Analisis perkembangan bakteri dengan TPC (*Total Plate Count*)

Total Plate Count dilakukan sebelum dan sesudah proses biofiltrasi untuk menguji seberapa besar aktifitas 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.

Jumlah bakteri dalam kompos sangat banyak, sehingga perlu dilakukan dilusi atau pengenceran. Rasio pengenceran yang akan digunakan pada uji

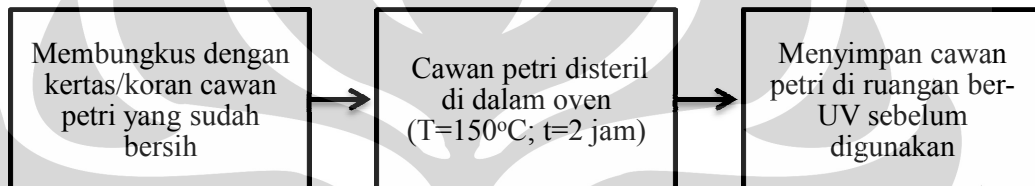
degradasi bakteri hingga $1:10^8$ agar keakuratan penghitungan jumlah koloni bakteri dapat terjaga.

Analisis TPC (*Total Plate Count*) dilakukan dengan alat dan bahan yang steril. Oleh karena itu, perlu dilakukan sterilisasi untuk segala alat dan bahan yang digunakan pada metode analisis ini.

a. Sterilisasi alat

Pada metode analisis TPC, digunakan cawan petri sebagai alat untuk medium agar untuk mengetahui jumlah bakteri yang ada. Penggunaan cawan petri harus dengan kondisi steril.

Adapun prosedur sterilisasi alat adalah :

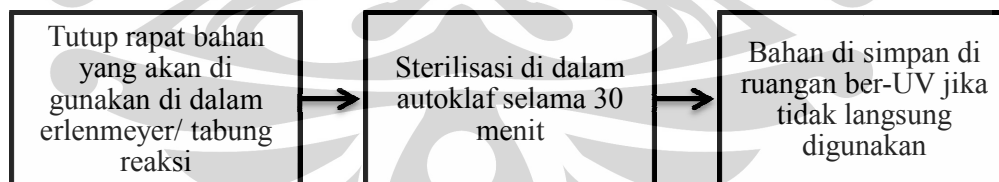


Gambar 3.9. Diagram alir prosedur sterilisasi alat

b. Sterilisasi bahan

Bahan yang digunakan selain sampel yang diuji harus dalam keadaan steril, sehingga dapat dipastikan jumlah mikroba yang terhitung dalam metode TPC berasal dari sampel yang akan diuji tanpa kontaminasi.

Berikut ini prosedur sterilisasi bahan :



Gambar 3.10. Diagram alir prosedur sterilisasi bahan

Langkah-langkah pengencerannya adalah sebagai berikut:

1. Melarutkan kompos sebanyak 9,7 gram kemudian menambahkan air aquades sebanyak 90 mL (untuk membuat rasio dilusi 1:10).
2. Mengambil 1 mL larutan dari dilusi 1:10 kemudian menambahkan aquades sebanyak 9 mL (untuk membuat rasio dilusi 1:100)

3. Mengocok larutan tersebut hingga homogen
4. Mengulangi langkah 2 dan 3 hingga diperoleh larutan dilusi kompos dengan rasio dilusi 1:10⁸
5. Menguji larutan-larutan tersebut dengan metode *Total Plate Count* hingga perhitungan jumlah bakteri

Langkah – langkah pembuatan medium agar adalah sebagai berikut:

1. Melarutkan bubuk nutrient agar sebanyak 3,72 gr kemudian menambahkan air aquades sebanyak 120 ml.
2. Didihkan larutan tersebut dengan agitasi pada *hot plate* selama hingga mendidih dan larutan homogen.
3. Diamkan larutan tersebut selama 1 menit
4. Sterilisasi dengan autoklaf sebelum digunakan selama 15 menit

Langkah-langkah metode *Total Plate Count* adalah sebagai berikut :

1. Mengambil larutan dilusi yang sesuai sebanyak 1 mL dan ditanam secara tuang (*pour plate*) pada cawan petri dengan menggunakan medium agar kering
2. Inkubasikan cawan petri tersebut pada suhu 37°C selama dua malam.
3. Menghitung jumlah koloni yang ada pada cawan petri dengan bantuan mikroskop atau kaca pembesar. Hitung jumlah bakteri per mL dengan rumus sebagai berikut :

$$\Sigma \text{bakteri } \left(\frac{\text{CFU}}{\text{g}} \right) = \frac{\text{jumlah koloni bakteri}}{\text{Volume pengenceran} \cdot \text{volume sampel pada cawan petri}} \times \frac{\text{massa sampel kompos}}{\text{volume air pada pengenceran 1:10}} \quad (3.8)$$

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan berikut ini akan menganalisa mengenai kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O , sifat dan karakteristik medium filter kompos sebelum dan setelah biofiltrasi, serta jumlah koloni mikroorganisme sebelum dan sesudah proses biofiltrasi dengan metode *Total Plate Count*. Kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O ditunjukkan oleh berkurangnya luas area N_2O pada GC karena adsorpsi oleh kompos. Dalam penelitian ini, pengamatan biofiltrasi dilakukan setiap jam selama 9 jam dengan menggunakan GC.

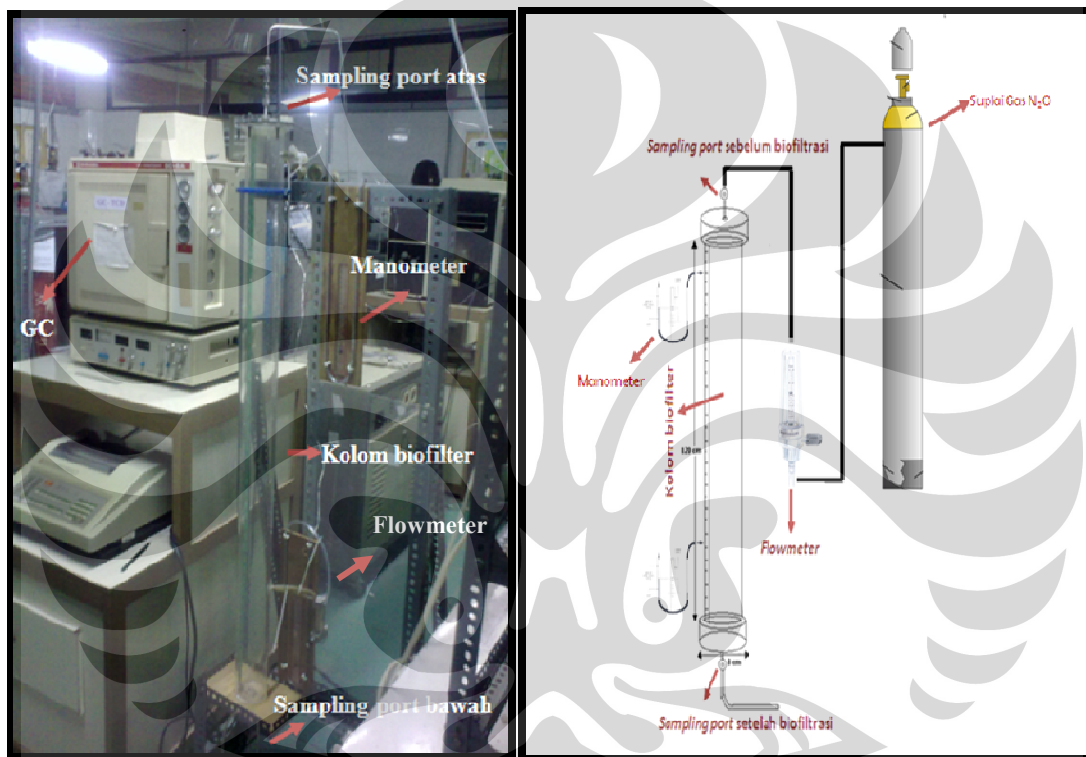
4.1 Instalasi Manometer Pada Biofilter

Penelitian Biofilter di Departemen Teknik Kimia, UI telah dilakukan sebelumnya oleh Utami et al. (2009). Sistem biofilter yang digunakan pada penelitian ini adalah sistem biofilter yang digunakan oleh Utami et al. (2009) dengan penambahan instalasi manometer pada kolom biofilter. Sistem biofilter terdiri dari tabung gas yang akan menyuplai gas N_2O , kolom biofilter sebagai tempat berlangsungnya biofiltrasi dan perpipaan yang menghubungkan keduanya serta *sampling port* untuk pengambilan sampel N_2O .

Instalasi manometer pada kolom dilakukan untuk melihat penurunan tekanan sepanjang kolom biofilter. Penurunan tekanan (*pressure drop*) merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kinerja biofilter. Penurunan tekanan berhubungan dengan adanya resistansi aliran gas yang melewati medium filter (Kinney et.al., 1996; Mohseni et.al., 1998). Resistansi aliran gas merupakan faktor yang menentukan jumlah energi yang dibutuhkan oleh *blower* pada biofilter skala besar untuk membuat aliran gas mengalir melalui medium filter (Abumaizar et.al., 1998). Oleh karena itu, pengontrolannya penting untuk dilakukan. Resistansi aliran gas terjadi karena akumulasi pertumbuhan mikroorganisme selama biofiltrasi yang menyebabkan terjadinya perubahan pada karakteristik medium seperti pengurangan pori interpartikel dan kompaksi medium filter alami.

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4.1. Sistem biofilter terbuat dari bahan *acrylic* dengan dimensi tinggi 120 cm dan

diameter dalam 7,35 cm. Material tersebut dipilih agar dapat mencegah kebocoran seefektif mungkin. Perpipaan dan persambungan pada sistem biofilter terbuat dari *stainless steel* yang memiliki sambungan yang seminimal mungkin. Penggunaan *stainless steel* sebagai material pada sistem biofilter untuk mencegah terjadinya korosi (Yang, et al, 2007). Aliran gas N_2O dalam udara dialirkan melalui bagian atas kolom biofilter (*down flow mode*). *Down flow mode* dipilih untuk meningkatkan kontrol terhadap kelembaban (Pagans et.al., 2005).



(a)



(b)

Gambar 4.1. (a) Sistem Biofilter Skala Laboratorium Pada Penelitian ini, (b) Perforated Plate

Universitas Indonesia

Dari Gambar 4.1, dapat dilihat bahwa komponen-komponen biofilter terdiri atas:

- Suplai gas N₂O dengan konsentrasi 15.000 ppm dalam udara
- *Flowmeter* dengan laju alir 0-473 cc/menit (N.T.K 94-4095)
- Kolom biofilitasi yang berbentuk tabung dengan dimensi panjang 120 cm diameter luar 8 cm, diameter dalam 7,35 cm dengan bahan dari *acrylic*
- *Sampling port* tempat mengambil sampel dengan *syringe*
- Manometer air tipe U untuk melihat penurunan tekanan sepanjang kolom

Selain komponen-komponen biofilter di atas, digunakan pula *Perforated plates* dari bahan *acrylic* yang beri lubang-lubang dengan diameter lubang 2 mm. *Perforated plates* digunakan pada kedalaman medium filter ≥ 80 cm. *Perforated plates* dipasang pada $\frac{1}{2}$ massa kompos yang digunakan sebagai medium filter. *Perforated Plates* untuk memastikan adanya redistribusi aliran gas dalam kolom, sehingga distribusi gas dalam kolom homogen (Taghipour et.al.,2007; Hong dan Park, 2004; Liu et.al.,2004).

4.2 Preparasi Medium Filter Kompos

Medium filter yang digunakan adalah medium filter kompos dengan sumber bahan organik kotoran sapi dengan kandungan *cocopeat* dan sekam sebagai *bulking agent*. Kompos telah digunakan secara luas sebagai medium biofilter dan apabila dibandingkan dengan medium filter lainnya kompos memiliki harga yang murah, dan kemudahan mendapatkannya karena banyak tersedia. Kompos merupakan medium biofilter yang relatif mudah untuk didegradasi apabila dibandingkan dengan gambut dan karbon aktif (Langenhove et.al., 1992). Selain itu kompos juga memiliki komunitas mikroba yang kompleks dan memiliki kandungan nutrisi (organik nitrogen dan mikronutrisi lainnya) yang tinggi sehingga tidak memerlukan penambahan nutrisi (Pagans et.al., 2005). Stabilitas kompos merupakan kunci dari parameter yang membuat masa penggunaan biofilter dapat tahan lama.

Kompos yang digunakan pada penelitian ini dicampur dengan *bulking agent* seperti sekam dan *cocopeat* untuk menghindari penurunan tekanan yang tinggi, hambatan dan *chanelling* serta untuk meningkatkan daya tahan (Nicolai dan Janni, 2001; Liang et.al., 2000).

Tahap preparasi medium filter dibagi menjadi dua bagian. Pertama, pembuatan medium filter (kompos). Kedua, persiapan lanjutan untuk menjadikan kompos yang sudah ada menjadi medium filter pada proses biofiltrasi dalam penelitian ini. Medium filter yang digunakan untuk proses biofiltrasi terlebih dahulu dipreparasi melalui pengeringan dan pengayakan.

Pengeringan kompos dilakukan di dalam ruang tertutup dengan suhu ruang sekitar 33 °C dan humiditas ruangan 70%. Pengeringan dilakukan selama 7 hari dengan pengadukan sebanyak satu kali pada hari keempat. Tujuan pengeringan adalah untuk mendapatkan medium filter dengan kelembaban yang sesuai untuk pertumbuhan mikroorganisme pendegradasi polutan. Pengadukan yang dilakukan agar proses pengeringan terjadi secara merata pada seluruh bagian kompos. Kelembaban yang direkomendasikan untuk medium filter organik berkisar antara 40-60% (berdasarkan berat) (Van Lith et al., 1997)

Proses pengeringan ini dilakukan dengan menggunakan tampah yang terbuat dari bambu sehingga memudahkan proses pengeringan kompos di banding dengan menggunakan wadah dengan bahan dasar plastik. Proses pengeringan diperlihatkan pada Gambar 4.2. Setelah proses pengeringan berakhir dilanjutkan dengan pengayakan kompos yang ada dengan menggunakan ayakan 100 mash (2 mm). Pengayakan ini bertujuan untuk menghasilkan partikel kompos yang homogen.



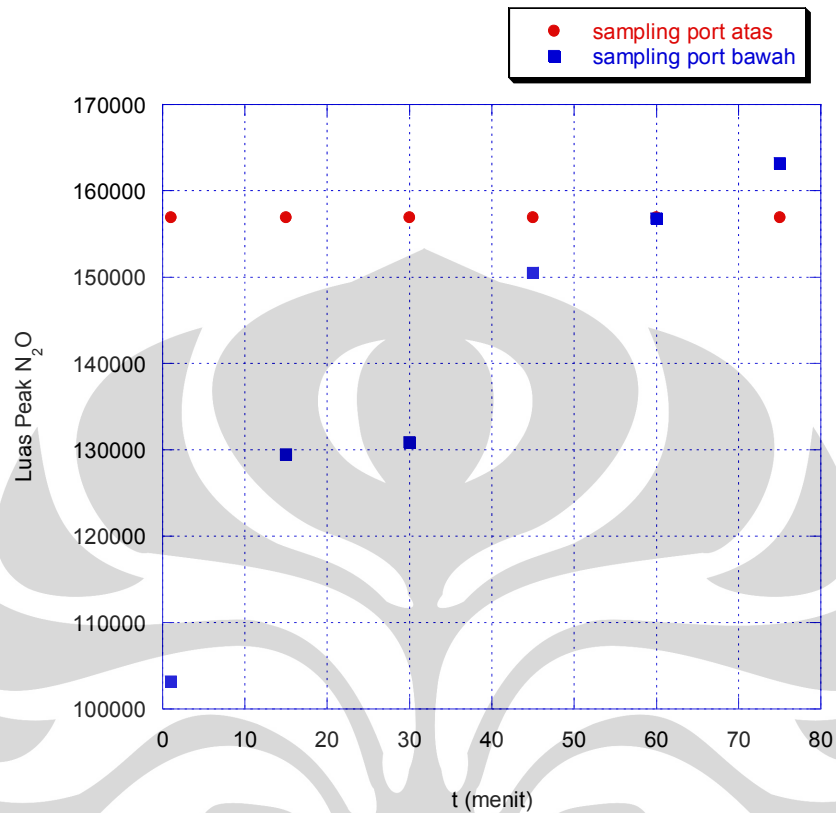
Gambar 4.2. Proses pengeringan kompos dengan kondisi $T = 33^{\circ}\text{C}$

4.3 Uji Kebocoran 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

Pengujian kebocoran alat dilakukan dengan meneteskan air sabun pada daerah kolom biofilter yang rentan terjadinya kebocoran karena sekrup dan baut serta sambungan perpipaan. Indikasi terjadinya kebocoran adalah timbulnya busa sabun yang berbuih pada bagian alat biofilter yang tidak tertutup dengan rapat saat dialiri gas N_2O . Pada penelitian biofiltrasi ini, beberapa kali terjadi kebocoran pada kolom biofilter dan pada sistem persambungan perpipaan gas N_2O . Jika terjadi kebocoran, maka pada bagian sistem biofilter yang bocor tersebut harus dilakukan perekatan kembali dengan menggunakan lem khusus

Uji kebocoran juga dilakukan dengan mengalirkan udara sampel ke dalam kolom tanpa medium filter kemudian dicek luas area pada *sampling port* atas (sebelum biofiltrasi) dan *sampling port* bawah (setelah biofiltrasi). Gambar 4.3 menunjukkan hasil uji blanko pada sistem biofilter yang digunakan.



Gambar 4.3. Uji Kebocoran dan Blangko Biofilter

Pada Gambar 4.3 di atas terlihat bahwa luas peak N₂O pada *sampling port* bawah terus meningkat dan pada menit ke 75 luas peak N₂O pada *sampling port* bawah memiliki nilai yang sama dengan luas area N₂O pada *sampling port* atas. Dari hasil tersebut dapat dijelaskan bahwa sesaat setelah penginjeksian gas N₂O ke dalam kolom biofilter ($t = 0$ menit) sampai $t = \pm 75$ menit, gas belum terdistribusi secara homogen pada *sampling port* bawah. Gas N₂O, membutuhkan waktu untuk dapat mengalir ke dalam kolom hingga menuju *sampling port* bawah dan terdistribusi secara merata didalam kolom .

Setelah homogen, maka konsentrasi gas N₂O di dalam kolom selama waktu pengamatan dapat dikatakan konstan jika dibandingkan dengan konsentrasi pada sampel yang diinjeksikan pada *sampling port atas*. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa alat biofilter tidak bocor dan siap digunakan untuk percobaan

dan terjadinya penurunan konsentrasi saat pengujian nanti bukan disebabkan oleh adanya kebocoran.

Uji blangko dilakukan sama seperti halnya uji kebocoran. Uji ini bertujuan untuk memastikan bahwa penurunan luas area di bawah *peak* saat uji kinerja biofilter disebabkan oleh biofiltrasi medium filter yaitu kompos. Sesuai dengan Gambar 4.3 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_2O pada saat melewati kolom biofilter berisi medium kompos terjadi karena adanya fenomena adsorpsi dan degradasi gas oleh medium kompos.

4.4 Kalibrasi *Flowmeter*

Laju alir yang diset pada *flowmeter* belum tentu menghasilkan laju alir yang sama, tergantung pada jenis *flowmeter* serta jenis gas yang digunakan. Oleh karena itu, *flowmeter* yang digunakan harus dikalibrasi terlebih dahulu sebelum digunakan untuk eksperimentasi biofiltrasi. Tujuan dari proses kalibrasi ini adalah mendapatkan laju alir aktual dari gas yang dialirkan ke dalam sistem biofilter. Laju alir aktual yang ingin didapatkan pada proses kalibrasi ini adalah laju alir yang digunakan pada penelitian biofiltrasi Oleh Utami et.al (2009) dengan jenis *flowmeter* sama yaitu 72 cc/menit; 88cc/menit; 105cc/menit; 127 cc/menit; 185 cc/menit; dan 233 cc/menit. Untuk kalibrasi di atas laju alir tersebut tidak dapat dilakukan karena tekanan yang terlalu besar membuat manometer tidak dapat digunakan.

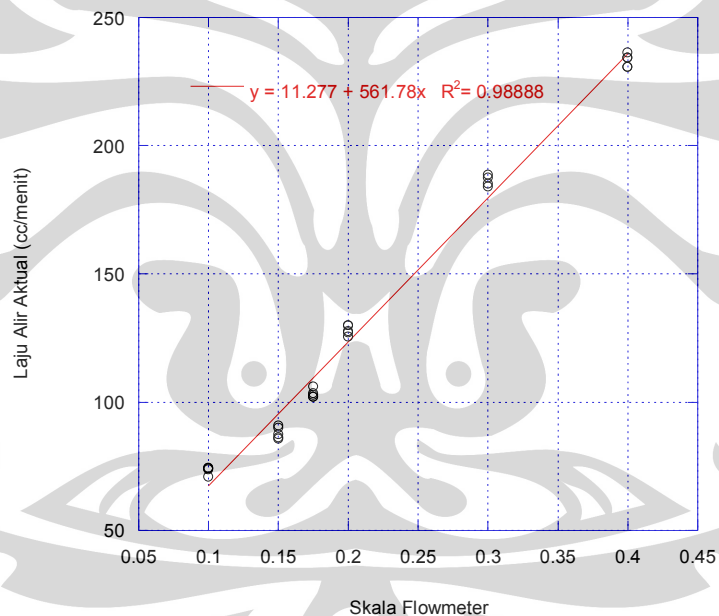
Kalibrasi dengan *flowmeter* dilakukan dengan gelembung sabun (*bubble soap*). Cara kerja alat gelembung sabun adalah dengan mengalirkan gas N_2O melalui gelembung sabun, kemudian menekan pipet sehingga cairan gelembung dapat bergerak ke atas pada suatu titik tertentu (mulai pada garis 0cc) dalam wujud cincin kecoklat-coklatan. Cara pengukurannya adalah dengan menentukan berapa lama waktu yang dibutuhkan cincin bergerak dari titik 0 hingga ke suatu titik tertentu (dalam percobaan ini 5 cc) dengan alat bantu stopwatch. Setelah mendapatkan waktu yang dibutuhkan, laju alir aktual dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$v \text{ (laju alir aktual)} = \frac{5 \text{ cc} \times 60 \frac{\text{s}}{\text{menit}}}{t} \quad (4.1)$$

Dimana: v = laju alir aktual (cc/menit)

t = waktu yang dibutuhkan (sekon)

Pengolahan data untuk kalibrasi flowmeter selengkapnya dapat dilihat di lampiran 2. Data uji kalibrasi tersebut akan diplot antara laju alir aktual dengan skala yang tertera pada *flowmeter* ke dalam bentuk grafik seperti yang terlihat pada gambar 4.4 berikut ini.



Gambar 4.4. Kalibrasi Flowmeter

Dari grafik di atas, dapat dilihat bahwa grafik uji kalibrasi *flowmeter* memiliki kecenderungan garis linear. Apabila diberi *treadline* garis linear, maka nilai korelasinya adalah $R^2 = 0,988$. Suatu grafik dapat dikatakan memiliki kecenderungan linear apabila $R^2 \geq 0,90$. Maka uji kalibrasi *flowmeter* disimpulkan dapat digunakan pada flowmeter untuk uji biofiltrasi selanjutnya.

4.5 Uji Waktu Tinggal

Waktu tinggal aktual gas N₂O berada dalam kolom biofilter kosong dapat diketahui melalui parameter EBRT (*Empty Bed Residence Time*). EBRT yang terlalu rendah berarti laju alir gas yang tinggi, penurunan tekanan yang tinggi, dan konsumsi energi yang besar. Tetapi EBRT yang terlalu tinggi membutuhkan medium filter dengan volume yang banyak dan biaya kapital yang tinggi. EBRT dihitung dengan Persamaan 2.8. EBRT dapat diartikan sebagai jumlah volum total kolom biofilter kosong dibagi dengan laju alir gas N₂O dengan panjang 120 cm dan diameter dalam 7,35 cm. Untuk laju alir gas N₂O kalibrasi terkecil (EBRT terbesar pada penelitian) yaitu

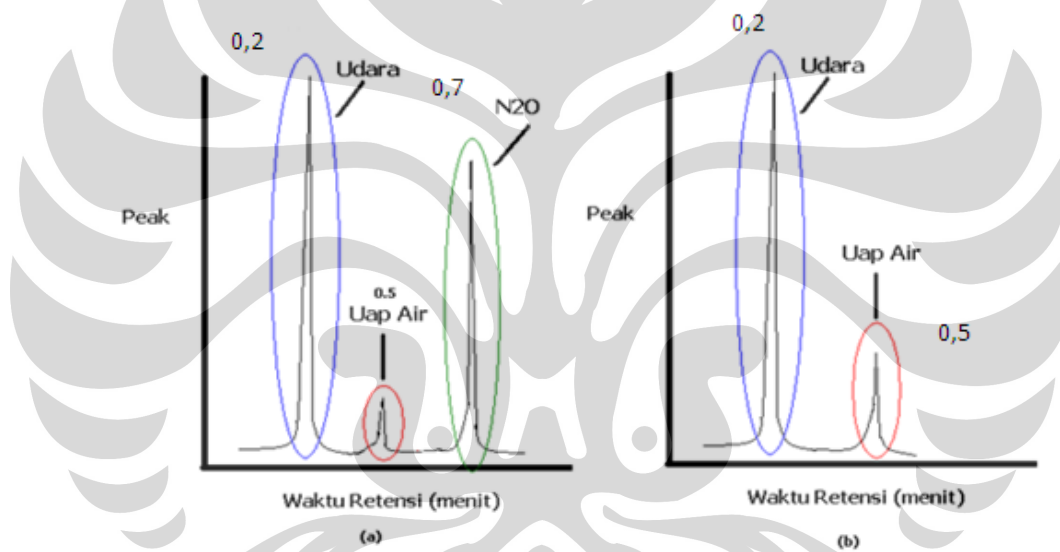
$$EBRT = \frac{\pi \times (\text{jari - jari kolom cm})^2 \times \text{tinggi kolom cm}}{Q \frac{\text{cc}}{\text{menit}}}$$

$$EBRT = \frac{3,14 \times (3,675 \text{ cm})^2 \times 120 \text{ cm}}{73,481 \frac{\text{cc}}{\text{menit}}} = 69.25 \text{ menit} = 1.15 \text{ jam}$$

Nilai EBRT juga dapat dibuktikan melalui percobaan. Percobaan yang dilakukan untuk menguji EBRT adalah percobaan yang sama seperti uji blanko yang hasilnya sudah dijelaskan pada subbab 4.3. Pada percobaan tersebut diperoleh hasil bahwa pada menit ke 75, luas peak N₂O *sampling port* bawah telah melebihi nilai luas peak N₂O *sampling port* atas. Hal tersebut diartikan bahwa pada menit ke 75, gas N₂O telah mengalir ke dalam kolom kosong hingga menuju *sampling port* bawah dan terdistribusi secara merata di dalam kolom. Hal tersebut memperkuat hasil perhitungan EBRT yang dilakukan. Uji blanko dilakukan per 15 menit. Jadi dimungkinkan bahwa pada menit ke 69 (menit yang tidak dilakukan pengamatan) luas peak N₂O *sampling port* bawah telah sama dengan nilai luas peak N₂O *sampling port* atas atau dengan kata lain pada menit 69, gas N₂O telah mengalir ke dalam kolom hingga menuju *sampling port* bawah dan terdistribusi secara merata di dalam kolom.

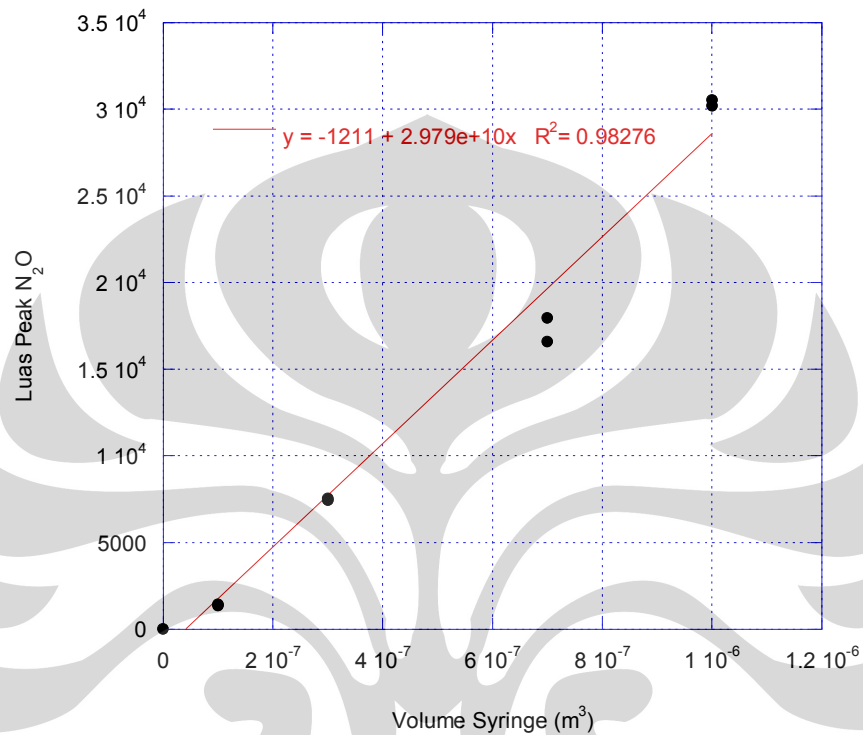
4.6 Kalibrasi Gas N₂O

Kalibrasi volum gas dilakukan dengan tujuan mengetahui volum N₂O pada setiap penurunan luas peak. Cara pengukuran uji kalibrasi gas dengan mengalirkan gas N₂O ke dalam *gas sampling* yang kemudian ditutup dengan rapat. Lalu sampel diambil dari *gas sampling* dengan menggunakan *syringe*. *Syringe* kemudian diinjeksikan ke dalam *Gas Chromatography* (GC) yang akan mendeteksi keberadaan gas beserta konsentrasinya. Hasil yang terbaca berupa *peak* dengan luas area tertentu. Contoh pembacaan hasil kromatograf pada sampel gas N₂O dengan volum 1.0 ml dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut ini.



Gambar 4.5. Sampel Grafik yang Terdeteksi pada (a) Gas N₂O (b) Udara Bebas oleh GC

Gas N₂O merupakan *peak* yang terletak setelah udara dan uap air karena sebelumnya dilakukan kalibrasi gas udara yang hanya menghasilkan dua *peak* (Gambar 4.5 b). Langkah selanjutnya adalah memvariasikan volum gas (0,1; 0,3; 0,7; 1,0 ml) di dalam *syringe* untuk membuat plot antara volum gas N₂O terhadap luas *peak* area N₂O sehingga didapat garis linear. Berikut ini adalah hasil kalibrasi gas N₂O dengan pengambilan data sebanyak dua kali (metode replikasi) untuk memastikan keakuratan hasil kalibrasi gas N₂O.



Gambar 4.6. Hasil Kalibrasi N₂O

Dari hasil kalibrasi di atas didapat persamaan linear $y = 2,979 \cdot 10^{10} x - 1211$ dimana dari persamaan tersebut dapat diketahui volum N₂O pada setiap penurunan luas peak.

4.7 Uji Karakteristik Kompos Berbasis Kotoran Sapi

Uji karakteristik kompos berbasis kotoran sapi yang dilakukan meliputi karakteristik BET untuk mengetahui luas permukaan kompos berbasis kotoran sapi dan uji komposisi elemen medium filter meliputi elemen C,N,P,K, dan S.

4.7.1 Uji Komposisi Elemen C,N,P,K, dan S Medium Filter Kompos

Jenis kompos yang digunakan pada penelitian ini adalah kompos berbasis kotoran sapi. Pada penelitian biofiltrasi oleh Utami et al. (2009). telah digunakan

kompos berbasis kotoran kambing. Tabel 4.1 menunjukkan perbedaan karakteristik antara kompos kotoran sapi yang digunakan pada penelitian ini dan kompos kotoran kambing yang digunakan pada penelitian Utami et al. (2009). berdasarkan analisis komposisi elemen C,N,P,K, dan S.

Tabel 4.1. Perbandingan Komposisi Elemen Utama Pada Medium Filter Kompos Biofiltrasi Oleh Utami et al. (2009). (2009) dan Pada Penelitian Saat ini

Parameter	Kompos Kotoran Kambing	Kompos Kotoran Sapi	Metode
	Kandungan (%w/w)	Kandungan (%w/w)	
Nitrogen (N)	1.73	1.19	SNI 02-2803-2000
P ₂ O ₅	2.57	1.7	957.02* 958.01*
K ₂ O	1.56	0.59	965.09*
Sulfur (S)	0.34	0.18	973.57*
Organic Carbon (C)	30.17	15.39	Kurmies
Rasio C/N	17.44	12.93	

Sumber : Laboratorium Sucofindo, 2009

Pada Tabel 4.1, kompos berbasis kotoran sapi memiliki nilai komposisi nutrisi utama penting bagi pertumbuhan mikroba seperti nitrogen fosfor, potasium, dan sulfur lebih rendah dibandingkan dengan kompos kotoran kambing.

Kesuksesan dari proses biodegradasi secara total ditentukan oleh aktivitas mikroba dalam medium filter. Karena itu, medium filter pada biofilter haruslah didesain untuk menyediakan lingkungan yang baik bagi pertumbuhan mikroba salah satunya adalah mampu menyediakan nutrisi untuk mikroba. 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 bioreaktor. 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

Tetapi nutrisi seperti nitrogen, fosfor, potasium (kode NPK pada label penyubur) dapat ditambahkan melalui penggabungan penyubur agrikultural ke dalam medium filter.

Universitas Indonesia

Namun kompos berbasis kotoran sapi, ternyata memiliki kandungan air yang lebih banyak daripada kompos berbasis kotoran kambing. Tabel 4.2 berikut ini, menunjukkan kandungan air pada kotoran ternak yang sumber bahan organik pembuatan kompos

Tabel 4.2. Jenis dan kandungan air pada beberapa kotoran ternak padat dan cair

Nama ternak dan bentuk kotorannya	Kandungan Air (%w/w)
Kuda –padat	75
Kuda –cair	90
Kerbau –padat	85
Kerbau –cair	92
Sapi –padat	85
Sapi –cair	92
Kambing –padat	60
Kambing –cair	85
Domba –padat	60
Domba –cair	85
Babi – padat	80
Babi –cair	87
Ayam –padat dan cair	55

Sumber : Lingga, 1991

Dilihat pada Tabel 4.2, keunggulan kotoran sapi adalah kandungan air pada kotoran sapi (85%w/w) lebih besar daripada kandungan air pada kotoran kambing (60%w/w). Salah satu faktor yang harus diperhatikan pada pemilihan medium filter adalah medium filter harus memiliki kemampuan menyimpan kelembaban untuk menopang lapisan *biofilm* (Shareefdeen Z., Singh A., 2005). Kelembaban merupakan suatu faktor kritis pada keefektifan biofilter karena mikroorganisme membutuhkan air untuk aktivitas metabolis. Kandungan kelembaban yang sedikit dapat menyebabkan keringnya medium filter yang dapat menimbulkan celah pada medium filter dan menyebabkan terjadinya *channeling*. Kelembaban yang sedikit juga berakibat pada berkurangnya kadar air bagi mikroorganisme dan menyebabkan penurunan laju biodegradasi polutan.

Tingkat kelembaban dalam biofilter biasanya dijaga melalui pra-humidifikasi aliran gas masukan atau menyediakan alat untuk langsung memberikan air ke dalam medium filter seperti dengan menggunakan penyemprot air. Melalui penggunaan kotoran sapi sebagai medium filter, maka pra-humidifikasi aliran gas menjadi tidak mutlak diperlukan, sehingga bisa mengurangi biaya operasi biofiltrasi.

Kelebihan lain dari medium filter kompos berbasis kotoran sapi adalah lebih mudah ditemukan dan banyak tersedia dibandingkan dengan kompos berbasis kotoran kambing. Tabel 4.3 menunjukkan bahwa kotoran sapi lebih banyak tersedia dibandingkan dengan kotoran kambing.

Tabel 4.3. Ketersediaan Kotoran Ternak Menurut Jenisnya Pada Tahun 2002 di Indonesia.

Jenis ternak	Kotoran ternak basah (juta ton)	Kotoran ternak kering (juta ton)
Sapi	11,815	5,908
Kerbau	2,668	1,334
Kuda	0,489	0,244
Kambing	2,381	1,190
Domba	1,398	0,699
Ayam	39,128	19,563
Total	57,877	28,938

Sumber : <http://www.pustaka-deptan.go.id/publikasi/wr276057.pdf>

4.7.2 Uji Karakteristik Luas Permukaan Medium Filter Kompos

Luas permukaan medium filter kompos juga di uji dengan menggunakan metode Brunauer, Emmett dan Teller (BET) yang dijadikan standar untuk pengukuran luas permukaan. Tabel 4.4 adalah hasil uji luas permukaan

Tabel 4.4. Hasil Uji Karakteristik Luas Permukaan Dengan BET

Parameter	Hasil
Multipoint BET	3,957 m ² /g
DR Method Micro Pore Diameter	1,800.10 ¹ Angstrom

Medium filter yang baik adalah medium yang memiliki pori-pori yang tepat dan luas permukaan besar, baik untuk absorpsi kontaminan dan pertumbuhan mikroba. Pada ukuran pori yang rendah dapat terjadi pertumbuhan biomassa pada permukaan dan menyebabkan pengurangan luas area permukaan spesifik yang tersedia untuk degradasi polutan.

4.8 Sifat Medium Kompos Sebelum dan Setelah Biofiltrasi

Tabel 4.5 menunjukkan sifat medium kompos sebelum dan sesudah biofiltrasi.

Tabel 4.5. Sifat Medium Kompos Sebelum dan Sesudah Biofiltrasi

Parameter	Kompos Awal	Setelah Variasi Kedalaman medium filter		Variasi penambahan fraksi air 50%wt	
		Sebelum Biofiltrasi	Sesudah Biofiltrasi	Sebelum Biofiltrasi	Sesudah Biofiltrasi
pH	8,1	8,1	7,1	7,95	7,78
Kandungan air	57,72%	57,72%	63,65%	41,46%	38,43%
Porositas	83,21%	80,24% (h = 60 cm)	n.a	n.a	n.a

n.a : tidak dapat dilakukan pengukuran dan perhitungan

Nilai kandungan air pada medium filter yang bertambah, disebabkan karena terjadinya penyerapan kadar air dari aliran gas N₂O (Pagans et.al.,2005).

Umumnya, mikroorganisme memiliki kisaran pH optimum untuk dapat melakukan aktivitasnya, contohnya pH 5-9 untuk bakteri, dan pH 2-7 untuk fungi. (Shareefdeen dan Singh, 2005). Aktivitas mikroba dalam suatu populasi akan menurun jika pH berada di bawah 4 atau di atas 8. Pada tabel 4.5 ditunjukkan bahwa kompos berbasis kotoran sapi yang digunakan pada biofiltrasi ini, memiliki pH awal 8,1. Nilai pH tersebut ternyata masih mendekati pH 8 yang masuk ke dalam kisaran pH yang disukai oleh mikroorganisme (Shareefdeen dan Singh, 2005). Nilai pH setelah biofiltrasi juga mengalami penurunan. Penurunan pH

tersebut dimungkinkan karena mikroorganisme dalam metabolismenya menghasilkan suatu senyawa yang dapat menyebabkan penurunan pH pada medium filter. Tetapi penurunan tersebut tidak terlalu signifikan sehingga tidak mutlak diperlukan penambahan kontrol pH atau *buffer*. Fluktuasi pH yang lebih dari 2-3 pada proses biofiltrasi dapat menyebabkan mikroba yang berada pada medium filter berkurang aktivitasnya atau bahkan mati.

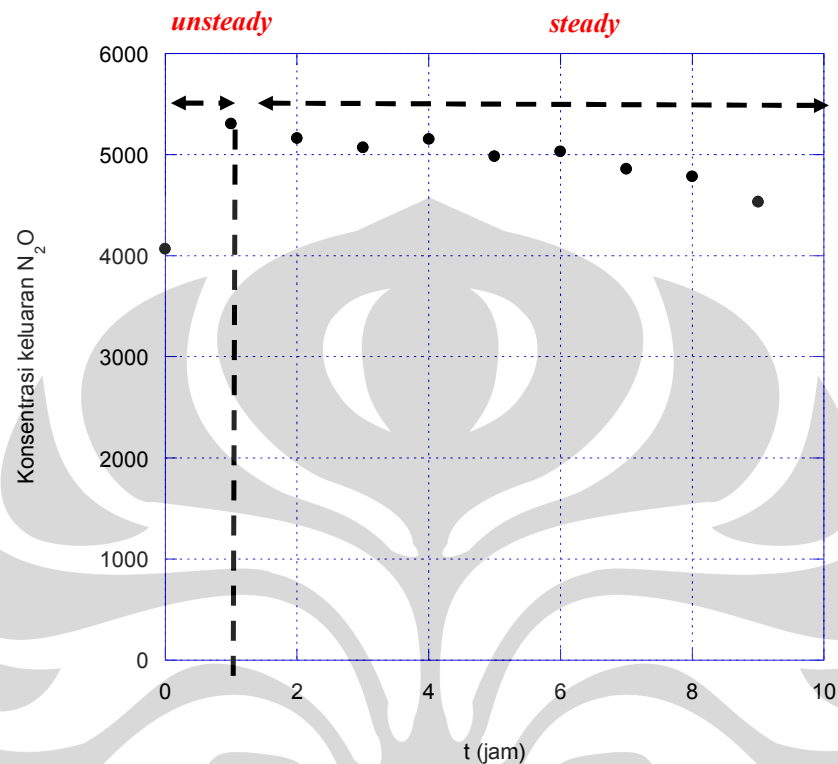
4.9 Uji Kinerja Biofilter

Uji ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh parameter operasi yaitu kedalaman medium filter dan kandungan air pada medium filter terhadap efisiensi penghilangan N_2O dan pertumbuhan mikroorganisme dalam medium filter kompos. Dari penelitian ini, dapat ditentukan kondisi optimal biofiltrasi sehingga dapat dihasilkan efisiensi penghilangan N_2O yang tinggi.

4.9.1 Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N_2O

Untuk menginvestigasi kinerja dari biofilter pada penelitian ini dalam mereduksi N_2O , dilakukan biofiltrasi dengan laju alir 73,48 cc/menit dan kedalaman medium filter kompos 50 cm (945 gram). Pada penelitian ini, digunakan kedalaman medium filter berbasis massa. Apabila digunakan basis kedalaman, maka dimungkinkan banyaknya medium filter yang berada dalam kolom biofilter tidaklah sama jika dilakukan penggantian medium filter. Medium filter merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi kinerja biofilter. Medium filter adalah tempat untuk pertumbuhan biofilm dan mikroba yang akan melakukan degradasi terhadap polutan. Oleh karena itu, semakin banyak medium filter, maka semakin banyak pula mikroba yang terdapat didalamnya.

Biofiltrasi pada penelitian ini dilakukan setiap jam selama 9 jam dengan menggunakan GC. Hasil uji kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O ditunjukkan oleh adanya penurunan luas area di bawah peak untuk setiap waktu tertentu. Penurunan luas area ini akan sebanding dengan penurunan konsentrasi. Berikut ini adalah grafik uji biofiltrasi yang dilakukan pada panjang biofilter 50 cm dan laju alir gas N_2O 73,48 cc/menit:



Gambar 4.7. Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N₂O
(h = 50 cm; Q = 73,48 cc/menit, medium kompos kering)

Dengan cara perhitungan yang dapat dilihat pada lampiran, dapat dilihat dari gambar 4.7, bahwa terjadi kenaikan dan penurunan konsentrasi keluaran dari biofilter. Konsentrasi N₂O keluaran mengalami kenaikan dimulai pada jam ke 0 hingga jam 1 dan kemudian mengalami penurunan hingga jam ke 9. Terjadinya kenaikan dan penurunan konsentrasi pada jam 0-1 disebabkan pada jam tersebut aliran gas polutan yang melewati medium filter masih belum stabil. .

Setelah jam ke 1, terjadi penurunan konsentrasi N₂O secara gradual. Hal ini dapat terjadi karena adanya daya adsorpsi kompos yang dilewati gas N₂O. 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.

Selanjutnya untuk penurunan konsentrasi N_2O pada jam-jam berikutnya relatif stabil dan turun secara perlahan. Hal ini dikarenakan sistem aliran yang sekali jalan (*batch*) dimana ketika gas N_2O pertama kali melewati kompos terjadi adsorpsi sesuai kemampuan kompos dalam mereduksi N_2O .

4.9.2 Pengaruh Kedalaman Medium Filter Kompos Terhadap Reduksi N_2O

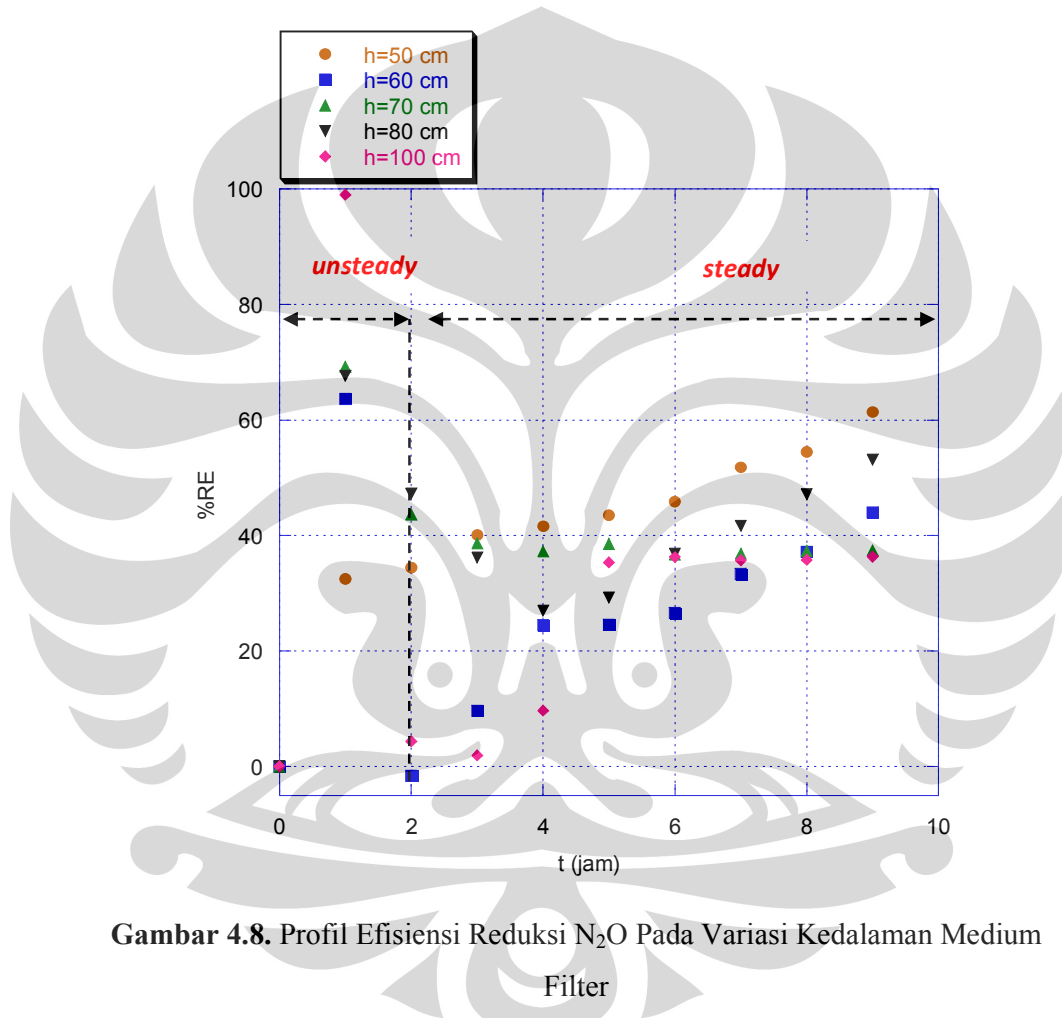
Pada penelitian biofiltrasi ini dilakukan variasi kedalaman medium filter terhadap reduksi N_2O yang bertujuan untuk mengkaji pengaruh kedalaman medium filter terhadap kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O . Pada percobaan ini, variabel bebas adalah kedalaman medium filter dengan variabel tetap waktu biofiltrasi dan laju alir gas N_2O . Pada percobaan ini, digunakan laju alir yang menghasilkan efisiensi terbaik pada biofiltrasi oleh Cynthia Noviani (2009) yaitu 88 cc/menit. Variasi kedalaman yang digunakan pada biofiltrasi ini yaitu 50 cm, 60 cm, 70 cm, 80 cm, dan 100 cm.

Kedalaman medium bervariasi mulai kurang dari 0,5 m sampai 2,5 m. Kedalaman kira-kira 1 m adalah kedalaman yang umum digunakan untuk biofilter karena mempunyai waktu tinggal yang cukup dan meminimisasi area yang dibutuhkan. (Shareefdeen et.al., 2005). Penggunaan kedalaman yang lebih tinggi untuk menghasilkan laju *loading* yang tinggi 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 penurunan tekanan yang tinggi dan terjadinya *channeling*.

Untuk mencegah adanya *channeling*, maka digunakanlah *perforated plates* dari bahan *acrylic* yang beri lubang-lubang dengan diameter lubang 2 mm.

Perforated plates digunakan jika kedalaman medium filter ≥ 80 cm. *Perforated plates* dipasang pada $\frac{1}{2}$ massa kompos yang digunakan sebagai medium filter. Dengan adanya *perforated Plates* maka terjadi redistribusi aliran gas dalam kolom, sehingga distribusi gas dalam kolom homogen.

Hasil dari uji kemampuan biofilter dalam mereduksi N_2O terhadap laju alir dapat dilihat pada Gambar 4.8 berikut.



Gambar 4.8. Profil Efisiensi Reduksi N_2O Pada Variasi Kedalaman Medium Filter

($Q=88$ cm/menit, Medium filter = Kompos kering)

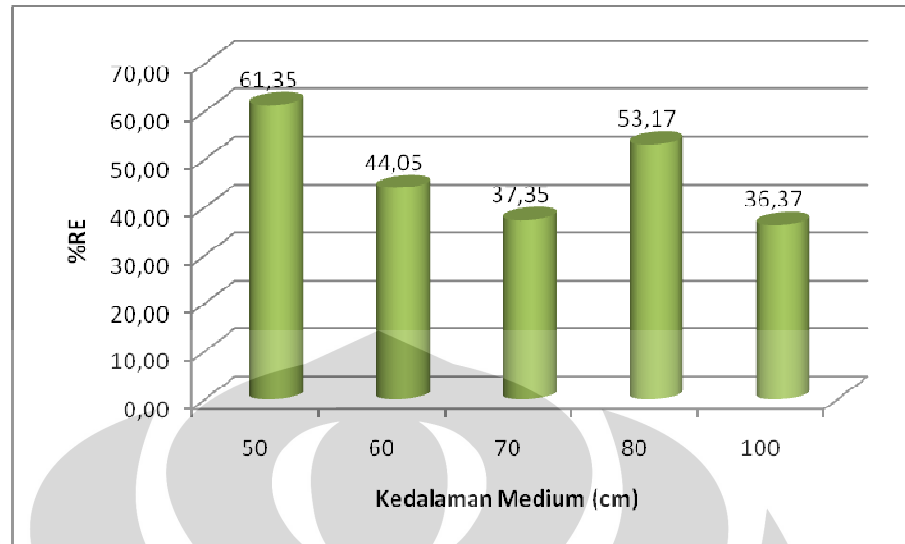
Dari Gambar 4.8 terlihat bahwa terjadi fenomena kenaikan efisiensi penghilangan N_2O pada kedalaman 60 cm, 70 cm, 80 cm, dan 100 cm pada jam 1. Kenaikan efisiensi penghilangan dikarenakan sistem aliran yang sekali jalan (*batch*). Gas N_2O ketika pertama kali melewati kompos teradsorpsi sesuai kemampuan kompos dalam mereduksi N_2O . Molekul kontaminan dapat teradsorpsi

pada permukaan medium, diambil oleh sel, lalu terabsorpsi dalam zat organik dalam biofilm atau medium, atau hanya terakumulasi pada permukaan air.

Kenaikan efisiensi penghilangan pada jam 1 diikuti oleh penurunan nilainya secara signifikan dikarenakan aliran gas polutan melewati medium masih belum stabil. Keadaan dimana aliran gas polutan yang melewati medium masih belum stabil disebut sebagai fase *unsteady*. Dari Gambar 4.9 terlihat bahwa fase *unsteady* yang terjadi pada kedalaman medium filter berbeda-beda. Fasa *unsteady* untuk kedalaman medium 50 cm terjadi selama 2 jam pertama, sedangkan fasa *unsteady* untuk kedalaman medium 60, 70, 80 cm dan 100 cm adalah 4 jam, 4 jam, 4 jam dan 5 jam. Hal tersebut mengindikasikan bahwa semakin dalam medium filter yang digunakan maka semakin lama waktu yang dibutuhkan oleh medium filter tersebut mencapai kondisi *steady* pada biofiltrasi N_2O .

Setelah fasa *unsteady* tersebut berakhir barulah terjadi kenaikan efisiensi penghilangan hingga jam 9. Fasa tersebut disebut sebagai fase *steady*. Dari Gambar 4.9 juga terlihat bahwa kedalaman 50 cm merupakan kedalaman dimana terjadi kenaikan efisiensi setelah fase *steady* yang paling stabil diantara kedalaman medium lainnya. Kestabilan yang terjadi menyebabkan kenaikan efisiensi pada kedalaman 50 cm juga berada di atas kedalaman lainnya.

Kestabilan kenaikan efisiensi penghilangan pada kedalaman medium 50 cm membuat kedalaman medium 50 cm merupakan kedalaman paling optimal pada biofiltrasi N_2O dengan medium filter berbasis kotoran sapi. Hal tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.9.

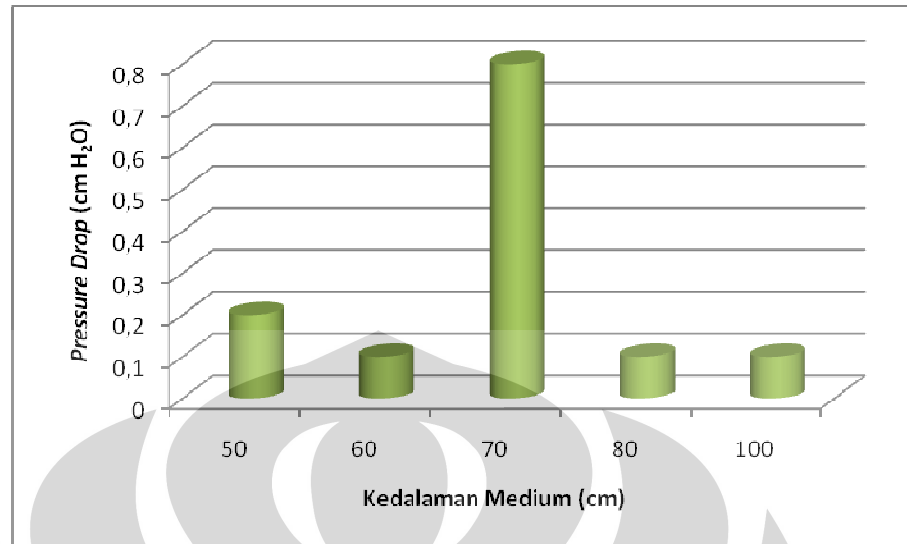


Gambar 4.9. Perbandingan Efisiensi Reduksi pada Uji Variasi Kedalaman Medium Filter Kompos

($Q = 88$ cc/menit, Medium kering, $t = 9$ jam)

Peningkatan kedalaman medium filter berpotensi membuat medium filter pada bagian paling bawah menjadi padat (kompaksi) sehingga dapat mengakibatkan timbulnya penurunan tekanan yang tinggi. Penurunan tekanan yang tinggi mengindikasikan adanya resistansi gas N_2O yang berakibat gas N_2O tidak bisa melalui media untuk didegradasi oleh mikroba.

Penggunaan *perforated plate* pada kolom biofilter untuk kedalaman ≥ 80 cm berpengaruh pada penurunan nilai *pressure drop* yang terjadi. Gambar 4.10 menunjukkan *pressure drop* yang terjadi pada variasi kedalaman medium filter.



Gambar 4.10. *Pressure Drop* Kolom Biofilter Pada Variasi Kedalaman Medium Filter

Perforated Plate digunakan memastikan adanya redistribusi aliran gas dalam kolom sehingga distribusi gas dalam kolom homogen. Pada saat kedalaman medium 70 cm dengan kolom tanpa *perforated plate*, *pressure drop* yang terjadi sangat besar hingga 0,8 cm H₂O. Namun pada kedalaman 80 cm dan 100 cm dengan *perforated plate*, nilai *pressure drop* kembali turun ke angka 0,1 cm H₂O.

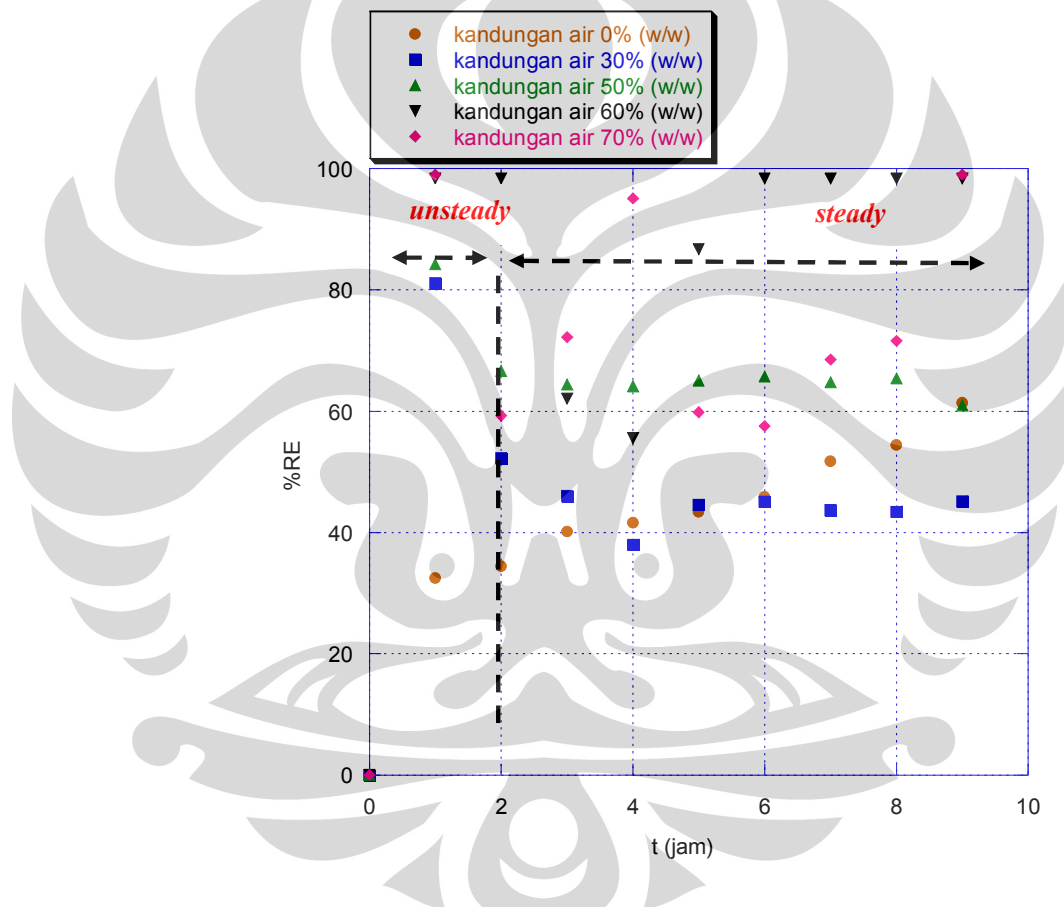
4.9.3 Pengaruh Kandungan Air Medium Terhadap Reduksi N₂O

Percobaan variasi fraksi air pada medium filter terhadap reduksi N₂O bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh kandungan air dalam kompos terhadap kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O. Pada percobaan ini kandungan air divariasikan terhadap persen berat kompos. Penambahan kandungan air ini bertujuan untuk meningkatkan kelembaban medium filter.

Kelembaban merupakan suatu faktor kritis pada keefektifan biofilter karena mikroorganisme membutuhkan air untuk aktivitas metabolis. Kelembaban yang direkomendasikan untuk medium filter organik berkisar antara 40-60% (berdasarkan berat) (Van Lith et al., 1997). Oleh karena itu, variasi kandungan air yang digunakan pada penelitian ini adalah 30%, 50%, 60%, dan 70% (w/w) berat

kompos. Adapun kedalaman medium filter yang digunakan adalah 50 cm (tinggi medium filter dengan efisiensi penghilangan terbaik) dengan laju alir 88 cc/menit. Penggunaan laju alir 88 cc/menit disebabkan karena laju alir tersebut menghasilkan efisiensi penghilangan terbaik pada penelitian biofiltrasi oleh Cynthia Noviani (2009).

Hasil dari uji kemampuan biofilter dalam mereduksi N_2O terhadap variasi kandungan air di dalam medium filter dapat dilihat pada Gambar 4.11 berikut.



Gambar 4.11. Profil Efisiensi Reduksi N_2O Pada Variasi Kandungan Air dalam Kompos

($Q = 88$ cm/menit, $h = 50$ cm, medium filter = kompos basah)

Pada kelembaban yang tinggi, yaitu 60% dan 70%, terjadi ketidakstabilan konsentrasi N_2O keluaran hasil biofiltrasi (*unsteady* hingga jam ke 9). RE yang

pada kelembaban 60% dan 70% yang tinggi (bahkan mencapai 100%) disebabkan karena gas N₂O tidak terdeteksi pada kromatografi gas hingga jam 9. Hal tersebut terjadi karena penambahan fraksi air sebanyak 60% dan 70% berat kompos membuat medium filter terlalu banyak air atau kelembaban yang tinggi. Hal tersebut akan menghalangi transfer oksigen dan polutan hidrofobik ke dalam *biofilm*, munculnya zona anaerobik dalam medium filter, menghambat laju reaksi, adanya tekanan balik karena pengurangan volume ruang kosong. Selain itu juga disebabkan kompos lembab, bahkan terjadi kompaksi medium filter sehingga waktu tinggal N₂O di kompos menjadi lebih lama. Kompaksi yang terjadi ditunjukkan oleh data kedalaman medium filter (massa medium filter kompos kering adalah 945 gram) yang semakin berkurang ketika fraksi air bertambah.

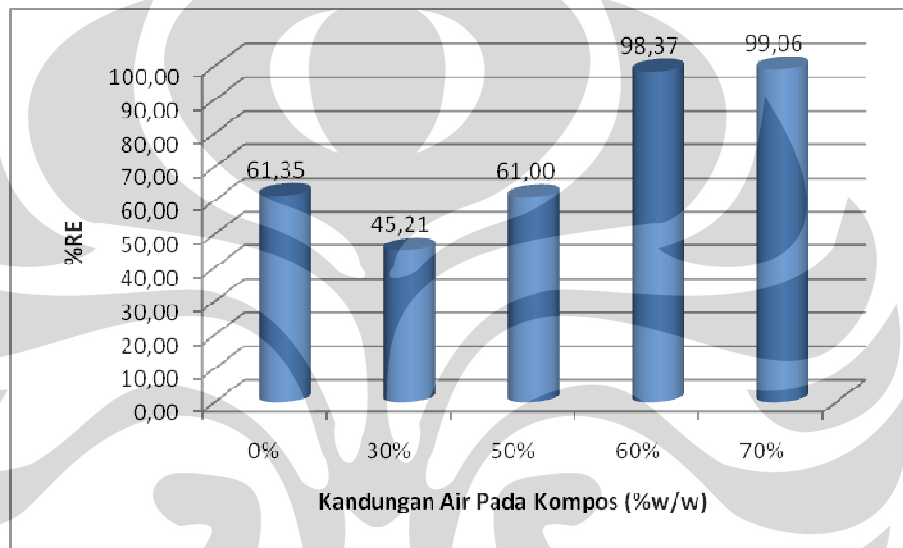
Tabel 4.6. Kedalaman Medium Filter Kompos Dalam Kolom Pada Penambahan Fraksi Air

Kandungan Air medium	Kedalaman medium dalam kolom (cm)
0%	49.7
30%	57
50%	54
60%	50
70%	47

Medium filter yang digunakan pada penelitian ini adalah medium filter berbasis kotoran sapi. Tabel 4.2 menunjukkan bahwa kotoran sapi memiliki kandungan air sebanyak 85%, sedangkan kotoran kambing 60%. Hal ini menunjukkan bahwa kandungan air pada kotoran sapi sudah tinggi dan penambahan fraksi air sebanyak 60% dan 70% berat kompos akan membuat medium kompos terlalu banyak air. Hal tersebut diperkuat dengan keluarnya air dari *sampling port* bawah selama proses biofiltrasi terjadi.

Pada penambahan fraksi air sebanyak 60% berat, air keluar di *sampling port* bawah pada jam 1. Sedangkan pada penambahan fraksi air sebanyak 70% berat air terjadi pada jam ke 0. Peristiwa keluarnya air pada *sampling port* bawah juga terjadi pada penambahan fraksi air 50% berat kompos yang terjadi pada jam ke 5

Pada Gambar 4.11 ditunjukkan profil efisiensi penghilangan pada variasi kandungan air yang ditambahkan ke dalam medium filter. Dari Gambar tersebut, kecenderungan yang terjadi adalah kenaikan efisiensi penghilangan pada jam 1 yang diikuti penurunan lalu dilanjutkan kenaikan efisiensi pada proses biofiltrasi. Kenaikan efisiensi penghilangan dikarenakan sistem aliran yang sekali jalan (*batch*) yang menyebabkan gas N_2O ketika pertama kali melewati kompos terjadi adsorpsi sesuai kemampuan kompos dalam mereduksi N_2O .



Gambar 4.12. Efisiensi Reduksi Pada Uji Variasi Kandungan Air Pada Kompos
($h = 50$ cm, $Q = 88$ cc/menit, $t = 9$ jam)

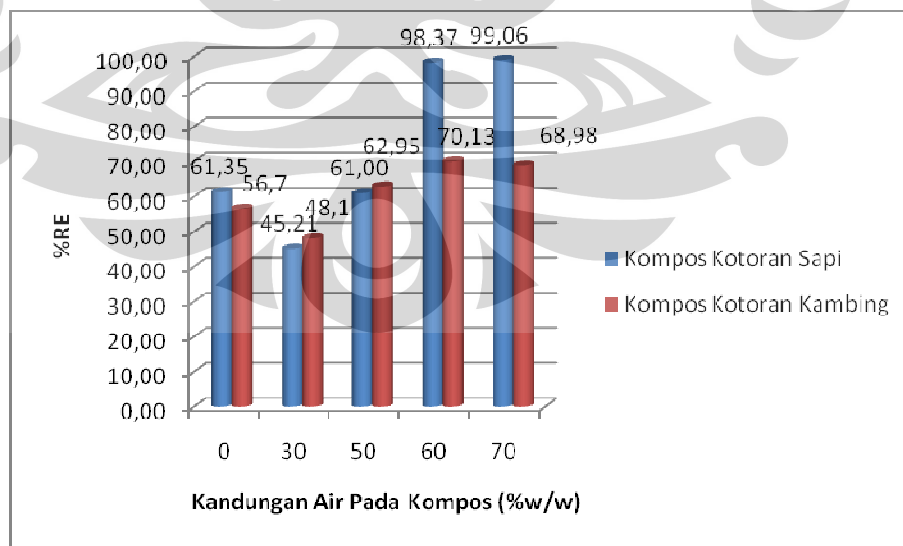
Dari Gambar 4.12 terlihat bahwa melalui penambahan fraksi air cenderung akan meningkatkan efisiensi penghilangan N_2O , namun jika penambahan air yang dilakukan terlalu banyak, maka efisiensi biofiltrasi akan berkurang. Biofiltrasi beroperasi paling efisien pada kandungan kelembaban antara 50-70% dan suhu antara 15 dan 35°C (Janni dan Nicolai, 2000). Kelembaban yang direkomendasikan untuk medium filter organik berkisar antara 40-60% (berdasarkan berat) (Van Lith et al., 1997).

Dari Gambar 4.12 dapat dilihat bahwa efisiensi tertinggi terdapat pada 60%wt, namun karena pada penambahan fraksi air 60%wt masih terjadi *unsteady*

state karena kompaksi yang terlalu besar hingga jam ke 9, maka efisiensi yang terbaik adalah 50%wt kompos.

Penambahan fraksi air optimal untuk proses biofiltrasi pada penelitian ini, ternyata memiliki nilai yang lebih rendah dari penelitian biofiltrasi oleh Utami et.al (2009). Pada penelitian biofiltrasi oleh Utami et.al (2009) efisiensi reduksi N_2O paling efektif adalah 60% (w/w) dari berat kompos. Hasil yang lebih rendah pada penelitian ini disebabkan karena medium filter kompos yang digunakan mempunyai perbedaan pada sumber bahan organik utama. Utami et.al (2009) menggunakan kompos dengan sumber bahan organik kotoran kambing. Pada penelitian ini, digunakan kompos dengan sumber bahan organik kotoran sapi yang memiliki kandungan air lebih banyak daripada kompos dengan sumber bahan organik kotoran kambing seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2. Oleh karena itu, penambahan fraksi air yang menghasilkan efisiensi yang terbaik pada penelitian ini memiliki nilai yang lebih kecil daripada penelitian Utami et.al (2009). Namun nilai tersebut ternyata berada ke dalam kisaran kelembaban yang direkomendasikan untuk medium filter organik berkisar antara 40-60% (berdasarkan berat) (Van Lith et al., 1997).

Gambar 4.13 menunjukkan efisiensi penghilangan biofilter menggunakan medium filter kompos berbasis kotoran sapi dan medium filter berbasis kotoran kambing (Utami et.al, 2009) pada variasi kandungan air.



Gambar 4.13. Perbandingan Efisiensi Reduksi Pada Uji Variasi Kandungan Air Pada Kompos Berbasis Kotoran Sapi dan Kotoran Kambing

(h = 50 cm, Q= 88 cc/menit, t = 9 jam)

Dari nilai efisiensi penghilangan N₂O yang dihasilkan pada kandungan air optimal (kompos berbasis kotoran sapi : (50 %wt, 61%RE); kompos berbasis kotoran kambing: (60 %wt, 70,13%), maka dapat dikatakan bahwa efisiensi penghilangan N₂O menggunakan medium filter kompos berbasis kotoran kambing lebih baik daripada kompos berbasis kotoran sapi. Hal tersebut disebabkan karena kandungan air pada kompos berbasis kotoran sapi (85%) jauh lebih banyak daripada kompos berbasis kotoran kambing (60%). Adanya penambahan air kembali pada kompos kotoran sapi membuat kandungan air yang pada kompos terlalu banyak, yang membuat efisiensi biofiltrasi akan berkurang. Biofiltrasi beroperasi paling efisien pada kandungan kelembaban antara 50-70% dan suhu antara 15 dan 35°C (Janni dan Nicolai, 2000). Kelembaban yang direkomendasikan untuk medium filter organik berkisar antara 40-60% (berdasarkan berat) (Van Lith et al., 1997).

Karena adanya tekanan akibat kompaksi yang terlalu besar, membuat manometer air pada kolom menjadi tidak bisa digunakan. Nilai pressure drop yang berhasil terukur hanyalah pressure drop untuk penambahan fraksi air sebanyak 30%wt yaitu sebesar 0,3 cm H₂O.

4.9.4 Hasil Uji Perkembangan Mikroba pada Kompos

Total Plate Count dilakukan sebelum dan sesudah proses biofiltrasi untuk menguji seberapa besar aktifitas degradasi yang terjadi 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.

TPC adalah salah satu teknik perhitungan mikroba dengan menggunakan Nutrien Agar (NA) sebagai medium bakteri yang akan dihitung. Hasil dari perhitungan TPC akan direpresentasikan dalam satuan *Colony Forming Units* (CFU) per gram kompos yang diuji.

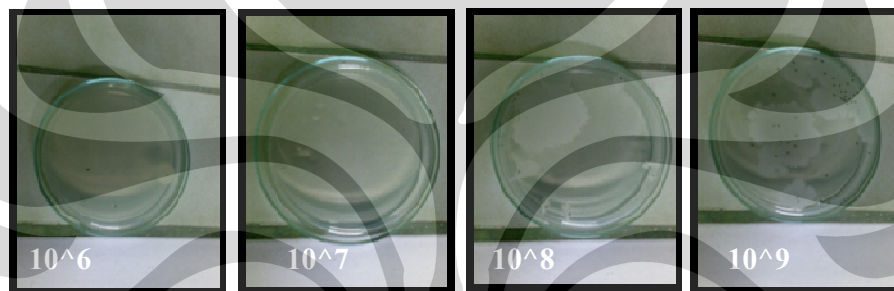
Terdapat beberapa langkah untuk melakukan pengujian TPC:

1. Sterilisasi alat dan bahan yang akan digunakan. Sterilisasi dilakukan sebagai proses menghancurkan semua jenis kehidupan sehingga menjadi steril dan tidak ada faktor X yang mengganggu hasil TPC nanti. Ada dua metode sterilisasi yang digunakan pada uji TPC yaitu panas lembab dengan uap jenuh bertekanan dan panas kering. Sterilisasi dengan cara yang pertama 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 dikarenakan cara ini menyediakan suhu jauh di atas titik didih, daya tembus kuat dan kelembaban sangat tinggi sehingga mempermudah koagulasi protein sel-sel mikroba yang menyebabkan sel hancur. Sedangkan metode pemanasan dengan metode panas kering suhu efektifnya 150°C selama 2 jam. Alat yang digunakan adalah oven. Metode ini digunakan untuk mensterilisasi alat laboratorium.
2. Pembuatan Nutrien Agar (NA) sebagai medium mikroba. Pembuatan medium ini sebagaimana telah dijelaskan pada Bab 3 dimana selalu dilakukan sterilisasi sebelum digunakan.
3. Kegiatan perpindahan bahan/sampel 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 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. Pada langkah ini sampel yang akan diuji dipindahkan ke medium agar yang sudah dibuat. Keempat, inkubasi sampel TPC dengan suhu $34\text{-}35^{\circ}\text{C}$ selama 2 hari. Ini bertujuan untuk menunggu pertumbuhan koloni mikroba pada medium agar sebelum dilakukan perhitungan. Kelima, adalah sterilisasi sampel yang telah dihitung menggunakan autoklaf untuk membunuh mikroba yang terdapat pada sampel.

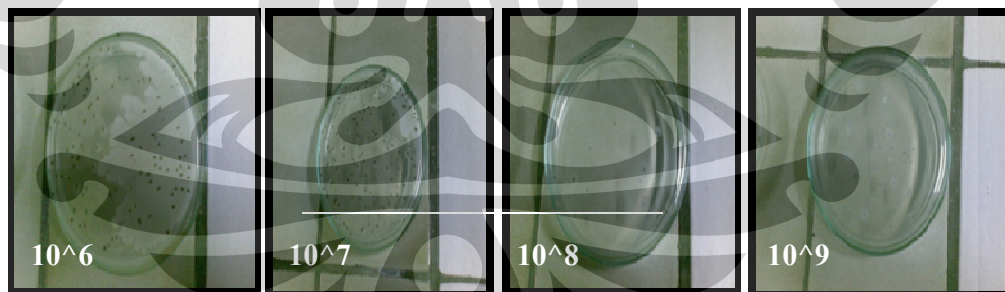
Berikut ini adalah Gambar hasil uji TPC yang dilakukan pada setiap variasi dalam penelitian ini.



Gambar 4.14. Medium Agar Sebelum Digunakan Uji TPC



Gambar 4.15. Hasil Uji TPC pada Kompos Sebelum Biofiltrasi



Gambar 4.16 Hasil Uji TPC pada Kompos Kering Setelah Biofiltrasi Variasi Kedalaman Medium Filter

Gambar-gambar diatas adalah hasil uji TPC yang dilakukan dengan empat kali pengenceran sampel kompos (10^6 , 10^7 , 10^8 , 10^9) yang diuji dengan metode replikasi dan didapat jumlah rata-rata koloni bakteri dari pengujian ini.

Universitas Indonesia

Pengenceran dilakukan untuk membuat koloni yang dihasilkan sedikit sehingga penghitungan koloni bakteri yang dilakukan secara manual akan lebih mudah. Kompos merupakan medium filter yang komunitas mikroba yang kompleks seperti bakteri, aktinomicetes, dan kapang. Pengenceran dilakukan karena *Total Plate Count* (TPC) mempunyai keterbatasan, yakni koloni yang dihasilkan tidak lebih dari 30-300 koloni

Pada hasil uji TPC ini dapat dilihat perbedaan jumlah bakteri sebelum dan sesudah dilakukan biofiltrasi secara visual dan perhitungan bahwa jumlah koloni setelah biofiltrasi lebih banyak dari sebelum dilakukan biofiltrasi. Peningkatan jumlah mikroba juga dibuktikan berdasarkan Tabel 4.7 jumlah mikroba hasil perhitungan dari uji TPC dengan cara perhitungan yang dijelaskan pada Lampiran.

Tabel 4.7. Hasil Uji TPC Sebelum Dan Setelah Biofiltrasi

Sampel Uji TPC	Σ Bakteri Setelah Biofiltrasi (CFU/g)
Kompos Sebelum Biofiltrasi	$1,35 \cdot 10^{11}$
Kompos Setelah Biofiltrasi Kedalaman Medium Filter	$1,45 \cdot 10^{11}$

Berdasarkan Tabel 4.7 dapat diketahui bahwa setelah biofiltrasi dilakukan, jumlah mikroba yang dihitung dengan metode TPC meningkat. Hal tersebut dapat dilihat dari peningkatan hasil perhitungan uji TPC dari $1,35 \cdot 10^{11}$ CFU/g menjadi $1,45 \cdot 10^{11}$ CFU/g. Peningkatan jumlah mikroorganisme tersebut menunjukkan bahwa mikroba dapat bertahan hidup dan memperbanyak diri selama proses biofiltrasi berlangsung. Untuk bisa bertahan hidup, mikroba memerlukan makanan dengan nutrisi seimbang dan medium filter alami seperti kompos mampu menyediakan nutrisi untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme. Sedangkan karbon dan energi yang dibutuhkan oleh mikroorganisme dapat berasal dari gas kontaminan N_2O . Kontaminan ditransfer dari aliran udara ke dalam *biofilm* yang tumbuh pada medium filter dan akan terdegradasi oleh mikroorganisme.

Oleh karena itu, adanya perkembangan dan pertumbuhan mikroorganisme pada medium filter selama proses biofiltrasi dimungkinkan karena terjadinya

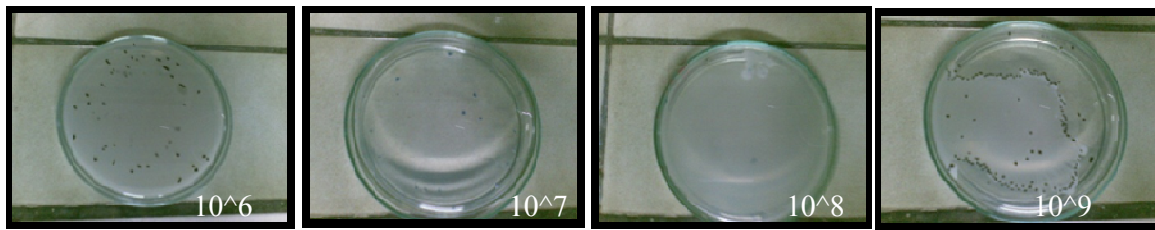
degradasi kontaminan oleh mikroorganisme untuk bisa mendapatkan karbon dan energi yang diperlukan untuk bertahan hidup dan memperbanyak diri.

Peningkatan jumlah mikroorganisme pada medium filter kompos setelah biofiltrasi juga terjadi pada penambahan fraksi air optimal sebanyak 50% berat kompos yang digunakan. Tabel 4.8 berikut ini menunjukkan peningkatan mikroorganisme.

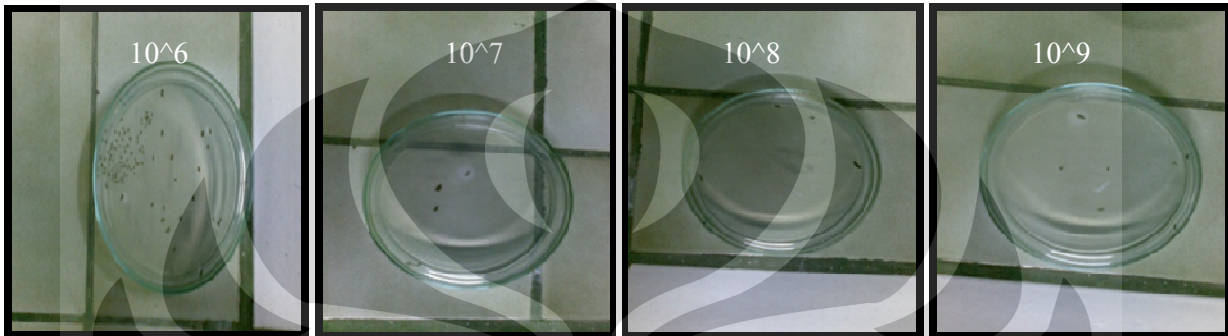
Tabel 4.8. Hasil Uji TPC pada Variasi Kandungan Air (Q = 88 cc/menit, h= 50 cm)

Sampel Uji TPC	Σ Bakteri Sebelum Biofiltrasi (CFU/g)	$\Delta\Sigma$ bakteri Setelah Biofiltrasi (CFU/g)
Kompos Sebelum Biofiltrasi	$1,35.10^{11}$	-
50 % (%w/w) Kandungan Air dalam Kompos	$1,35.10^{11}$	$3,65.10^{11}$
60 % (%w/w) Kandungan Air dalam Kompos	$1,35.10^{11}$	$1,44.10^{10}$

Peningkatan jumlah mikroorganisme juga dapat dilihat secara visual pada Gambar 4.17 berikut ini:



(a)



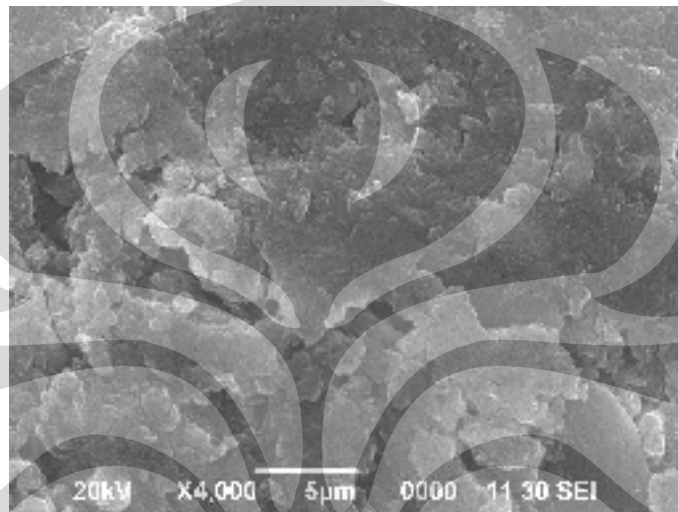
(b)

Gambar 4.17. (a) Hasil Uji TPC pada Kompos dengan penambahan air 50% (w/w) ($Q = 88$ cc/menit; $h = 50$ cm)

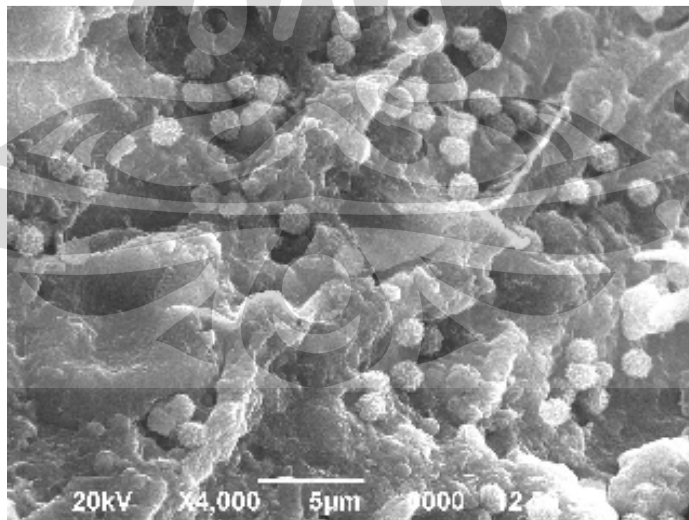
(b). Hasil Uji TPC pada Kompos dengan penambahan air 60% (w/w) ($Q = 88$ cc/menit; $h = 50$ cm)

Berdasarkan Tabel 4.8 dapat diketahui bahwa jumlah mikroorganisme setelah biofiltrasi pada variasi kandungan air mengalami peningkatan. Dari jumlah mikroorganisme awal. Peningkatan jumlah mikroorganisme pada kandungan air 50% berat kompos ternyata lebih besar daripada kandungan air 60% berat kompos. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, proses biofiltrasi terjadi karena adanya adsorpsi dan degradasi. Degradasi kontaminan terjadi karena mikroorganisme ingin mendapatkan karbon dan energi dari proses atau hasil degradasi untuk bertahan hidup dan memperbanyak diri. Mikroorganisme yang lebih banyak pada kandungan air 50%wt dibandingkan pada kandungan air 60%wt memungkinkan proses degradasi berlangsung lebih cepat dan lebih banyak daripada 60%wt sehingga pada penambahan air 50% berat kompos mempunyai efisiensi penghilangan kontaminan N_2O yang optimal.

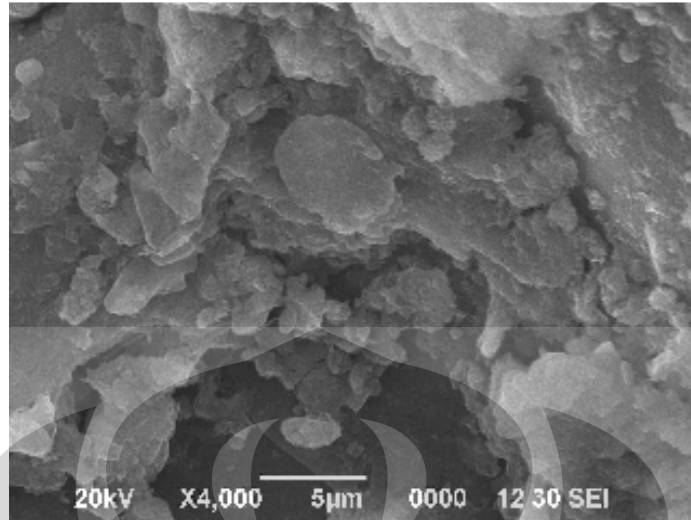
Peningkatan jumlah mikroba setelah biofiltrasi juga diperkuat dari hasil uji kompos menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dengan perbesaran 4000x untuk melihat morfologi kompos. SEM yang digunakan yaitu tipe JEOL jsm-6390 A dengan acc volt 20 kV, wd 12mm, spolsize 30, dan signal SEI. Sebelum dilakukan SEM, sampel terlebih dahulu dilapisi (*coating*) dengan menggunakan platina selama 30 detik pada arus 30 mA. Gambar 4.18 sampai 4.20 menunjukkan hasil SEM pada kompos sebelum dan sesudah biofiltrasi.



Gambar 4.18. Hasil Uji SEM pada Kompos Sebelum Biofiltrasi



Gambar 4.19. Hasil Uji SEM pada Kompos Setelah Biofiltrasi Variasi Kedalaman Medium



Gambar 4.20. Hasil Uji SEM pada Kompos Setelah Biofiltrasi Variasi Kandungan Air Pada Medium Filter

BAB 5

KESIMPULAN

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

- Pencapaian efisiensi reduksi optimum pada variasi kedalaman medium filter diperoleh pada kedalaman medium 50 cm sebesar 61,35%.
- Penambahan kandungan air 50% dari berat kompos merupakan penambahan kandungan air optimum dalam mereduksi N_2O dengan efisiensi reduksi sebesar 61 %.
- Proses biofiltrasi N_2O , kandungan air pada medium filter yang bertambah, disebabkan karena terjadinya penyerapan kadar air dari aliran gas N_2O dan penurunan pH yang disebabkan karena terjadinya asidifikasi.
- Komposisi elemen utama C, N, P, K, S pada kompos berbasis kotoran sapi lebih kecil daripada kompos berbasis kotoran kambing.
- Jumlah mikroorganisme dalam kompos berbasis kotoran sapi mengalami peningkatan setelah digunakan sebagai medium filter pada biofiltrasi baik pada variasi kedalaman maupun kandungan air.
- Kinerja biofilter pada penelitian ini dalam mereduksi N_2O mencapai efisiensi reduksi sebesar 61 % dengan ketinggian medium 50 cm, laju alir N_2O 88 cc/menit, dan kandungan air 50% berat kompos.

DAFTAR REFERENSI

- Allen PJ, vantil TS. (1996). *Installation of a full-scale biofilter for odor reduction at a hardboard mill*. In: Proc Conf Biofiltration: an Air Pollution Control Technology, 1996. USC, LA, pp 31–38
- Aizpuru, A., Malhautier, L., Roux, J.C., & Fanlo, J.L. (2003). Biofiltration of a mixture of volatile organic compounds on grabular activated carbon. *Biotechnol. Bioeng*, 83, 479-488.
- Anonim. Kompos. (4 April 2009). <http://id.wikipedia.org/wiki/kompos>
- Anonim. Nitrous Oxide. (28 Maret 2009). http://en.wikipedia.org/wiki/Nitrous_oxide.html
- Anonim. Global Warming. (28 Maret 2009). http://en.wikipedia.org/wiki/Global_warming
- Anonim. Greenhouse gas. (28 Maret 2009). http://en.wikipedia.org/wiki/Greenhouse_gas
- Arnold, M., Reittu, A., Von Wright, A., Martikainen P.J., & Suihko, M.L. (1997). Bacterial degradation of styrene in waste gases using a peat filter. *Appl Microbiol Biotechnol*, 48, 738–44.
- Auria, R., Morales, M., Acuna, M.E., Perez, F., & Revah S. (1996). Biofiltration of toluene vapors: start up and gaseous ammonia addition. In: Proc Conf Biofiltration: an Air Pollution Control Technology, 1996. USC, LA, 134–141.
- Barnes, J.M., Apel, W.A., & Barrett, K.B. (1995). Removal of nitrogen oxides from gas streams using biofiltration. *J. Hazard. Mater*, 41, 315–326.
- Baquerizo, G., Maestre, J.P., Sakuma, T., Deshusses, M.A., Gamisans, X., Gabriel, D., & Lafuente, J. A detailed model of a biofilter for ammonia removal: model parameters analysis and model validation, in: J.S. Devinny (Ed.), Proceedings of the 2004 Conference on Biofiltration for Air Pollution Control, Redondo Beach, 19–22October, 2004.
- Bina, B., Dehghanzadeh, R., Pourmoghadas, H. Kalantary, A., & Torkian, A. (2004). *Journal of research in medical science*, 6, 280-288.

- Bohn, H.L. (1992). Considering biofiltration for decontaminating gases. *Chem Eng Prog*, 88, 34–40.
- Buijsman, E., Maas, H.F.M., & Asman, W.A.H. (1987). Anthropogenic NH₃ emissions in Europe. *Atm. Environ*, 21, 1009–1022.
- Burgess, J.E., Parsons, S.A., & Stuetz, R.M. (2001). Developments in odour control and waste gas treatment biotechnology: a review. *Biotechnol. Adv*, 19, 35–63.
- Busca, G., Pistarino, C., (2003). Abatement of ammonia and amines from waste gases: a summary. *J. Loss Prevent. Proc*, 16, 157–163.
- Carlson, D.A., & Leiser, C.P. (1981). Soil beds for control of sewage odors. *J. Water Pollut. Control Fed*, 80, 574–580.
- Chagnot, E., Taha, S., Martin, G., & Vicard, J.F. (1998). Treatment of nitrogen oxides on a percolating biofilter after pre-concentration on activated carbon. *Proc. Biochem*, 33, 617–624.
- Chan, W.C., Zheng, R.X., 2005. A new synthetic biofiltration material: poly(vinyl alcohol)/pig manure compost composite beads. *J. Chem. Technol. Biotechnol*, 80, 574–580.
- Chen, L., J.Hoff Steven, A Koziel Jacek, Cai Lingshuang, Zelle Brian, & Sun Gang. (2008). Performance evaluation of wood-chip based biofilter using solid-phase microextraction and gas chromatography-mass spectroscopy-olfactometry. *Biosource technology*, 99, 7767–7780.
- Chen, Y.X., Yin, J., Wang, K.X., Fang, S. (2004). Effects of periods of nonuse and fluctuating ammonia concentration on biofilter performance. *J. Environ. Sci. Health A: Toxic. Hazard. Subst. Environ. Eng*, 39, 2447–2463.
- Chung, W.J., Jin C.S., Lee T.J., Kwon E.M., Jeong S.G., Park J.K., & Galera M.M. Development of a two-step biofiltration system for the control of odorous emission from composting process of food waste, in: IWA (Ed.), Proceedings of the Second IWA International Workshop and Conference on Odour and Volatile Organic Compounds, Singapore, 14–17 September, 2003, 14–17.
- Chung, Y.C., & Huang, C. (1998). Biotreatment of ammonia in air by an immobilized *Nitrosomonas europaea* biofilter. *Environ. Prog*, 17, 70–76.

- Chung, Y.C., Huang C., & Tseng C.P. (1998). Advanced study of H₂S removal by Thiobacillus novellus CH₃ biofilter in autotrophic and mixotrophic environments. *J. Environ. Eng., ASCE* 124, 362–367.
- Climate Change (1995). The Science of Climate Change: Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group I Report, page 22. http://unfccc.int/ghg_data/items/3825.php. Diakses tanggal 9 Mei 2009.
- Corsi RL, Seed L. (1995). *Biofiltration of BTEX: media, substrate and loading effects*. *Environ Prog* 14:151–158.
- Dastous, P.A., Soreanu, G., Nikiema, J., & Heitz, M. (2005). Biofiltration of the alcohols on a mature bed compost. In: Proceedings of the Annual Air & Waste Management Association. Pittsburgh, PA.
- Dehganzadeh, R., Torkian, A., Bina, B., Poormogaddas, H., & Kalantary, A. (2005). Biodegradation of styrene laden waste gas stream using compost-based biofilter. *Chemosphere*, 60, 434–439.
- Demeestere, K., Van, L.H., & Smet, E. (2002). Regeneration of a compost biofilter degrading high loads of ammonia by addition of gaseous methanol. *J AirWaste Manage Assoc* 52, 7, 796–804.
- Deshusses, M.A., & Cox, H.H.J. Biotrickling filters for air pollution control. *Department of Chemical and Environmental Engineering University of California*.
- Devinny, J.S., Deshusses, M.A., & Webster, T.S. (1999). *Biofiltration of air pollution control*. New York: Lewis Publishers.
- Dharmavaram S. (1991). Biofiltration: a lean emission abatement technology. In: Proc 84th Annu Meet Exhibition Air and Waste Management Association, Pittsburgh, PA, Pap 91, 103.2.
- Doughlas, M.C., (1976). *Von Nostrands Scientific Encyclopedia*. New York: Von Nostrand Rein Hold Company.
- Dumont, E., Andres, Y., Le Cloirec, P., & Gaudin, F. (2008). Evaluation of new packing material for H₂S removed by biofiltration. *Biochemical engineering journal*, 42, 120-127.

- Du Plessis & Chris. (1998). Denitrification and nitric oxide reduction in an aerobic-toluene treating biofilter. *Biotechnology and Bioengineering*, 58., no 44, 408-415.
- Elias, A., Barona, A., Rios, J., Arreguy, A., Munguira, M., Penas, J., & Sanz, J.L. (2000). Application of biofiltration to the degradation of hydrogen sulphide in gas effluents. *Biodegradation*, 11, 423–427.
- Epstein, E., (1997). *The Science of Composting*. Technomic Publishing Co., Lancaster, PA, 431–446.
- Gabriel, D., Maestre, J.P., Martin L., Gamisans, X., & Lafuente, J. (2007). Characterisation and performance of coconut fibre as packing material in the removal of ammonia in gas-phase biofilters. *Biosystem engineering*, 97, 481-490.
- Govind, R.. (1999, May:13-14). Biotrickling filter. In:Resources. ASAE, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659, USA.
- Grano, D. in: U.S. Ozkan, Agarwald, S.K., dan Marcelin, G. (Eds.). (1995). *Reduction of nitrogen oxide emissions*. American Chemical Society. Washington DC,14.
- Hartikainen, T., Ruuskanen, J., Vanhatalo, M., & Martikainen, P. (1996). Removal of ammonia from air by a peat biofilter. *Environ. Technol*, 17, 45–53.
- Haug, R.T. (1993). *The Practical Handbook of Compost Engineering*. Boca Raton, FL: Lewis Publishers.
- Hodge, D.S., Medina, V.F., Islander, R.L., & Deviny J.S. (1991). Treatment of hydrocarbon fuel vapors in biofilters. *Environ Technol*, 12, 655–662.
- Hong, J.H., & Park, K.J. (2005). Compost Biofiltration of ammonia gas from bin composting. *Bioresource Technology*, 96, 741-745.
- Hong, J.H., Park, K.J., & Choi, W.C. (2002). Biofiltration for ammonia removal from dairy manure composting. In: Michel Jr., F.C., Rynk, R.F., Hoitink, H.A.J. (Eds.). *Proceedings of the 2002*.
- Hudepohl, & Nate J. (1999). *Biofilter Technology for NOx Control*. University of California, Davis.

- IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2001. *Climate Change 2001 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group II Report*. WMO-UNDP.
- Janni, K.A., & Nicolai, R. (2000). Designing biofilters for livestock facilities. In: *Livestock and Poultry Odor Workshop II*. Department of Biosystems and Agricultural Engineering, University of Minnesota, St. Paul, MN, USA.
- Jin, Y., Viega, M., & Kennes, C. (2005). Bioprocesses for the removal of nitrogen oxides from polluted air, *J. Chem. Technol. Biotechnol*, 80, 483-494.
- Jorio, H., Bibeau, L., & Heitz, M. (2000). Biofiltration of air contaminated by styrene: effect of nitrogen supply gas flow rate, and inlet concentration. *Environ Sci Technol*, 34, 1764-1771.
- Kapahi, R., & Gross, M. (1995). Biofiltration for VOC and ammonia emission control. *BioCycle* 36, 2, 87-90.
- Kementerian Lingkungan Hidup Indonesia. (1990). *Indonesia: The First National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- Kennes, C., & Thalasso F. (1998). Waste gas biotreatment technology. *J. Chem. Technol. Biotechnol*, 72, 303-319.
- Kennes, C., & Veiga, M.C. (2001). Conventional biofilters. In: Kennes, C., Veiga, M.C. (Eds.). *Bioreactors for Waste Gas Treatment*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 47-98.
- Kennes, C., & Veiga, M.C. (2004). Fungal biocatalysts in the biofiltration of VOC-polluted air. *Journal of Biotechnology*, 113, 305-319.
- Khan, F.I., & Ghoshal, A.K. (2000). Removal of volatile organic compounds from polluted air. *J. Loss Prevent Proc. Ind*, 13, 527-545.
- Kim, J.H., Rene E.R., & Park, H.S. (2007). Performance of an immobilized cell biofilter for ammonia removal from contaminated air stream. *Chemosphere*, 68, 274-280.
- Kim, N.J., Sugano, Y., Hirai, & M., Shoda, M. (2000). Removal of a high load of ammonia gas by a marine bacterium, *Vibrio alginolyticus*. *J. Biosci. Bioeng*, 90, 410-415.

- Kinney KA, Chang DPY, Schroeder Ed, Scow KM. (1996). *Performance of a directionally-switching biofilter treating toluene contaminated air*. In: Proc 89th Annu Meet Exhibition Air and Waste Management Association, Nashville.
- Kurita, M., & Kamata, O. (1990). Deodorization systems used at sewage treatment plants in Nagoya city. *Sewage Works Japan*, 114-119.
- Langenhove, H.V., Bendinger, B., Oberthur, R., & Schamp, N. (1992). Biotechniques for Air Pollution Abatement and Odour Control Policies. *Elsevier Science Publishers, Amsterdam*, 177-182.
- Lee, B.D., Apel, W.A., & Smith, W.A. (2001). Oxygen effect on thermophilic microbial population in biofilters treating nitric oxide containing off-gas streams. *Environ. Prog.*, 20, 157-166.
- Leson, G., & Winter, A.M. (1991). Biofiltration: an innovative air pollution control technology for VOC emissions. *J AirWaste Manage Assoc* 41, 8, 1045-1054.
- Liang, Y., Quan, X., Chen, J., Chung, J.S., Sung, J.Y., Chen, S., Xue, D., & Zhao, Y. (2000). Long-term results of ammonia removal and transformation by biofiltration. *J. Hazard. Mater.*, 80, 259-269.
- Liu, Y., Quan, Xie., Zhao, Y., Chen, S., & Zhao, H. (2005). Removal of ternary VOCs in air streams at high loads using a compost-based biofilter. *Biochemical Engineering Journal*, 23, 85-95.
- Martens W., Martinec M., Zafirain R., Stark M., Hartung E., & Palmgren U. (2001). Reduction potential of microbial, odour and ammonia emissions from a pig facility by biofilters. *Int. J. Hyg. Environ. Health*, 203, 335-345.
- MacNevin, D., & Barford, J. (2000). Biofiltration as an odour abatement strategy. *Biochem. Eng. J.*, 5, 231-242.
- Millemann, R.E., Birge, W.J., Black, J.A., Cushman, R.M., Daniels, K.L. Franco, P.J., Giddings, J.M., McCarthy, J.F., & Stewart, A.J. (1984). Comparative acute toxicity to aquatic organisms of components of coal-derived synthetic fuels. *Trans. Am. Fish Soc.*, 113, 74.

- Mohseni M, Allen DG, Nichols KM. (1998). *Biofiltration of α -pinene and its application to the treatment of pulp and paper air emissions*. TAPPI J81:205–211
- Morgan-Sagastume JM, Ergas S, Revah S, Noyola A. (2003). *Changes in physical structure of a compost biofilter treating H_2S* . J Air Waste Manage Assoc 53:1011–10121.
- Nicolai, R.E., & Janni, K.A. (2001). Biofilter media mixture ratio of wood chips and compost treating swine odors. *Water Sci. Technol*, 44, 261-267.
- Nicolai, R.E. & Janni, K.A. (1998). Comparison of Biofilter Retention Time. Paper No. 974053. ASAE, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659 USA.
- Nicolai, R.E. & Janni, K.A. (1999). Effect of biofilter retention time on emissions from dairy, swine, and poultry buildings. Paper No. 994149. ASAE, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659 USA.
- Ottengraf, S.P.P. (1986). Exhaust gas purification. In: Rehm, H.J., Reed, G. (Eds.). *Biotechnology*, 8. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 425–452.
- Ottengraf, S.P.P. (1987). Biological system for waste gas elimination. *TIBTECH*, 5, 132–136.
- Pandey, R.A., Padoley, K.V., Mukhereji, S.S., Mudliar, S.N., Vaidya, A.N., Rajvaidya, A.S., & Subbarao, T.V. (2007). Biotreatment of waste gas containing pyridine in a biofilter. *Bioresource Technology*, 98, 2258-2267.
- Pagans, E., Font, X., & Sanchez, A. (2005). Biofiltration for ammonia removal from composting exhaust gases. *Chem. Eng. J*, 11, 105–110.
- Park, K.J., Choi, M.H. & Hong, J.H. (2002). Control of composting odor using biofiltration. *Compost Sci. Util*, 10, 356–362.
- Pinnette, J.R., Giggey, M.D., Marcy, G.J., & Brie, M.A.O. (1994). Performance of biofilter at tow agitated bin facilities, in: Proceeding of the 87th Annual Meeting of Air and Waste Management Association, Air and Waste Management Association, Ohio.
- Prado, O.J., Veiga, M.C., & Kennes, C. (2005). Treatment of gas-phase methanol in conventional biofilters packed with lava rock. *Water Res*, 39, 2385-2393.
- Rappert, S., & Muller, R. (2005). Microbial degradation of selected odorous substances. *Waste Management*, 25, 940–954.

- Rene, E.R., Murthy, D.V.S., & Swaminathan, T. (2005). Performance evaluation of a compost biofilter treating toluene vapours. *Process. Biochem*, 40, 2771-2779.
- Shareefdeen, Zarook., & Singh Ajay. (2005). *Biotechnology for Odor and Air Pollution Control*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- Sheridan, B.A., Curran, T.P., & Dodd, V.A. (2002). Assesment of influence of media particle size on biofiltration of odorous exhaust ventilation air from piggery facility. *Bioresour. Technol*, 84, 129-143.
- Shinabe, K., Oketani, S., Kanchanatawee, S., & Matsumura, M. (2000). Characteristics of hydrogen sulphide removal in a carrier-packed biological deodorization system. *Biochem. Eng. J*, 5, 209–217.
- Shoda M. (1991). Methods for the biological treatment of exhaust gases. In: *Biological Degradation of Wastes. Elsevier Applied Science*, London, 1–30.
- Simanjuntak, J. (2008). Reduksi Gas Dinitrogen Monoksida Dengan Menggunakan Pupuk Kompos Sebagai Biofilter. Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, Depok.
- Skiba, U., Smith, K. A., & Fowler, D. (1993). Nitrification and denitrification as sources of nitric oxide and nitrous oxide in sandy loam soils. *Soil Biol. Biochem*, 25, 1527-1536.
- Sorial, G.A., Smith, F.L., Suidan, M.T., Brenner, R.C. (2001). Removal of ammonia from contaminated air by trickle bed air biofilters. *J. Air Waste Manage. Assoc.* 51, 756–765.
- Swanson WJ, Loehr RC. (1997). *Biofiltration: fundamentals, design and operations principles and applications of biological APC technology*. *J Environ Eng ASCE* 123:538–54.
- Taghipour, H., Shahmansoury, M.R., Bina, B., & Mvahdian, H. (2007). Operational parameters in biofiltration of ammonia-contaminated air streams using compost pieces of hard plastics filter media. *Chemical engineering journal*.
- Togashi, I., Suzuki, M., & Hirai, M. (1986). Removal of NH₃ by a peat biofilter without and with nitrifier. *J. Ferment. Technol*, 64, 425-432.

- Torkian, A., Keshavarzi Shirazi, H., & Azimi, A. (2005). Effects of operational conditions on the performance of triethylamine biofiltration. *Iranian J Env Health Sci Eng*, 2, 31-40.
- Utami et.al. (2009, Juni). Biosorption study for the removal of nitrous oxide gas using compost biofiltration. Paper presented at International Symposium Environmental, Science, and Technology, Shanghai.
- Utami et.al. (2009, Agustus). Pengaruh parameter operasi dalam proses biofiltrasi N₂O dengan medium filter berbasis kompos. Paper presented at Proceeding Seminar Tjipto Utomo, Kampus Itenas, Bandung.
- Van Lith C, David SL, Marsh R. (1990). Design criteria for biofilters. In: Van Lith C, David SL, Marsh R (eds) *Effluent treatment and waste disposal*. ClairTech, Utrecht, Netherlands Institution of Chemical Engineers Symp Ser 116, pp 127-132.
- Verschuere, K., (1977). *Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals*. New York: Reinhold Company.
- Von Bernuth, R.D., K. Vallieu & H. Nix. (1999). Experiences with a biofilter on a slatted floor hog barn. Paper No. 994148. ASAE, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659 USA.
- Wani AH, Branion RMR, & Lau AK. (1997). Biofiltration: *a promising and cost-effective control technology for odors, VOCs and air toxics*. *J Environ Sci Health A32*:2027-2055.
- Yang, Wan-Fa, Hao-Jan Hsing, Yu-Chiung Yang & Jieh-Yu Shyung. (2007). The Effect of Selected Parameters on The Nitric Oxide Removal by Biofilter. National Taiwan University, Taiwan.
- Ying-Chien Chung. (2007). Evaluation of gas removal and bacterial community diversity in a biofilter developed to treat composting exhaust gases. *Journal of Hazardous Materials*, 144, 377-385.
- Zeisig, H. D. & Munchen, T. U. (1987). Experiences with the use of Biofilters to Remove Odours from Piggeries and Hen Houses. In: *Volatile Emissions from Livestock Farming and Sewage Operations*. eds. V.C. Nielsen, J. H. Voorburg, and P. L'Hermite New York: Elsevier Applied Science Publishers: 209 - 216.

Zilli, M., Palazzi, E., Sene, L., Converti, A., & Del Borghi, M. (2001). Toluene and styrene removal form air in biofilter. *Process Biochem*, 37, 423-429.



LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Hasil Kalibrasi N₂O

	Waktu Retensi			Luas Area		
	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara	Uap air	N ₂ 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

waktu retensi :

udara 0.2415 menit
 N₂O 0.794 menit

Keterangan :

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

Lampiran 2. Data Hasil Kalibrasi *Flowmeter*

Skala	Vol	t (waktu)	Q (cc/menit)	Q rata-rata (cc/menit)
0.1	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	
0.15	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	
0.175	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	
0.2	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	
0.3	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	
0.4	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 Uji Kebocoran dan Uji Blangko

t (menit)	Luas Area Peak N ₂ O	
	Sampling port atas	Sampling port bawah
2	156957	103164
15	156957	129456
30	156957	130905
45	156957	150478
60	156957	156775
75	156957	163198
90	156957	103928
105	156957	106618



Lampiran 4. Data Hasil Uji Kinerja Biofilter

- Langkah perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O
- Menghitung volume N₂O hasil biofiltrasi dari persamaan kalibrasi
- Menghitung massa N₂O dengan massa jenis N₂O 1812 g/m³
- Menghitung konsentrasi N₂O = massa N₂O / 0.000001
- Menghitung RE (*Removal Efficiency*) dengan persamaan :

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

Laju alir = 73,48 cc/menit (h = 50 cm, kompos kering = 945 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (gr)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	% RE (berdasarkan kalibrasi luas area)
	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara	Uap Air	N ₂ O				
0 (in)	0.202		0.772	3844673		140673	96.4521		3.5291	4.72947E-06	0.008569794	8569.7936	
0 (out)	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

Lampiran 5. Data Hasil Uji Variasi Kedalaman Medium

- Langkah perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O
- Menghitung volume N₂O hasil biofiltrasi dari persamaan kalibrasi
- Menghitung massa N₂O dengan massa jenis N₂O 1812 g/m³
- Menghitung konsentrasi N₂O = massa N₂O / 0.000001
- Menghitung RE (Removal Efficiency) dengan persamaan :

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

a. $h = 50$ cm ($Q = 88$ cc/menit, kompos kering = 945 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi		Luas Area		Konsentrasi			Vol. N ₂ O (m3)	Massa N ₂ O (gr)	Konsentrasi N ₂ O (g/m3)	% RE		
	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara	Uap Air	N ₂ O							
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

b. $h = 60$ cm ($Q = 88$ cc/menit, kompos kering = 1134 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi		Luas Area		Konsentrasi			Vol. N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (gr)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	% RE
	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara	Uap air	N ₂ O					
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	3038910	516290	33683	14.3858	0.9385	1.16313E-06	0.002107598	2107.5976	63.60355474
2	0.192	0.55	3223830	188806	91.8769	5.3808	2.7422	3.2477E-06	0.005884832	5884.8324	-1.626126502
3	0.192	0.557	3281994	66639	95.57	1.9405	2.4895	2.8901E-06	0.005236861	5236.8612	9.563793391
4	0.19	0.555	3297343	42449	96.4332	1.2415	2.083	2.4145E-06	0.004375074	4375.074	24.44613652
5	0.185	0.557	3288644	28497	97.0226	0.8407	2.1002	2.4133E-06	0.0043729	4372.8996	24.48368658
6	0.2	0.56	3334736	21220	97.337	0.6194	2.0196	2.34673E-06	0.004252281	4252.2808	26.56667223
7	0.192	0.553	3349501	15552	97.5216	0.4528	1.8255	2.13033E-06	0.003860164	3860.164	33.33820093
8	0.2	0.562	3380086	12480	97.9262	0.3616	1.7122	2.0104E-06	0.003642845	3642.8448	37.0911215
9	0.185	0.56	3297577	11562	98.0963	0.3439	1.5598	1.78817E-06	0.003240158	3240.158	44.04518525

c. $h = 70$ cm ($Q = 88$ cc/menit, kompos kering = 1323 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi		Luas Area		Konsentrasi			Vol. N ₂ O (m3)	Massa N ₂ O (gr)	Konsentrasi N ₂ O (g/m3)	% RE
	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara	N ₂ O	Uap Air	N ₂ O				
0	0.187	0.55	0.7	3497537	83701	9076	96.8124	2.3169	0.2512	621.3348	0
1	0.192	0.562	0.715	3391959	73647	36445	96.8564	2.103	1.0407	2274.4224	69.148082
2	0.198	0.563	0.715	3367507	47023	67549	96.7097	1.3504	1.9399	4153.104	43.66427975
3	0.192	0.563	0.713	3386173	28544	73724	97.0684	0.8182	2.1134	4526.074	38.60504367
4	0.2	0.568	0.718	3375139	19139	75485	96.6953	0.5483	2.1626	4632.4384	37.16223966
5	0.198	0.565	0.715	3374942	15392	73831	97.4244	0.4443	2.1313	4532.5368	38.51737755
6	0.19	0.565	0.718	3471738	15049	76005	97.4443	0.4224	2.1333	4663.8464	36.73619873
7	0.198	0.573	0.725	3425428	13023	75833	97.1281	0.3693	2.1502	4653.4576	36.87711996
8	0.177	0.558	0.71	3458198	11991	75282	97.5151	0.3381	2.1228	4620.1772	37.32855949
9	0.19	0.56	0.712	3449274	11637	75259	97.5426	0.3291	2.1283	4618.788	37.34740361

d. $h = 80$ cm ($Q = 88$ cc/menit, kompos kering = 1512 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi		Luas Area			Konsentrasi			Vol. N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (gr)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	% RE
	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara	Uap Air	N ₂ O	Udara	Uap Air				
0	0.188	0.555	0.702	3305567	17696	96.8259	2.6557	0.5183	6.30233E-07	0.001141983	1141.9828	0
1	0.192	0.555	0.707	3410079	69006	97.1665	1.9663	0.8673	1.05493E-06	0.001911539	1911.5392	67.64835165
2	0.198	0.567	0.717	3340753	38048	97.3866	1.1091	1.4683	1.71933E-06	0.003115432	3115.432	47.27319192
3	0.185	0.558	0.708	3367565	25806	97.3755	0.7462	1.7701	2.0809E-06	0.003770591	3770.5908	36.18502428
4	0.193	0.565	0.717	3386978	17888	97.464	0.5147	2.0212	2.38173E-06	0.004315701	4315.7008	26.95936622
5	0.198	0.567	0.717	3344100	16386	97.5391	0.4779	1.9829	2.3065E-06	0.004179378	4179.378	29.26654741
6	0.185	0.562	0.712	3318463	13569	97.5705	0.399	1.7807	2.0591E-06	0.003731089	3731.0892	36.85356504
7	0.198	0.568	0.718	3321415	11866	97.7582	0.3492	1.6437	1.90187E-06	0.003446182	3446.1824	41.67544084
8	0.197	0.565	0.715	3391614	10245	98.2403	0.2968	1.463	1.72393E-06	0.003123767	3123.7672	47.13212369
9	0.2	0.563	0.713	3355777	9363	98.4174	0.2746	1.308	1.52703E-06	0.002766984	2766.9844	53.17045745

e. $h = 100$ cm ($Q = 88$ cc/menit, kompos kering = 1890 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi		Luas Area			Konsentrasi			Vol. N ₂ O (m3)	Massa N ₂ O (gr)	Konsentrasi N ₂ O (g/m3)	% RE
	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara	Uap Air				
0	0.198	0.565	0.715	3356592	23567	118231	95.9468	0.6737	3.3796	0.007214297	7214.2968	
0	0.183	0.54		3018144	569998		84.1144	15.8856		7.31444E-05	73.1444	0
1	0.19	0.545		3052682	624204		83.0236	16.9764		7.31444E-05	73.1444	98.98611879
2	0.188	0.55	0.705	3203942	348080	112984	87.4198	9.4974	3.0828	0.006897378	6897.378	4.392927111
3	0.177	0.547	0.698	3336052	142815	115906	92.7798	3.9719	3.2235	0.007073867	7073.8668	1.946551464
4	0.19	0.558	0.708	3471022	64651	106616	95.2978	1.775	2.9272	0.006512751	6512.7508	9.724385057
5	0.188	0.555	0.705	343866	43325	76108	96.6576	1.2125	2.1299	0.004670068	4670.0676	35.26648917
6	0.192	0.56	0.71	3448954	32972	74942	96.966	0.927	2.107	0.004599641	4599.6412	36.2426952
7	0.19	0.558	0.708	3511038	30143	75549	97.0777	0.8334	2.0889	0.004636304	4636.304	35.73449875
8	0.185	0.563	0.715	3586270	28437	75500	96.9147	0.7685	2.0403	0.004633344	4633.3444	35.77552285
9	0.192	0.558	0.708	3561928	23702	74794	97.0085	0.6455	2.037	0.004590702	4590.702	36.36660471

f. $h = 60$ cm ($Q = 185$ cc/menit, kompos kering 1134 g), untuk memilih laju alir terbaik

Waktu (Jam)	Waktu Retensi		Luas Area			Konsentrasi			Vol. N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (gr)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	% RE	
	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara	Uap Air					N ₂ O
0	0.198	0.555	0.703	3295012	220623	1423	93.5719	6.2653	0.0404	8.78E-08	0.000159094	159.0936	0
1	0.182	0.55	0.7	3578909	20063	62640	97.7414	0.5479	1.7107	2.12837E-06	0.0038566	3856.6004	16.19393876
2	0.198	0.562	0.712	3197962	7942	66978	97.7109	0.2427	2.0465	2.27297E-06	0.004118616	4118.6156	10.50020344
3	0.187	0.557	0.705	3297564	7481	70693	97.6842	0.2216	2.0941	2.3968E-06	0.004343002	4343.0016	5.624171468
4	0.195	0.555	0.703	3446485	6809	71956	97.7657	0.1931	2.0412	2.4389E-06	0.004419287	4419.2868	3.96645185
5	0.192	0.557	0.707	3349377	6268	69696	97.4852	0.1824	2.0285	2.36357E-06	0.004282783	4282.7828	6.932759322
6	0.183	0.55	0.7	3219227	7323	70862	97.6212	0.2221	2.1489	2.40243E-06	0.004353209	4353.2092	5.402354671
7	0.19	0.553	0.702	3285615	7644	67615	97.7607	0.2274	2.0118	2.2942E-06	0.00415709	4157.0904	9.664124742
8	0.18	0.543	0.692	3397083	4398	71608	97.7939	0.1266	2.0614	2.4273E-06	0.004398268	4398.2676	4.4232107
9	0.19	0.553	0.702	3337881	4416	73006	97.7331	0.1293	2.1376	2.4739E-06	0.004482707	4482.7068	2.588300148

Lampiran 6. Data Hasil Uji Variasi Kandungan Air pada Kompos

- Langkah perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O
- Menghitung volume N₂O hasil biofiltrasi dari persamaan kalibrasi
- Menghitung massa N₂O dengan massa jenis N₂O 1812 g/m³
- Menghitung konsentrasi N₂O
- Menghitung RE (Removal Efficiency) dengan persamaan :

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

- a. Penambahan kandungan air 30% berat kompos (Q= 88 cc/menit, h = 50 cm, berat kompos = 945 g)

Waktu	Waktu Retensi		Luas Area		Konsentrasi			Vol. N ₂ O (m3)	Massa N ₂ O (gr)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	% RE	
	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara					
0	0.19	0.547	0.69	3247286	10724	663	99.5781	0.3289	0.0203	0.00011319	113.1896	0
1	0.187	0.542	0.687	3185470	16684	23407	98.7571	0.5172	0.7257	0.001486927	1486.9272	81.1360658
2	0.183	0.537	0.682	3299680	18847	61105	97.6343	0.5577	1.808	0.003763886	3763.8864	52.2493736
3	0.18	0.538	0.682	3262532	17722	69203	97.4048	0.5291	2.0661	0.004253006	4253.0056	46.0441522
4	0.192	0.543	0.688	3209932	16679	79724	97.0843	0.5045	2.4113	0.004888474	4888.474	37.9822686
5	0.182	0.54	0.685	3226534	15564	71124	97.3836	0.4697	2.1467	0.004369034	4369.034	44.5721554
6	0.192	0.543	0.688	3185763	15081	70372	97.3877	0.461	2.1513	0.004323613	4323.6132	45.1483874
7	0.192	0.542	0.687	3294394	14783	72284	97.4252	0.4372	2.1376	0.004439098	4439.098	43.683287
8	0.187	0.56	0.707	3539727	14328	72586	96.9074	0.3923	1.9872	0.004457339	4457.3388	43.4518747
9	0.187	0.543	0.687	3302274	13527	70296	97.5245	0.3995	2.076	0.004319023	4319.0228	45.2066236

b. Penambahan kandungan air 50% berat kompos (Q= 88 cc/menit, h = 50 cm, berat kompos = 945 g)

Waktu	Waktu Retensi		Luas Area		Konsentrasi		Vol. N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (gr)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	% RE	
	Udara	Uap air	N ₂ O	N ₂ O	Udara	Uap Air					N ₂ O
0	0.175	0.542		24383		99.2765	0.7235	4.03667E-08	7.31444E-05	73.1444	0
1	0.2	0.568	0.718	3266068	31508	98.4985	0.4113	1.09063E-06	0.001976228	1976.2276	84.1816459
2	0.2	0.567	0.715	3192401	67860	97.4131	0.5162	2.30237E-06	0.004171888	4171.8884	66.6068787
3	0.19	0.555	0.703	3331992	72251	97.3346	0.4357	2.44873E-06	0.004437105	4437.1048	64.4840023
4	0.14	0.527	0.677	3583291	72964	97.5102	0.5039	2.4725E-06	0.00448017	4480.17	64.1392947
5	0.198	0.685	0.87	4328383	71061	97.9223	0.4415	2.40907E-06	0.004365229	4365.2288	65.0593206
6	0.143	0.512	0.658	3007574	18146	97.1642	0.5862	2.36143E-06	0.004278917	4278.9172	65.7501861
7	0.177	0.583	0.718	4643034	18954	98.0844	0.4004	2.4312E-06	0.004405334	4405.3344	64.7383027
8	0.132	0.503	0.653	2794510	18555	96.0281	0.6376	2.38307E-06	0.004318117	4318.1168	65.4364201
9	0.14	0.535	0.693	3041660	18713	96.8734	0.596	2.68897E-06	0.004872408	4872.4076	60.9997003

c. Penambahan kandungan air 60% berat kompos (Q= 88 cc/menit, h = 50 cm, berat kompos = 945 g)

Waktu	Waktu Retensi		Luas Area		Konsentrasi			Vol. N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (gr)	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	% RE
	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara	Uap Air	N ₂ O					
0	0.163	0.52	3189386	13249		99.5863	0.4137	4.03667E-08	7.31444E-05	73.1444	0
1	0.177	0.53	3230430	3503		98.8286	0.1072	4.03667E-08	7.31444E-05	73.1444	98.3713486
2	0.183	0.537	3223670	2286		99.9291	0.0708	4.03667E-08	7.31444E-05	73.1444	98.3713486
3	0.183	0.543	3200221	3596	26965	99.0541	0.1113	9.392E-07	0.00170183	1701.8304	62.1066222
4	0.18	0.535	3309839	2041	31819	98.9874	0.061	0.000001101	0.001995012	1995.012	55.578568
5	0.182	0.537	3237406	3017	8646	99.641	0.0929	3.28567E-07	0.000595363	595.3628	86.7435042
6	0.18	0.537	3289973	1675		99.9491	0.0509	4.03667E-08	7.31444E-05	73.1444	98.3713486
7	0.183	0.565	3807994	2270		99.7058	0.0594	4.03667E-08	7.31444E-05	73.1444	98.3713486
8	0.175	0.523	3307490	3226		99.8739	0.0974	4.03667E-08	7.31444E-05	73.1444	98.3713486
9	0.188	0.557	3517022	3848		99.8907	0.1093	4.03667E-08	7.31444E-05	73.1444	98.3713486

d. Penambahan kandungan air 70% berat kompos (Q= 88 cc/menit, h = 50 cm, berat kompos = 945 g)

Waktu	Waktu Retensi		Luas Area		Konsentrasi			Vol. N ₂ O (m3)	Massa N ₂ O (gr)	Konsentrasi N ₂ O (g/m3)	% RE	
	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara					Uap Air
0	0.178	0.532		2716848	2215		99.9185	0.0815		4.03667E-08	73.1444	0
1	0.183	0.533		3147771	7133		99.759	0.2261		4.03667E-08	73.1444	99.0629691
2	0.175	0.527	0.67	3135491	51705	51339	96.8182	1.5966	1.5853	1.75167E-06	0.00317402	59.3385846
3	0.175	0.525	0.67	3138268	46681	34654	97.4737	1.4499	1.0763	1.1955E-06	0.002166246	72.2488742
4	0.183	0.532	0.675	3137640	10356	5126	99.509	0.3284	0.1626	2.11233E-07	0.000382755	95.0966434
5	0.172	0.53	0.675	3159876	41018	50753	97.1777	1.2615	1.5608	1.73213E-06	0.003138626	59.7920116
6	0.172	0.522	0.667	3258796	46204	53632	97.0275	1.3757	1.5969	1.8281E-06	0.003312517	57.5643387
7	0.173	0.527	0.672	3146486	28406	39442	97.8691	0.8835	1.2268	1.3551E-06	0.002455441	68.5440815
8	0.175	0.522	0.665	3180987	27184	35511	97.9671	0.8372	1.0937	1.22407E-06	0.002218009	71.5857565
9	0.172	0.525		3223414	1831		99.9432	0.0568		4.03667E-08	73.1444	99.0629691

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
- Menghitung jumlah koloni bakteri dalam setiap cawan petri pada pengenceran tertentu
- Menghitung jumlah bakteri pada setiap sampel dengan persamaan berikut:

$$\Sigma \text{bakteri} \left(\frac{\text{CFU}}{\text{g}} \right) = \frac{\text{jumlah koloni bakteri}}{\text{Volume pengenceran} \cdot \text{volume sampel pada cawan petri}} \times \frac{\text{massa sampel kompos}}{\text{volume air pada pengenceran 1:10}}$$

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

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	1.35E+11
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			

b. Kompos kering setelah biofiltrasi pada variasi kedalaman medium

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	1.45E+11
1.00E+06	1.00E-06	188			
1.00E+07	1.00E-07	154	172	1.60E+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	5.43E+11	
1.00E+09	1.00E-09	48			
Uji blanko		6			

c. Kompos variasi penambahan kandungan air

- Kandungan air 50% (w/w)

Volume Pengenceran	Pengenceran	Jumlah Koloni	Rata-rata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Rata-rata jumlah (CFU/g)
1.00E+06	1.00E-06	65			3.65E+11
1.00E+06	1.00E-06	88	76.5	7.10E+08	
1.00E+07	1.00E-07	22			
1.00E+07	1.00E-07	120	71	6.59E+09	
1.00E+08	1.00E-08	12			
1.00E+08	1.00E-08	103	57.5	5.34E+10	
1.00E+09	1.00E-09	152			
1.00E+09	1.00E-09	150	151	1.40E+12	

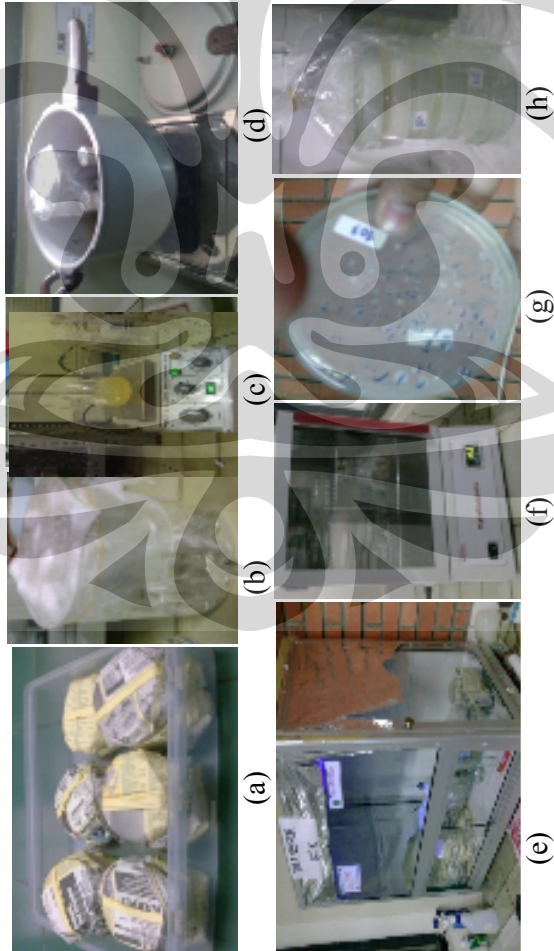
Uji Blanko	131
------------	-----

- Kandungan air 60% (w/w)

Volume Pengenceran	Pengenceran	Jumlah Koloni	Rata-rata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Rata-rata jumlah (CFU/g)
1.00E+06	1.00E-06	24	74.5	6.91E+08	1.44E+10
1.00E+06	1.00E-06	125			
1.00E+07	1.00E-07	4	4	3.71E+08	
1.00E+07	1.00E-07	4			
1.00E+08	1.00E-08	4	6	5.57E+09	
1.00E+08	1.00E-08	8			
1.00E+09	1.00E-09	9	5.5	5.10E+10	
1.00E+09	1.00E-09	2			
Uji Blanko		131			

Lampiran 8. Dokumentasi Metode *Total Plate Count* dan SEM

Gambar (a)-(h) merupakan visual dari prosedur analisis mikroba dengan TPC (*Total Plate Count*) seperti yang telah jelaskan sebelumnya (Bab. 3).



Keterangan :

- a : Alat yang akan disteril di oven
- b : Bahan yang akan disteril dengan autoklaf
- c : Proses pembuatan nutrient agar sebagai medium TPC
- d : Proses sterilisasi dengan autoklaf
- e : Transfer box untuk memasukan sampel pada medium dengan kondisi steril dan aseptis
- f : TPC yang akan diuji diinkubasi
- g: Perhitungan bakteri dengan metode TPC
- h : Sterilisasi sampel yang telah dianalisis



Gambar Alat Coating Sampel