



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMANFAATAN KOMPOS SEBAGAI BIOFILTER
UNTUK MEREDUKSI EMISI GAS N₂O**

SKRIPSI

**LILA ADRIATY
0405060385**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**PEMANFAATAN KOMPOS SEBAGAI BIOFILTER
UNTUK MEREDUKSI EMISI GAS N₂O**

SKRIPSI

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

**LILA ADRIATY
0405060385**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 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 : Lila Adriaty

NPM : 0405060385

Tanda Tangan :



Tanggal : 7 Juli 2009

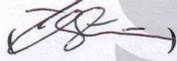
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Lila Adriaty
NPM : 0405060385
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Pemanfaatan Kompos Sebagai Biofilter Untuk Mereduksi Emisi Gas N₂O

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Tania Surya Utami, ST., MT ()
Pembimbing : Dr. Heri Hermansyah, ST., M.Eng ()
Penguji : Ir. Dianursanti, MT ()
Penguji : Dr. Ir. Anondho Wijanarko, M.Eng ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Juli 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., dan Dr. Heri Hermansyah, ST., MT., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran serta kesabaran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Kang Jajat, Mbak Fita, dan Mang Ijal sebagai teknisi laboratorium yang telah membantu saya secara teknis.
3. Orang tua dan keluarga saya tercinta yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
4. Yayang, Novi, Titis sebagai sahabat yang selalu menyemangati saya dalam menyelesaikan skripsi ini. Sera yang sudah rela meminjamkan jas labnya. Ayu, Iteng, Adel, Yendha sahabat berbagi di kampus. Josia, Chyntia dan Shilfa pejuang biofilter. Indra yang udah bantuin cari bahan, thanks ya semua.. Rekan-rakan RPKA dan Bioproses akhirnya kita bisa!. Semua pihak yang tak dapat disebutkan satu persatu makasih yaaaaa....=)

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, 7 Juli 2008

Penulis

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

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

Nama : Lila Adriaty
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
NPM : 0405060385

Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

“Pemanfaatan Kompos Sebagai Biofilter Untuk Mereduksi Emisi Gas N₂O”

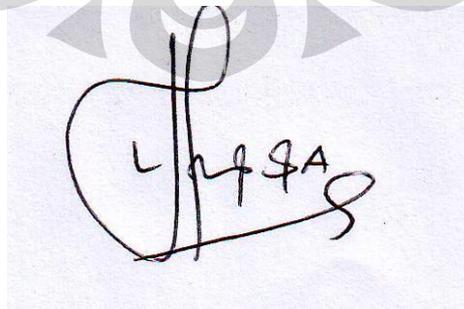
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 26 Juni 2009

Yang menyatakan



(Lila Adriaty)

ABSTRAK

Nama : Lila Adriaty
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Pemanfaatan Kompos Sebagai Biofilter Untuk Mereduksi Emisi Gas N₂O

Biofilter merupakan teknologi terbaru yang dapat mereduksi N₂O dengan medium filter kompos. Teknologi ini memiliki keunggulan diantaranya memiliki biaya instalasi dan operasi yang rendah, kondisi operasi yang aman dengan konsumsi energi yang rendah, tidak menghasilkan produk samping berbahaya, dan stabil pada waktu yang relatif lama, serta memiliki daya degradasi gas polutan yang tinggi. Efek laju alir, kandungan air serta perbandingan penggunaan nutrisi alami dan sintetik pada kompos yang ditambahkan *nitrobacter,sp* diteliti pada penelitian ini selama 9 jam dengan sistem aliran *batch*. Penurunan konsentrasi N₂O hasil dari biofiltrasi dianalisis dengan kromatografi gas (GC), sedangkan kompos sebagai medium filter dianalisis dengan metode *Total Plate Count* (TPC) untuk mengetahui peningkatan jumlah bakteri hasil biofiltrasi. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi reduksi N₂O terbaik didapatkan pada laju alir terkecil 72 cc/menit kandungan air 60% dengan penggunaan nutrisi sintetik untuk kompos yang ditambahkan *nitrobacter,sp* sebesar 75,9 %.

Kata kunci:

Biofilter, kompos, N₂O, *Nitrobacter,sp.*, nutrisi alami dan sintetik

ABSTRACT

Name : Lila Adiaty
Study Program: Chemical Engineering
Title : Using Compost As Biofilter for Reduction N₂O Emission

Biofiltration is the last technology pollution control for removal N₂O with compost as medium filter. This technology has advantages such as low installation and operation cost, secure operation, low energy consumption, good stability and able to remove pollutant with high efficiency. Effects of N₂O flowrate, water content, and usage nature and synthetic nutrient supplement in compost which is adding *Nitrobacter,sp* will be investigated towards to N₂O gas reduction efficiency for 9 hours in batch system. Decreasing concentration of N₂O was analyzed with Gas Chromatograph (GC) and Increasing quantity of microorganism in compost as filter material was analyzed with Total Plate Count (TPC). The result indicates that the highest N₂O gas reduction efficiency is obtained under biofilter length 50 cm and gas flow rate 72.02 cc/min and 60% water content as conditions for removal efficiency was achieved. The result shows that N₂O gas removal efficiency could be optimized by adding synthetic nutrient supplement in compost which's been mixed with *Nitrobacter,sp*, hence 75.9 % of removal efficiency.

Key words:

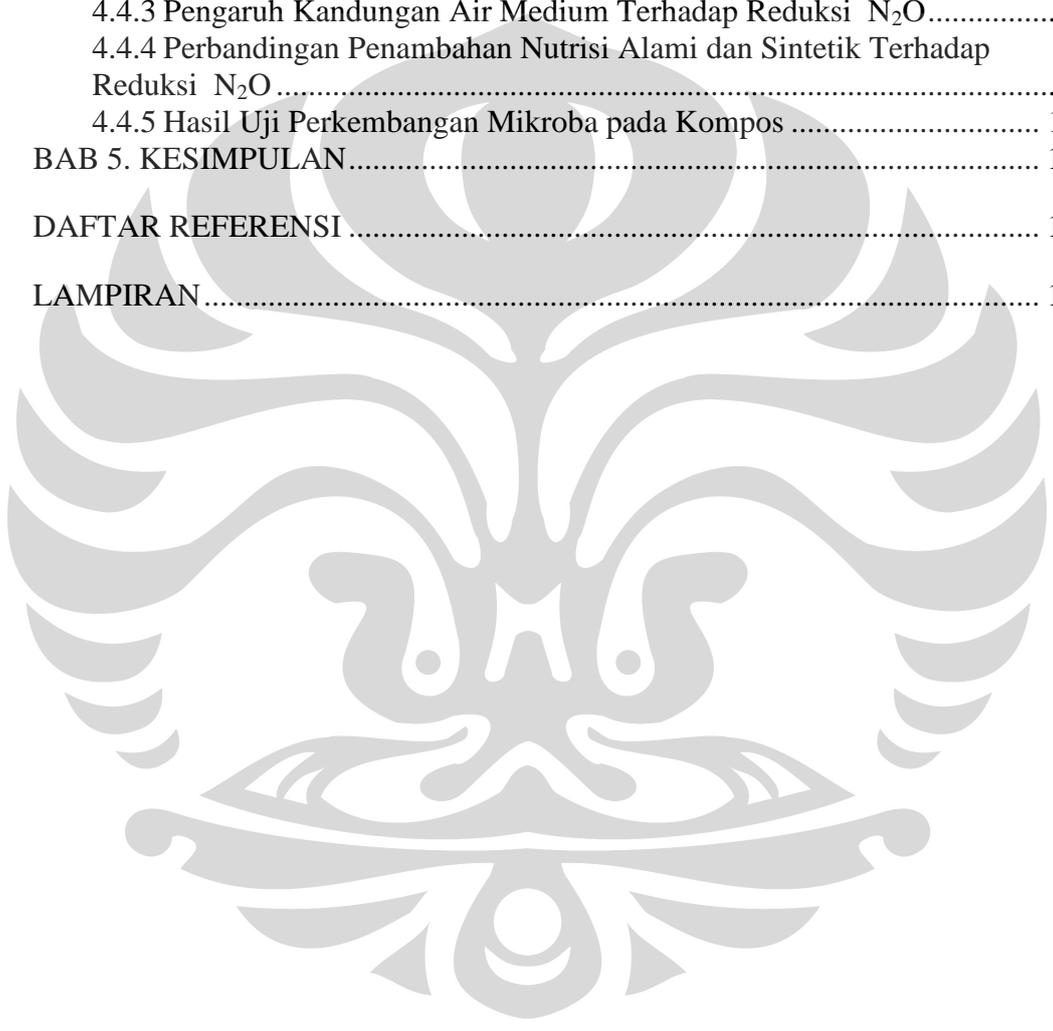
Biofilter, compost, N₂O, *Nitrobacter,sp.*, synthetic & natural nutrient supplement

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	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB 1. PENDAHULUAN	15
1.1 Latar Belakang Masalah.....	15
1.2 Rumusan Masalah	19
1.3 Tujuan Penelitian	19
1.4 Batasan Masalah.....	19
1.5 Sistematika Penulisan	20
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	22
2.1 Polusi Udara	22
2.1.1 Nitrogen Oksida (NO _x)	23
2.1.2 Dinitrogen Monoksida (N ₂ O)	25
2.2 Teknologi Reduksi Reduksi NO _x	26
2.2.1 Teknologi Pra Pembakaran	27
2.2.2 Teknologi Pasca Pembakaran	27
2.3 Teknologi Reduksi Biologis	28
2.4 Biofilter	29
2.4.1 Terminologi Biofilter	30

2.4.2 Karakteristik Performa Biofilter	31
2.4.3 Keefektifan Teknologi dan Biaya	33
2.4.4 Karakteristik Biofilter Ideal	35
2.4.5 Kelebihan dan Kekurangan Biofilter	35
2.5 Parameter yang Mempengaruhi Biofiltrasi	37
2.5.1 Kelembaban	37
2.5.2 pH 38	
2.5.3 Nutrisi	39
2.5.4 Temperatur	40
2.5.5 Kandungan Oksigen	41
2.5.6 Medium filter	41
2.5.7 Kedalaman Medium Filter	42
2.5.8 Pressure Drop	42
2.6 Mikrobiologi Pada Biofilter	42
2.7 Medium Biofilter	44
2.8 Kompos Sebagai Medium Filter	48
2.8.1 Proses Pengomposan	49
2.9 Metabolisme Nitrogen	53
2.9.1 Nitrifikasi	54
2.10 Rangkuman State of The Art Biofiltrasi	56
BAB 3. METODE PENELITIAN	64
3.1 Diagram Alir Penelitian	64
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	66
3.2.1 Alat	66
3.2.2 Bahan	67
3.3 Prosedur Penelitian	68
3.3.1 Perancangan dan Instalasi Sistem Biofilter	68
3.3.2 Preparasi Medium Filter	68
3.1 Persiapan Eksperimen	70
3.1.1 Uji Kebocoran Alat dan Uji Blangko	70
3.1.2 Kalibrasi Laju Alir	72
3.3 Pengujian Kinerja Biofilter	73
3.3.1 Variasi laju alir gas sampel	74
3.3.2 Variasi fraksi air dalam medium filter	74
3.3.3 Variasi Larutan Nutrisi Pada Medium Filter	75
3.4 Data Penelitian	75
3.5 Pengukuran dan Analisis	75
3.5.1 Analisis Gas N ₂ O	75
3.5.2 Analisis perkembangan bakteri dengan TPC (<i>Total Plate Count</i>)	76
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	80
4.1 Perancangan Sistem Biofilter	80

4.2. Preparasi Medium Filter	81
4.3 Persiapan Eksperimen	83
4.3.1 Uji Kebocoran dan Uji Blangko	83
4.3.2 Kalibrasi <i>Flowmeter</i>	84
4.3.3 Uji Waktu Tinggal	86
4.3.4 Kalibrasi Gas N ₂ O.....	87
4.4 Uji Kinerja Biofilter	88
4.4.1 Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N ₂ O	88
4.4.2 Pengaruh Laju Alir Terhadap Reduksi N ₂ O	90
4.4.3 Pengaruh Kandungan Air Medium Terhadap Reduksi N ₂ O.....	93
4.4.4 Perbandingan Penambahan Nutrisi Alami dan Sintetik Terhadap Reduksi N ₂ O	97
4.4.5 Hasil Uji Perkembangan Mikroba pada Kompos	100
BAB 5. KESIMPULAN.....	108
DAFTAR REFERENSI	109
LAMPIRAN.....	113



DAFTAR GAMBAR

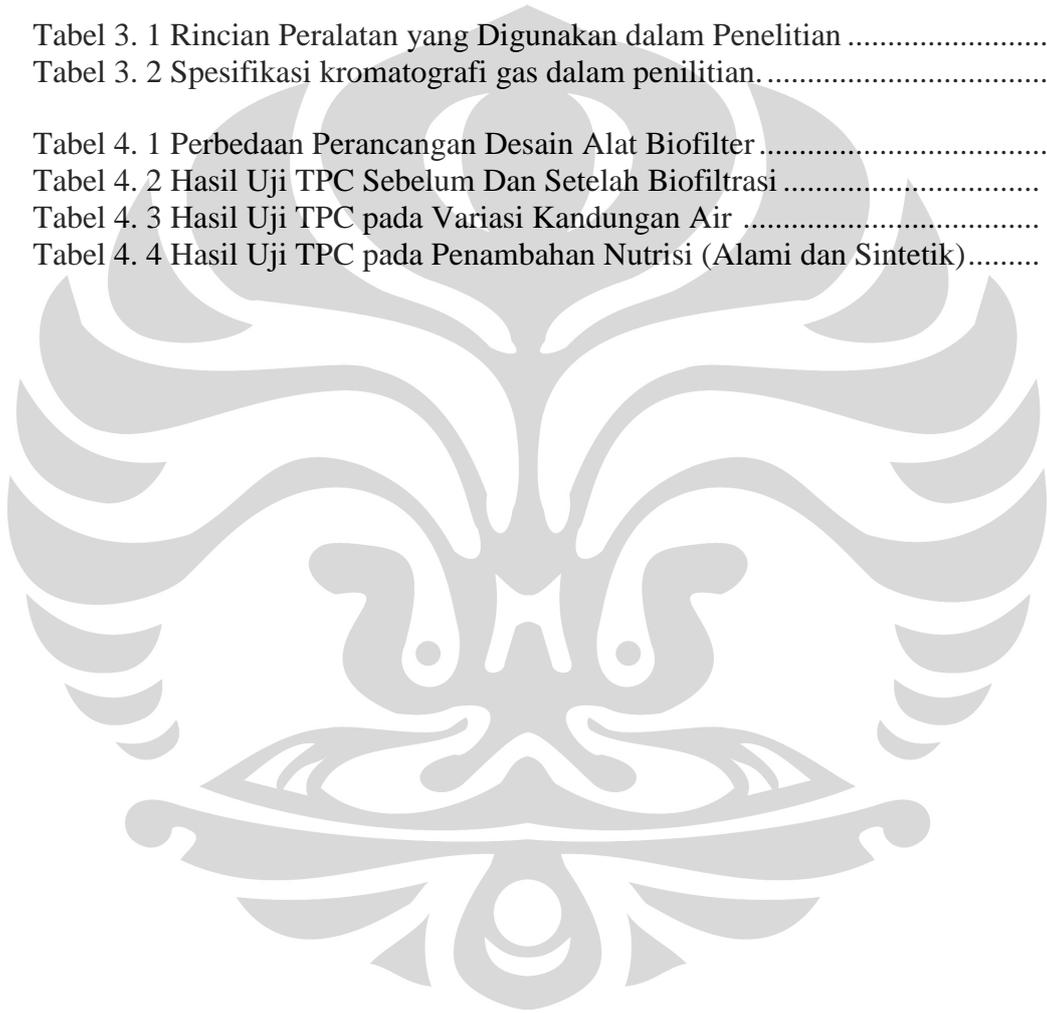
Gambar 1. 1 Sumber Penghasil Emisi NO _x dan Trend yang dihasilkan	15
Gambar 2. 1 Presentase Sumber Emisi NO _x	23
Gambar 2. 2 Perkembangan emisi NO _x di The Brownsville PUB,USA.	25
Gambar 2. 3 Perbandingan emisi gas rumah kaca pada hasil pembakaran transportasi	26
Gambar 2. 4 Tipe Kurva EC vs Loading	32
Gambar 2. 5 Aplikasi berbagai teknologi polusi control berdasarkan laju alir dan konsentrasi kontaminan	33
Gambar 2. 6 Perbandingan Biaya Modal Teknologi Reduksi NO _x	34
Gambar 2. 7 Perbandingan Biaya Operasi Teknologi Reduksi NO _x	34
Gambar 2. 8 Efek kandungan air untuk reduksi iso-pentanadengan Biofilter	38
Gambar 2. 9 Skema proses biodegradasi kontaminan oleh bakteri pada biofilm.	46
Gambar 2. 10 Proses adsorpsi pada biofilter.....	46
Gambar 2. 11 Aliran kontaminan udara dalam biofilter	47
Gambar 2. 12 Model gas transfer.....	47
Gambar 2. 13 Jalur Metabolisme Nitrogen	54
Gambar 2. 14 <i>Mapping State of The Art Biofilter</i>	56
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian Secara Umum.....	64
Gambar 3. 2 Diagram Skematik Desain Biofilter Skala Laboratorium	66
Gambar 3. 3 Diagram Prosedur Pengomposan	69
Gambar 3. 4 Skema prosedur preparasi kompos yang sudah jadi sebelum biofiltrasi dilakukan	70
Gambar 3. 5 Skema Uji Kebocoran Alat dan Uji Blangko (rute kanan).....	71
Gambar 3. 6 Diagram alir prosedur kalibrasi laju alir	73
Gambar 3. 7 Diagram alir prosedur pengoperasian GC.....	76
Gambar 3. 8 Diagram alir prosedur sterilisasi alat.....	78
Gambar 3. 9 Diagram alir prosedur sterilisasi bahan.....	78
Gambar 4. 1 Hasil perancangan alat biofilter.....	81
Gambar 4. 2 Proses pengeringan kompos dengan kondisi T= 27 ^o C	82
Gambar 4. 3 Kompos sebagai medium filter	83
Gambar 4. 4 Uji Kebocoran dan Uji Blangko Biofilter	84
Gambar 4. 5 Kalibrasi Flowmeter	85
Gambar 4. 6 Sampel Grafik yang Terdeteksi pada (a) Gas N ₂ O (b) Udara Bebas oleh GC	87
Gambar 4. 7 Hasil Kalibrasi N ₂ O.....	88
Gambar 4. 8 Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N ₂ O	89
Gambar 4. 9 Profil Variasi Laju Alir Terhadap Reduksi N ₂ O	90

Gambar 4. 10 Perbandingan Efisiensi Reduksi pada Uji Variasi Laju Alir Gas N ₂ O.....	91
Gambar 4. 11 Grafik <i>Elimination Capacity</i> (EC) terhadap variasi <i>Inlet Loading</i> (IL)	92
Gambar 4. 12 Grafik Variasi Kandungan Air dalam Kompos Terhadap.....	94
Gambar 4. 13 Profil Pengaruh Penambahan Air 60% (w/w) terhadap Konsentrasi N ₂ O.....	95
Gambar 4. 14 Efisiensi Reduksi pada Uji Variasi Kandungan Air pada Kompos	96
Gambar 4. 15 Profil Penambahan Nutrisi (Alami dan Sintetik) dalam Kompos yang Telah Diberi Nitrobakter Terhadap Efisiensi Reduksi N ₂ O.....	98
Gambar 4. 16 Perbandingan Tanpa dan Penggunaan nutrisi pada Kompos terhadap Efisiensi Reduksi N ₂ O	99
Gambar 4. 17 Medium Agar Sebelum Digunakan Uji TPC	101
Gambar 4. 18 Hasil Uji TPC pada Kompos Sebelum Biofiltrasi.....	102
Gambar 4. 19 Hasil Uji TPC pada Kompos Kering Setelah Biofiltrasi.....	102
Gambar 4. 20 Hasil Uji TPC pada Kompos dengan penambahan air 60%	103
Gambar 4. 21 Hasil Uji TPC pada Kompos yang diberi <i>Nitrobacter,sp</i> dan Nutrisi Sintetik (Q = 70,02 cc/menit; h = 50 cm)	103
Gambar 4. 22 Hasil Uji SEM pada Kompos Sebelum Biofiltrasi.....	105
Gambar 4. 23 Hasil Uji SEM pada Kompos Setelah Variasi Laju Alir.....	105
Gambar 4. 24 Hasil Uji SEM Setelah Variasi Kandungan Air pada Kompos.....	105



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Beberapa Proses Industri yang Menerapkan <i>Biological treatment</i>	29
Tabel 2. 2 Perbandingan design biofilter beserta keuntungannya.....	30
Tabel 2. 3 Organisme Yang Terdapat Pada Kompos.....	51
Tabel 2. 4 Komposisi Kotoran Ternak sebagai bahan dasar kompos	52
Tabel 2. 5 Nilai Optimal yang Mengontrol Proses Pengomposan.....	53
Tabel 2. 6 Rangkuman State of The Art Biofiltrasi	58
Tabel 3. 1 Rincian Peralatan yang Digunakan dalam Penelitian	66
Tabel 3. 2 Spesifikasi kromatografi gas dalam penelitian.....	76
Tabel 4. 1 Perbedaan Perancangan Desain Alat Biofilter	80
Tabel 4. 2 Hasil Uji TPC Sebelum Dan Setelah Biofiltrasi	102
Tabel 4. 3 Hasil Uji TPC pada Variasi Kandungan Air	104
Tabel 4. 4 Hasil Uji TPC pada Penambahan Nutrisi (Alami dan Sintetik).....	104



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Hasil Kalibrasi N ₂ O	113
Lampiran 2. Data Hasil Kalibrasi <i>Flowmeter</i>	114
Lampiran 3. Data Hasil Uji Kebocoran dan Uji Blangko	116
Lampiran 4. Data Hasil Uji Variasi Laju Alir.....	117
Lampiran 5. Pengolahan Data Perhitungan.....	121
Lampiran 6. Data Hasil Uji Variasi Kandungan Air pada Kompos.....	122
Lampiran 7. Profil Efisiensi Reduksi N ₂ O Saat Penambahan Kandungan Air Pada Awal-awal Percobaan.....	126
Lampiran 8. Data Hasil Perbandingan Biofiltrasi dengan Penambahan <i>Nitrobacter, sp</i> dan Nutrisi pada Kompos.....	127
Lampiran 9. Pengolahan Data Hasil <i>Total Plate Count</i> (TPC).....	130
Lampiran 10. Dokumentasi Eksperimen.....	138



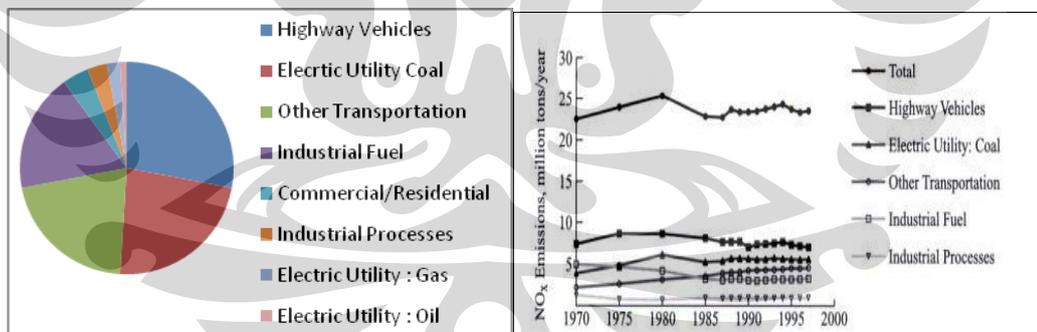
BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Polusi udara merupakan masalah yang cukup besar untuk ditangani. Banyak polusi yang berasal dari kendaraan bermotor yang menggunakan bahan bakar fosil yang mengandung zat pencemar, diantaranya partikulat, CO, CO₂, SO₂, VOCs, Pb dan NO_x. Nitrogen oksida (NO_x) merupakan emisi dari pembakaran bahan bakar fosil. Sekitar 10% pencemar udara setiap tahun adalah gas NO_x. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Klimont (1999) bahwa emisi NO_x akan selalu meningkat hingga mencapai 95% pada tahun 2030 nanti dimana sumber polutan ini sebagian besar dihasilkan dari aktivitas sehari-hari. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

Gambar 1. 1 dapat diketahui bahwa sebagian besar sumber NO_x berasal dari hasil transportasi, listrik dan kegiatan industri dimana aktivitas tersebut tidak dapat dihindari.



Gambar 1. 1 Sumber Penghasil Emisi NO_x dan Trend yang dihasilkan (Schnelle & Brown, 2001)

NO_x terdiri dari 95% nitrogen oksida dan 5% nitrogen dioksida. di mana kedua gas tersebut merupakan polutan berbahaya dan menyebabkan masalah lingkungan yang serius (Yang, 2007). Selain itu, emisi NO_x ini turut berkontribusi terhadap dampak negatif bagi atmosfer, seperti deposisi asam, penipisan ozon di stratosfer, dan perubahan iklim global.

Bahaya akibat emisi NO_x adalah timbulnya hujan asam akibat adanya NO_x yang bereaksi dengan senyawa organik volatil membentuk ozon dan oksida lainnya seperti *peroksiasetilnitrat* (PAN) di dalam *smog* fotokimia dan air hujan. Emisi NO_x yang berupa *smog* fotokimia berbahaya bagi kesehatan manusia karena menyebabkan kesulitan bernafas pada penderita asma, batuk-batuk, dan berbagai gangguan sistem pernafasan. Selain itu, dapat menurunkan visibilitas serta dapat pula meningkatkan penyakit jantung. Sedangkan hujan asam dapat membahayakan tanaman, pertanian, ekosistem perairan dan hutan. Hujan asam dapat mengalir memasuki danau dan sungai lalu melepaskan logam berat dari tanah serta mengubah komposisi kimia air. Hal ini pada akhirnya dapat menurunkan dan bahkan memusnahkan kehidupan air (udarakota.bappenas.go.id, 2008).

Salah satu jenis gas nitrogen oksida (NO_x) adalah N₂O (Dinitrogen Monoksida) yang disebut juga dengan gas ketawa. Tidak seperti gas nitrogen oksida lainnya, N₂O adalah salah satu gas yang memberi kontribusi terbesar pada pemanasan global. Meskipun sifat pemanasan radiasinya lebih rendah dibandingkan CO₂, namun dampaknya terhadap pemanasan global 310 kali lebih besar per massa CO₂. N₂O merupakan gas rumah kaca terbanyak keempat di atmosfer setelah CO₂, CH₄, dan uap air. Meskipun konsentrasinya relatif rendah, akan tetapi gas N₂O sangat sulit terurai di atmosfer.

Terjadinya pemanasan global berawal dari adanya perubahan iklim yang muncul karena dihasilkan polutan seperti N₂O. Perubahan iklim dapat terjadi karena panas matahari yang masuk ke bumi hanya sebagian kecil yang dapat dipantulkan kembali ke atmosfer, sementara sisanya terjebak di bumi akibat adanya lapisan gas rumah kaca di atmosfer. Terjebaknya panas matahari ini pada akhirnya menyebabkan bumi menjadi semakin panas. Oleh karena itu, tingginya produksi NO_x dalam hal ini N₂O sebagai gas polutan menuntut dilakukannya pencegahan emisi yang ditimbulkan.

Dalam rangka mengendalikan jumlah produksi polutan N₂O yang berasal dari emisi dari proses industri dan kegiatan transportasi hasil dari pembakaran bahan bakar fosil, terdapat berbagai teknologi yang dapat mengontrol emisi yang ditimbulkan pada polutan ini. Sebelumnya, teknologi konvensional seperti

Selective Catalytic Reduction (SCR) dan *Selective Non Catalytic Reduction* (SNCR) digunakan untuk mengontrol emisi NO_x pada kegiatan-kegiatan industri. Akan tetapi, kedua proses ini membutuhkan katalis, suhu yang tinggi, serta biaya instalasi dan operasi yang tinggi. Selain itu, cara ini menghasilkan produk buangan dalam jumlah cukup besar sehingga mengharuskan pemilik pabrik untuk membayar biaya pembersihan dan pembuangan. Adanya masalah ini memicu para peneliti untuk mengembangkan teknologi baru yang lebih murah dan efisien untuk menghilangkan NO_x dari gas buangan, yaitu dengan teknologi biofilter.

Biofilter merupakan teknologi baru yang lebih baik untuk efisiensi biaya dari teknologi sebelumnya dalam menghilangkan gas polutan dengan media filter berbahan alam. Teknologi ini memiliki banyak kelebihan diantaranya efisiensi yang tinggi dalam menghilangkan gas polutan, biaya operasi yang rendah dan tidak menghasilkan produk yang berbahaya pada lingkungan (Yang, 2007). Selain itu jika dibandingkan dengan metode fisika-kimia konvensional, metode biofilter ini mempunyai kelebihan yaitu stabil pada waktu yang relatif lama dan memiliki daya degradasi gas polutan yang tinggi.

Biofilter bekerja dengan cara mengalirkan aliran udara yang terkontaminasi melalui suatu media berpori dimana kontaminan dalam aliran udara akan teradsorpsi oleh biofilm dan kontaminan ini akan teroksidasi untuk menghasilkan biomassa, CO₂, H₂O, NO³⁻, dan SO₄²⁻. Zat-zat di udara terserap dan dikonsumsi oleh mikroorganisme. Selain itu, biofilter dapat mendukung pertumbuhan biologi dari mikroorganisme yang terdapat di dalam media berpori (Liu, 2004). Sebelumnya teknologi ini telah berhasil digunakan untuk menghilangkan bau dan *volatile organik compounds* (VOC) atau senyawa organik yang mudah menguap seperti benzene, stirena, fenol, dan alkena dari berbagai proses industri (Yang, 2007).

Dalam penelitian biofiltrasi ini, medium filter yang akan digunakan adalah kompos untuk mereduksi N₂O. Hal ini disebabkan kompos memiliki retensi air yang baik dan kandungan zat organik yang cocok. Selain itu, kompos juga merupakan media yang murah dan banyak tersedia. Penggunaan biofiltrasi untuk mengurangi emisi NO_x dapat dilakukan karena adanya aktivitas mikroorganisme seperti proses nitrifikasi dan denitrifikasi yang ada pada kompos tersebut.

Pengaplikasian mekanisme denitrifikasi diawali oleh proses nitrifikasi untuk mengurangi kadar NO_x pada kondisi jumlah oksigen tertentu. Proses reduksi terjadi pada penyederhanaan urutan berikut ini: $NO_3^- \rightarrow NO_2^- \rightarrow NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$ (Barnes, 1994). Pada proses denitrifikasi, karbon organik bertindak sebagai donor elektron seperti asam asetat, metanol, dan sampah domestik (G. Bitton, 1994). Jadi, bakteri nitrifikasi dapat membantu menuju proses denitrifikasi dalam pembentukan gas nitrogen yang ramah lingkungan sehingga dapat mencegah dari bahaya yang ditimbulkan NO_x.

Sebelumnya, dalam penelitian yang dilakukan Yang (2007) juga telah melakukan biofiltrasi NO pada kolom biofilter dengan menggunakan medium filter berupa kompos memperoleh efisiensi reduksi NO sebesar 60% untuk kondisi aerobik dan 99% untuk kondisi anaerobik. Sementara itu, penelitian mengenai biofiltrasi N₂O dengan menggunakan medium filter berupa pupuk kandang juga telah dilakukan oleh Utami et.al (2008) dengan efisiensi reduksi gas N₂O yang dihasilkannya dapat mencapai 70.217% tanpa melakukan penambahan nutrisi dan dapat mencapai efisiensi reduksi tertinggi sebesar 91.49% pada ketinggian kolom biofilter sebesar 50 cm dan laju alir gas N₂O 200 cc/menit melalui penambahan nutrisi dengan sistem aliran sirkulasi selama 6 jam.

Berdasarkan uraian di atas, diharapkan penelitian ini dapat menghasilkan efisiensi reduksi N₂O yang lebih tinggi dengan menggunakan parameter-parameter yang telah dipilih dengan sistem aliran *batch* (sekali jalan) selama 9 jam. Parameter-parameter yang akan diteliti antara lain adalah pengaruh laju alir gas N₂O, dan pengaruh kandungan air di dalam kompos terhadap kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O, efek dari penambahan nutrisi baik alami maupun nutrisi sintetik pada kompos yang telah diberi mikroorganisme tambahan yaitu *nitrobacter, sp.* Penambahan *nitrobacter, sp* di dalam kompos bertujuan agar dapat terjadi proses nitrifikasi secara lebih baik sehingga konsentrasi N₂O yang melalui kompos akan lebih efektif terdegradasi. Disamping itu, untuk memaksimalkan kinerja mikroorganisme pada kompos dalam mendegradasi N₂O, dilakukan juga penambahan nutrisi yang bertujuan untuk meningkatkan jumlah mikroorganisme sehingga dapat mencapai efisiensi reduksi N₂O yang lebih baik.

1.2 Rumusan Masalah

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

- a. Bagaimana pengaruh variasi parameter operasi (Laju alir gas, dan kandungan air pada medium filter) terhadap efisiensi reduksi N_2O ?
- b. Bagaimana perbandingan penggunaan nutrisi alami (limbah cair) dan larutan nutrisi sintetik dalam meningkatkan jumlah bakteri di dalam medium filter terhadap efisiensi reduksi N_2O ?
- c. Bagaimana kemampuan biofilter dalam menurunkan konsentrasi gas N_2O berdasarkan penurunan konsentrasi maksimum yang dihasilkan ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah :

- a. Mengkaji pengaruh variasi parameter operasi (Laju alir gas, dan kandungan air pada medium filter) terhadap efisiensi reduksi N_2O .
- b. Mengkaji dan membandingkan pengaruh penambahan nutrisi alami dan sintetik terhadap efisiensi biofiltrasi.
- c. Menentukan kemampuan biofilter pada reduksi N_2O .

1.4 Batasan Masalah

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

- a. Penelitian dilakukan di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (RPKA) Departemen Teknik Kimia dan Laboratorium Bioproses Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia, Depok.
- b. Peralatan biofilter yang digunakan untuk penelitian merupakan peralatan dalam skala kecil.
- c. Gas NO_x yang digunakan adalah gas N_2O .
- d. Konsentrasi gas N_2O sebagai gas sampel adalah 15.000 ppm dalam udara.
- e. Tinggi dan diameter kolom biofilter berturut-turut adalah 120 cm dan 8 cm.

- f. Medium filter yang digunakan adalah kompos yang berbasis kotoran kambing.
- g. Nutrisi alami yang digunakan untuk penambahan bakteri pada medium filter adalah limbah peternakan yang berasal dari Kukusan Teknik UI.
- h. Bakteri yang digunakan adalah *Nitrobacter, sp.*

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari makalah ini adalah sebagai berikut :

▪ **BAB I. PENDAHULUAN**

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

▪ **BAB II. TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisikan studi literatur secara umum dan secara khusus mengenai hal-hal yang berkaitan dengan penelitian seperti pembuatan kompos dan polutan udara, biofiltrasi, serta jurnal-jurnal internasional yang terkait dengan biofilter.

▪ **BAB III. METODE 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 N_2O , uji kebocoran, uji blangko, uji kemampuan alat biofilter dalam mereduksi N_2O dengan variasi laju alir, kandungan air serta perbandingan penggunaan nutrisi alami dan sintetik.

▪ **BAB V. KESIMPULAN**

Berisikan kesimpulan dari hasil penelitian dan pembahasan.



BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Polusi Udara

Udara dimana di dalamnya terkandung sejumlah oksigen, merupakan komponen esensial bagi kehidupan, baik manusia maupun makhluk hidup lainnya. Udara merupakan campuran dari gas, yang terdiri dari sekitar 78% Nitrogen, 20% Oksigen, 0,93% Argon, 0,03% Karbon Dioksida (CO₂) dan sisanya terdiri dari Neon (Ne), Helium (He), Metana (CH₄) dan Hidrogen (H₂). Udara dikatakan "Normal" dan dapat mendukung kehidupan manusia apabila komposisinya seperti tersebut diatas. Sedangkan apabila terjadi penambahan gas-gas lain yang menimbulkan gangguan serta perubahan komposisi tersebut, maka dikatakan udara sudah mengalami pencemaran/ terpolusi.

Akibat aktivitas manusia udara seringkali menurun kualitasnya. Perubahan kualitas ini dapat berupa perubahan sifat-sifat fisis maupun sifat-sifat kimiawi. Perubahan kimiawi, dapat berupa pengurangan maupun penambahan salah satu komponen kimia yang terkandung dalam udara, yang lazim dikenal sebagai pencemaran udara. Kualitas udara yang dipergunakan untuk kehidupan tergantung dari lingkungannya. Kemungkinan di suatu tempat dijumpai debu yang bertebaran dimana-mana dan berbahaya bagi kesehatan. Demikian juga suatu kota yang terpolusi oleh asap kendaraan bermotor atau angkutan yang dapat menimbulkan gangguan kesehatan.

Polusi udara di kebanyakan kota di Asia Tenggara dan China memiliki peringkat teratas sebagai penyebab kematian dari 500.000 orang setiap tahun. Hal ini disampaikan oleh Michal Krzyzanowski, seorang spesialis kualitas udara pada Pusat Lingkungan WHO Eropa, di Bonn, Jerman (dizzproperty.blogspot.com, 2008).

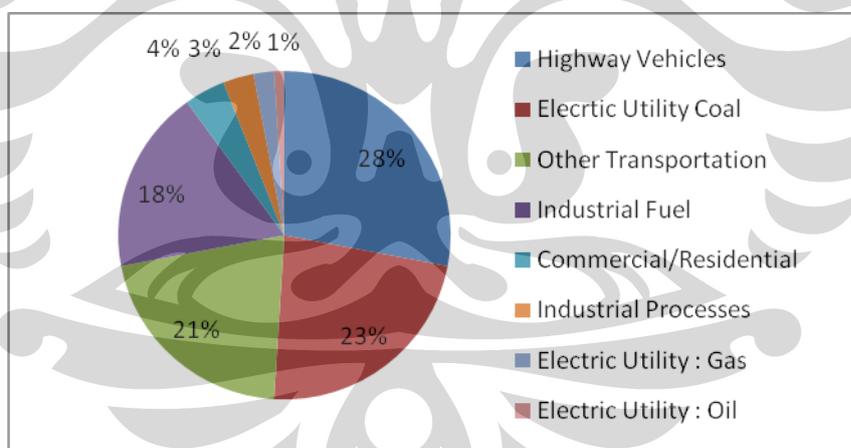
Menurut WHO di seluruh dunia, polusi udara menyebabkan kematian 800.000 orang setiap tahun. Berdasarkan studi Bank Dunia tahun 1994, pencemaran udara merupakan pembunuh kedua bagi anak balita di Jakarta, 14% bagi seluruh kematian balita seluruh Indonesia dan 6% bagi seluruh angka

kematian penduduk Indonesia. Jakarta sendiri adalah kota dengan kualitas udara terburuk ketiga di dunia (dizzproperty.blogspot.com, 2008).

Banyak polusi yang berasal dari kendaraan bermotor yang menggunakan bahan bakar fosil yang mengandung zat pencemar, diantaranya : partikulat, O_3 , NO_x , CO, CO_2 , SO_2 , VOCs, Pb dan NO_x . Dari berbagai zat pencemar tersebut NO_x merupakan salah satu zat pencemar hasil emisi dari proses industri dan kegiatan transportasi. di mana gas tersebut merupakan gas polutan berbahaya dan menyebabkan masalah lingkungan yang serius (Yang, 2007).

2.1.1 Nitrogen Oksida (NO_x)

Nitrogen oksida (NO_x) dikeluarkan dari berbagai proses industri dan aktivitas transportasi. NO_x terdiri dari sekitar 95% oksida nitrat dan sekitar 5% nitrogen dioksida, dimana keduanya merupakan polutan udara yang beracun dan dapat mengakibatkan permasalahan yang serius pada lingkungan hidup (Yang, 2007). Gambar di bawah ini menunjukkan sumber-sumber emisi NO_x :

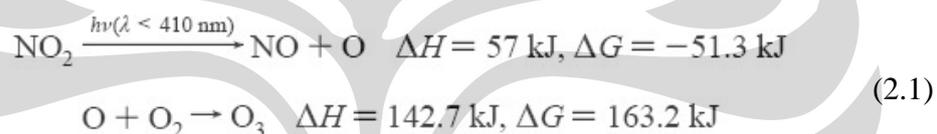


Gambar 2. 1 Presentase Sumber Emisi NO_x (Schnelle & Brown, 2000)

Gas buang NO_x banyak diemisikan dari industri listrik, utilitas, dan lain-lain. Kendaraan bermotor menghasilkan sekitar 28% dari total emisi NO_x di dunia (NoxRemoval.com). Sangatlah sulit untuk mengumpulkan NO_x apabila senyawa itu telah terdispersi dalam udara, sehingga NO_x hanya dapat disingkirkan secara efektif sebelum emisi (Yang, 2007).

Emisi NO_x merupakan problem yang serius untuk kedua masalah ini, yaitu kesehatan dan lingkungan. Emisi gas buang berupa NO_x adalah senyawa-senyawa pemicu (*precursor*) pembentukan ozon. Senyawa ozon di lapisan atmosfer bawah (troposfer bawah, pada ketinggian 0 – 2000 m) terbentuk akibat adanya reaksi fotokimia pada senyawa oksida nitrogen (NO_x) dengan bantuan sinar matahari. Oleh karena itu, potensi produksi ozon troposfer di daerah beriklim tropis seperti Indonesia sangat tinggi.

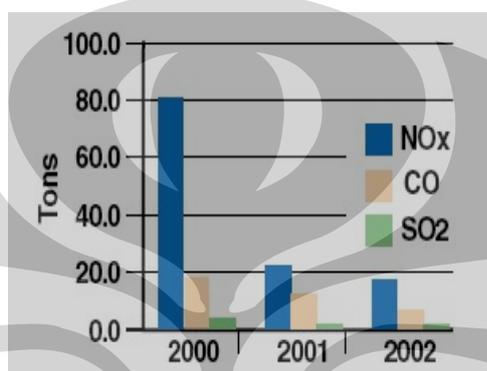
Disatu sisi, ozon pada atmosfer menguntungkan dalam mereduksi radiasi matahari yang membahayakan. Namun, disisi lain dapat menyebabkan iritasi pernapasan, penurunan fungsi paru-paru, serangan asma, bahkan kerusakan paru-paru secara permanen (Fernando, 2005). Ozon dapat diproduksi dengan adanya NO_x, dengan reaksi sebagai berikut (Fernando, 2005):



NO_x dalam bentuk nitrogen oksida adalah kontibutor hujan asam yang menyebabkan kerusakan struktur (*man-made structure*) dan dapat meningkatkan keasaman sumber air yang tidak baik untuk dikonsumsi. Hal ini dapat terjadi karena nitrogen oksida bereaksi dengan senyawa organik volatil membentuk ozon dan oksidan lainnya seperti *peroksiasetilnitrat* (PAN) di dalam *smog* fotokimia dan dengan air hujan menghasilkan asam nitrat dan menyebabkan hujan asam. *Smog* fotokimia berbahaya bagi kesehatan manusia karena menyebabkan kesulitan bernafas pada penderita asma, batuk-batuk dan berbagai gangguan sistem pernafasan, serta menurunkan visibilitas. Deposisi asam basah (hujan asam) dan kering (bila gas NO_x membentuk partikel aerosol nitrat dan terdeposisi ke permukaan bumi) dapat membahayakan tanaman, pertanian, ekosistem perairan dan hutan. Hujan asam dapat mengalir memasuki danau dan sungai lalu melepaskan logam berat dari tanah serta mengubah komposisi kimia air. Hal ini pada akhirnya dapat menurunkan dan bahkan memusnahkan kehidupan air.

Oksida nitrogen diproduksi terutama dari proses pembakaran bahan bakar fosil, seperti bensin, batubara, dan gas alam (udarakota.bappenas.go.id., 2008).

Banyaknya bahaya yang ditimbulkan akibat adanya emisi NO_x, menuntut banyak pihak untuk mencegah dan mengatasi masalah ini. Banyak langkah yang diambil dengan berbagai teknologi untuk mengeliminasi salah satu polutan ini. Hal ini dapat dilihat pada perkembangan emisi beberapa polutan khususnya NO_x selama tiga tahun.



Gambar 2. 2 Perkembangan emisi NO_x di The Brownsville PUB,USA. (Bruciak, 2008)

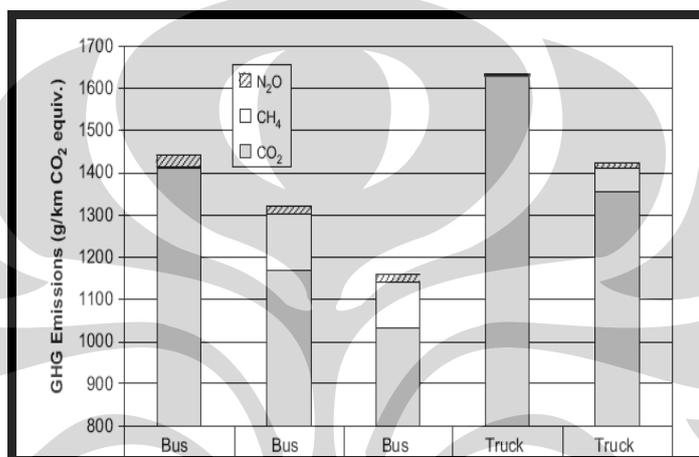
Dari Gambar 2. 2 diatas dapat dilihat dari tahun ketahun emisi NO_x menurun secara signifikan setelah dilakukan pengontrolan khusus terhadap emisi dari polutan NO_x ini dengan berbagai teknologi.

2.1.2 Dinitrogen Monoksida (N₂O)

Dinitrogen Monoksida (N₂O), yang juga dikenal dengan sebutan gas tawa karena efek euforia yang ditimbulkan ketika menghirupnya, merupakan gas anestetik lemah yang digunakan dalam pembedahan dan kedokteran gigi. Gas ini pertama kali dihasilkan pada tahun 1775 oleh Joseph Priestley. Gas dinitrogen monoksida ini juga kadang digunakan dalam dunia automotif sebagai penambah kecepatan dan digunakan pula dalam penyelaman untuk mempersiapkan para penyelam terhadap efek *nitrogen narcosis*.

N₂O merupakan gas rumah kaca terbanyak keempat di atmosfer setelah CO₂, CH₄, dan uap air. Gas N₂O sangat sulit terurai di atmosfer dan diperkirakan mempunyai waktu tinggal di atmosfer sekitar 170 tahun. Selain itu, N₂O juga

merupakan salah satu gas yang memberi kontribusi terbesar pada pemanasan global. Dampak gas rumah kaca terhadap pemanasan global sangat bervariasi. Seperti yang dijelaskan pada Bab 1, bahwa N_2O memiliki potensi penyebab gas rumah kaca 310 kali lipat dibandingkan CO_2 dimana sebagian besar gas polutan N_2O berasal dari hasil pembakaran. Berikut ini dapat kita lihat polusi gas rumah kaca yang dihasilkan dari hasil pembakaran pada alat transportasi berdasarkan GHG (*Green House Gas*) dengan tolak ukur CO_2 .



Gambar 2. 3 Perbandingan emisi gas rumah kaca pada hasil pembakaran transportasi (Graham, Rideout, Rosenblatt & Hendren 2008)

Dari gambar grafik diatas dilihat N_2O adalah polutan yang paling dominan yang dihasilkan dari proses pembakaran transportasi. Seperti telah disebutkan sebelumnya, dampak dari gas N_2O ini juga memberikan dampak terhadap pemanasan global secara tidak langsung melalui kontribusi terhadap produksi ozon troposferik pada pembentukan *smog*.

2.2 Teknologi Reduksi Reduksi NO_x

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

2.2.1 Teknologi Pra Pembakaran

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

2.2.2 Teknologi Pasca Pembakaran

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

1. *Selective Non Catalytic Reduction* (SNCR)

Proses non katalitik ini termasuk injeksi nitrogen dalam bentuk senyawa amonia (NH_3) atau urea (NH_2CONH_2) pada suatu daerah di mana suhu gas berada dalam range 1600°F hingga 2100°F . Suhu window tergantung dari apakah yang digunakan adalah amonia atau urea. Pada rentangan suhu ini, amonia atau urea diionisasi dan bereaksi terhadap NO_x dalam wujud oksigen untuk membentuk molekular nitrogen, karbon dioksida atau air. Reduksi NO_x dengan teknologi ini memiliki efisiensi antara 50% hingga 70% (Holland, 2000).

2. *Selective Catalytic Reduction* (SCR)

Aplikasi dari sistem SCR di Amerika Serikat berkembang pada dekade 1990. SCR telah menjadi metode yang banyak digunakan oleh sistem utilitas dalam reduksi NO_x . Proses teknologi ini telah diaplikasikan ke dalam sistem boiler dan memiliki efisiensi pengurangan NO_x antara 90% hingga 94%. Teknologi ini dapat beroperasi pada jangkauan suhu yang luas antara 300°F hingga 1100°F (Holland, 2000).

2.3 Teknologi Reduksi Biologis

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

Kontaminan udara harus *biodegradable* dan tidak beracun untuk didegradasi secara biologis agar memperoleh hasil yang maksimal. Perlakuan secara biologis dalam menghilangkan udara yang terkontaminasi lebih mudah untuk senyawa yang memiliki berat molekul rendah, dan tingkat kelarutan yang tinggi dalam senyawa organik dengan struktur ikatan yang simpel. Senyawa yang memiliki struktur ikatan yang kompleks umumnya membutuhkan energi yang lebih besar untuk didegradasi dan energi ini tidak selalu dapat disediakan oleh mikroba. Sehingga, degradasi akan sedikit atau tidak sama sekali terjadi pada senyawa tersebut. Senyawa organik seperti alkohol, aldehid, keton, dan beberapa senyawa aromatik sederhana sangat baik untuk dibiodegradasi. Senyawa inorganik seperti H₂S, Amonia dan NO_x juga dapat dibiodegradasi dengan baik. Untuk senyawa antropogenik tertentu tidak dapat dibiodegradasi dikarenakan mikroorganisme tidak dapat memproses enzim yang dibutuhkan untuk menghancurkan ikatan struktur pada senyawa secara efektif. Senyawa-senyawa yang dapat diberi perlakuan secara biologis dapat berasal dari berbagai sumber. Beberapa proses industri yang dapat menggunakan teknologi mengontrol polusi udara secara biologis dengan efektif dapat dilihat pada table berikut:

Tabel 2. 1 Beberapa Proses Industri yang Menerapkan *Biological treatment* (Deviny et al., 1999)

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

2.4 Biofilter

Biofilter telah banyak digunakan di negara-negara Eropa, Amerika dan Jepang, karena memiliki efektivitas yang tinggi untuk mengolah emisi gas buang dari berbagai industri dengan volum gas yang besar namun mempunyai konsentrasi polutan yang rendah.

Biofilter dapat didefinisikan sebagai reaktor biokimia *fixed-bed* dimana terdapat mikroorganisme di permukaan medium filter untuk mengkonsumsi udara yang terserap. Prinsip dari biofiltrasi relatif sederhana, aliran udara yang terkontaminasi dialirkan melalui suatu unggun berpori di mana suatu kultur mikroorganisme pengurai polutan diimobilisasi. Udara berbau dan terkontaminasi kemudian melewati *porous packed bed*, dan zat kontaminan dalam aliran udara diadsorpsi oleh biofilm, kemudian zat kontaminan tersebut dioksidasi untuk menghasilkan biomassa, CO₂, H₂O, NO₃⁻ dan SO₄²⁻ (Schlegelmilch, et.al., 2005)

Biofiltrasi merupakan suatu teknologi berkembang yang menawarkan beberapa keuntungan dibandingkan dengan metode tradisional dalam mengontrol zat polutan udara dalam konsentrasi rendah. Biofilter ini memberikan porositas yang tinggi, memiliki ketersediaan nutrisi yang tinggi, kapasitas retensi dengan kelembaban yang tinggi, dan kapasitas *buffering* yang tinggi guna mempertahankan pertumbuhan mikrobial pada matriks support yang diinginkan. Efektivitas biofilter tergantung pada aktivitas populasi mikroba dan jenis

pengayaan (*enrichment*) yang dilakukan selama tahap inokulasi. Selain itu, jenis matriks support juga mempengaruhi stabilitas jangka panjang dan kinerja dari biofilter. Medium filter yang paling sering digunakan dalam biofilter adalah *peat*, kompos, karbon teraktivasi, tanah, *heather*, serpihan kayu, dan batu lava.

Selain merupakan penghilang polutan yang sangat efisien, biofilter hanya memerlukan investasi modal dan biaya operasi yang rendah, memiliki kondisi operasional yang aman, serta konsumsi energi yang rendah (Govind, 1998). Biofilter juga tidak mengeluarkan produk samping yang tidak diinginkan dan dapat mengkonversi banyak senyawa organik dan anorganik ke dalam produk oksidasi yang tidak berbahaya dengan desain alat yang sederhana dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan.

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. 2 Perbandingan design biofilter beserta keuntungannya (Devinny et al., 1999)

Jenis- jenis Tipe Biofilter	Keuntungan
Biofilter terbuka (kompos)	Simpel, Biaya modal yang rendah
Biofilter terbuka dengan peningkatan kualitas medium filter	Memiliki ketahanan terhadap pematatan medium filter, <i>pressure drop</i> 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

2.4.1 Terminologi Biofilter

Untuk mendeskripsikan mekanisme mengenai biofiltrasi secara jelas, terminologi umum yang berhubungan dengan biofilter akan dijelaskan pada

bagian ini. Hal ini dikarenakan biofiltrasi banyak berkaitan dengan beberapa hal, seperti proses kimia, mikrobiologi, fisika, matematik dan banyak terminologi yang terkait di dalamnya. 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.

$$EBRT = \frac{V}{Q} \dots\dots\dots(2.2)$$

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 panjang 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:

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

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

2.4.2 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 (Devinny 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.

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

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

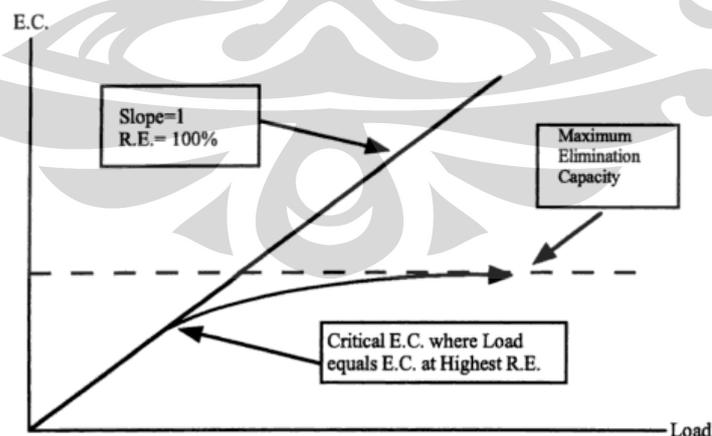
C_o = konsentrasi kontaminan yang keluar (ppmv, g m^{-3})

▪ **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:

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

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.



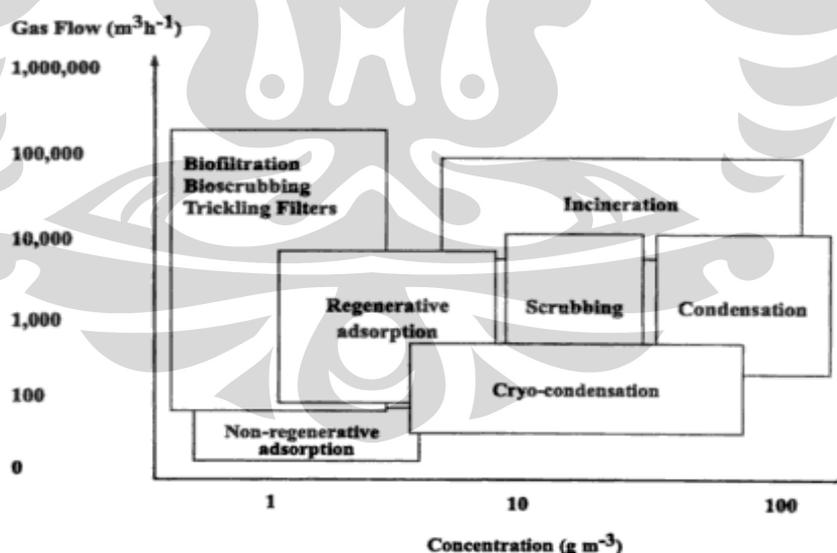
Gambar 2. 4 Tipe Kurva EC vs Loading (Deviny et al., 1999)

Dari Gambar 2. 4 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.

2.4.3 Keefektifan Teknologi dan Biaya

Tidak ada teknologi reduksi polutan yang seefektif dan seekonomis biofilter yang dapat diaplikasikan pada sebagian besar industry. Keefektifan teknologi dapat ditentukan oleh laju alir dan konsentrasi kontaminan khususnya pada keefektifan biaya. Biaya untuk teknologi reduksi limbah gas sangat bervariasi. Hal ini bergantung pada penerapan aplikasi yang disesuaikan, aliran kontaminan yang akan diberi perlakuan, material yang digunakan, sistem monitoring, dan lain-lain. Inilah yang membuat biaya yang diperlukan bervariasi dan lebih spesifik.

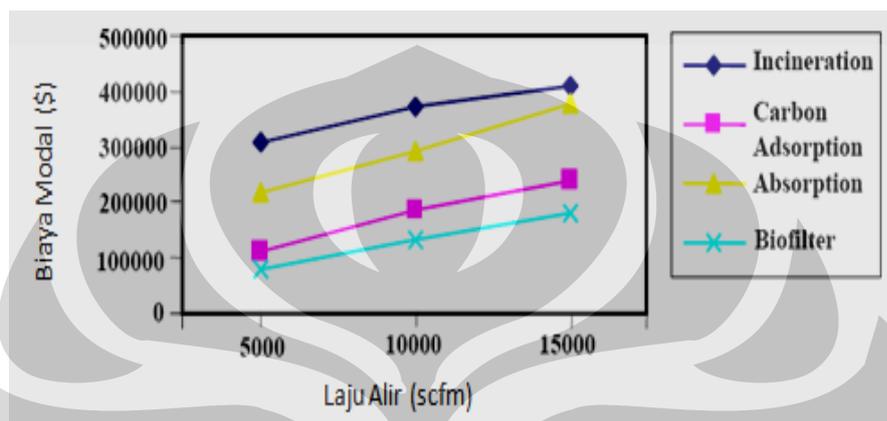
Biaya untuk teknologi pengolahan limbah polutan bermacam-macam dikarenakan prosesnya yang berbeda. Hal tersebut dapat dibandingkan dalam gambar berikut ini.



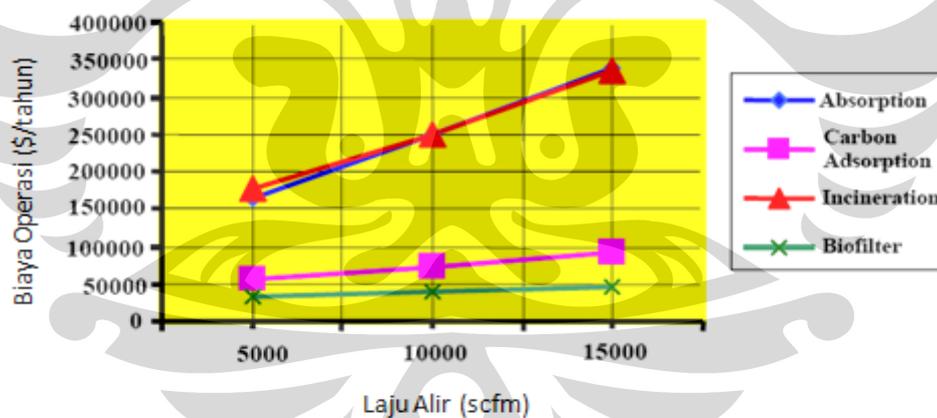
Gambar 2.5 Aplikasi berbagai teknologi polusi control berdasarkan laju alir dan konsentrasi kontaminan (Deviny et al., 1999).

Dari Gambar 2. 5 dapat dilihat bahwa teknologi biofilter memiliki cakupan yang luas dalam mereduksi polutan. Hal inilah yang menjadikan salah satu nilai positif penggunaan biofilter sebagai teknologi polusi kontrol.

Berdasarkan perbandingan dengan metode lain dalam penghilangan polutan udara, biofilter jauh lebih efisien dilihat dari segi biaya instalasi dan operasi. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar di bawah ini .



Gambar 2. 6 Perbandingan Biaya Modal Teknologi Reduksi NO_x (Govind, 1998)



Gambar 2. 7 Perbandingan Biaya Operasi Teknologi Reduksi NO_x (Govind, 1998)

Berdasarkan Gambar 2.6 dan 2.7 diatas dari empat metode teknologi reduksi gas polutan, seperti absorpsi, adsorpsi karbon, pembakaran, dan biofilter dapat disimpulkan bahwa metode reduksi gas polutan dengan biofilter merupakan cara paling efisien dari segi ekonomi.

2.4.4 Karakteristik Biofilter Ideal

Berikut ini adalah daftar yang dipertimbangkan untuk menghasilkan sebuah biofilter yang ideal untuk diaplikasikan (Pandey, 2004)

- **Kepadatan dan mudah mobilisasi**

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

- **Inert material konstruksi**

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

- **Biaya operasi rendah**

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

- **Keamanan dan Reliabilitas**

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

- **Sistem monitor**

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

- **Sistem kontrol**

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

2.4.5 Kelebihan dan Kekurangan Biofilter

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

Kelebihan biofiltrasi yaitu:

- a. 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.
- b. 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.
- c. 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).
- d. 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).
- e. Berbagai macam media, mikroba, dan kondisi operasi dapat digunakan

Kekurangan biofilter yaitu:

- a. Biofiltrasi tidak dapat secara sukses menghilangkan beberapa senyawa organik, terutama yang memiliki adsorpsi rendah atau laju degradasi rendah. Ini biasanya berlaku untuk VOC terklorinasi.
- b. Gas polutan dengan emisi senyawa kimia tinggi membutuhkan unit biofilter besar atau area terbuka untuk menginstalasi sistem biofiltrasi.
- c. Gas polutan dengan emisi yang sering berfluktuasi dapat menyebabkan kerusakan pada populasi mikroba biofilter dan kinerja keseluruhan.
- d. Adanya periode aklimasi pada populasi mikroba selama berminggu-minggu atau bahkan berbulan-bulan, terutama saat kontaminan adalah VOC.

- e. Biofilter yang mengandung konsentrasi mikroorganisme dalam jumlah yang tinggi dapat melepaskan mikroorganisme tersebut ke atmosfer (Martens et.al., 2001)

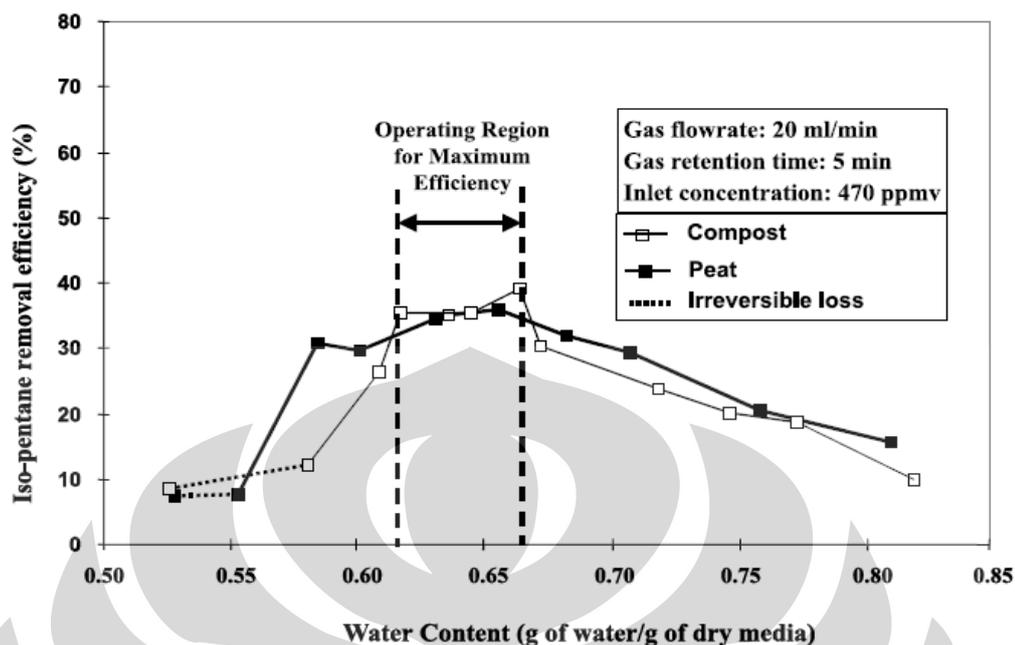
2.5 Parameter yang Mempengaruhi Biofiltrasi

Parameter yang penting untuk dikontrol dalam proses biofiltrasi antara lain adalah kelembaban, pH, nutrisi, temperatur, dan kandungan oksigen, medium filter, pressure drop, dan kedalaman medium. Parameter-parameter inilah yang akan menentukan efisiensi reduksi gas polutan yang dihasilkan pada proses biofiltrasi.

2.5.1 Kelembaban

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

Kelembaban optimal bervariasi terhadap medium filter yang berbeda, tergantung pada area permukaan medium dan porositas (Hodge et al., 1991). 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 masuk atau dengan menggunakan penyemprot air agar dapat langsung memberikan air ke dalam medium filter.



Gambar 2. 8 Efek kandungan air untuk reduksi iso-pentanadengan Biofilter (Shareefdeen, 2005)

Gambar 2. 8 menunjukkan efek kandungan air pada efisiensi biofilter antara kompos dan *peat* sebagai medium filter. Dari gambar di atas dapat dilihat, Efisiensi penghilangan gas polutan akan maksimal saat kandungan air berada pada rentang 0,62-0,67 g air/g berat kering medium filter. Saat kandungan air diatas 0,67 g air/g berat kering medium, efisiensi biofilter dari yang optimum akan berkurang perlahan-lahan.

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). Panas yang dibentuk pada reaksi biologis dan kelembaban pada polutan yang masuk dapat menentukan laju air yang hilang, dan dari sinilah dapat diketahui kebutuhan air akibat kelembaban yang berkurang (Morales et al. 2003).

2.5.2 pH

Sebagian besar mikroorganisme memilih rentang pH tertentu, sehingga perubahan pH dapat sangat mempengaruhi aktivitas mereka. Pengasaman medium

filter dapat menjadi masalah dalam pengolahan bahan kimia karena biodegradasi akan menghasilkan produk akhir asam, seperti pada H₂S dan senyawa terklorinasi (Devinny et al., 1999). Banyak bakteri memiliki pH optimum antara 6 dan 8, tetapi H₂S juga dapat teroksidasi pada pH asam oleh mikroorganisme seperti *Thiobacillus* (Chung et al., 1998). Namun demikian, pH dalam biofilter dapat dijaga melalui penambahan *buffer* ke dalam medium filter pada saat memulai biofiltrasi, dan ketika *buffer* tersebut telah habis, maka medium filter diganti dengan yang baru.

2.5.3 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. Pembusukkan medium isian organik dapat menyediakan nutrisi utama tersebut. Meskipun demikian, jika isian kurang baik dalam beberapa nutrisi, maka mikroba akan berhenti tumbuh dan mati, seperti halnya pada medium sintetik *rockwool*. Medium ini tidak mengandung kebutuhan nutrisi yang sesuai, sehingga diperlukan adanya penambahan nutrisi secara terpisah selama operasi.

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

pada label penyubur) dapat ditambahkan melalui penggabungan penyubur agrikultural ke dalam medium filter. Kandungan nutrisi dari medium juga harus diperiksa secara periodik dengan mengumpulkan sampel untuk laboratorium dengan tujuan untuk analisis.

2.5.4 Temperatur

Temperatur merupakan salah satu variabel yang paling penting dalam menentukan laju pertumbuhan mikrobial dan jenis spesies dalam komunitas mikrobial (Wani et al., 1997). Untuk keberhasilan operasi, temperatur sistem dijaga tetap konstan. Temperatur biofilter terutama dipengaruhi oleh temperatur aliran udara masuk dan juga oleh reaksi biologi secara eksotermik di dalam 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). Baru-baru ini, beberapa studi mengenai operasi *thermophilic* (45-75°C) juga telah dilaporkan (Dhamwichukorn et al., 2001). Pada penelitian lainnya, Lehtomäki et al. (1992) menyelidiki dampak temperatur dingin (-18°C sampai 8°C) pada biofiltrasi senyawa fenolik dari produksi wol mineral. Sementara itu, Giggey et al. (1994) melaporkan bahwa biofilter yang mereduksi gas-gas belerang dan *terpenes* menunjukkan performa yang baik pada musim dingin dengan temperatur ambient di bawah 0°C bersama dengan salju. Namun, Shareefdeen et al. (2004) mencatat penurunan reduksi 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.

2.5.5 Kandungan Oksigen

Oksigen juga 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 tidak menjadi persoalan karena jumlahnya yang berlimpah pada aliran udara masuk dan relatif sedikit pada *biofilm*.

2.5.6 Medium filter

Medium filter sebagai medium filter merupakan parameter yang mempengaruhi kinerja biofilter. Penggunaan medium filter yang tepat dapat mencapai biodegradasi optimum pada kontaminan udara. Medium filter yang umum digunakan untuk aplikasi biofilter adalah kompos, peat, serbuk kayu, dll. (Shareefdeen & Singh, 2005)

Dalam metode biofilter, pemilihan medium filter sebagai tempat hidup mikroorganisme yang digunakan merupakan hal sangat penting untuk mendukung kehidupan mikroorganisme (Hirai et.al, 2001). Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam menentukan bahan pengisi biofilter adalah sebagai berikut :

- a. Kemampuan menyerap air untuk menjaga kelembaban lapisan *biofilm*.
- b. Porositas dan luas permukaan yang besar, baik untuk absorpsi kontaminan maupun untuk pertumbuhan mikroba.
- c. Kemampuan untuk menyerap nutrisi dan menyuplainya ketika dibutuhkan oleh mikroba serta pH yang tepat.
- d. Kemampuan menahan aliran udara (penurunan tekanan udara dan kekuatan angin yang dikeluarkan blower).
- e. Perubahan bentuk yang sedikit setelah digunakan untuk waktu tertentu.
- f. Material yang digunakan relatif murah.
- g. Karakteristik fisik, seperti kestabilan fisik dan mudah dalam penanganan.

2.5.7 Kedalaman Medium Filter

Kedalaman medium biofilter mempunyai rentang dari kurang dari 0,5 sampai 2 m. Kedalaman medium filter sekitar 0,5-1 m yang biasanya digunakan, dimana pada kedalaman ini waktu retensi yang dibutuhkan sangat cukup dengan luas area medium filter yang minimum. Beberapa manufaktur merekomendasikan untuk menggunakan sistem multi layer pada medium biofilter, karena kebutuhan akan luas area akan lebih kecil dengan laju loading yang tinggi (Leson and Winter, 1991). Apabila menggunakan kedalaman yang lebih tinggi untuk menghasilkan laju loding yang tinggi juga 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 *pressure drop* yang tinggi.

2.5.8 Pressure Drop

Pada biofilter, sintesis biomassa memudahkan untuk mengakumulasikan 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.

2.6 Mikrobiologi Pada Biofilter

Bohn (1992) memperkirakan populasi mikrobiologi pada biofilter sekitar 1 milyar mikroorganisme per gram material organik. Beberapa kelompok

mikroorganisme tersebut diketahui termasuk mikroorganisme pereduksi polutan udara pada biofilter, termasuk bakteri, *actinomyces* dan jamur (Ottengraf, 1987). Komposisi kelompok mikroba dan kondisi hidup mikroba tersebut tergantung pada kondisi fisika dan kimia pada medium filter. Keanekaragaman mikroorganisme tersebut adalah suatu fungsi dari komposisi aliran gas yang masuk dan medium filter yang digunakan. Medium filter alami seperti kompos mengandung jumlah jenis mikroorganisme yang cukup untuk 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.

Populasi mikroorganisme itu akan tumbuh dari energi (ATP) yang berasal dari transformasi polutan udara yang mengalir pada biofilter. Dengan kata lain, pertumbuhan mikroorganisme tersebut merupakan hasil dari metabolisme polutan. Adapun mineral yang dibutuhkan oleh mikroorganisme mengandung N, S, P, Ca, K, Na, Mg, Fe, Co, dan Zn (Shuler dan Kargi, 1992). Dimana unsur tersebut umumnya terkandung di dalam aliran polutan udara. Pada polutan yang mengandung sulfur, nitrogen atau halogen, beberapa elemen tersebut akan terakumulasi didalam sistem dan akan direduksi oleh mikroorganisme autotropi yang menurunkan energi dari oksidasi molekul dan menggunakan CO₂ sebagai sumber karbon.

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

1. Laju atau kapasitas degradasi maksimum (g/kg-medium kering/hari).
2. Kecepatan tercapainya kondisi aklimatisasi mikroba. Parameter ini akan menunjukkan kinerja dari bioavailabilitas konsorsium mikroba yang dikembangkan untuk mendegradasi gas polutan. Semakin cepat masa adaptasi mikroba (*log phase*), maka kinerja biofilter akan semakin baik.
3. Kemampuan mempertahankan rasio degradasi gas (efisiensi degradasi) dalam waktu yang lama. Rasio degradasi polutan gas dari biofilter umumnya di atas 95 % dan dapat bertahan dalam jangka waktu yang relatif lama.\

4. Kemampuan bahan pengisi dalam mempertahankan kondisi pH, temperatur dan kadar air. Kemampuan ini menggambarkan kinerja biofilter terhadap fluktuasi beban polutan gas yang tinggi, kurangnya humidifikasi dan masa tidak terpakainya biofilter akibat fluktuasi proses produksi pada industri.

2.7 Medium Biofilter

Kompos yang diisi sebagai medium filter pada biofiltrasi digunakan untuk mereduksi polutan udara. Medium kompos ini memiliki area permukaan yang tinggi untuk pertumbuhan mikroba dan adsorpsi polutan yang masuk. Selain itu kompos juga memiliki pressure drop yang rendah, komposisi nutrisi yang tinggi serta keanekaragaman populasi mikroba yang hidup di dalamnya dimana kandungan air / kelembaban pada kompos dapat terjaga. Kompos juga memiliki harga yang rendah juga biaya operasi dengan hasil reduksi yang efektif pada biofilter.

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.

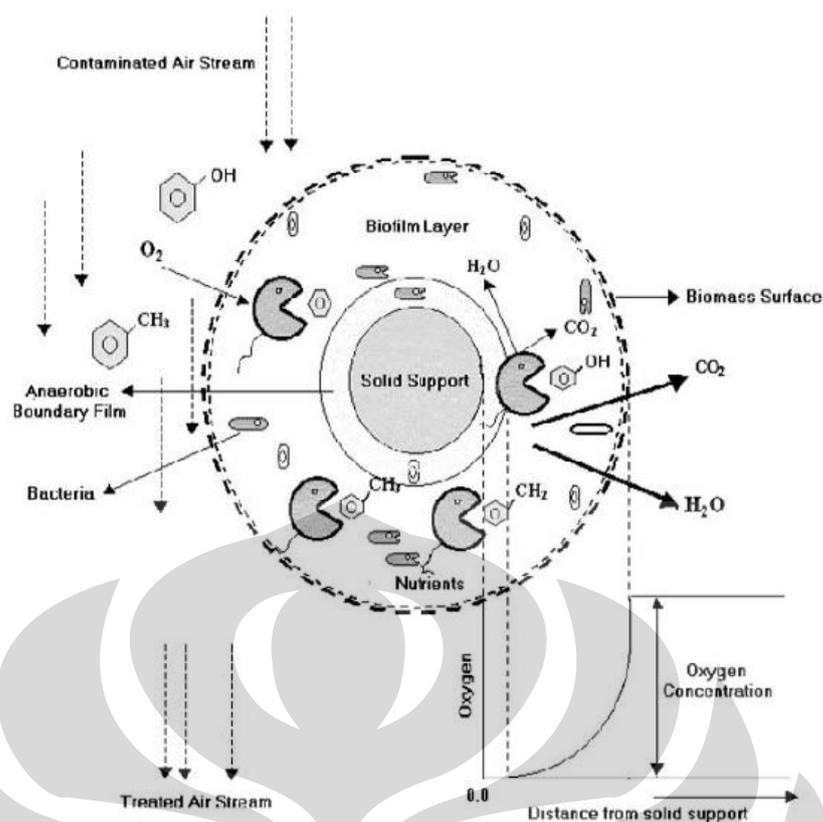
Medium biofilter harus memiliki daya adsorpsi yang baik, pH yang tepat, struktur dan poros yang baik, serta pepadatan pada medium yang rendah (Leson dan Winer, 1991). Beberapa kelompok bakteri berfungsi untuk mendegradasi polutan dalam biofilter. Umumnya kelompok bakteri yang terkandung dalam kompos 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)

Medium biofilter sangat besar pengaruhnya terhadap efek dari kinerja biofilter. Dilihat dari komposisi medium yang umumnya mengandung bahan organik, padatan inorganik alami, bahkan bahan sintetik. Komposisi setiap

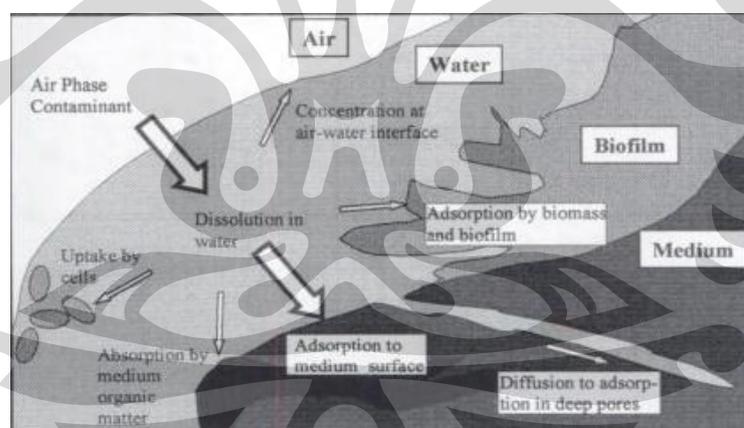
medium filter sangat beragam, hal inilah yang juga mempengaruhi setiap biofilter memiliki efisiensi reduksi kontaminan yang berbeda. Keanekaragaman ukuran partikel memiliki pengaruh yang dominan terhadap suatu karakteristik dari medium filter, seperti resistensi aliran kontaminan pada medium filter dan total area permukaan biofilm pada medium filter tersebut. Setiap partikel medium filter yang halus yang memiliki ratio antara luas permukaan dan volumenya rendah, bentuk yang kompleks dan internal mikroporos dapat menghasilkan luasnya permukaan area adsorpsi. Selain efek kinerja, penggunaan medium filter juga berpengaruh terhadap besar biaya yang dibutuhkan oleh pengaplikasian biofilter. Penggunaan medium filter alami sebagai packing material adalah salah satu faktor mendasar keberhasilan aplikasi suatu biofilter. Hal ini dikarenakan berpengaruh pada frekuensi penggantian medium filter yang akan menjadi pengaruh utama terhadap aktivitas bakteri dan pressure drop yang terjadi pada bioreaktor. Oleh karena itulah, medium yang alami akan berpengaruh untuk mendapatkan efisiensi reduksi dan biaya operasional yang lebih baik.

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

Pada penggunaan biofilter dengan medium kompos, kontaminan dari gas akan berdifusi ke dalam pori-pori partikel kompos, terlarut ke dalam lapisan biofilm, teradsorpsi pada fraksi organik dan inorganik dari kompos tersebut, kemudian terbiodegradasi akibat bakteri kompos aktif di dalamnya, serta terperangkap di sekitar partikel kompos, seperti terlihat pada Gambar 2. 9.



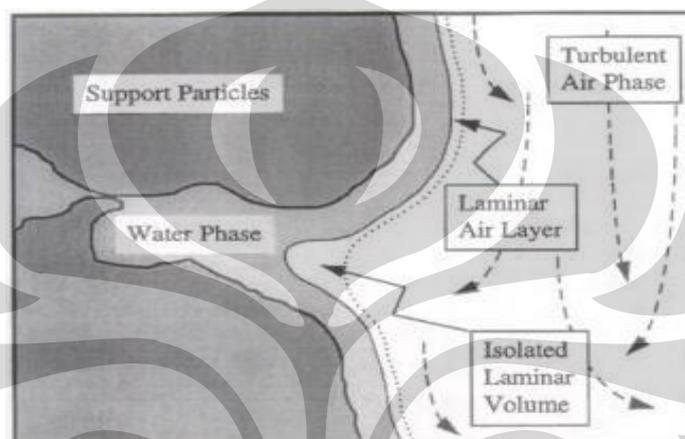
Gambar 2. 9 Skema proses biodegradasi kontaminan oleh bakteri pada biofilm. (Pandey, 2004)



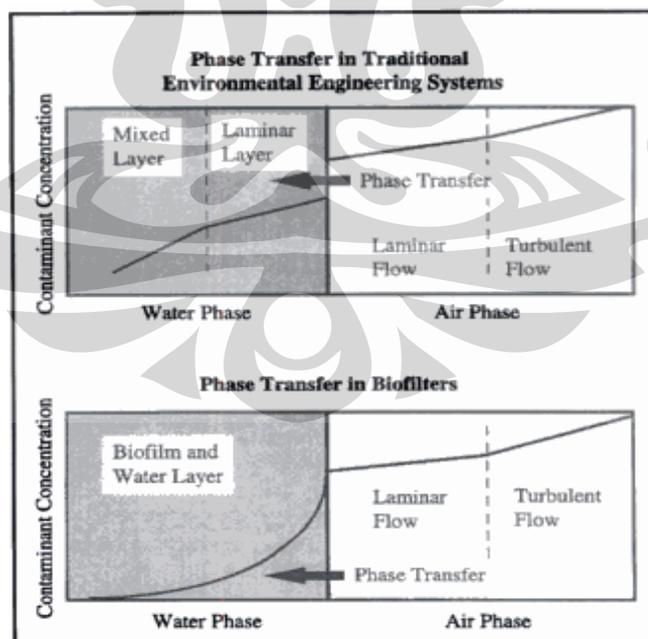
Gambar 2. 10 Proses adsorpsi pada biofilter (Devanny et.al, 1999)

Gambar 2. 10 menggambarkan proses yang terjadi dalam medium filter ketika dialiri kontaminan. Pada proses ini terjadi kontak yang terjadi antara fasa gas sebagai kontaminan, fasa cair dan biofilm sebagai permukaan medium filter dan fasa padat sebagai partikel padatan medium filter. Transformasi kontaminan dari fasa gas ke air dan padatan pada partikel kompos adalah langkah dasar dari perlakuan degradasi kontaminan dengan adsorpsi. Bagaimanapun proses ini

merupakan mekanisme yang kompleks. Molekul kontaminan dengan mudah 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 di atas. Disamping itu, di daerah cair inilah kontaminan mengalami *dissolution* dan teradsorpsi pada lapisan biofilm dan sebagian terabsorpsi oleh bahan medium organik. Beberapa kontaminan juga ada yang berdiffusi masuk ke bagian dalam dari poros medium filter untuk diadsorpsi.



Gambar 2. 11 Aliran kontaminan udara dalam biofilter (Deviny et.al, 1999)



Gambar 2. 12 Model gas transfer (Deviny et.al, 1999)

Pada Gambar 2. 11 dapat dilihat dimana aliran kontaminan akan menjadi laminar ketika mendekati permukaan biofilm. Ketika kontaminan telah mencapai daerah *biofilm* pada medium filter yang digunakan, maka akan terjadi proses degradasi secara maksimum dalam mereduksi konsentrasi kontaminan tersebut. Sedangkan Gambar 2. 12 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.

2.8 Kompos Sebagai Medium Filter

Pada metode biofilter, pemilihan medium filter sebagai substrat untuk tempat hidup dan pertumbuhan mikroba merupakan hal yang sangat penting untuk mendukung kehidupan dari mikroba yang digunakan. Material yang dapat digunakan sebagai medium biofilter yaitu kompos, gambut (*peat*), tanah, karbon aktif, serpihan atau kulit kayu (*bark*), serta perlite dan medium sintetik, dimana mikroba akan terimmobilisasi secara alami di dalam bahan pengisi dan selanjutnya membentuk lapisan tipis (*biofilm* atau *biolayer*).

Pada umumnya medium filter alami mengandung sejumlah nutrisi yang mencukupi untuk pertumbuhan mikroorganisme, sehingga penambahan nutrisi dan mineral tidak diperlukan. Tetapi untuk pemakaian biofilter dalam waktu yang relatif lama perlu ditambahkan nutrisi (nitrogen atau fosfor) secara manual untuk mempertahankan kelangsungan hidup mikroorganisme tersebut. Namun untuk medium filter berupa kompos tidak terlalu membutuhkan nutrisi karena kompos

telah memiliki sejumlah kandungan nutrisi berupa nitrogen organik dan mikroorganik lainnya dalam jumlah yang cukup banyak.

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).

2.8.1 Proses Pengomposan

Pengomposan didefinisikan sebagai suatu proses biokimia dimana bahan organik didekomposisi menjadi zat-zat seperti humus (kompos) oleh kelompok mikroorganisme yang berbeda pada kondisi yang dikontrol (Gaur, 1983 dan EPA, 1989). Kompos dibuat dari bahan organik yang berasal dari bermacam-macam sumber. Dengan demikian kompos merupakan sumber bahan organik dan nutrisi tanaman. Kemungkinan bahan dasar kompos mengandung selulose 15%-60%, hemiselulose 10-30%, lignin 5%-30%, protein 5%-40%, bahan mineral 3%-5%, disamping itu, terdapat bahan larut air panas dan dingin (gula, pati, asam amino, urea, garam ammonium) sebanyak 2%-30%, dan 1%-15% lemak larut eter dan alkohol, minyak, dan lilin (Sutanto, 2002)

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

1. Berwarna coklat tua hingga hitam.
2. Tidak larut dalam air, meskipun sebagian dari kompos dapat membentuk suspensi.
3. Sangat larut dalam pelarut alkali, natrium pirofosfat atau larutan amonium oksalat dengan menghasilkan ekstrak yang berwarna.
4. Memiliki rasio C/N 10-20 (tergantung pada bahan dan derajat humidifikasinya).
5. Secara biokimiawi tidak stabil, tetapi komposisinya berubah melalui aktivitas-aktivitas mikroorganisme, sepanjang kondisi lingkungannya sesuai (suhu dan kelembaban), yang dioksidasi menjadi garam-garam anorganik, karbondioksida dan air.

6. Menunjukkan kapasitas pemindahan kation dan absorpsi zat yang tinggi. Jika digunakan pada tanah, kompos dapat memberikan pengaruh positif bagi tanah dan pertumbuhan tanaman. Komposisi pupuk kompos meliputi N, P, K, Ca dan Mg. Selain itu, kompos mengandung *trace element* untuk pertumbuhan tanaman.

Komponen organik yang terkandung di dalam kompos mengalami proses dekomposisi di bawah kondisi mesofilik dan termofilik. Biokonversi terhadap bahan organik pada saat pengkomposan dilakukan oleh kelompok mikroorganisme heterofilik berbeda yang meliputi bakteri, kapang, protozoa dan *actinomycetes*. Mikroorganisme selulolitik dan lignolitik sangat berperan mendekomposisi komponen dari bahan organik yang terdegradasi secara lambat (Gaur, 1983).

Pengomposan dengan metode timbunan di permukaan tanah, lubang galian tanah, indoor menghasilkan bahan yang terhumidifikasi berwarna gelap setelah 3-4 bulan. Selama proses pengomposan berlangsung, perubahan secara kualitatif dan kuantitatif terjadi, pada tahap awal akibat perubahan lingkungan beberapa spesies flora menjadi aktif dan berkembang dalam waktu yang relatif singkat, dan kemudian hilang untuk memberikan kesempatan pada jenis lain untuk berkembang. Pada minggu kedua dan ketiga, kelompok fisiologi yang berperan aktif dalam proses pengomposan dapat diidentifikasi dengan komposisi:

- ✓ Bakteri (10^6 - 10^7)
- ✓ Bakteri amonifikasi (10^4)
- ✓ Bakteri proteolitik (10^4)
- ✓ Bakteri paktinolitik (10^3)
- ✓ Bakteri penambat nitrogen (10^3)

Mulai hari ke tujuh kelompok mikroba meningkat dan setelah hari ke 14 terjadi penurunan jumlah kelompok. Kemudian terjadi kenaikan populasi kembali selama minggu keempat. Mikroorganisme yang berperan adalah mikroorganisme selulolitik, lignolitik, dan fungi.

Tabel 2. 3 Organisme Yang Terdapat Pada Kompos (Balai Penelitian Bioteknologi Perkebunan Indonesia, Bogor; isroi@ipard.com)

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	

Proses pengomposan ada dua cara:

- **Pengomposan aerob**

Dalam sistem ini, kurang lebih 2/3 unsur karbon (C) menguap (menjadi CO₂) dan sisanya 1/3 bagian bereaksi dengan nitrogen dalam sel hidup. Selama proses pengomposan aerob tidak timbul bau busuk. Selama proses pengomposan berlangsung akan terjadi reaksi eksotermik sehingga timbul panas akibat pelepasan energi. Kenaikan temperatur dalam timbunan bahan organik menghasilkan temperatur yang menguntungkan mikroorganisme termofilik. Akan tetapi, apabila temperatur melampaui 65-70 oC, kegiatan mikroorganisme akan menurun karena kematian organism akibat panas yang tinggi (Sutanto, 2002).

- **Pengomposan anaerob**

Penguuraian bahan organik akan terjadi pada kondisi anaerob. Pertama kali, bakteri fakultatif penghasil asam menguraikan bahan organik menjadi asam lemak, aldehida, dll. Kemudian bakteri kelompok lain mengubah asam lemak menjadi metana, amoniak, CO₂, dan hidrogen. Dengan demikian oksigen juga diperlukan untuk proses dekomposisi anaerob dengan sumber senyawa kimia yang tidak terlarut oleh oksigen. Apabila dibandingkan dengan proses aerob yang melepaskan energi lebih besar (484-674 kcal/mol glukosa) hanya 26 kcal/mol glukosa yang dilepaskan pada kondisi anaerob.

Keberhasilan metode pengomposan sangat tergantung pada kesesuaian komposisi bahan dan perlakuan pada bahan dasar untuk berlangsungnya proses dekomposisi sangat tergantung pada karakteristik individu limbah dan perlakuan sanitasi. Beberapa kondisi yang perlu diperhatikan adalah nisbah hara dan kandungan air bahan dasar kompos, dapat diperbaiki melalui pencampuran berbagai jenis limbah. Kombinasi yang terbaik untuk pengomposan adalah kotoran ternak dan limbah pertanian. Beberapa karakteristik bahan organik dapat dilihat dalam berikut :

Tabel 2. 4 Komposisi Kotoran Ternak sebagai bahan dasar kompos (Sutanto, 2002).

Komposisi Kotoran Ternak				
Ternak	H ₂ O (%)	Senyawa Organik (%)	N (%)	P ₂ O ₅ (%)
Sapi perah	80	16	0.3	0.2
Kuda	73	22	0.5	0.25
Kerbau	81	12.7	0.25	0.18
Domba/kambing	64	31	0.7	0.4
Babi	78	17	0.5	0.4
Ayam	57	29	1.5	1.3

Proses dekomposisi alami dapat di percepat secara buatan dengan cara memperbaiki kondisi proses dekomposisi. Adapun faktor-faktor yang berperan dalam proses dekomposisi memiliki ringkasan kondisi dekomposisi optimum pada table berikut ini.

Tabel 2. 5 Nilai Optimal yang Mengontrol Proses Pengomposan (Sutanto, 2002).

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

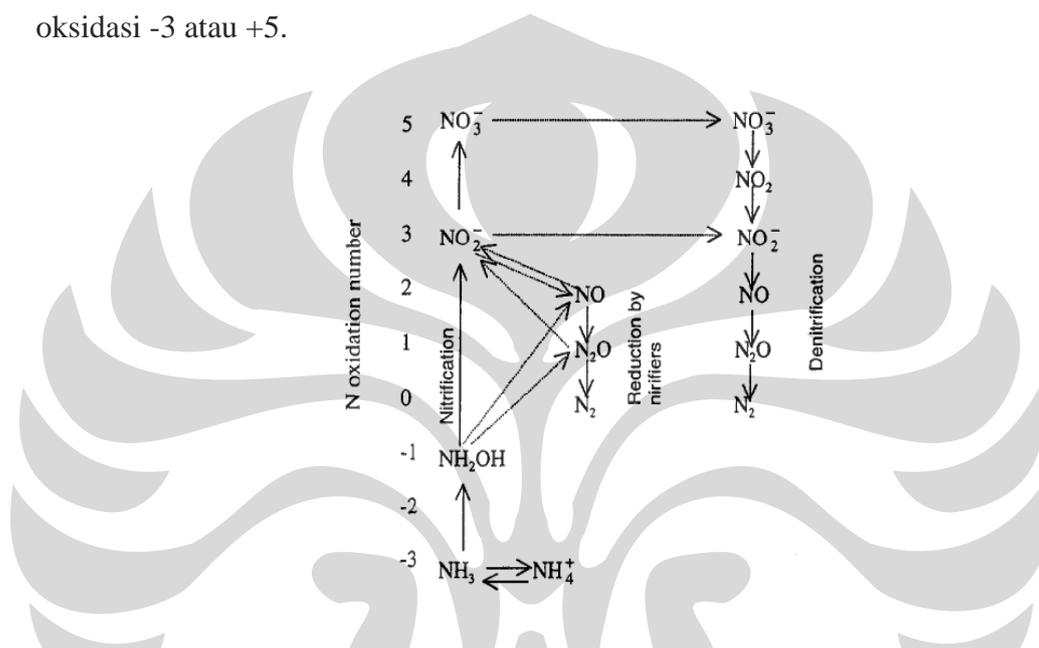
2.9 Metabolisme Nitrogen

Transformasi mikroba dari nitrogen ada 5 macam :

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

Nitrogen merupakan zat nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan dalam jumlah besar, dan pada basis kering merupakan elemen ketiga yang paling banyak

terdapat dalam jaringan. Sel hidup umumnya terdiri dari 14% nitrogen. Sebagian besar dari spesies bakteri mampu mengasimilasi nitrogen pada berbagai jangkauan bilangan oksidasi. Biasanya antara -3 (NH_3 , NH_4^+) dan +5 (NO_3^-). Nitrogen yang bergabung ke dalam senyawa sel seperti protein dan asam nukleat selalu berada dalam bilangan oksidasi -3. Jika nitrogen yang tersedia berada dalam bilangan oksidasi di atas -3, maka biasanya tereduksi melalui reaksi enzim katalitik. Sebagian besar nitrogen yang ditemukan di alam ditemukan dalam bilangan oksidasi -3 atau +5.



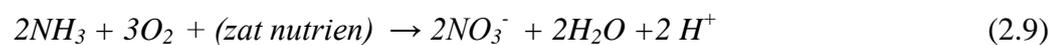
Gambar 2. 13 Jalur Metabolisme Nitrogen (Hudepohl, 1999)

2.9.1 Nitrifikasi

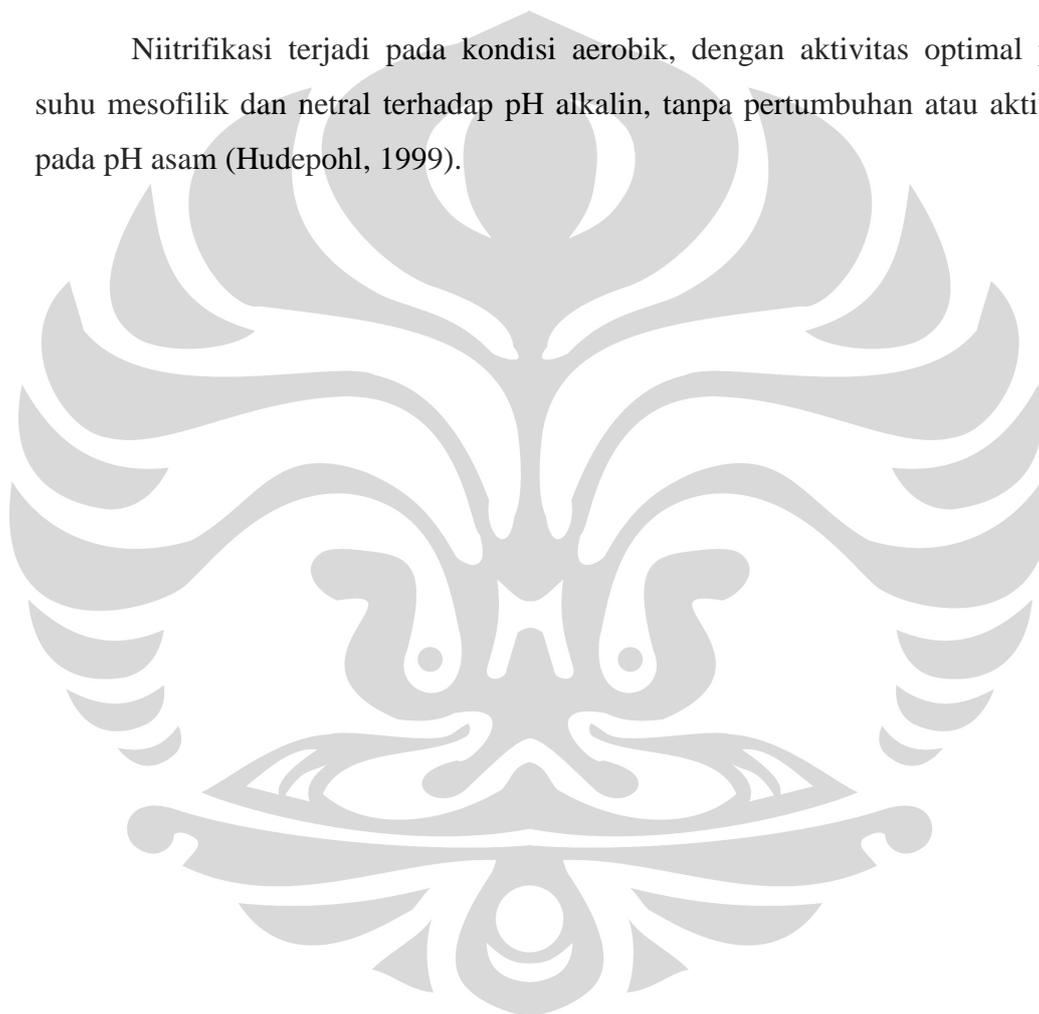
Kumpulan bakteri yang mampu mereduksi senyawa nitrogen (misalnya NH_3 , NO_2^-) sebagai sumber energi, dan CO_2 sebagai sumber karbon, dalam dua tahap proses yang dikenal sebagai nitrifikasi. Tahap pertama, oksidasi dari amonia menjadi ion nitrit, dibawa oleh 4 genus bakteri yang memiliki nama *Nitroso* sebagai bagian dari nama (misal *Nitrosomonas europaea*, *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 (2.7) dan (2.8) tidak diberikan karena variasi pada kondisi lingkungan. Akan tetapi produksi sel selalu rendah pada kedua reaksi dan pendekatan terbaik diberikan pada persamaan (2.9) dan (2.10).



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).



2.10 State of The Art Biofiltrasi

Penelitian biofilter telah berkembang di beberapa negara. Hal ini dapat kita lihat dari gambar peta perjalanan penelitian biofilter dibawah ini.

Emisi Gas

N₂O				PENELITIAN INI (batch), 2009 Utami, 2008 (Sirkulasi)
NO			Lee, 2001	Barnes, 1994 Yang, 2007
VOCs	Delhomenie, 2008		Zilli, 1993 Chen, 2008 Okuno, 1999	Liu, 2002 Liu, 2005
H₂S	Dumont, 2008		Hirai, 1990	Barona, 2005
Ammonia	Kim, 2007	Taghipour, 2007	Hong dan Park, 2004 Gabriel, 2007	Pagans, 2005, Liang, 2000
Emisi Bau			Chen, 2008	Pandey, 2006 Chung, 2007
	Sintetik	Sintetik+Alami	Alami	KOMPOS

Jenis Medium Filter

Gambar 2. 14 Mapping State of The Art Biofilter

Gambar 2.14 diatas menjelaskan perjalanan penelitian biofilter yang telah banyak mereduksi emisi gas dari emisi bau, ammonia, H₂S, VOCs, hingga NOx yang kini sedang dikembangkan. Penelitian Biofilter dalam mereduksi NOx, pertama kali dirintis oleh Bernes (1994) dengan judul “Removal of nitrogen oxides from gas streams using biofiltration”. Penelitian ini melakukan uji coba

feasibilitas dari kemampuan kompos sebagai medium biofilter dalam mereduksi NO_x . Gas sampel yang diujikan pada penelitian ini adalah NO , dengan hasil efisiensi reduksi sebesar $>90\%$. Penelitian selanjutnya adalah optimasi dari parameter operasi dalam meningkatkan kinerja biofilter untuk mereduksi N_2O . Penelitian ini dilakukan oleh Yang (2007) dengan memvariasikan parameter operasi dari ketinggian medium, konsentrasi gas polutan, kandungan oksigen, penambahan nutrisi untuk medium filter dengan efisiensi reduksi sebesar 60% untuk kondisi aerobik, dan 99% untuk kondisi anaerobik.

Biofiltrasi dinitrogen monoksida (N_2O) dengan kompos sebagai medium filter, pertama kali dilakukan di Departemen Teknik Kimia UI dengan optimasi parameter operasi untuk sistem aliran sirkulasi (Utami et al., 2008). Parameter operasi yang diuji adalah laju alir gas polutan, ketinggian medium filter dan penambahan nutrisi. Efisiensi reduksi yang dihasilkan pada penelitian biofilter ini adalah $67,86\%$ untuk variasi laju alir, $72,02\%$ untuk variasi ketinggian medium filter, dan $91,49\%$ untuk penambahan nutrisi pada medium filter. Sedangkan, sistem aliran *batch* (sekali jalan) untuk biofiltrasi N_2O akan dilakukan dalam penelitian ini. Berikut ini adalah Tabel 2.5 *rangkuman state of the art biofilter*.

Tabel 2. 6 Rangkuman State of The Art Biofiltrasi

Peneliti	Polutan	Medium Filter	Hasil	Efisiensi Tertinggi
Barnes, 1994	NO	Kompos	Biofilter dengan medium kompos dapat mereduksi salah satu NOx yaitu N ₂ O. Efisiensi reduksi yang di hasilkan >90%	>90%
Arnold et.al. (1997)	Stirene	berbasis gambut	kapasitas eliminasi (EC) sebesar 30 g m ⁻³ jam ⁻¹	98%
Chung dan Huang (1998)	amonia	imobilisasi <i>Nitrosomonas europeae</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	- loads : 0.33 sampai 16.25 mg NH ₃ kg media ⁻¹ jam ⁻¹ - empty bed residence time (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	- Reduksi Etil Asetat dan Isopropanol , <i>load</i> < 200 dan 120 g m ⁻³ medium jam ⁻¹ - EC _{maks} Toluena 20 g m ⁻³ medium jam ⁻¹	100% 40%-100%
Bina et.al (2004)	stirene	kompos yang dicampur sobekan plastik (75:25, v/v)	- 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 jangan 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)	- OFMSW (5:1), EC_{maks} 829 mg NH_3 m^{-3} biofilter jam^{-1}	98,8
			-OFMSW (1:1), EC_{maks} 7170 mg NH_3 m^{-3} biofilter jam^{-1}	95,9
			- DS, EC_{maks} 6580 mg NH_3 m^{-3} biofilter jam^{-1}	99,4
			- AP (hari 0-4), EC_{maks} 61300 mg NH_3 m^{-3} biofilter jam^{-1}	89,5
			- AP (hari (4-9), EC_{maks} 21700 mg NH_3 m^{-3} biofilter jam^{-1}	46,7
Torkian et.al (2005)	Trietilamin (TEA)	Kompos tersebut dan bulking agent serpihan kayu, 60:40 (v/v)	- 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 loading 90,5 g $m^{-3} jam^{-1}$ (23 ± 2 °C)	
Chan dan Zheng (2005)	etil asetat	media sintetik berbasis polivinil alkohol (PVA/ <i>beads</i> kompos, PVA/ <i>beads</i> gambut, PVA/kompos kotoran babi)	- 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 - CH₃)₃N - Dimetildisulfit - 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 	

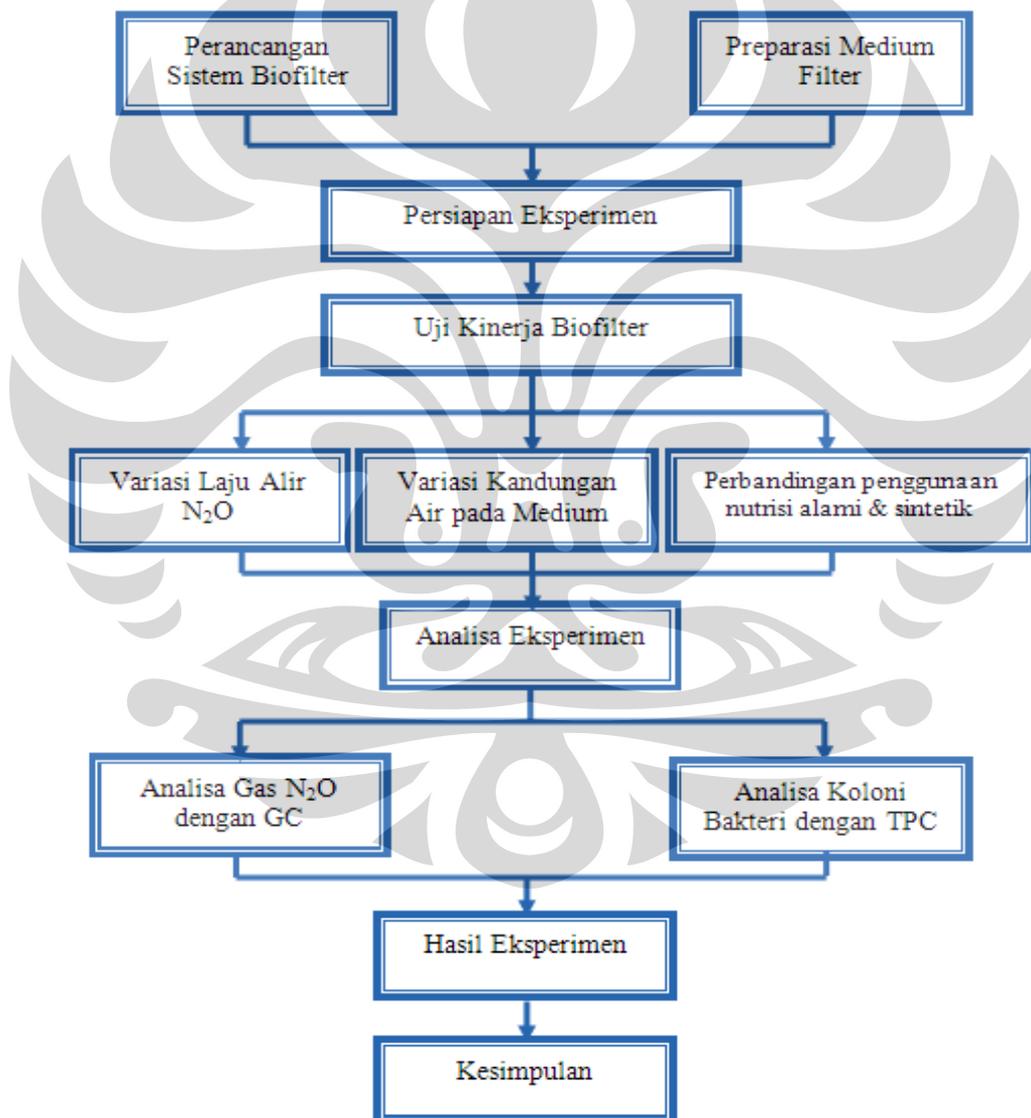
			anaerobik - Efisiensi Penghilangan NO anaerobik > aerobik	60% aerobik 99 % anaerobik
Gabriel et.al (2007)	amonia	medium filter serat kelapa	- EC_{maks} 12 g $[NH_3]$ m^{-3} jam^{-1} (transien) - EC_{maks} 33,3 g $[NH_3]$ m^{-3} jam^{-1} (steady)	80% 100%
Kim et.al (2007)	amonia	biomedia yang dientapsulasi dengan sodium alginat dan polivinil alkohol (PVA) membentuk PVA cryogels (kubus)	- <i>loading</i> amonia 4,5 g m^{-3} jam^{-1} - EC_{maks} yaitu 5,5 g m^{-3} h^{-1} pada laju <i>loading</i> 7,5 g m^{-3} jam^{-1}	100%
Chen et.al (2008)	VOCs (VFAs, fenolik, senyawa sulfur indolik)	kayu keras (HW) kayu pohon cedar (WC)	- 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 sintetis UP20 -kulit kayu pohon cemara -campuran pozzolan dan UP20 (80/20, v/v).	laju <i>loading</i> 10 g m ³ jam ⁻¹ - biofilter UP20 - kulit kayu pohon cemara - campuran pozzolan dan UP20	>93% 69% 74%.
Utami et.al (2008)	N ₂ O (sistem aliran sirkulasi)	serpihan kayu dan pupuk kandang	- efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada panjang biofilter tertinggi 50 cm - efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada laju alir gas N ₂ O tertinggi 200 cc/menit - Penambahan nutrisi menghasilkan efisiensi reduksi tertinggi	67,86%. 72,02%. 91,49%,
Riset saat ini (2009)	N ₂ O (sistem aliran <i>batch</i> selama 9 jam)	Pupuk Kompos (berbasis kotoran kambing)	Akan diteliti: - pengaruh laju alir gas N ₂ O - pengaruh penambahan kandungan air pada laju alir terbaik - pengaruh penambahan bakteri dan nutrisi (alami dan sintetis) pada kondisi kelembaban dan laju alir terbaik selama 9 jam	56,7% 70,13% 75,9%

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

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



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian Secara Umum

Tahap pertama penelitian adalah perancangan alat biofilter dengan desain sesuai kebutuhan eksperimen berdasarkan informasi dari jurnal-jurnal internasional mengenai biofiltrasi. Adapun sistem aliran biofilter pada penelitian ini adalah sistem *batch* (sekali jalan) dengan menggunakan *flowmeter* yang mempunyai kemampuan mengatur laju alir sekecil mungkin. Penggunaan alat *flowmeter* ini pada biofilter agar laju alir dari tabung gas N₂O dapat sekecil mungkin sehingga waktu tinggal N₂O pada medium filter menjadi lebih lama dan konsentrasi N₂O yang teradsorpsi dan terdegradasi oleh medium filter dapat lebih maksimal. Langkah selanjutnya pada tahap ini adalah preparasi kompos sebagai medium filter. Preparasi diawali dengan pembuatan kompos di Sekolah Alam, Ciganjur. Kemudian dilakukan langkah preparasi lanjutan yaitu mengeringkan kompos yang telah jadi. Pengeringan dilakukan pada suhu 27 °C dengan humiditas ruang 70% lalu dilakukan pengayakan guna mendapatkan partikel kompos yang seragam.

Tahap kedua adalah persiapan eksperimen. Tahapan ini berawal dari uji kebocoran alat yang bertujuan untuk memastikan konsentrasi N₂O berkurang karena proses adsorpsi dan degradasi, bukan karena kebocoran. Selanjutnya kalibrasi *flowmeter* dan volum gas N₂O untuk mengetahui laju alir gas sampel pada penelitian ini. Tujuan dari proses kalibrasi adalah untuk mendapatkan laju alir aktual (sesungguhnya) dari gas yang dialirkan ke dalam sistem Biofilter dan luas area N₂O pada volum sampel N₂O standar.

Tahap ketiga adalah eksperimen biofiltrasi dengan tujuan untuk menurunkan konsentrasi gas N₂O menggunakan biofilter dengan menginvestigasi faktor operasi seperti laju alir gas N₂O, pengaruh kandungan air pada medium filter terhadap kinerja biofilter serta perbandingan penggunaan nutrisi alami dan sintetik terhadap daya adsorpsi dan degradasi biofilter dengan menggunakan bakteri penitrifikasi.

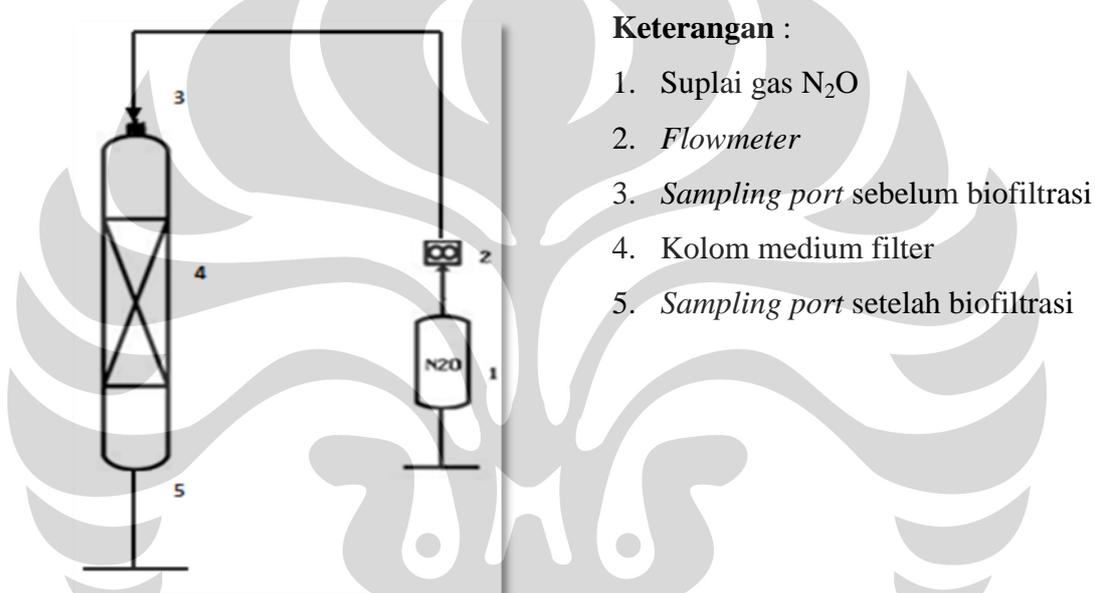
Tahap selanjutnya adalah analisis gas yang keluar dari medium filter dengan kromatografi gas (GC) dan analisis peningkatan jumlah mikroba pada kompos hasil biofiltrasi akan diteliti dengan metode TPC (*Total Plate Count*).

Setelah itu, hasil analisis akan dibahas dalam pembahasan untuk mencapai suatu kesimpulan.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat

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



Gambar 3. 2 Diagram Skematik Desain Biofilter Skala Laboratorium

Perincian keseluruhan peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

Tabel 3. 1 Rincian Peralatan yang Digunakan dalam Penelitian

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>Bubble soap</i>	Kalibrasi laju alir
5.	<i>Gas Chromatograph</i>	Menganalisis konsentrasi N ₂ O dalam sampel

	(GC)	
6.	<i>Syringe</i>	Mengambil gas sampel
7.	Cawan Petri	Perhitungan populasi/koloni bakteri
8.	Tabung Reaksi	Tempat pengenceran larutan
9.	Timbangan	Mengukur berat kompos dan air
10.	Autoklaf & oven	Sterilisasi alat dan bahan
11.	Bunsen	Sterilisasi dan perlakuan aseptis untuk TPC
12.	Transfer box	Ruang steril sampel TPC
13.	Inkubator	Tempat inkubasi bakteri
14.	<i>Hot Plate</i>	Memanaskan medium agar untuk TPC

3.2.2 Bahan

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

1. **Kompos**, digunakan sebagai medium filter sekaligus sebagai tempat hidup bakteri.
2. **Bakteri penitrifikasi (*nitrobacter, sp*)**, sebagai mikroba yang berfungsi untuk mendegradasi N_2O dalam gas sampel.
3. **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. Adapun kegunaannya sebagai model sampel gas NO_x
4. ***Aquadest***, sebagai penambah kandungan air dalam medium filter yang berfungsi untuk meningkatkan kelembaban sehingga bakteri pada medium filter dapat berkembang dengan lebih baik.
5. **Nutrient agar** sebagai medium agar untuk perhitungan bakteri.
6. **Larutan nutrisi** sebagai pemberi nutrisi tambahan untuk bakteri nitrifikasi. Larutan nutrisi ditambahkan *trace element* sebagai mikronutrient.

Komposisi larutan nutrisi terdiri dari (dalam 1 L H₂O) :

- K₂HPO₄ (0,4 g)
- KH₂PO₄ (0,15 g)
- NH₄Cl (0,3 g)
- MgSO₄·7H₂O (0,4 g)
- COONa (2,93 g)

Sedangkan komposisi larutan *trace element* terdiri dari (dalam 1L H₂O) :

- EDTA (50,0g)
- ZnSO₄·7H₂O (2,2 g)
- CaCl₂·2H₂O (5,5 g)
- MnCl₂·4H₂O (5,06 g)
- FeSO₄·7H₂O (5,0 g)
- (NH₄)₆Mo₇O₂₄·2H₂O (1,1 g)
- CuSO₄·5H₂O (1,57 g)
- CoCl₂·H₂O (1.61 g)

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Perancangan dan Instalasi Sistem Biofilter

Perancangan biofilter dilakukan guna mendapatkan desain bentuk biofilter untuk eksperimen. Pada saat persiapan alat, digunakan *flowmeter* dengan laju alir udara keluaran sekecil mungkin sehingga waktu tinggal N₂O pada medium filter menjadi lebih lama dan konsentrasi N₂O yang terserap oleh medium filter dapat lebih maksimal. Selain itu, desain dan pemilihan material dilakukan agar dapat mencegah kebocoran seefektif mungkin. Dengan menggunakan kolom biofilter dari bahan *acrylic* dan perpipaan dari *stainless steel* dimana memiliki sambungan yang seminimal mungkin dengan dua buah *sampling port* sebelum dan sesudah biofiltrasi untuk pengambilan sampel.

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 kotoran kambing sebagai pupuk kandang yang dicampur dengan sekam, sampah rumah tangga, *cocopeat* (sabut kelapa yang telah dikeringkan dan dihancurkan), gula pasir, kapur dan dedak.



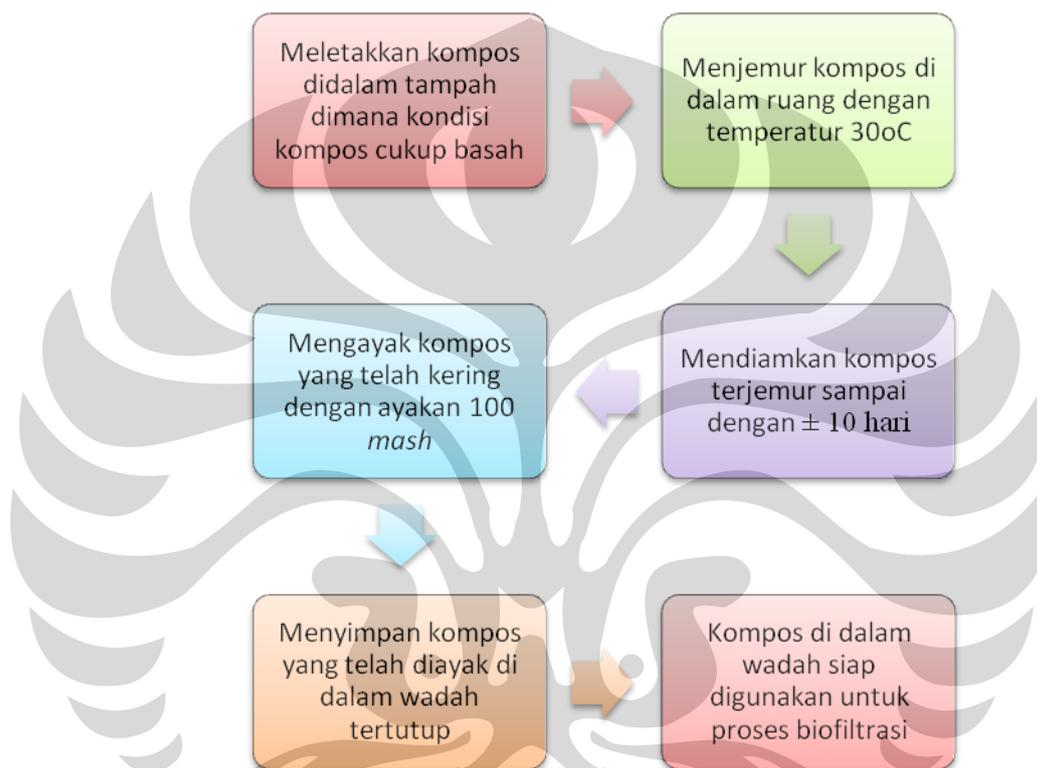
Gambar 3. 3 Diagram Prosedur Pengomposan

Adapun perincian prosedur pembuatan kompos sebagai berikut:

- a. Menyiapkan bahan-bahan yang digunakan berikut:
 - Pupuk kandang : bahan dasar pembuatan kompos
 - Sampah rumah tangga : bahan dasar organik untuk kompos
 - Sekam dan *cocopeat* : sebagai *bulking agent* kompos
 - Gula pasir : sebagai sumber glukosa
 - Kapur : meningkatkan pH pupuk
 - Dedak : sumber protein mikroba
- b. Membuat komposisi pembuatan kompos dari bahan-bahan diatas dengan rasio (kg) = 2 pupuk kandang: 2 sekam: 3 sampah rumah tangga : 2 *cocopeat* : 2 dedak : 1 gula pasir : ¼ kapur
- c. Mencampur komponen diatas di aduk dengan larutan EM4 (*Effective Microorganism*) 120 ml, dengan penambahan 10 liter air limbah. Penggunaan EM4 sebagai bioaktivator untuk mempercepat pengomposan
- d. Setelah dicampur, kompos disekap di dalam terpal selama 10 hari dengan dilakukan pengadukan setiap 3 hari dalam 10 hari tersebut

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

Berikut ini adalah diagram prosedur preparasi kompos yang sudah jadi sebelum dimasukkan ke dalam kolom biofilter untuk dilakukan proses biofiltrasi.



Gambar 3. 4 Skema prosedur preparasi kompos yang sudah jadi sebelum biofiltrasi dilakukan

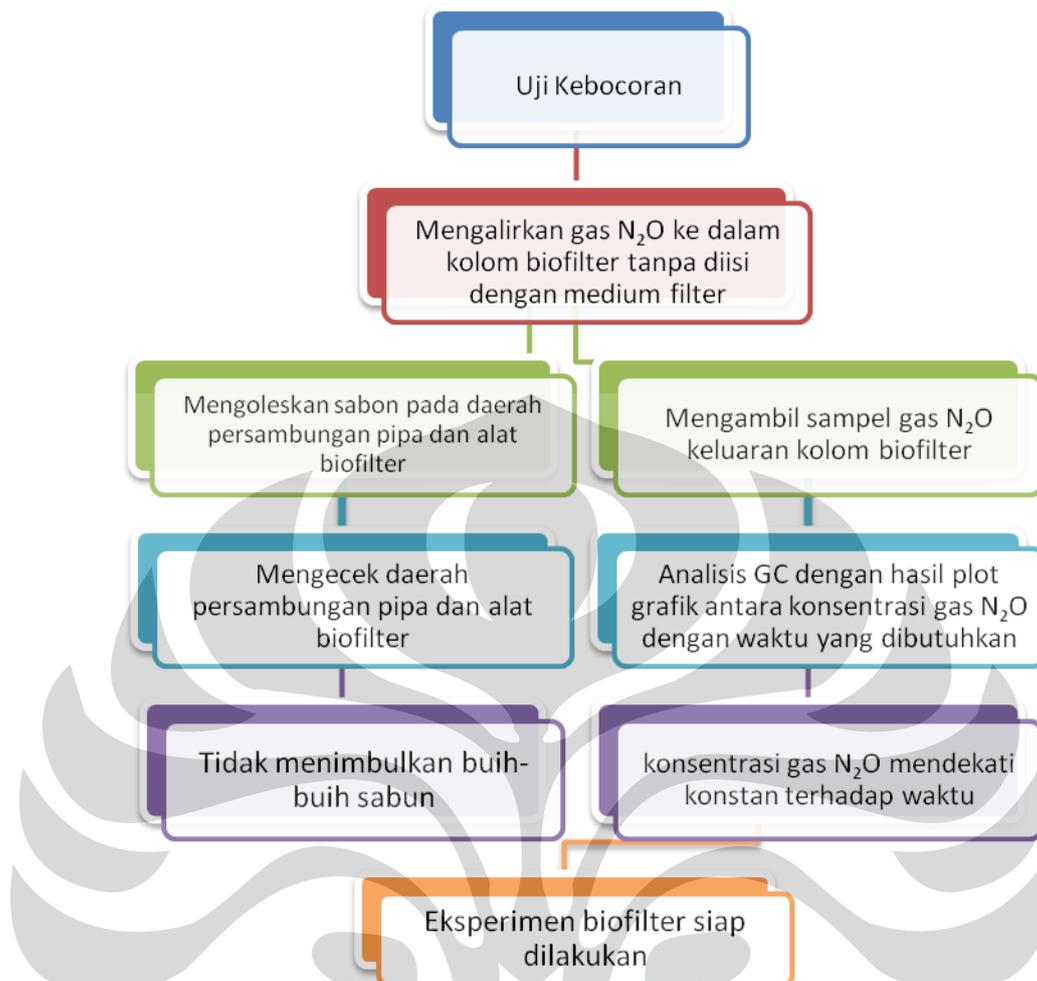
3.1 Persiapan Eksperimen

Pada tahapan ini dilakukan beberapa hal yang harus disiapkan. Hal-hal yang harus disiapkan sebelum eksperimen mencakup :

3.1.1 Uji Kebocoran Alat dan Uji Blangko

Uji kebocoran pada biofilter dilakukan untuk menghindari ketidakakuratan data percobaan sehingga diperoleh hasil yang baik.

Berikut adalah tahapan pengerjaan uji kebocoran alat biofilter :



Gambar 3. 5 Skema Uji Kebocoran Alat dan Uji Blangko (rute kanan)

Berikut ini adalah prosedur detail uji kebocoran :

Cara 1 :

- Meneteskan sabun pada daerah persambungan pipa
- Mengecek ada tidaknya gelembung buihbuih sabun, jika ada artinya terdapat kebocoran
- Mengecek sambungan antar perpipaan dan *sampling port* jika terdapat kebocoran
- Mengecek kembali dengan sabun jika tidak ada buih, maka alat siap digunakan

Cara 2 :

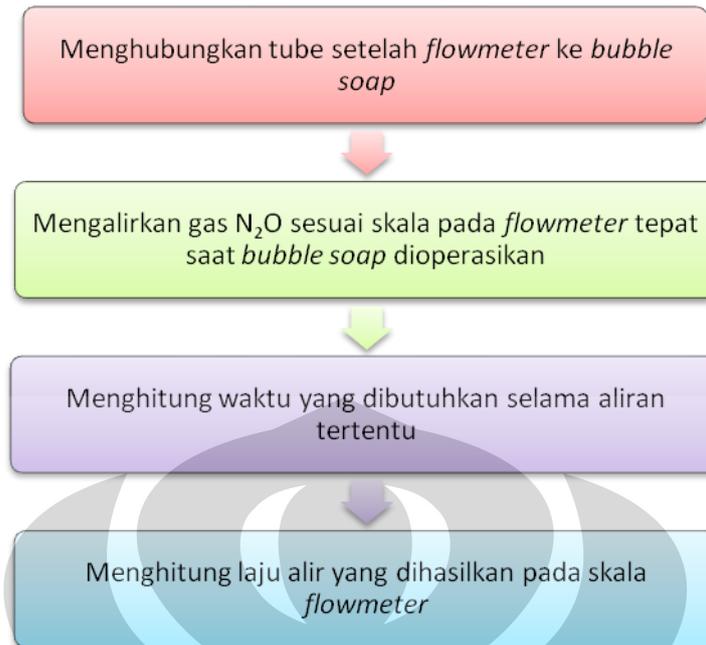
- Mengalirkan gas N_2O ke dalam kolom biofilter tanpa diisi dengan medium filter
- Mengambil sampel gas N_2O keluaran kolom biofilter
- Melakukan analisis pada kromatografi gas
- Mengeplot grafik antara konsentrasi gas N_2O dengan waktu yang dibutuhkan.
- Jika tidak terjadi kebocoran pada alat biofiltrasi ini, maka akan dihasilkan suatu grafik dimana konsentrasi gas N_2O mendekati konstan terhadap waktu.

Sedangkan uji blangko dilakukan untuk memastikan bahwa terjadinya penurunan luas area di bawah *peak* hasil analisis GC dikarenakan adanya biofiltrasi oleh kompos. Uji ini dilakukan tanpa menggunakan medium filter. Jika selama waktu tertentu tidak terjadi penurunan konsentrasi gas hasil analisis GC, maka penurunan konsentrasi saat memakai medium filter merupakan hasil dari proses biofiltrasi. Cara untuk uji blangko sama dengan cara 2 dalam menguji kebocoran alat.

3.1.2 Kalibrasi Laju Alir

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

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



Gambar 3. 6 Diagram alir prosedur kalibrasi laju alir

Prosedur kalibrasi *flowmeter* secara detail adalah sebagai berikut:

- Menghubungkan *tube* pada *flowmeter* dengan gelembung gas, *tube* bagian bawah dihubungkan ke *bubble soap* sedangkan *tube* bagian atas dihubungkan ke *flowmeter*.
- Mengalirkan gas N_2O sesuai dengan laju alir yang diset pada *flowmeter*, sambil menekan pipet pada botol gelembung gas tepat ketika gas dialirkan, sampai terlihat ada gelembung sabun yang berjalan di sepanjang botol
- Menghitung dan mencatat waktu yang dibutuhkan gelembung sabun untuk mencapai skala dari 0 sampai 10 cc, untuk berbagai kondisi laju alir yang diset pada *flowmeter*.
- Menghitung laju alir aktual dengan persamaan berikut.

$$Q \left(\frac{\text{cc}}{\text{menit}} \right) = \frac{10 \text{ cc} \times 60 \text{ s}}{t} \dots\dots\dots(3.1)$$

3.3 Pengujian Kinerja Biofilter

Pada tahapan ini, ada dua bagian besar pengujian yang akan dilakukan yakni pengujian dalam hal kemampuan mereduksi gas N_2O dan dalam hal perkembangan jumlah mikroba sebelum dan setelah biofiltrasi pada kompos.

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 laju alir gas N₂O, pengaruh kandungan air pada medium filter terhadap kinerja biofilter serta perbandingan penggunaan nutrisi alami dan sintetik terhadap daya adsorpsi dan degradasi biofilter dengan menggunakan bakteri penitrifikasi dalam mereduksi N₂O.

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 :

3.3.1 Variasi laju alir gas sampel

- a. Menyiapkan dan menimbang medium filter yaitu kompos yang telah dipreparasi ($w = 945$ gr untuk $h = 50$ cm)
- b. Memasukkan medium filter tersebut ke dalam kolom biofilter dengan ketinggian 50 cm.
- c. Mengalirkan gas sampel yang terdapat kandungan N₂O sebesar 15.000 ppm dalam udara dengan variasi laju alir : 72 ; 88 ; 105 ; 127 ; 186 ; 233 cc/menit untuk dilakukan biofiltrasi.
- d. Mengambil gas sampel yang telah dibiofiltrasi dengan *syringe* untuk dianalisis pada kromatografi gas.
- e. Mengambil sampel kompos setelah biofiltrasi untuk uji TPC (*Total Plate Count*)

3.3.2 Variasi fraksi air dalam medium filter

- a. Menyiapkan medium filter yaitu kompos yang telah dipreparasi
- b. Menimbang kompos yang dibutuhkan dan menambahkan air pada kompos dengan variasi kandungan air: 30,40,50,60, dan 70 % berat kompos.
- c. Memasukkan medium filter tersebut ke dalam kolom biofilter dengan ketinggian 50 cm.
- d. Mengalirkan gas sampel dengan kandungan N₂O sebesar 15.000 ppm dalam udara dengan laju alir paling efektif untuk dilakukan biofiltrasi.

- e. Mengambil gas sampel yang telah dibiofiltrasi dengan *syringe* untuk dianalisis pada kromatografi gas.
- f. Mengambil sampel kompos setelah dilakukan biofiltrasi untuk uji TPC (*Total Plate Count*)

3.3.3 Variasi Larutan Nutrisi Pada Medium Filter

- a. Menyiapkan medium filter yaitu kompos yang telah dipreparasi.
- b. Menimbang kompos yang dibutuhkan dan menambahkan bakteri nitrifikasi ke dalam kompos.
- c. Menambahkan larutan nutrisi (alami atau sintetik) pada kompos sebanyak volum kandungan air terefektif pada variasi eksperimen sebelumnya
- d. Memasukkan medium filter tersebut ke dalam kolom biofilter dengan ketinggian 50 cm.
- e. Mengalirkan gas sampel dengan kandungan N_2O sebesar 15.000 ppm dalam udara dengan laju alir paling efektif untuk dilakukan biofiltrasi.
- f. Mengambil gas sampel yang telah dibiofiltrasi dengan *syringe* untuk dianalisis pada kromatografi gas.
- g. Mengambil sampel kompos setelah dilakukan biofiltrasi untuk uji TPC (*Total Plate Count*)

3.4 Data Penelitian

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

- a. Konsentrasi gas N_2O sesudah dilakukan biofiltrasi.
- b. Medium filter sebelum dan setelah dilakukan biofiltrasi untuk melihat pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme di dalam medium filter.

3.5 Pengukuran dan Analisis

3.5.1 Analisis Gas N_2O

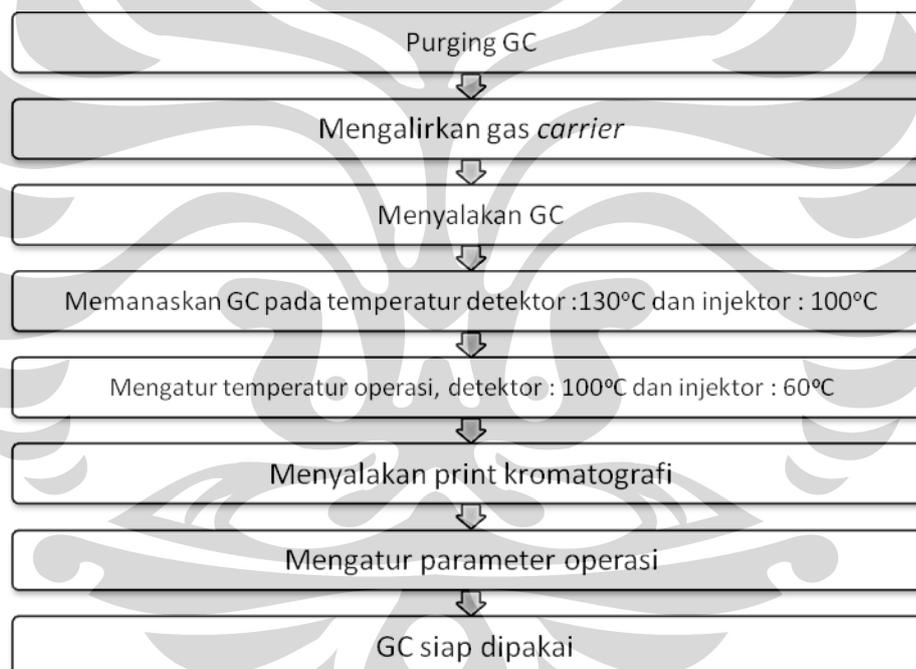
Konsentrasi efluen gas N_2O kemudian diukur dengan menggunakan kromatografi gas (GC) jenis TCD. Spesifikasi kromatografi gas (GC) yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 3. 2 Spesifikasi kromatografi gas dalam penelitian.

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 GC:



Gambar 3. 7 Diagram alir prosedur pengoperasian GC

3.5.2 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. Oleh karena itu konsentrasi bakteri

dalam kompos yang nantinya akan diuji perlu untuk diketahui. Jumlah bakteri dalam kompos sangat banyak, sehingga perlu dilakukan dilusi atau pengenceran. Rasio pengenceran yang akan digunakan pada uji degradasi bakteri adalah 1:000.000 agar keakuratan penghitungan jumlah koloni bakteri dapat terjaga.

A. Langkah-langkah pengencerannya adalah sebagai berikut:

- Melarutkan kompos sebanyak 1 mL kemudian menambahkan air aquades sebanyak 9 mL (untuk membuat rasio dilusi 1:10).
- Mengambil 1 mL larutan dari dilusi 1:10 kemudian menambahkan aquades sebanyak 9 mL (untuk membuat rasio dilusi 1:100).
- Mengulangi langkah 2 hingga diperoleh larutan dilusi kompos dengan rasio dilusi 1: 000.000.
- Menguji larutan-larutan tersebut dengan metode *Total Plate Count* hingga perhitungan jumlah bakteri

B. Langkah – langkah pembuatan medium agar adalah sebagai berikut:

- a. Melarutkan bubuk nutrient agar sebanyak 2,79 gr kemudian menambahkan air aquades sebanyak 90 ml.
- b. Didihkan larutan tersebut dengan agitasi pada *hot plate* selama hingga mendidih dan larutan homogen.
- c. Diamkan larutan tersebut selama 1 menit
- d. Sterilisasi dengan autoklaf sebelum digunakan selama 15 menit

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

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

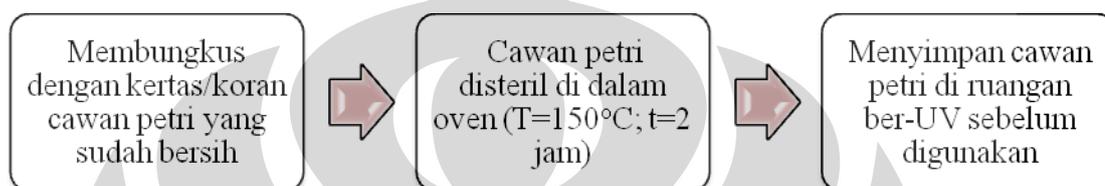
$$\Sigma \text{bakteri} \left(\frac{\text{CFU}}{\text{g}} \right) = \frac{\text{Jumlah koloni bakteri}}{\text{Volume pengenceran} \cdot \text{volume sampel pada cawan petri}} \dots\dots\dots(3.2)$$

Adapun untuk melakukan analisis TPC (*Total Plate Count*) 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. 8 Diagram alir prosedur sterilisasi alat

b. Sterilisasi bahan

Bukan hanya alat saja yang harus di steril pada metode TPC ini, melainkan segala 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. 9 Diagram alir prosedur sterilisasi bahan



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Perancangan Sistem Biofilter

Secara umum sistem biofilter terdiri dari tabung gas yang akan menyuplai gas sampel, kolom biofilter sebagai tempat medium filter dan perpipaan yang menghubungkan keduanya serta *sampling port* untuk pengambilan sampel. Penelitian Biofilter di Departemen Teknik Kimia, UI telah dilakukan sebelumnya oleh Utami et.al (2008). Namun, perancangan alat biofilter dilakukan kembali. Hal ini dikarenakan adanya perubahan dimensi dari alat biofilter sebelumnya. Selain itu peralatan biofilter ini tidak menggunakan sistem aliran sirkulasi, tetapi akan dilakukan sistem aliran *batch* (sekali jalan). Perancangan alat biofilter dilakukan berdasarkan skema alat yang telah dipaparkan pada bab 3 dengan disain kolom biofilter yang tertutup. Kelebihan dari disain kolom seperti ini adalah proses pengontrolan proses dan kontak aliran polutan dengan medium filter yang lebih baik (Devanny, 1999).

Berikut ini adalah perbedaan perancangan alat biofilter pada peralatan sebelumnya antara lain:

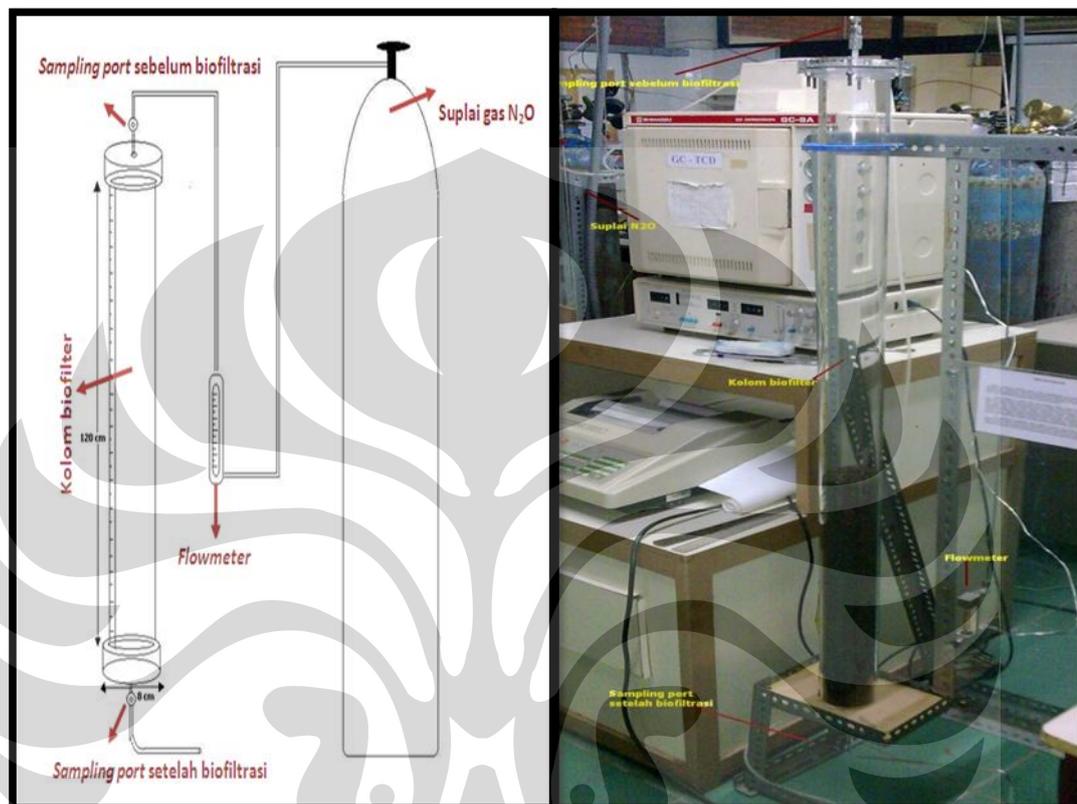
Tabel 4. 1 Perbedaan Perancangan Desain Alat Biofilter

50 cm	120 cm
4 cm	8 cm
Sirkulasi	<i>Batch</i>
Pipa silikon	Pipa <i>stainless steel</i>

Perubahan dimensi biofilter di atas dilakukan untuk memaksimalkan kinerja biofilter yang akan digunakan. Kolom yang lebih tinggi dan diameter yang lebih besar dapat menjadi tempat medium filter yang lebih banyak sehingga reduksi gas N₂O oleh kompos dapat lebih maksimal. Selain itu sistem saluran pada peralatan biofilter kali ini dibuat lebih efektif dalam meminimalisasi

kebocoran agar keakuratan alat dapat dipastikan. Penggunaan *stainless steel* sebagai *tube* juga bertujuan untuk menghindari timbulnya korosi (Yang, et al, 2007).

Hasil Perancangan biofilter dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 4. 1 Hasil perancangan alat biofilter

Komponen-komponen desain biofilter diatas adalah sebagai berikut:

- Suplai gas N_2O dengan konsentrasi 15.000 ppm dalam udara
- *Flowmeter* dengan laju alir 0-473 cc/menit (N.T.K 94-4095)
- Kolom biofiltrasi yang berbentuk tabung dengan dimensi panjang 120 cm dan diameter 8 cm dengan bahan dari *acrylic*
- Sampling port tempat mengambil sampel dengan *syringe*

4.2. Preparasi Medium Filter

Sebelum melakukan biofiltrasi, langkah awal yang dilakukan adalah preparasi medium filter. Medium filter yang digunakan adalah kompos karena memiliki retensi air yang baik dan kandungan zat organik yang cocok dalam

mereduksi gas N_2O . Selain itu salah satu alasan lain penggunaan kompos karena nutrisi yang terkandung di dalamnya dibentuk dengan cara mineralisasi dan difusi kedalam biofilm di setiap partikel kompos saat dialiri kontaminan untuk menggantikan nutrisi yang telah dikonsumsi mikroba (Liu et al., 2004).

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 biofiltrasi dalam penelitian ini. Adapun persiapan lanjutan tersebut meliputi kegiatan pengeringan kompos pada suhu ruang dan pengayakan kompos untuk mendapatkan partikel yang homogen. Pengeringan kompos dilakukan di dalam ruang tertutup dengan suhu ruang sekitar 27-28 °C dan humiditas ruangan 70%.

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 kompos ini dilakukan selama sepuluh hari hingga dihasilkan kompos yang agak kering. Setelah proses pengeringan berakhir dilanjutkan dengan pengayakan kompos yang ada dengan menggunakan ayakan 100 mash (1-1,5 mm). Pengayakan ini bertujuan untuk menghasilkan partikel kompos yang homogen.



Gambar 4. 2 Proses pengeringan kompos dengan kondisi $T = 27^{\circ}C$

Hasil medium biofilter yang sudah dikeringkan dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut ini.



Gambar 4. 3 Kompos sebagai medium filter

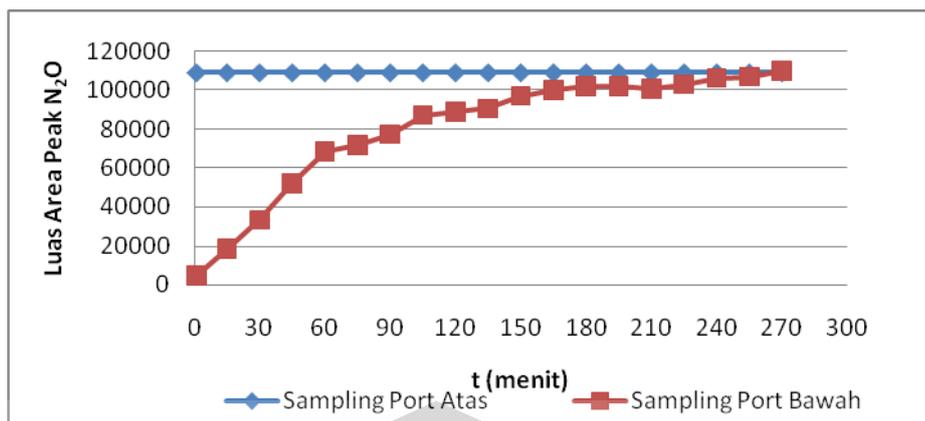
Medium filter berupa kompos tidak perlu diberi perlakuan pemanasan seperti pada zeolit karena akan membunuh mikroba yang terdapat pada kompos dan menjadikan pH kompos menjadi sangat basa (pH 10-11). Mikroba tidak dapat bekerja dengan baik pada rentang pH ini sehingga prosedur ini hanya dilakukan jika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

4.3 Persiapan Eksperimen

4.3.1 Uji Kebocoran dan Uji Blangko

Uji kebocoran dilakukan untuk memastikan bahwa penurunan luas area di bawah *peak* saat uji kinerja biofilter disebabkan oleh biofiltrasi akibat adanya adsorpsi dan degradasi. Uji kebocoran juga dilakukan untuk menghindari ketidakakuratan alat. 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 .

Uji kebocoran juga dilakukan dengan mengalirkan udara sampel ke dalam kolom kemudian dicek luas area pada *sampling port* atas (sebelum biofiltrasi) dan *sampling port* bawah (setelah biofiltrasi). Pengambilan sampel di *sampling port* atas untuk menjadi acuan pengujian uji kebocoran dan uji blangko.



Gambar 4. 4 Uji Kebocoran dan Uji Blangko Biofilter

Pada uji kebocoran ini, diperoleh hasil yang dapat dilihat pada Gambar 4. 4 dan data dapat dilihat di Lampiran 3. Dari hasil ini dapat jelas terlihat bahwa sesaat setelah penginjeksian gas N₂O ke dalam kolom biofilter (t = 0 menit) sampai t = ± 180 menit, distribusi gas belum homogen pada *sampling port* bawah. Artinya gas N₂O memerlukan waktu untuk berdistribusi di dalam kolom biofilter hingga menuju *sampling port* bawah. 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. 4 diatas apabila konsentrasi (luas area *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 N₂O terjadi karena adanya fenomena adsorpsi dan degradasi gas oleh medium biofilter.

4.3.2 Kalibrasi *Flowmeter*

Penggunaan *flowmeter* bertujuan untuk mengetahui laju alir gas N₂O aktual (sesungguhnya) sesuai dengan skala pada *flowmeter* alat terhadap laju alir

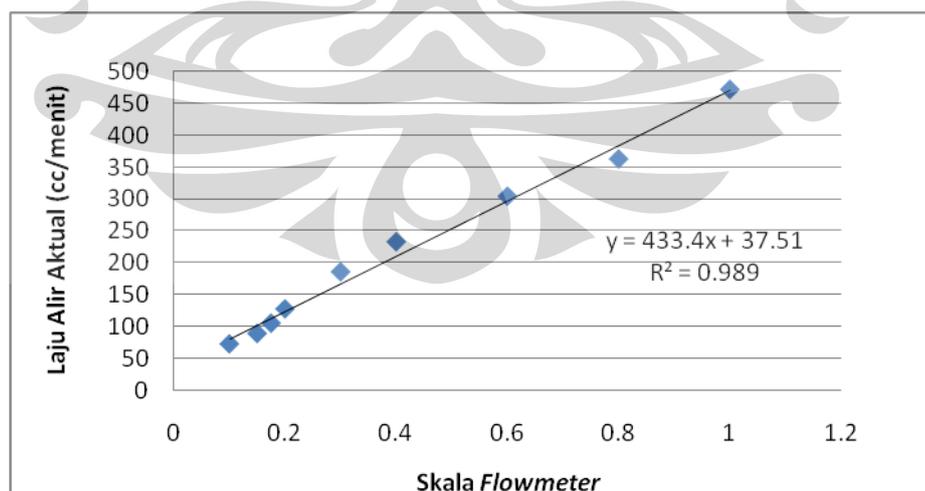
gas N₂O yang mengalir pada kolom biofilter. Hal tersebut dapat diketahui dengan melakukan kalibrasi. Kalibrasi dengan *flowmeter* dilakukan dengan gelembung sabun (*bubble soap*). Cara kerja alat gelembung sabun adalah dengan mengalirkan gas N₂O melalui gelembung sabun, kemudian menekan pipet sehingga 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 dengan alat bantu stopwatch. Dalam percobaan ini dilakukan hingga ke titik 10 cc. Setelah mendapatkan waktu yang dibutuhkan, laju alir aktual dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$v \text{ (laju alir aktual)} = \frac{10 \text{ cc} \times 60 \text{ s}}{t} \dots\dots\dots(4.1)$$

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. 5 berikut ini.



Gambar 4. 5 Kalibrasi Flowmeter

Dari grafik di atas, dapat dilihat bahwa grafik uji kalibrasi *flowmeter* memiliki kecenderungan garis linear. Apabila diberi *treadline* garis linear, maka nilai pendekatannya adalah $R^2 = 0,989$. Suatu grafik dapat dikatakan memiliki kecenderungan linear apabila $R^2 \geq 0,90$. Maka uji kalibrasi *flowmeter* disimpulkan dapat digunakan pada *flowmeter* yang digunakan untuk uji biofiltrasi selanjutnya.

4.3.3 Uji Waktu Tinggal

Percobaan ini dilakukan untuk mengetahui berapa lama waktu tinggal aktual N_2O di dalam kolom biofilter kosong. Lamanya waktu tinggal gas N_2O di dalam kolom biofilter dapat diketahui dengan menghitung EBRT (*Empty Bed Residence Time*) dengan persamaan 2.2. EBRT berhubungan dengan laju alir pada kolom kosong biofilter. EBRT dapat diartikan sebagai jumlah volum total kolom biofilter kosong dibagi dengan laju alir gas N_2O dengan panjang 120 cm dan diameter 8 cm.

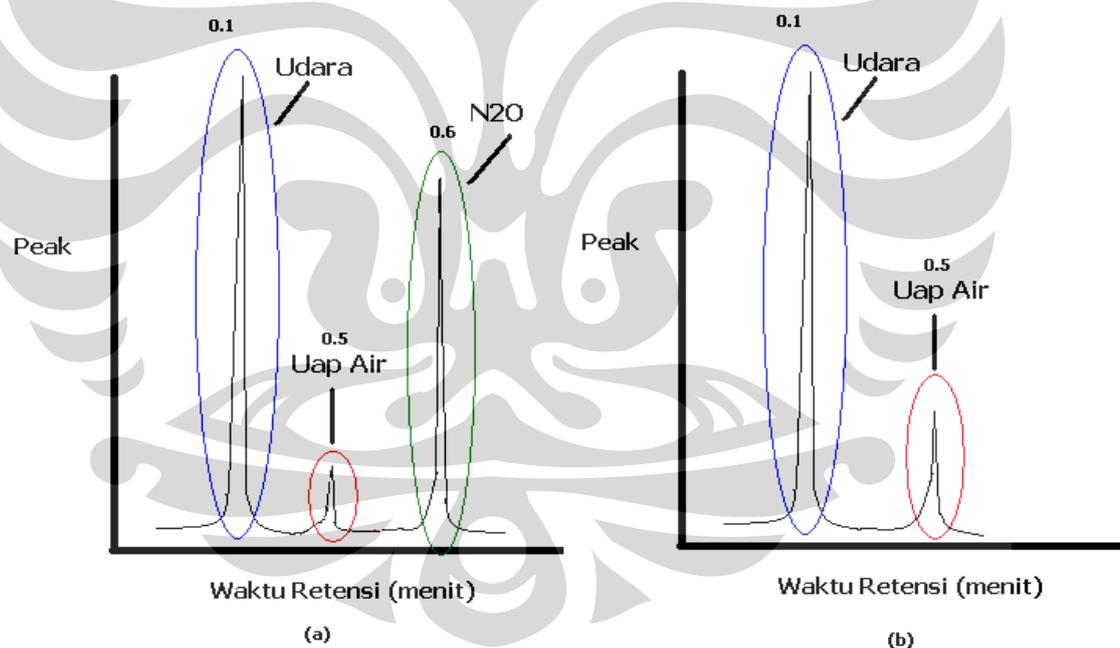
$$EBRT = \frac{3,14 \times 8^2 \text{ cm} \times 120 \text{ cm}}{72,02 \text{ cc/menit}} = 334,84 \text{ menit} = 5,58 \text{ jam}$$

Uji waktu tinggal (EBRT) juga diuji dengan percobaan. Percobaan yang dilakukan sama seperti uji kebocoran dan uji blangko. Waktu tinggal gas N_2O dalam kolom biofilter dapat dicari dengan rumus EBRT di atas. Namun, faktanya adalah gas tersebut dapat dideteksi pada kolom biofilter beberapa menit kemudian. Meskipun sudah dapat dideteksi, konsentrasi gas N_2O belum sama seperti konsentrasi gas N_2O yang masuk dari atas tabung. Hal ini dapat dibuktikan dengan mengecek luas area *peak* gas N_2O dengan GC. Berdasarkan Gambar 4.4 (Sub Bab 4.3.1) dapat dilihat bahwa luas area *peak* keluaran N_2O akan mendekati luas area *peak* masukan N_2O sekitar menit ke 180 atau 3 jam. Waktu tinggal gas N_2O berbeda dengan perhitungan di atas, sehingga dibutuhkan pengujian untuk mengetahui EBRT aktual. Berdasarkan hal ini, dapat didefinisikan bahwa EBRT yang diperoleh dari hasil perhitungan adalah lamanya waktu tinggal gas N_2O di dalam kolom setelah homogen.

4.3.4 Kalibrasi Gas N₂O

Kalibrasi volum gas dilakukan dengan tujuan mengetahui konsentrasi gas N₂O awal 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% dengan menyesuaikan terhadap luas area yang tertera dari pembacaan GC. Cara pengukuran uji kalibrasi gas dengan mengalirkan gas N₂O ke dalam *gas trap* yang kemudian ditutup dengan rapat. Lalu sampel diambil dari *gas trap* dengan menggunakan *syringe* kaca. *Syringe* kaca kemudian diinjeksikan ke dalam *Gas Chromatography* (GC) yang akan mendeteksi keberadaan gas beserta konsentrasinya

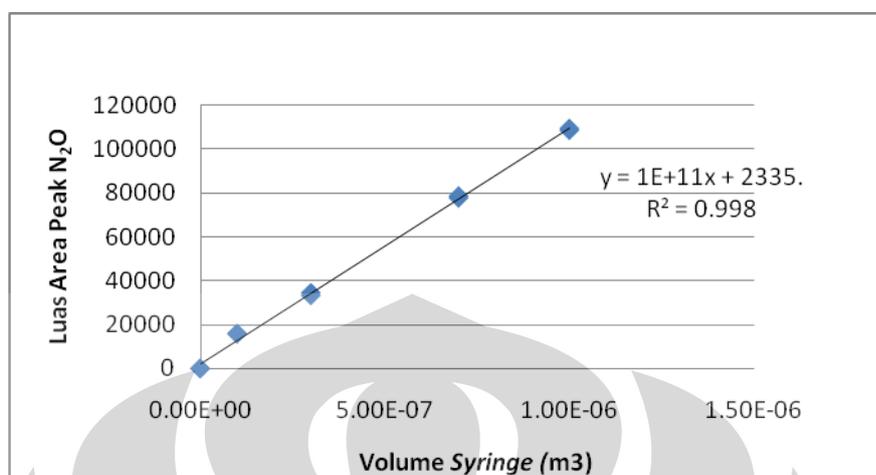
Hasil yang terbaca berupa *peak* dengan luas area tertentu. Contoh pembacaan hasil kromatograf pada sampel gas N₂O dengan volum 1.0 ml dapat dilihat pada Gambar 4. 6 berikut ini.



Gambar 4. 6 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 4.6 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. 7 Hasil Kalibrasi N₂O

Dari hasil kalibrasi di atas didapat persamaan linear $y = 1.10^{11}x + 2335$ dimana dari persamaan tersebut dapat diketahui volum N₂O pada setiap penurunan luas area *peak*.

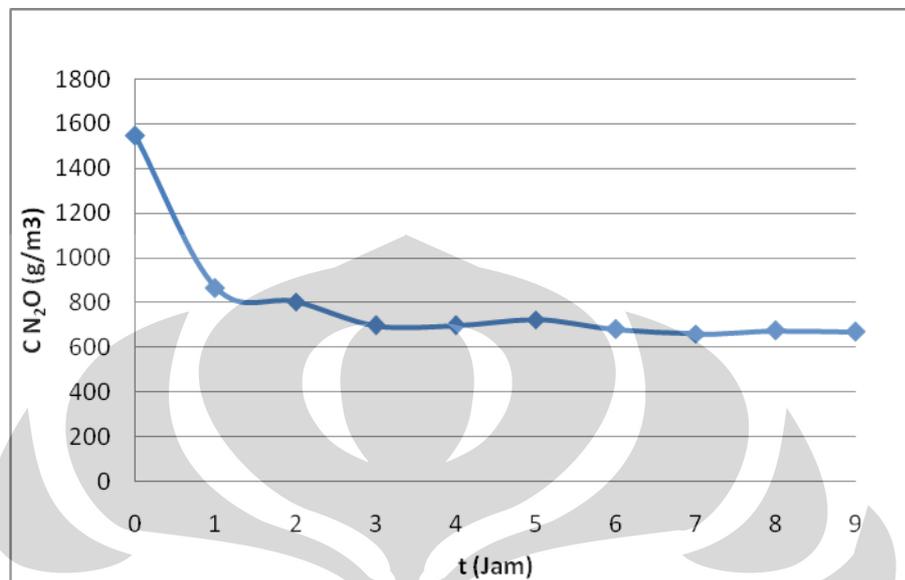
4.4 Uji Kinerja Biofilter

Uji ini bertujuan mengetahui kinerja biofilter dengan menganalisis beberapa hal yaitu pertama, pengaruh variasi laju alir terhadap efisiensi reduksi gas N₂O. Kedua, pengaruh variasi fraksi air terhadap efisiensi reduksi gas N₂O. Ketiga, pengaruh penggunaan nutrisi alami dan sintetik terhadap efisiensi reduksi gas N₂O. Uji kinerja biofilter dilakukan pada ketinggian 50 cm berdasarkan hasil penelitian sebelumnya Utami et.al (2008).

4.4.1 Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N₂O

Dalam sub-bab ini akan dianalisis mengenai kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O. Hasil uji kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O ditunjukkan oleh adanya penurunan luas area di bawah *peak* untuk setiap waktu tertentu. Penurunan luas area ini akan sebanding dengan penurunan konsentrasi (Harris, 1995). Dalam penelitian ini, pengamatan biofiltrasi dilakukan setiap jam selama 9 jam dengan

menggunakan GC. Berikut ini adalah grafik uji biofiltrasi yang dilakukan pada panjang biofilter 50 cm dan laju alir gas N_2O 72,02 cc/menit:



Gambar 4. 8 Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N_2O
($h = 50$ cm; $f = 72$ cc/menit, medium kompos kering)

Dengan cara perhitungan yang dapat dilihat pada Lampiran, dapat dilihat pada Gambar 4. 8 bahwa konsentrasi N_2O berkurang setiap jamnya. Pada Gambar 4. 8 dihasilkan suatu profil hubungan antara konsentrasi N_2O selama 9 jam yang turun secara tajam pada awal percobaan, kemudian turun secara perlahan-lahan. Hal ini dapat terjadi karena adanya daya adsorpsi kompos yang dilewati gas N_2O .

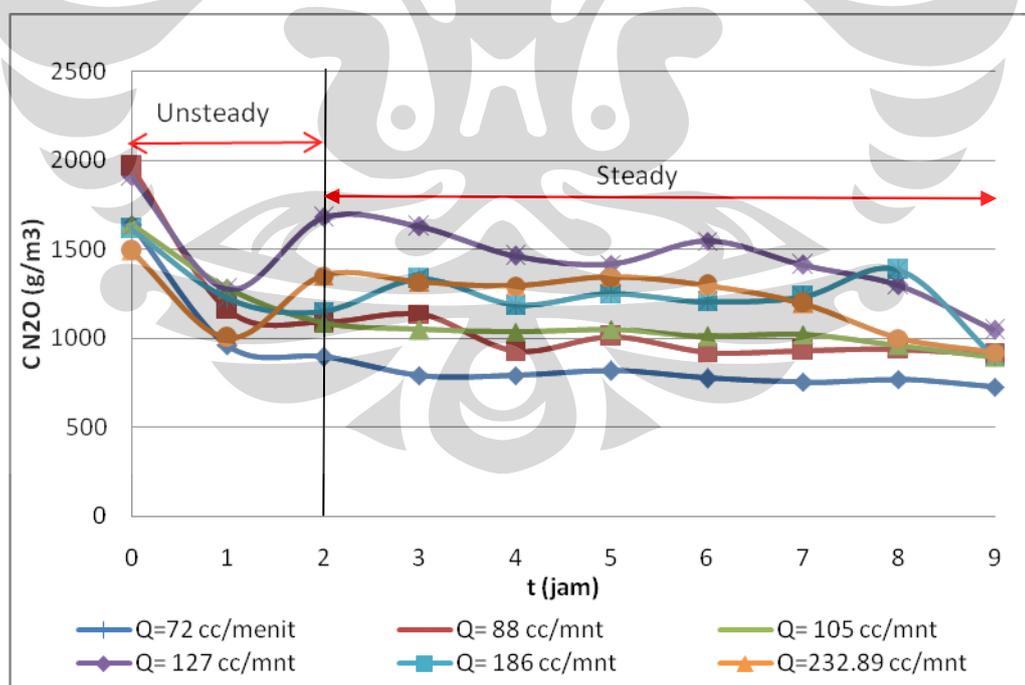
Penurunan tajam pada awal percobaan terjadi karena adanya proses adsorpsi yang dilakukan kompos. Jika dikaitkan dengan kurva terobosan adsorpsi pada umumnya, maka konsentrasi suatu adsorbat akan menurun karena diserap oleh adsorben hingga pada waktu tertentu sebelum mengalami kesetimbangan adsorpsi. Dengan demikian, konsentrasi N_2O akan menurun karena teradsorpsi oleh medium biofilter pada setiap interval waktu tertentu sebelum medium biofilter mengalami penenuhan. 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 ,

sedangkan peningkatan efisiensi reduksi yang perlahan-lahan pada jam berikutnya disebabkan adanya proses degradasi N_2O oleh mikroba. Mikroba tersebut mendapatkan suplai nitrogen sebagai sumber nutrisi dari gas yang mengalir melewati medium filter.

4.4.2 Pengaruh Laju Alir Terhadap Reduksi N_2O

Percobaan variasi laju alir terhadap reduksi N_2O bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh laju alir kontaminan dalam hal ini N_2O terhadap kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O . Pada percobaan ini laju alir divariasikan sebanyak enam laju alir sesuai kemampuan *flowmeter* pada alat biofilter. Variasi laju alir tersebut adalah 72; 88; 105; 127; 186; 233 cc/menit. Adapun ketinggian medium filter yang digunakan adalah 50 cm. Penggunaan ketinggian ini berdasarkan ketinggian optimum dalam mereduksi N_2O pada penelitian sebelumnya di Departemen Teknik Kimia, UI (Utami et.al, 2008).

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

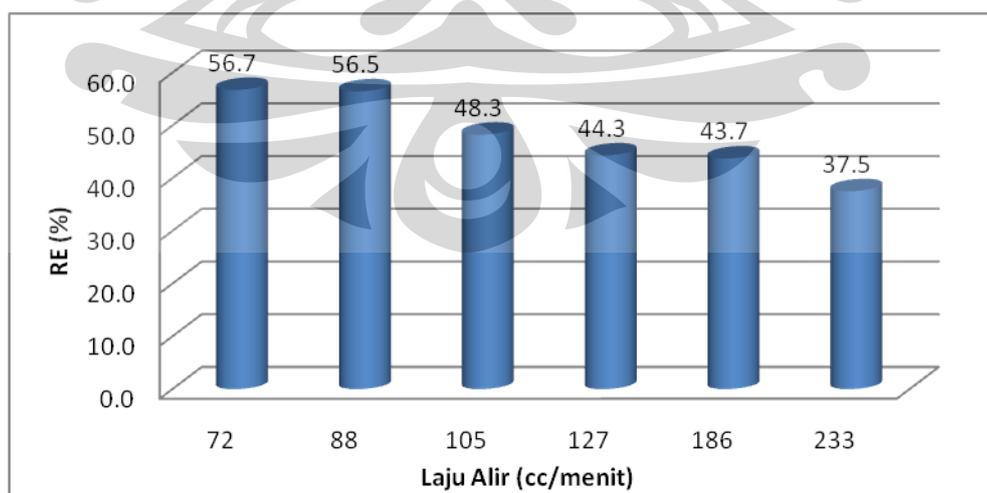


Gambar 4. 9 Profil Variasi Laju Alir Terhadap Reduksi N_2O

(h = 50 cm, Medium filter = Kompos kering)

Fenomena yang terjadi pada biofiltrasi ini adalah adanya daya adsorpsi kompos dalam mereduksi N_2O . Grafik ini menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak antara kompos dan gas N_2O menyebabkan Konsentrasi N_2O yang lebih rendah. Grafik diatas juga menunjukkan bahwa semakin kecil laju alir gas N_2O maka efisiensi reduksi N_2O lebih tinggi. Hal ini ditunjukkan oleh kecenderungan garis yang semakin meningkat terhadap lama waktu kontak dan laju alir gas N_2O .

Gambar 4. 9 menunjukkan bahwa terjadi penurunan secara tajam pada saat $t = 1$ jam. Hal ini 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 . Pada $t = 1-2$ jam merupakan daerah *unsteady* dimana pada keadaan ini aliran gas polutan melewati medium masih belum stabil. Pada Gambar 4. 9 juga dapat dilihat bahwa profil efisiensi reduksi untuk laju alir 127,22 ; 185,74 ; 232,89 cc/menit, plot yang dihasilkan turun naik pada $t = 1$ jam dan $t = 2$ jam. Ini dikarenakan laju alir yang dilakukan pada biofiltrasi ini sangat besar sehingga waktu tinggal di dalam medium tidak lama. Hal ini juga dapat terjadi karena kompos yang digunakan kering sehingga memudahkan gas N_2O mengalir. Kandungan kelembaban yang kurang dapat mengakibatkan kekeringan dan menimbulkan celah pada medium filter, serta dapat menyebabkan terjadinya *channeling* (Datta, Indrani., & Allen ,D. Grant., 2005)

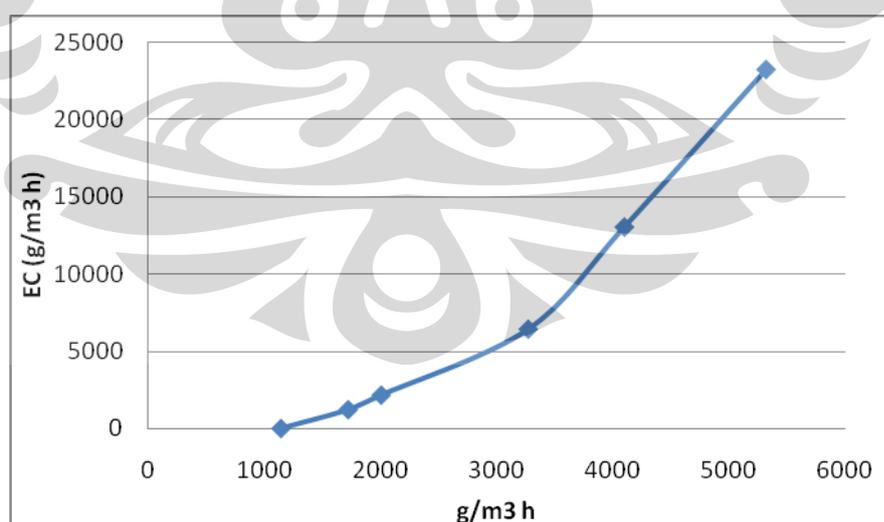


Gambar 4. 10 Perbandingan Efisiensi Reduksi pada Uji Variasi Laju Alir Gas N_2O

($h = 50$ cm, Medium kering, $t = 9$ jam)

Pada Gambar 4.10 dapat dilihat bahwa efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada laju alir gas N_2O tertinggi 72 cc/menit dengan efisiensi reduksi 56,7 %. Fenomena yang terjadi pada proses ini disebabkan oleh proses adsorpsi dan degradasi karena pengaruh lama kontak antara kompos akibat laju alir gas N_2O . Variabel peubah pada percobaan ini adalah laju alir dengan variabel tetap waktu biofiltrasi dan ketinggian medium filter.

Efisiensi reduksi gas N_2O cenderung meningkat pada laju alir yang semakin kecil karena waktu tinggal gas N_2O dalam medium filter menjadi lebih lama sehingga waktu kontak antara gas N_2O dan medium biofilter juga lebih lama. Akibatnya intensitas gas N_2O mengalami proses adsorpsi dan degradasi lebih banyak daripada laju alir gas N_2O yang lebih tinggi. Efisiensi reduksi gas N_2O juga semakin besar pada setiap jam waktu kontak antara kompos dengan gas N_2O . Sesuai dengan penjelasan pada sub-bab sebelumnya, dan jika dikaitkan dengan kurva adsorpsi pada umumnya, maka konsentrasi suatu adsorbat akan menurun karena diserap oleh adsorben hingga efisiensi reduksi gas N_2O sebagai kontaminan akan meningkat dibandingkan laju alir lainnya yang lebih kecil. Jadi dapat disimpulkan berdasarkan grafik batang pada Gambar 4. 10 bahwa semakin kecil laju alir memiliki persentase efisiensi reduksi N_2O yang semakin besar.

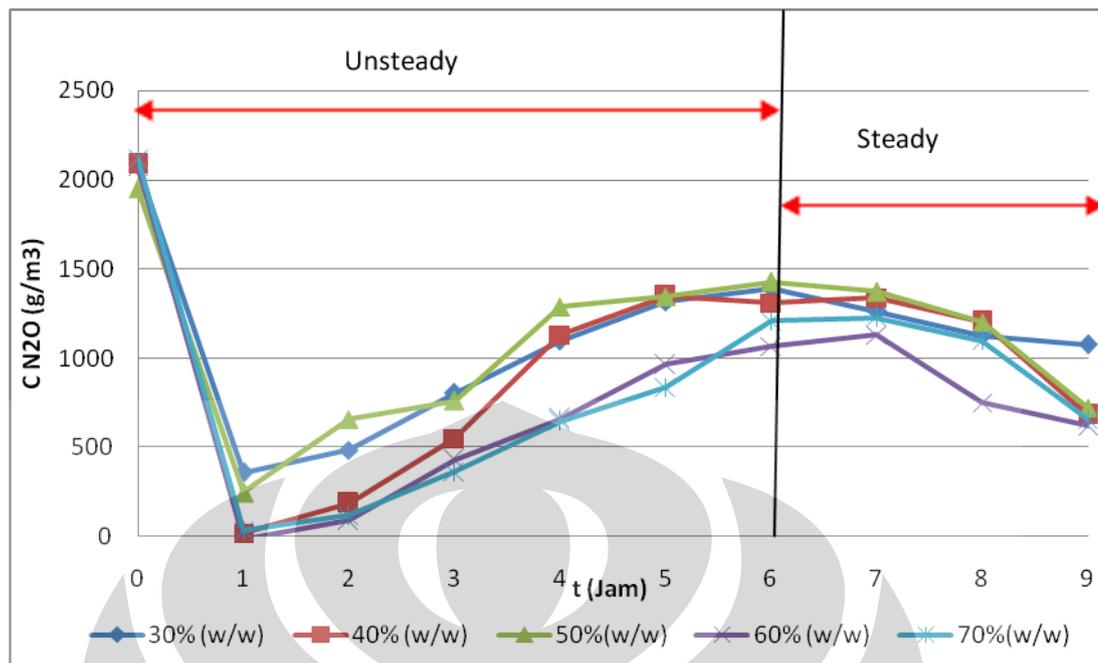


Gambar 4. 11 Grafik *Elimination Capacity* (EC) terhadap variasi *Inlet Loading* (IL)

Variasi laju alir pada percobaan ini akan menghasilkan besar *Inlet Loading* (IL) yang berbeda, sehingga dari variasi *Inlet Loading* (IL) dapat dibuat grafik hubungan dengan *Elimination Capacity* (EC). Gambar 4. 11 menjelaskan bahwa pada pemakaian kompos kering dengan *Inlet Loading* (IL) berbeda pada penelitian ini belum mencapai *Elimination Capacity* (EC) maksimum. Hal ini dapat dilihat pada grafik dimana pada *Inlet Loading* (IL) terbesar masih menghasilkan *Elimination Capacity* (EC) yang lebih besar. Peningkatan ini masih terus berlanjut untuk *Inlet Loading* (IL) yang lebih besar hingga mendapatkan *Elimination Capacity* (EC) maksimum. Titik *Elimination Capacity* (EC) maksimum didapat pada titik tertinggi garis linear (RE 100%), yang berarti merupakan batas *Elimination Capacity* (EC) maksimal yang dihasilkan sesuai kemampuan kompos dalam mereduksi N₂O

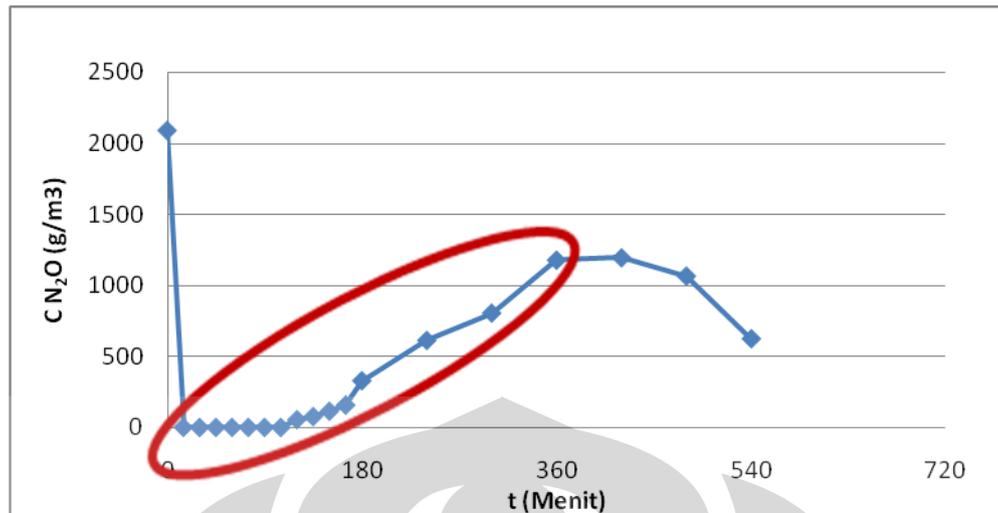
4.4.3 Pengaruh Kandungan Air Medium Terhadap Reduksi N₂O

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 yang berpengaruh terhadap perkembangan mikroba di dalamnya. Variasi kandungan air adalah 30%, 40%, 50%, 60%, dan 70% (w/w) berat kompos. Variasi kandungan air 30-70% dilakukan berdasarkan penelitian sebelumnya yang telah melakukan investigasi kandungan air dalam mereduksi polutan lain (Xie quan, et.al.1998). Adapun ketinggian medium filter yang digunakan adalah 50 cm dengan laju alir terkecil (72 cc/menit) berdasarkan percobaan sebelumnya efisiensi reduksi N₂O yang dihasilkan paling optimum. Hasil dari uji kemampuan biofilter dalam mereduksi N₂O terhadap variasi kandungan air di dalam medium filter dapat dilihat pada Gambar 4. 12 berikut.



Gambar 4. 12 Grafik Variasi Kandungan Air dalam Kompos Terhadap Efisiensi Reduksi N_2O

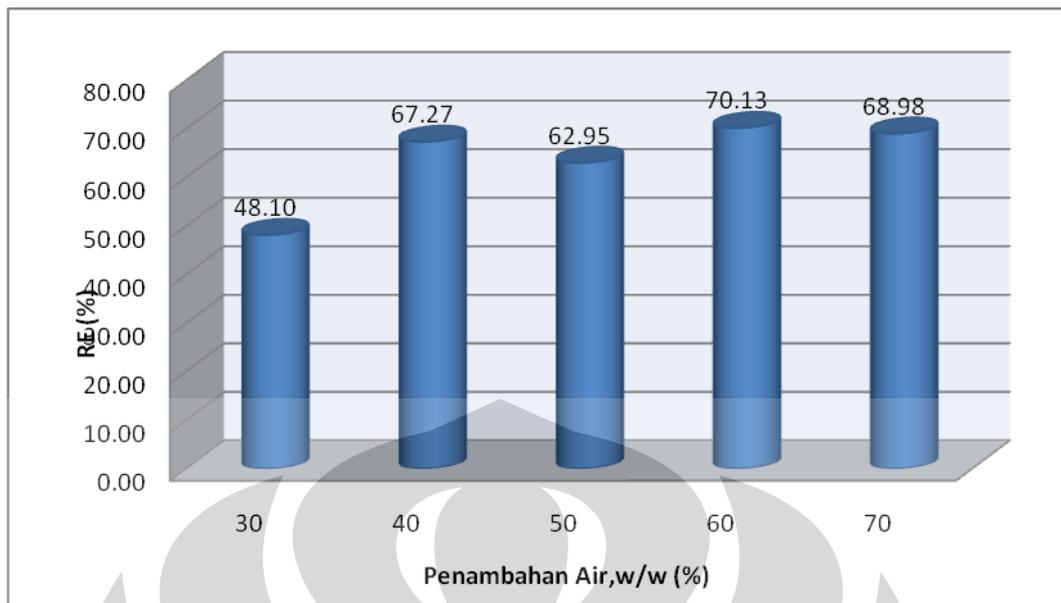
Pada Gambar 4.12 menunjukkan profil penurunan konsentrasi dengan variasi kandungan air yang ditambahkan ke dalam medium filter. Gambar diatas juga menggambarkan trend secara umum dengan tiga segment yaitu profil yang naik, turun lalu naik lagi secara perlahan. Ketika percobaan ini dilakukan dan dimulai untuk proses biofiltrasi ($t = 0$) dianggap konsentrasi gas N_2O di dalam reaktor mendekati nol sehingga gas N_2O keluaran kolom biofilter juga dianggap nol. Hal inilah yang menyebabkan hasil efisiensi reduksi gas N_2O sama dengan nol. Namun, ketika tepat saat dimulai gas N_2O mengalir ke dalam kolom biofilter melewati medium filter untuk direduksi. Pada $t = 1$ jam gas N_2O belum terdeteksi, sedangkan pada $t = 2$ jam apabila gas keluaran pada sampling port bawah kolom diuji, maka sudah mengandung gas N_2O , namun memiliki konsentrasi yang sangat kecil yang kemudian akan meningkat sampai waktu tertentu (6-7 jam). Hal ini dikarenakan waktu tinggal gas N_2O di dalam medium menjadi lebih lama karena kelembaban daerah biofilm pada partikel-partikel kompos semakin meningkat. Hal ini dapat dibuktikan oleh Gambar 4.13 berikut.



Gambar 4. 13 Profil Pengaruh Penambahan Air 60% (w/w) terhadap Konsentrasi N₂O

Berdasarkan Gambar 4.13 di atas dapat dilihat bahwa untuk segment pertama efisiensi reduksi akan menurun. Hal ini juga diperkuat oleh hasil luas area *peak* N₂O setelah dilakukan analisis kromatografi gas (GC) dimana luas *peak* akan meningkat sampai waktu tertentu (6-7 jam). Peningkatan luas area *peak* N₂O ini juga didukung oleh hasil uji blangko dimana gas N₂O membutuhkan waktu yang cukup lama (± 3 jam) untuk mencapai konsentrasi yang sama antara *sampling port* atas dan bawah.

Pada jam ke 6-7, profil pengaruh fraksi air menghasilkan efisiensi reduksi yang semakin meningkat dari waktu ke waktu. Hal ini menunjukkan bahwa pada titik ini daya adsorpsi minimal kompos dapat diketahui karena semakin lama efisiensi reduksi semakin meningkat. Peningkatan efisiensi reduksi ini dikarenakan adanya bantuan kinerja mikroba yang semakin baik karena mendapat nutrisi dari gas N₂O yang mengalir. Populasi mikroba tersebut akan tumbuh dari energi (ATP) yang berasal dari transformasi polutan udara yang mengalir pada biofilter (Shuler & Kragi, 1992).



Gambar 4. 14 Efisiensi Reduksi pada Uji Variasi Kandungan Air pada Kompos
(h = 50 cm, f = 72 cc/menit, Medium kering, t = 9 jam)

Pada Gambar 4.14 dapat dilihat bahwa efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada kandungan air 60 % (w/w) dengan besar efisiensi sebesar 70,13 %. Variabel peubah pada percobaan ini adalah fraksi kandungan air (w/w) pada kompos dengan variabel tetap waktu biofiltrasi, dan ketinggian medium filter serta laju alir gas N_2O . Fenomena yang terjadi pada proses ini disebabkan oleh proses adsorpsi dan degradasi karena pengaruh kelembaban biofilm yang lebih besar dibandingkan penggunaan kompos kering. Daerah biofilm pada partikel medium filter adalah daerah aerobik dan mengandung air serta tempat mikroba melakukan degradasi terhadap polutan yang mengalir. Selain itu, *biofilm* menyediakan nutrisi penting untuk aktivitas biologis, menjaga kelembaban untuk pertumbuhan bakteri. Jadi, kelembaban optimum pada daerah biofilm akan meningkatkan kinerja mikroba dalam mendegradasi gas N_2O sehingga gas N_2O yang berdifusi ke dalam pori-pori partikel kompos akan terlarut ke dalam lapisan biofilm dan terdegradasi oleh mikroba yang terkandung di dalamnya.

Efisiensi reduksi gas N_2O cenderung meningkat pada kandungan air yang optimum untuk setiap medium filter tertentu. Berdasarkan Gambar 4. 14 dapat dilihat bahwa efisiensi reduksi N_2O paling efektif adalah 60% (w/w) dari berat kompos. Karena pada kelembaban air inilah dihasilkan luas area *peak* yang

semakin rendah. Saat kandungan air berada lebih dari 0,6 g air/g berat kering medium, maka efisiensi biofilter akan berkurang.

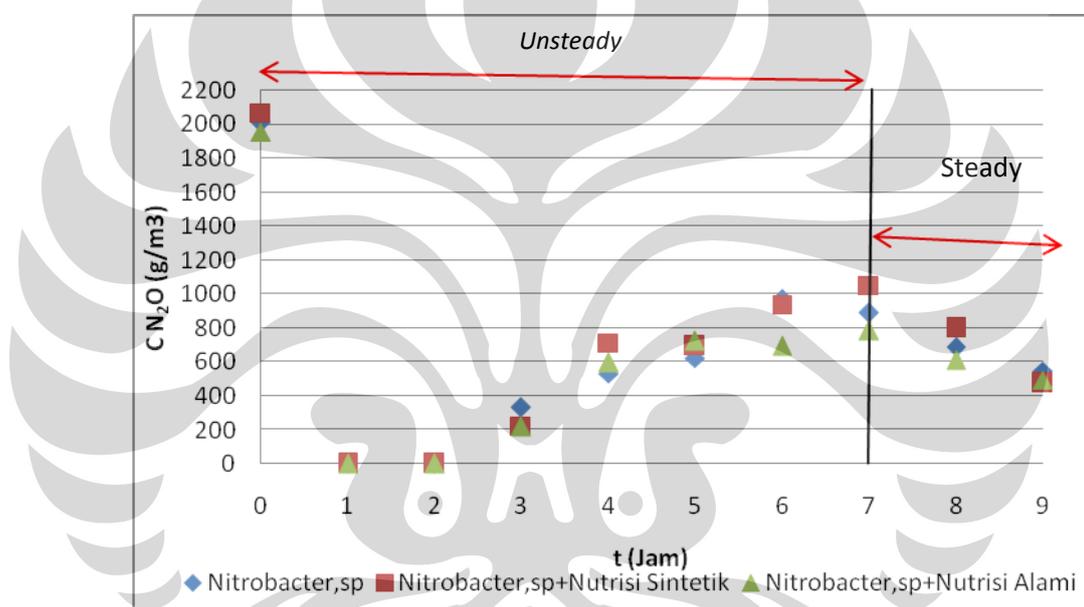
Efisiensi reduksi yang meningkat dibandingkan percobaan sebelumnya disebabkan karena kompos lembab dan menyebabkan porositas berkurang, sehingga waktu tinggal N_2O di kompos menjadi lebih lama. Akibatnya intensitas gas N_2O mengalami proses adsorpsi dan degradasi lebih banyak sehingga efisiensi reduksi gas N_2O juga semakin besar pada setiap jam waktu kontak antara kompos dengan gas N_2O . Jadi, berdasarkan Gambar 4.14 disimpulkan bahwa pada kandungan air 60% berat kompos akan menghasilkan persentase efisiensi reduksi N_2O yang semakin besar.

4.4.4 Perbandingan Penambahan Nutrisi Alami dan Sintetik Terhadap Reduksi N_2O

Percobaan perbandingan penambahan nutrisi alami dan sintetik terhadap reduksi N_2O bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh penambahan nutrisi antara nutrisi alami dan sintetik. Pengaruh dari pemakaian kedua nutrisi tersebut dilihat dari efisiensi reduksi N_2O yang dihasilkan. Pada percobaan ini kompos sebagai medium filter diberi *nitrobakter,sp* sebagai bakteri nitrifikasi penambat N dari N_2O . Kemudian Medium filter tersebut ditambahkan nutrisi yang diharapkan dapat meningkatkan kinerja mikroba menjadi lebih baik dalam mereduksi N_2O . 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 biofiltrasi. Oleh karena itu, selain karbon dan energi dari degradasi kontaminan, mikroba juga memerlukan nutrisi utama untuk memperpanjang hidup (Datta, Indrani, Allen, D. Grant, 2005)

Percobaan ini dilakukan dengan ketinggian medium filter 50 cm, laju alir 72 cc/menit dan penambahan kandungan air optimum sebesar 60% (w/w) kompos. Nutrisi yang ditambahkan dilarutkan sebanyak volum air terbaik pada percobaan sebelumnya. Nutrisi alami yang ditambahkan berupa limbah cair dari peternakan sapi, sedangkan nutrisi sintetik yang diberikan terdiri dari larutan nutrisi dan *trace element*. Larutan nutrisi yang diberikan sebanyak 40 ml ditambah dengan larutan

trace element sebagai mikronutrient sebanyak 2 ml lalu dilarutkan kedalam air sehingga volumenya sama dengan penambahan kandungan air 60%. Komposisi nutrisi yang diberikan terdiri dari K_2HPO_4 , KH_2PO_4 , NH_4Cl , $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $COONa$. Sedangkan larutan *trace element* terdiri dari EDTA, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, $MnCl_2 \cdot 4H_2O$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 2H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $CoCl_2 \cdot H_2O$. Senyawa-senyawa tersebut dipilih dikarenakan telah digunakan sebelumnya untuk menumbuhkan bakteri nitrifikasi aerobik (Yang, et.al.,2007). Hasil dari penambahan nutrisi baik alami atau sintetik dalam kompos yang telah diberi nitrobakter dapat dilihat pada Gambar 4. 15 berikut.



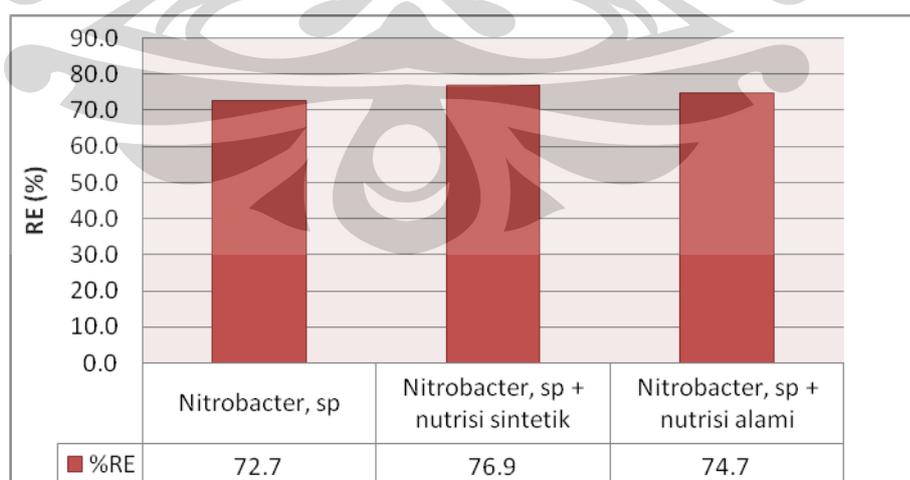
Gambar 4. 15 Profil Penambahan Nutrisi (Alami dan Sintetik) dalam Kompos yang Telah Diberi Nitrobakter Terhadap Efisiensi Reduksi N_2O

Pada Gambar 4.15 menunjukkan profil penambahan nutrisi alami dan sintetik dalam kompos yang telah diberi *nitrobacter,sp* terhadap efisiensi reduksi N_2O . Gambar di atas juga menggambarkan trend secara umum dengan tiga segment yaitu profil yang turun, naik, turun lagi secara perlahan sama seperti grafik yang dihasilkan saat uji variasi kandungan air yang ditambahkan ke dalam kompos. Hal ini dikarenakan kondisi medium filter yang sama yaitu mengandung kandungan air. Sehingga distribusi N_2O di dalam kompos tidak jauh berbeda dengan waktu *unsteady* selama 6-7 jam. Perbedaan penambahan nutrisi selain

meningkatkan kandungan air juga meningkatkan performa biofilter yang berhubungan dengan kinerja mikroba dalam mendegradasi N_2O . Hal inilah yang membedakan penambahan nutrisi dengan penambahan kandungan air biasa. Perbedaan antara kedua percobaan tersebut terletak pada daya adsorpsi dan degradasi dari kinerja biofilter. Pada kompos yang ditambahkan nutrisi baik alami maupun sintetis memiliki persen efisiensi reduksi N_2O yang lebih tinggi jika dibanding dengan penambahan air biasa.

Pemberian nutrisi khususnya nutrisi sintetis selain bertujuan memberikan suplemen kepada semua mikroba yang terkandung di dalam kompos. Nutrisi ini lebih cocok ditujukan untuk pertumbuhan bakteri nitrifikasi berdasarkan penelitian yang telah dilakukan (Yang, et.al.,2007). Oleh karena itu untuk memaksimalkan pemanfaatan nutrisi sintetis yang diberikan, maka kompos ditambahkan *nitrobacter,sp* terlebih dahulu sebelum diberi larutan nutrisi. Agar perbandingan ini memiliki parameter awal, maka dilakukan percobaan biofiltrasi dengan kompos yang ditambahkan nitrobakter tanpa suplai nutrisi. Dari parameter inilah dapat di bandingkan besar pengaruh penambahan nutrisi baik sintetis maupun alami terhadap peningkatan efisiensi reduksi N_2O .

Berikut ini adalah gambar hasil perbandingan penggunaan nutrisi alami dan nutrisi sintetis dalam mereduksi N_2O . Dari Gambar 4.16 dapat dilihat dengan perbedaan antara penggunaan tanpa nutrisi, dan dengan nutrisi baik sintetis maupun alami.



Gambar 4. 16 Perbandingan Tanpa dan Penggunaan nutrisi pada Kompos terhadap Efisiensi Reduksi N_2O

Gambar 4.16 diatas bahwa menunjukkan bahwa efisiensi paling besar adalah penambahan nutrisi sintetis. Efisiensi reduksi N_2O yang dihasilkan sebesar 76,9 %. Apabila dibandingkan dengan percobaan tanpa nutrisi menghasilkan efisiensi reduksi 4,2% lebih tinggi. Jika dibandingkan dengan penggunaan nutrisi alami menghasilkan efisiensi reduksi N_2O 2,2 % lebih tinggi.

Peningkatan efisiensi reduksi N_2O karena penambahan nutrisi sintetis dikarenakan nutrisi ini memiliki mineral-mineral yang dibutuhkan mikroba khususnya mikroba yang berkaitan langsung dengan degradasi N_2O . Sedangkan nutrisi alami tidak memiliki mineral selengkap nutrisi sintetis. Namun, nutrisi alami juga mengandung banyak mikroba tambahan hasil dari kotoran sapi, dimana mikroba ini juga membantu performa biofilter dalam mereduksi N_2O .

Jika dilihat dari komposisi nutrisi dan *trace element* yang ditambahkan mengandung unsur-unsur N, S, P, Ca, K, Na, Mg, Fe, Co, dan Zn. Menurut Shuler dan Kargi (1992) mineral yang dibutuhkan oleh mikroba mengandung S, P, Ca, K, Na, Mg, Fe, Co, dan Zn. Sama halnya seperti yang ditambahkan dalam percobaan ini. Hal inilah yang menyebabkan hasil dari penambahan nutrisi sintetis lebih baik dibandingkan nutrisi alami.

4.4.5 Hasil Uji Perkembangan Mikroba pada Kompos

Pengujian perkembangan jumlah mikroba pada kompos sebelum dan sesudah biofiltrasi dilakukan dengan uji *Total Plate Count* (TPC). *Total Plate Count* (TPC) adalah salah satu uji analisis untuk mengetahui jumlah koloni mikroba pada suatu sampel. 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. Pertama, 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. Kedua, pembuatan Nutrien Agar (NA) sebagai medium mikroba. Pembuatan medium ini sebagaimana telah dijelaskan pada Bab 3 dimana selalu dilakukan sterilisasi sebelum digunakan. Ketiga, 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 34-35°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. 17 Medium Agar Sebelum Digunakan Uji TPC



Gambar 4. 18 Hasil Uji TPC pada Kompos Sebelum Biofiltrasi



Gambar 4. 19 Hasil Uji TPC pada Kompos Kering Setelah Biofiltrasi
(Q= 72 cc/menit; h= 50 cm; Medium Kering)

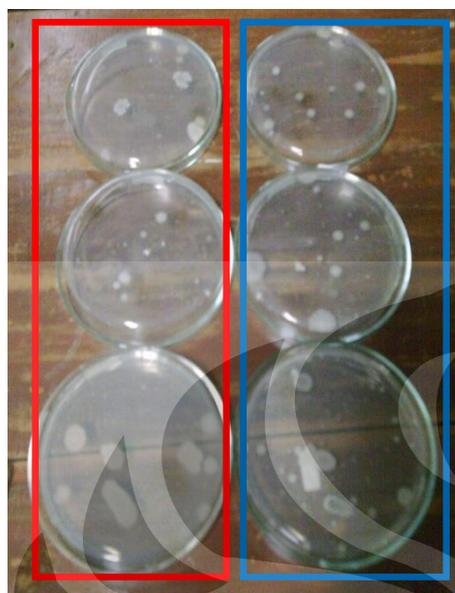
Gambar-gambar diatas adalah hasil uji TPC yang dilakukan dengan tiga kali pengenceran sampel kompos (10^6 , 10^7 , 10^8) yang diuji dengan metode replikasi dan didapat jumlah rata-rata koloni bakteri dari pengujian ini. Pada hasil uji TPC ini dapat dilihat perbedaan jumlah bakteri sebelum dan sesudah dilakukan biofiltrasi secara visual dan perhitungan bahwa jumlah koloni setelah biofiltrasi lebih banyak dari sebelum dilakukan biofiltrasi. Peningkatan jumlah mikroba juga dibuktikan berdasarkan tabel jumlah mikroba hasil perhitungan dari uji TPC dengan cara perhitungan yang dijelaskan pada Lampiran 9.

Tabel 4. 2 Hasil Uji TPC Sebelum Dan Setelah Biofiltrasi

Sampel Uji TPC	Σ Bakteri Setelah Biofiltrasi (CFU/g)
Kompos Sebelum Biofiltrasi	$5,32 \cdot 10^9$
Kompos Setelah Biofiltrasi Variasi Laju Alir	$1,08 \cdot 10^{10}$

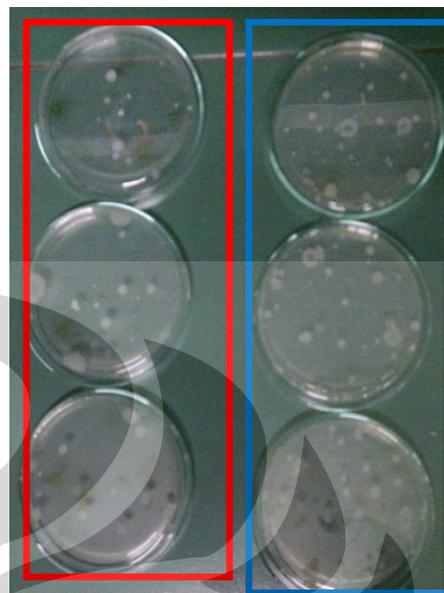
Berdasarkan Tabel 4.2 dapat diketahui bahwa setelah biofiltrasi dilakukan, jumlah mikroba yang dihitung dengan metode TPC meningkat. Hal tersebut dapat dilihat dari peningkatan hasil perhitungan uji TPC dari $5,32 \cdot 10^9$ menjadi $1,08 \cdot 10^{10}$

CFU/g. Jumlah mikroba yang dihasilkan sesuai dengan referensi kandungan mikroba dalam kompos pada Tabel 2.3.



Sebelum (a) **Sesudah**

Gambar 4. 20 Hasil Uji TPC pada Kompos dengan penambahan air 60% (w/w)
($Q = 70,02$ cc/menit; $h = 50$ cm)



Sebelum (b) **Sesudah**

Gambar 4. 21 Hasil Uji TPC pada Kompos yang diberi *Nitrobacter, sp* dan Nutrisi Sintetik ($Q = 70,02$ cc/menit; $h = 50$ cm)

Gambar 4.20 adalah hasil uji TPC secara visual yang dilakukan pada kompos yang diberi perlakuan penambahan air. Pada hasil uji TPC ini dapat dilihat perbedaan jumlah bakteri sebelum dan sesudah dilakukan biofiltrasi secara visual. Hasil perhitungan dari uji TPC juga menunjukkan bahwa jumlah koloni setelah biofiltrasi lebih banyak dari sebelum dilakukan biofiltrasi (Tabel 4.3). Peningkatan jumlah mikroba pada kompos setelah biofiltrasi dengan penambahan kandungan air lebih besar jika di bandingkan dengan kompos kering hasil biofiltrasi. Hal ini dapat terjadi karena adanya penambahan tingkat kelembapan medium yang menciptakan kondisi lingkungan optimum untuk pertumbuhan mikroba sehingga lebih meningkatkan perkembangan jumlah mikroba di dalam medium filter.

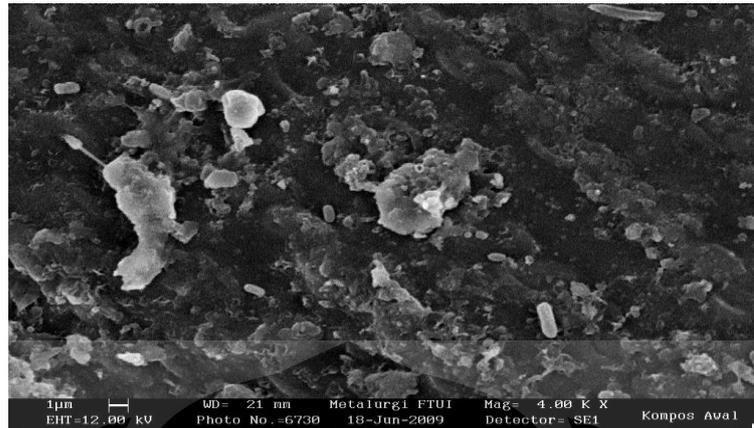
Tabel 4. 3 Hasil Uji TPC pada Variasi Kandungan Air (Q = 72 cc/menit, h= 50 cm)

Sampel Uji TPC		Σ Bakteri Setelah Biofiltrasi (CFU/g)	$\Delta\Sigma$ bakteri Setelah Biofiltrasi (CFU/g)
Kompos Sebelum Biofiltrasi		$5.32.10^9$	
Variasi Kandungan Air dalam Kompos (%w/w) Setelah Biofiltrasi	30	$1.92.10^{10}$	$1.39.10^{10}$
	40	$1.98.10^{10}$	$1.45.10^{10}$
	50	$2.06.10^{10}$	$1.53.10^{10}$
	60	$2.03.10^{10}$	$1.49.10^{10}$
	70	$2.04.10^{10}$	$1.51.10^{10}$

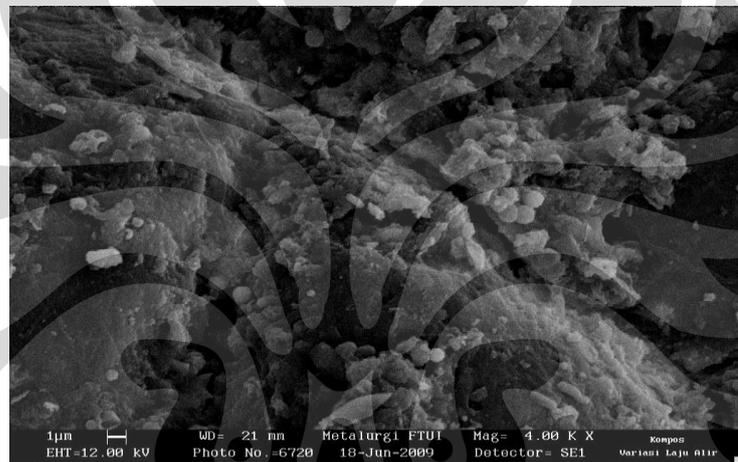
Tabel 4. 4 Hasil Uji TPC pada Penambahan Nutrisi (Alami dan Sintetik) (Q= 72 cc/menit, h = 50 cm, Kandungan air 60 % (w/w))

Jenis Perlakuan	Σ Bakteri Sebelum Biofiltrasi (CFU/g)	Σ Bakteri Setelah Biofiltrasi (CFU/g)
<i>Nitrobacter,sp</i>	$2,63. 10^{10}$	$3,97,10^{10}$
<i>Nitrobacter,sp</i> +Nutrisi Sintetik	$2,99. 10^{10}$	$4,77,10^{10}$
<i>Nitrobacter,sp</i> +Nutrisi Alami	$3,36. 10^{10}$	$4,90,10^{10}$

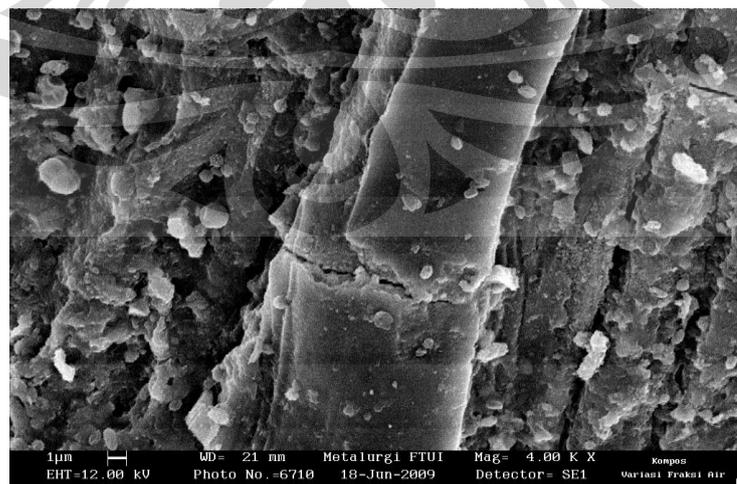
Berdasarkan Tabel 4.4 juga dapat diketahui bahwa setelah biofiltrasi dilakukan, jumlah mikroba yang dihitung dengan metode TPC jumlahnya meningkat. Hal ini juga terlihat dari hasil visual TPC (Gambar 4.21) pada uji variasi ini dimana kompos dengan penambahan nutrisi sintetik yang menghasilkan efisiensi terbaik dari kinerja biofilter pada penelitian ini. Sebagai contoh untuk efisiensi reduksi terbesar untuk biofiltrasi pada penambahan *Nitrobacter, sp* dan nutrisi sintetik didapat perubahan jumlah koloni mikroba dari $2,99 \times 10^{10}$ menjadi $4,77 \times 10^{10}$ CFU/g. Peningkatan ini dapat terjadi seperti yang dipaparkan pada pembahasan sebelumnya. Salah satunya yaitu adanya energi (ATP) yang berasal dari transformasi polutan udara yang mengalir pada biofilter (Shuler & Kragi, 1992). Peningkatan jumlah mikroba setelah biofiltrasi juga diperkuat dari hasil uji kompos menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) untuk melihat morfologi kompos.



Gambar 4. 22 Hasil Uji SEM pada Kompos Sebelum Biofiltrasi



Gambar 4. 23 Hasil Uji SEM pada Kompos Setelah Variasi Laju Alir



Gambar 4. 24 Hasil Uji SEM Setelah Variasi Kandungan Air pada Kompos

Berdasarkan hasil SEM diatas, dapat dilihat perbedaan pada kompos yang belum digunakan biofiltrasi dengan kompos yang telah digunakan biofiltrasi untuk variasi laju alir dan variasi kandungan air. Jelas tampak bahwa kompos yang belum digunakan lebih sedikit bakteri yang terlihat daripada kompos yang sudah digunakan biofiltrasi. Perbedaan juga terdapat pada kompos yang telah ditambahkan kandungan airnya pada proses biofiltrasi. Hasilnya, jumlah bakteri yang terkandung dalam kompos tersebut lebih banyak dibandingkan kompos kering yang juga sudah digunakan untuk proses biofiltrasi. Adanya kandungan air dapat menciptakan kondisi lingkungan optimum untuk perkembangan mikroba, sehingga dapat meningkatkan kinerja bakteri tersebut dalam mendegradasi untuk mendapatkan nutrisi yang lebih dari hasil degradasi tersebut.

Fenomena peningkatan jumlah bakteri pada kompos setelah dilakukan biofiltrasi memperkuat analisis bahwa terjadi proses degradasi dalam reduksi polutan di dalam kinerja biofilter. Selain itu juga dapat disimpulkan bahwa kompos yang telah digunakan pada proses biofiltrasi akan lebih baik kualitasnya. Hal ini dikarenakan meningkatnya jumlah bakteri sebagai penyubur tanaman yang ada di dalam kompos.



BAB 5

KESIMPULAN

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

- Pencapaian efisiensi reduksi optimum sebesar 56,7% pada variasi laju alir sebesar 72 cc/menit, sehingga disimpulkan semakin kecil laju alir N₂O maka semakin banyak N₂O yang teradsorp dan terdegradasi oleh medium filter.
- Kandungan air 60% dari berat kompos merupakan kandungan air optimum dalam mereduksi N₂O dengan efisiensi reduksi sebesar 70,13 %
- Penggunaan nutrisi baik alami maupun sintetik dapat meningkatkan efisiensi reduksi N₂O.
- Penambahan *Nitrobacter,sp* dan nutrisi sintetik pada kompos dapat meningkatkan efisiensi reduksi N₂O 2,2% lebih tinggi dibandingkan nutrisi alami.
- Kinerja biofilter pada penelitian ini dalam mereduksi N₂O mencapai efisiensi reduksi sebesar 75,9 % dengan ketinggian medium 50 cm, laju alir N₂O 72 cc/menit, kandungan air 60% dan penambahan nutrisi sintetik serta *Nitrobacter,sp* pada kompos sebagai medium filter.

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
- Barnes, J.M, W.A. Apel, K.B. Barrett. 1994. *Removal of Nitrogen Oxides from Gas Stream using Biofiltration*, J. Hazard. Matter.
- Bohn HL. 1992. *Considering biofiltration for decontaminating gases*. Chem Eng Prog 88:34–40
- Bruciak, Jhon S. *Environmental Stedward Report*. www.brownsville.com (Diakses tanggal 25 April 2008).
- Chung, Y.C., Huang, C., Tseng, C.P., Pan, J.R. 2000. *Biotreatment of H₂S and NH₃ containing waste gases by co-immobilized cells biofilter*. Chemosphere 41, 329–336
- Corsi RL, Seed L. 1995. *Biofiltration of BTEX: media, substrate and loading effects*. Environ Prog 14:151–158
- Deviny, J.S., Deshusses, M.A., dan Webster, T.S. 1999. *Biofiltration of Air Pollution Control*. Lewis Publishers, NY.
- 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
- EPA. 2003. *Using Bioreactors to Control Air Pollution*. US North Carolina: Author.
- Fernando, Sandun., Crish Hall, dan Saroj Jha. 2005. *NO_x Reduction from Biodiesel Fuels*. Department of Agricultural and Biological Engineering, Mississippi State University.
- Gaur, A.R. 1983. *Manual of Rural Composting*. FAO USA.
- Giggey MD, Dwinal CA, Pinnette JR, O'Brien MA .1994. *Performance testing of biofilters in a cold climate*. In: ProcWater Environment Federation

- Speciality Conf Odor and Volatile Organic Compound Emission Control for Municipal and Industrial Wastewater Facilities, Jacksonville, FL, pp 29–39
- Govind, R. 1998. *Biofiltration: An Innovative Technology for The Future*. Paper submitted to Environmental Progress.
- Graham, Lisa A., Rideout, Greg., Rosenblatt, Deborah., & Jill Hendren. 2008. *Greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles*. Emissions Research and Measurement Division, Environmental Science and Technology Centre, Canada.
- Hodge DS, Medina VF, Islander RL, Deviny JS. 1991. *Treatment of hydrocarbon fuel vapors in biofilters*. Environ Technol 12:655–662
- Holland, Charles D. 2000. *A Summary of NOx reduction Technologies For Advancement of Chemical Engineerin*. Texas A&M University.
- Hong, Jih Yung. 2003. *Manure Compost Biofilter*. Bioindustrial Machinery Engineering, Sonchon National University.
- Hudepohl, Nate J. 1999. *Biofilter Technology for NOx Control*. University of California, Davis.
- Kennes C, Veiga C, Prado O. 2001. *Non biological treatment technologies*. In: Kennes C, Veiga MC (eds) *Bioreactors for waste gas treatment*. Kluwer, Dordrecht, pp 17–46
- Kennes, C., dan Thalasso F. 1998. *Waste gas biotreatment technology*. J. Chem. Technol. Biotechnol. 72:303-319.
- 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
- Leson G, Winter AM. 1991. *Biofiltration: an innovative air pollution control technology for VOC emissions*. J AirWasteManage Assoc 41(8):1045–1054
- Liu, Yonghui, Xie Quan, Yazhi Zhao, Shuo Chen, and Huimin Zhao. 2004. *Removal of Ternary VOCs in air streams at high loads using a compost-based biofilter*. Dalian University of Technology, China.

- Martens W., Martinec M., Zapirain 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.
- McNevin D, Baford J. 2000. *Biofiltration as an odour abatement strategy*. Biochem Eng J 5:231–242
- 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
- Morales M, Hernández S, Cornabé T, Revah S, Auria R. 2003. *Effect of drying on biofilter performance: modeling and experimental approach*. Environ Sci Technol 37:985–992
- 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 53:1011–1021
- Ottengraf SPP. 1987. *Biological system for waste gas elimination*. TIBTECH 5:132–136
- Pandey, Ashok. 2004. *Concise Encyclopedia of Bioresource Technology*. The Haworth Press, Inc :New York
- Prameswari, Adisty. *Pencemaran udara oleh Hidrokarbon*. <http://dizzproperty.blogspot.com/2007/10/pencemaran-udara-oleh-hidrokarbon.html> (Diakses tanggal 12 Mei 2008).
- Schlegelmilch, M., J. Streese, and R. Stegmann. 2005. *Odour management and treatment technologies: an overview*. Waste Manage, Vol. 25 pp 928–939.
- Schnelle, Karl B dan Charles Arnold Brown. 2001. *Air pollution control technology handbook*
- Shareefdeen Z, Baltzis BC, Oh Y-S, Bartha R. 1993. *Biofiltration of methanol vapors*. Biotechnol Bioeng 41: 512–524
- Shareefdeen/Singh (Eds.). 2005. *Biotechnology for Odor and Air Pollution Control* © Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Sheridan B.A., Curran T.P., dan. 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.

- Shuler ML, Kargi F. 1992. *Bioprocess engineering—basic concepts*. Prentice Hall, Englewood Cliffs
- Sutanto, Rachman. 2002. *Penerapan Pertanian Organik*. Jakarta
- Swanson WJ, Loehr RC. 1997. *Biofiltration: fundamentals, design and operations principles and applications of biological APC technology*. J Environ Eng ASCE 123:538–54
- 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
- Wahyuni, Ahnur. 2004. *Penghilangan H₂S dengan Metode Biofilter Menggunakan Media Kompos dan Arang Aktif*. Fakultas Teknologi Pertanian. IPB.
- Wani AH, Branion RMR, Lau AK. 1997. Biofiltration: *a promising and costeffective control technology for odors, VOCs and air toxics*. J Environ Sci Health A32:2027–2055
- Yang, Wan-Fa, Haoj-Jan Hsing, Yu-Chiung Yang and Jieh- Yu Shyung. 2007. *The Effect of Selected Parameters on The Nitric Oxide Removal by Biofilter*. National Taiwan University, Taiwan.
- Anonim. *NO_x Removal*. www.NoXRemoval.com/index (Diakses tanggal 15 April 2008).
- Anonim. *Pajanan (exposure)*. www.udarakota.bappenas.go.id (Diakses tanggal 2 Mei 2008).

Lampiran 1. Data Hasil Kalibrasi N₂O

volume	Waktu Retensi		Luas Area	
	Udara	N ₂ O	Udara	N ₂ O
1.00E-06	0.177	0.675	3772946	108900
1.00E-06	0.175	0.672	3774931	109697
7.00E-07	0.183	0.675	3031124	77969
7.00E-07	0.192	0.682	3188484	78819
3.00E-07	0.187	0.678	1467563	34628
3.00E-07	0.193	0.683	1404942	33436
1.00E-07	0.175	0.678	899775	15997
1.00E-07	0.181	0.672	887567	15788
0.00E+00	0	0	0	0
0.00E+00	0	0	0	0

Keterangan :

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

Waktu Retensi Udara = 0,183 menit

Waktu Retensi N₂O = 0,677 menit

Lampiran 2. Data Hasil Kalibrasi *Flowmeter*

Skala <i>Flowmeter</i>	Volum <i>buble soap</i> (cc)	Waktu (s)	Laju alir aktual	Laju alir aktual rata- rata
0,1	10	8,17	73,44	72
	10	8,44	71,09	
	10	8,04	74,63	
	10	8,48	70,75	
	10	8,55	70,18	
0,15	10	6,62	90,63	88
	10	6,87	87,34	
	10	6,73	89,15	
	10	6,86	87,46	
	10	6,85	87,59	
0,175	10	5,64	106,38	105
	10	5,83	102,92	
	10	5,72	104,90	
	10	5,76	104,17	
	10	5,69	105,45	
0,2	10	4,88	122,95	127
	10	4,6	130,43	
	10	4,86	123,46	
	10	4,71	127,39	
	10	4,55	131,87	
0,3	10	3,68	163,04	186
	10	3,18	188,68	
	10	3,09	194,17	
	10	3,15	190,48	
	10	3,12	192,31	
0,4	10	2,55	235,29	233
	10	2,85	210,53	
	10	2,62	229,01	
	10	2,31	259,74	
	10	2,61	229,89	
0,6	10	1,97	304,57	305
	10	1,99	301,51	
	10	1,88	319,15	
	10	2,03	295,57	
	10	1,98	303,03	
0,8	10	1,72	348,84	363
	10	1,64	365,85	

	10	1,72	348,84	
	10	1,52	394,74	
	10	1,67	359,28	
1	10	1,4	428,57	473
	10	1,16	517,24	
	10	1,33	451,13	
	10	1,23	487,80	
	10	1,25	480,00	



Lampiran 3. Data Hasil Uji Kebocoran dan Uji Blangko

t (menit)	Luas Area <i>Peak N₂O</i>	
	Sampling port atas	Sampling port bawah
1	108900	4708
15	108900	18412
30	108900	33328
45	108900	51810
60	108900	68403
75	108900	71740
90	108900	77213
105	108900	87052
120	108900	88765
135	108900	90461
150	108900	96882
165	108900	99881
180	108900	101888
195	108900	101940
210	108900	100600
225	108900	102674
240	108900	106043
255	108900	106627
270	108900	109802

Lampiran 4. Data Hasil Uji Variasi Laju Alir

a. Laju alir = 72 cc/menit (h = 50 cm, kompos kering = 945 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N2O (m3)	Massa N2O (gr)	konsentrasi N2O (g/m3)	% RE
	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap Air	N2O				
0	0.187	0.503	0.68	1607429	334	24201	98.4966	0.0204	1.483	8.533E-07	0.00154618	1546.1796	0
1	0.188	0.533	0.682	948591	267	12942	98.5336	0.0278	1.3444	0.000000478	0.000866136	866.136	43.982187
2	0.193	0.542	0.688	871672	399	11908	98.5828	0.0259	1.3462	4.43533E-07	0.000803682	803.6824	48.021407
3	0.203	0.542	0.688	1302805	5362	10154	98.2931	0.4045	0.7661	3.85067E-07	0.000697741	697.7408	54.873237
4	0.178	0.523	0.67	1965828	4139	10165	99.2776	0.209	0.5133	3.85433E-07	0.000698405	698.4052	54.830267
5	0.195	0.543	0.69	1167802	3998	10595	98.6393	0.3377	0.8949	3.99767E-07	0.000724377	724.3772	53.150514
6	0.187	0.533	0.678	1521426	3648	9881	99.1142	0.2376	0.6437	3.75967E-07	0.000681252	681.2516	55.939685
7	0.195	0.542	0.687	1054240	3200	9536	98.8042	0.2999	0.8938	3.64467E-07	0.000660414	660.4136	57.287394
8	0.18	0.523	0.668	1278543	3175	9779	98.997	0.2458	0.7572	3.72567E-07	0.000675091	675.0908	56.338138
9	0.195	0.542	0.687	1054240	3200	9676	98.8042	0.2999	0.8938	3.69133E-07	0.00066887	668.8696	56.7405

b. Laju alir = 88,44 cc/menit (h = 50 cm, kompos kering = 945 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N2O (m3)	Massa N2O (gr)	konsentrasi N2O (g/m3)	% RE
	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap Air	N2O				
0	0.193	0.555	0.705	2257095	14960	29653	98.0618	0.6499	1.2883	1.03503E-06	0.00187548	1875.4804	0
1	0.167	0.493	0.632	1391748	7474	16303	97.6306	0.5243	1.8451	5.90033E-07	0.00106914	1069.1404	42.993784
2	0.193	0.55	0.702	1829671	604	15152	98.6064	0.0326	1.3555	5.51667E-07	0.00099962	999.62	46.700589

3	0.197	0.557	0.707	1782071	10888	15850	98.5218	0.602	0.8763	5.74933E-07	0.001041779	1041.7792	44.452675
4	0.195	0.56	0.71	1722924	8603	12385	98.7965	0.4933	0.7102	4.59433E-07	0.000832493	832.4932	55.611736
5	0.193	0.557	0.707	1553029	8816	13766	98.5397	0.5594	0.8734	5.05467E-07	0.000915906	915.9056	51.164214
6	0.188	0.552	0.703	2151642	7864	12301	99.071	0.3621	0.5664	4.56633E-07	0.00082742	827.4196	55.882258
7	0.195	0.555	0.705	1365721	7002	12501	98.592	0.5055	0.9025	4.633E-07	0.0008395	839.4996	55.238157
8	0.195	0.558	0.708	1544702	7270	12598	98.6997	0.4645	0.8049	4.66533E-07	0.000845358	845.3584	54.925767
9	0.198	0.557	0.707	1340719	6145	12120	98.656	0.4522	0.8918	4.506E-07	0.000816487	816.4872	56.46517

c. Laju alir = 104,76 cc/menit (h = 50 cm, kompos kering = 945 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N2O (m3)	Massa N2O (gr)	konsentrasi N2O (g/m3)	% RE
	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap Air	N2O				
0	0.187	0.503	0.68	1607429	334	24201	98.4966	0.0204	1.483	8.533E-07	0.00154618	1546.1796	0
1	0.188	0.538	0.683	1272500	451	18227	98.5283	0.0349	1.4113	6.54167E-07	0.00118535	1185.35	23.336849
2	0.177	0.508	0.647	1401077	3989	15045	98.6597	0.2809	1.0594	5.481E-07	0.000993157	993.1572	35.767022
3	0.18	0.515	0.653	1545769	4414	14416	98.7965	0.2821	0.9214	5.27133E-07	0.000955166	955.1656	38.224149
4	0.167	0.5	0.64	3280526	5363	14200	99.4072	0.1625	0.4303	5.19933E-07	0.000942119	942.1192	39.067932
5	0.17	0.5	0.64	1227387	4179	14427	98.5067	0.3354	1.1579	5.275E-07	0.00095583	955.83	38.181179
6	0.16	0.5	0.642	3525998	5365	13772	99.4602	0.1513	0.3885	5.05667E-07	0.000916268	916.268	40.739873
7	0.18	0.513	0.655	1376717	3840	13976	98.6997	0.2753	1.0019	5.12467E-07	0.00092859	928.5896	39.942967
8	0.18	0.508	0.648	1312078	3592	12927	98.7567	0.2703	0.973	4.775E-07	0.00086523	865.23	44.040783
9	0.185	0.517	0.655	1015447	3013	11848	98.5576	0.2924	1.15	4.41533E-07	0.000800058	800.0584	48.255791

d. Laju alir = 127,22 cc/menit (h = 50 cm, kompos kering = 945 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N2O (m3)	Massa N2O (gr)	konsentrasi N2O (g/m3)	% RE
	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap Air	N2O				
0	0.165		0.657	3648632		109522	97.0858		2.9142	1.07187E-06	0.001942228	1942.22844	0
1	0.173	0.54	0.688	3831284	24437	74713	97.4774	0.6217	1.9009	7.2378E-07	0.001311489	1311.48936	32.47502
2	0.173	0.537	0.683	3851491	32897	96855	96.7409	0.8263	2.4328	9.452E-07	0.001712702	1712.7024	11.817664
3	0.17	0.535	0.682	4069218	32016	94080	96.9793	0.763	2.2421	9.1745E-07	0.001662419	1662.4194	14.406598
4	0.172	0.532	0.678	3851028	27748	85000	97.1553	0.7	2.1444	8.2665E-07	0.00149789	1497.8898	22.877774
5	0.175	0.528	0.673	4412712	29984	82355	97.5174	0.6626	1.82	8.002E-07	0.001449962	1449.9624	25.345424
6	0.175	0.538	0.685	3784788	28355	89543	96.9776	0.7265	2.2944	8.7208E-07	0.001580209	1580.20896	18.639387
7	0.175	0.535	0.682	3865957	25624	82299	97.2842	0.6448	2.071	7.9964E-07	0.001448948	1448.94768	25.397669
8	0.173	0.537	0.683	3998520	24810	75856	97.5442	0.6052	1.8505	7.3521E-07	0.001332201	1332.20052	31.40866
9	0.175	0.538	0.685	3850753	28155	62025	97.6918	0.7143	1.5753	5.969E-07	0.001081583	1081.5828	44.312277

e. Laju alir = 185,74 cc/menit (h = 50 cm, kompos kering = 945 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N2O (m3)	Massa N2O (gr)	konsentrasi N2O (g/m3)	% RE
	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap Air	N2O				
0	0.173	0.512	0.663	4024512	124	93317	98.0844	0.007	1.8993	9.0982E-07	0.001648594	1648.59384	0
1	0.17	0.513	0.655	4441447	59808	71747	97.1232	1.3078	1.5689	6.9412E-07	0.001257745	1257.74544	23.707986
2	0.175	0.51	0.655	4505093	44512	67737	95.7193	0.9458	1.4392	6.5402E-07	0.001185084	1185.08424	28.115451
3	0.175	0.517	0.658	3875636	51088	77773	0.02	93.4355	1.2317	7.5438E-07	0.001366937	1366.93656	17.084698
4	0.177	0.533	0.675	3656772	43998	69604	96.987	1.1669	1.8461	6.7269E-07	0.001218914	1218.91428	26.063397
5	0.167	0.507	0.65	3936983	41202	73262	97.1791	1.1025	1.8084	7.0927E-07	0.001285197	1285.19724	22.042822

6	0.183	0.53	0.672	3803396	37552	70734	97.2317	0.96	1.8083	6.8399E-07	0.00123939	1239.38988	24.821393
7	0.183	0.527	0.668	3580555	37742	72203	97.0209	1.0227	1.9565	6.9868E-07	0.001266008	1266.00816	23.206788
8	0.192	0.538	0.68	3521983	38954	80683	96.7045	1.0696	2.2154	7.8348E-07	0.001419666	1419.66576	13.886263
9	0.178	0.527	0.667	3593877	36035	53527	97.5685	0.9783	1.4532	5.1192E-07	0.000927599	927.59904	43.733925

f. Laju alir = 232,89 cc/menit (h = 50 cm, kompos kering = 945 g)

Waktu (Jam)	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi (GC)			Vol. N2O (m3)	Massa N2O (gr)	konsentrasi N2O (g/m3)	% RE
	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap Air	N2O				
0	0.173		0.668	3207344		86633	97.3474		2.6294	8.4298E-07	0.00152748	1527.47976	0
1	0.133	0.487	0.63	3712730	41901	59520	97.3409	1.0986	1.5605	5.7185E-07	0.001036192	1036.1922	32.163278
2	0.183	0.537	0.68	3748518	59069	78872	96.4507	1.5199	2.0294	7.6537E-07	0.00138685	1386.85044	9.2066241
3	0.19	0.54	0.683	3698513	48080	76800	96.7338	1.2575	2.0087	7.4465E-07	0.001349306	1349.3058	11.664571
4	0.155	0.508	0.652	3753708	43715	75680	96.9173	1.1287	1.954	7.3345E-07	0.001329011	1329.0114	12.993191
5	0.183	0.53	0.673	3720175	42453	78444	96.8525	1.1052	2.0422	7.6109E-07	0.001379095	1379.09508	9.7143467
6	0.19	0.538	0.68	3734474	36757	75818	97.0737	0.9555	1.9708	7.3483E-07	0.001331512	1331.51196	12.829486
7	0.178	0.53	0.673	3683098	34234	70337	97.2317	0.9038	1.8569	6.8002E-07	0.001232196	1232.19624	19.331419
8	0.183	0.535	0.678	3605807	24990	59386	97.7135	0.6772	1.6093	5.7051E-07	0.001033764	1033.76412	32.322238
9	0.192	0.54	0.683	3702268	26458	54999	97.8472	0.6993	1.4536	5.2664E-07	0.000954272	954.27168	37.526394

**Lampiran 5. Pengolahan Data Perhitungan
EC (*Elimination Capacity*) vs IL (*Inlet Loading*)**

Langkah perhitungan EC vs IL :

- Mencari volum N₂O hasil biofiltrasi setiap inlet
- Mencari massa N₂O berdasarkan persamaan berat jenis ($\rho_{N_2O} = 1812 \text{ g/m}^3$)
- Mencari konsentrasi N₂O (g/m³)
- Menghitung loading setiap laju alir pada t = 9 jam dengan persamaan (2.4) dan (2.6)

Q(m ³ /h)	Luas <i>Peak</i>	volum (m ³)	massa N ₂ O (gr)	C (gr/m ³)	Loading (g/m ³ h ³)	EC (g/m ³ h)
0,0043	9676	$5,45 \cdot 10^{-8}$	$9,88 \cdot 10^{-5}$	98,75	$4,23 \cdot 10^{-5}$	0,00
0,0053	12120	$7,894 \cdot 10^{-8}$	$1,43 \cdot 10^{-4}$	143,04	$6,12 \cdot 10^{-5}$	18,95
0,0063	11848	$7,622 \cdot 10^{-8}$	$1,38 \cdot 10^{-4}$	138,11	$5,91 \cdot 10^{-5}$	16,84
0,0076	62025	$5,7799 \cdot 10^{-7}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	1047,32	$4,48 \cdot 10^{-4}$	405,93
0,0111	53527	$4,9301 \cdot 10^{-7}$	$8,93 \cdot 10^{-4}$	893,33	$3,82 \cdot 10^{-4}$	340,04
0,014	54999	$5,0773 \cdot 10^{-7}$	$9,20 \cdot 10^{-4}$	920,01	$3,94 \cdot 10^{-4}$	351,45

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= 72 cc/menit, h = 50 cm, kompos kering = 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	Udara	Uap Air	N ₂ O				
0	0.173		0.682	3830731	0	116892	97.013		2.9603	1.14557E-06	0.002075773	2075.77284	0
1	0.182	0.543	0.693	4294659	58191	22142	98.1638	1.3301	0.5061	1.9807E-07	0.000358903	358.90284	82.70992
2	0.178	0.548	0.698	4308976	72412	29092	97.6986	1.6418	0.6569	2.6757E-07	0.000484837	484.83684	76.64307
3	0.182	0.55	0.7	3965808	116503	46717	96.047	2.8216	1.1314	4.4382E-07	0.000804202	804.20184	61.25771
4	0.178	0.547	0.697	3920426	147357	62943	94.9089	3.5673	1.5238	6.0608E-07	0.001098217	1098.21696	47.09359
5	0.173	0.523	0.673	4736018	177994	75095	94.9272	3.5677	1.5052	7.276E-07	0.001318411	1318.4112	36.48577
6	0.175	0.537	0.687	4311214	182500	79126	94.2787	3.991	1.7304	7.6791E-07	0.001391453	1391.45292	32.96699
7	0.175	0.53	0.68	4338038	199335	72126	92.1108	4.3244	1.5647	6.9791E-07	0.001264613	1264.61292	39.07749
8	0.168	0.538	0.688	4102161	178738	64586	94.4005	4.1132	1.4863	6.2251E-07	0.001127988	1127.98812	45.65937

9	0.162	0.527	0.677	3663014	166148	61791	94.1418	4.2701	1.5881	5.9456E-07	0.001077343	1077.34272	48.0992
---	-------	-------	-------	---------	--------	-------	---------	--------	--------	------------	-------------	------------	---------

b. Penambahan kandungan air 40% berat kompos ($Q=72$ cc/menit, $h=50$ cm, kompos kering = 945 g)

Waktu	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N2O (m3)	Massa N2O (gr)	konsentrasi N2O (g/m3)	% RE
	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap Air	N2O				
0	0.18		0.677	3859622		117545	97.0445		2.9555	1.1521E-06	0.002087605	2087.6052	0
1	0.163	0.517	0.657	3969943	53544	3350	98.5871	1.3297	0.0832	1.015E-08	1.83918E-05	18.3918	99.119
2	0.172	0.523	0.667	3887146	67292	12768	97.982	1.6962	0.3218	1.0433E-07	0.000189046	189.04596	90.94436
3	0.177	0.533	0.68	3722509	98916	32667	93.7309	2.4906	0.8225	3.0332E-07	0.000549616	549.61584	73.67242
4	0.183	0.633	0.813	4800718	172673	64799	95.2865	3.4273	1.2868	6.2464E-07	0.001131848	1131.84768	45.78248
5	0.173	0.555	0.71	4079856	154948	76825	94.6245	3.5937	1.7818	7.449E-07	0.001349759	1349.7588	35.34415
6	0.173	0.548	0.7	3973296	171961	74638	94.1563	4.075	0.17687	7.2303E-07	0.00131013	1310.13036	37.24243
7	0.168	0.528	0.673	3691339	166740	76238	93.8241	4.2381	1.9378	7.3903E-07	0.001339122	1339.12236	35.85366
8	0.178	0.538	0.685	3792494	154693	68957	94.4312	3.8518	1.717	6.6622E-07	0.001207191	1207.19064	42.17342
9	0.175	0.527	0.673	3527519	89132	40039	96.4675	2.4375	1.095	3.7704E-07	0.000683196	683.19648	67.27367

c. Penambahan kandungan air 50% berat kompos ($Q=72$ cc/menit, $h=50$ cm, kompos kering = 945 g)

Waktu	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N2O (m3)	Massa N2O (gr)	konsentrasi N2O (g/m3)	% RE
	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap Air	N2O				
0	0.158		0.648	3729149	0	110046	97.1273		2.8662	1.07711E-06	0.001951723	1951.72332	0
1	0.175	0.527	0.67	3788730	15104	15961	99.1867	0.3954	0.4179	1.3626E-07	0.000246903	246.90312	87.34948
2	0.175	0.525	0.67	4455407	41243	38704	98.2373	0.9094	0.8534	3.6369E-07	0.000659006	659.00628	66.23465
3	0.158	0.507	0.648	3996650	48213	44402	97.7164	1.1788	1.0856	4.2067E-07	0.000762254	762.25404	60.94456
4	0.183	0.552	0.703	4787104	92224	73368	96.6565	1.8621	1.4814	7.1033E-07	0.001287118	1287.11796	34.05223

5	0.16	0.505	0.647	4303594	128374	76685	95.4425	2.847	1.7007	7.435E-07	0.001347222	1347.222	30.9727
6	0.175	0.533	0.68	4178259	140583	81069	94.9624	3.1951	1.8425	7.8734E-07	0.00142666	1426.66008	26.90254
7	0.175	0.512	0.653	4001835	151742	78081	94.569	3.5859	1.8452	7.5746E-07	0.001372518	1372.51752	29.67663
8	0.182	0.533	0.678	3739154	141863	68660	94.6699	3.5918	1.7384	6.6325E-07	0.001201809	1201.809	38.42319
9	0.175	0.518	0.66	3562584	89648	42240	96.4301	2.4265	1.1433	3.9905E-07	0.000723079	723.0786	62.95179

d. Penambahan kandungan air 60% berat kompos ($Q = 72$ cc/menit, $h = 50$ cm, kompos kering = 945 g)

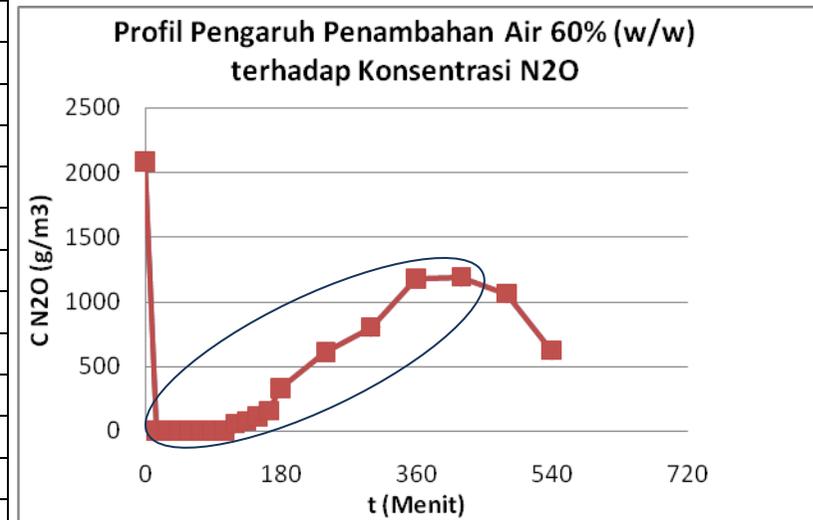
Waktu	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N ₂ O (m ³)	Massa N ₂ O (gr)	konsentrasi N ₂ O (g/m ³)	% RE
	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara	Uap air	N ₂ O	Udara	Uap Air	N ₂ O				
0	0.158		0.672	3912787		116887	97.0908		2.9004	1.14552E-06	0.002075682	2075.68224	0
1	0.188	0.557	0.7	3893616	39424	1402	98.9544	1.0019	0.0356	-9.33E-09	-1.6906E-05	-16.90596	100.8145
2	0.197	0.568	0.717	3952537	62508	7268	98.2653	1.554	0.1807	4.933E-08	8.9386E-05	89.38596	95.69366
3	0.182	0.552	0.702	3883500	104317	26185	96.7488	2.5988	0.6523	2.385E-07	0.000432162	432.162	79.17976
4	0.167	0.533	0.682	4204463	120797	38714	96.3304	2.7676	0.887	3.6379E-07	0.000659187	659.18748	68.24237
5	0.183	0.525	0.67	4273434	148418	55551	95.4445	3.3148	1.2407	5.3216E-07	0.000964274	964.27392	53.54424
6	0.173	0.52	0.662	4246768	167443	61148	94.8853	3.7412	1.3662	5.8813E-07	0.001065692	1065.69156	48.65825
7	0.18	0.523	0.667	4237583	187604	64719	94.3802	4.1783	1.4414	6.2384E-07	0.001130398	1130.39808	45.54089
8	0.183	0.532	0.675	3681906	120054	43693	95.742	3.1218	1.1362	4.1358E-07	0.000749407	749.40696	63.89587
9	0.188	0.535	0.68	3400287	94255	36547	96.2957	2.6693	1.035	3.4212E-07	0.000619921	619.92144	70.13409

- e. Penambahan kandungan air 70% berat kompos (Q= 72 cc/menit, h = 50 cm, kompos kering = 945 g) Penambahan kandungan air 60% berat kompos (Q= 72 cc/menit, h = 50 cm, kompos kering = 945 g)

Waktu	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N2O (m3)	Massa N2O (gr)	konsentrasi N2O (g/m3)	% RE
	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap Air	N2O				
0	0.182	0	0.69	3980576	0	119319	97.0897	0	2.9103	1.16984E-06	0.00211975	2119.75008	0
1	0.167	0.522	0.663	3789577	44543	4124	98.732	1.1605	0.01074	1.789E-08	3.24167E-05	32.41668	98.47073
2	0.168	0.52	0.662	4362074	57425	9007	98.4999	1.2967	0.2034	6.672E-08	0.000120897	120.89664	94.29666
3	0.175	0.537	0.685	5160069	95238	22343	97.7721	1.8046	0.4234	2.0008E-07	0.000362545	362.54496	82.89681
4	0.168	0.525	0.668	3729720	118817	37956	95.9662	3.0572	0.9766	3.5621E-07	0.000645453	645.45252	69.55054
5	0.18	0.528	0.672	3660970	139907	48554	95.1042	3.6345	1.2613	4.6219E-07	0.000837488	837.48828	60.49118
6	0.183	0.638	0.82	5001680	192855	69068	95.0239	3.6639	1.3122	6.6733E-07	0.001209202	1209.20196	42.95545
7	0.165	0.52	0.667	4240957	158630	69982	94.8851	3.5491	1.5658	6.7647E-07	0.001225764	1225.76364	42.17414
8	0.173	0.533	0.682	3751395	186497	62875	93.7669	4.6615	1.5716	6.054E-07	0.001096985	1096.9848	48.24933
9	0.175	0.522	0.667	3702341	115743	38624	95.9922	3.0009	1.0014	3.6289E-07	0.000657557	657.55668	68.97952

Lampiran 7. Profil Efisiensi Reduksi N₂O Saat Penambahan Kandungan Air Pada Awal-awal Percobaan.

FRAKSI 60%					
waktu	luas peak	Vol N2O(m3)	Massa N2O (gr)	Konsentrasi N2O (g/m3)	%RE
0	119319	1.1508E-06	0.00208525	2085.2496	0
15	0	0	0	0	100
30	0	0	0	0	100
45	1009	0	0	0	100
60	1402	0	0	0	100
75	1538	0	0	0	100
90	1612	0	0	0	100
105	2423	0	0	0	100
120	7268	3.029E-08	5.48855E-05	54.88548	97.3679
135	8442	4.203E-08	7.61584E-05	76.15836	96.3478
150	10519	6.28E-08	0.000113794	113.7936	94.5429
165	12884	8.645E-08	0.000156647	156.6474	92.4878
180	22343	1.8104E-07	0.000328044	328.04448	84.2683
240	37956	3.3717E-07	0.000610952	610.95204	70.7013
300	48554	4.4315E-07	0.000802988	802.9878	61.492
360	69068	6.4829E-07	0.001174701	1174.70148	43.6661
420	69982	6.5743E-07	0.001191263	1191.26316	42.8719
480	62875	5.8636E-07	0.001062484	1062.48432	49.0476
540	38624	3.4385E-07	0.000623056	623.0562	70.1208



Lampiran 8. Data Hasil Perbandingan Biofiltrasi dengan Penambahan *Nitrobacter,sp* dan Nutrisi pada Kompos

- a. Penambahan *Nitrobacter,sp* tanpa nutrisi dalam kompos (Q= 72 cc/menit, h = 50 cm, kompos kering = 945 g, kandungan air= 60% w/w)

Waktu	Waktu Retensi			Konsentrasi			Vol.N2O(ml)	Massa N2O (gr)	Konsentrasi N2O(g/m3)	%RE
	Peak 1	Peak 2	Peak 3	Peak 1	Peak 2	Peak 3				
0	0.175		0.675	3811594		113399	1.1106E-06	0.002012	2012.47968	0
1	0.175	0.528		3807400	145746	0	0	0	0	100
2	0.17	0.53	0.672	3801840	181890	1522	0	0	0	100
3	0.177	0.568	0.725	4740169	217186	20812	1.8477E-07	0.000335	334.80324	83.36365
4	0.155	0.505	0.65	3607654	156102	31722	2.9387E-07	0.000532	532.49244	73.54048
5	0.183	0.528	0.673	3662001	165460	36722	3.4387E-07	0.000623	623.09244	69.03857
6	0.178	0.527	0.672	3679607	162536	56180	5.3845E-07	0.000976	975.6714	51.51894
7	0.16	0.512	0.657	3852007	191594	51559	4.9224E-07	0.000892	891.93888	55.67961
8	0.183	0.532	0.677	3599516	174471	40313	3.7978E-07	0.000688	688.16136	65.8053
9	0.165	0.518	0.662	3643470	118006	32620	3.0285E-07	0.000549	548.7642	72.73194

- b. Penambahan *Nitrobacter,sp* dengan nutrisi sintetik dalam kompos (Q= 72 cc/menit, h = 50 cm, kompos kering = 945 g, kandungan air= 60% w/w)

Waktu	Waktu Retensi			Konsentrasi			Vol.N2O(ml)	Massa N2O (gr)	Konsentrasi N2O(g/m3)	%RE
	Peak 1	Peak 2	Peak 3	Peak 1	Peak 2	Peak 3				
0	0.18		0.673	3699310		116553	1.1422E-06	0.00207	2069.63016	0
1	0.173	0.528		3694250	146355	0	0	0	0	100
2	0.167	0.515		3642963	174740	0	0	0	0	100
3	0.172	0.522	0.662	3841126	205888	14620	1.2285E-07	0.000223	222.6042	89.24425
4	0.172	0.522	0.667	3641536	233246	41665	3.933E-07	0.000713	712.6596	65.56585
5	0.168	0.523	0.667	3671471	256339	40723	3.8388E-07	0.000696	695.59056	66.39059
6	0.175	0.522	0.667	3621882	269593	54148	5.1813E-07	0.000939	938.85156	54.63675
7	0.173	0.518	0.663	3749442	292713	60355	5.802E-07	0.001051	1051.3224	49.2024
8	0.175	0.527	0.675	3628205	197903	46587	4.4252E-07	0.000802	801.84624	61.25654
9	0.207	0.587	0.738	3474365	128890	28717	2.6382E-07	0.000478	478.04184	76.90206

- c. Penambahan *Nitrobacter, sp* dengan nutrisi alami dalam kompos ($Q = 72$ cc/menit, $h = 50$ cm, kompos kering = 945 g, kandungan air = 60% w/w)

Waktu	Waktu Retensi			Konsentrasi			Vol.N ₂ O(ml)	Massa N ₂ O (gr)	Konsentrasi N ₂ O(g/m ³)	%RE
	Peak 1	Peak 2	Peak 3	Peak 1	Peak 2	Peak 3				
0	0.19		0.692	3742787		110185	1.0785E-06	0.001954	1954.242	0
1	0.165	0.522		3756184	125203	0	0	0	0	100
2	0.17	0.533		3799352	126330	0	0	0	0	100
3	0.158	0.508	0.653	4096535	158987	14579	1.2244E-07	0.000222	221.86128	88.6472
4	0.168	0.527	0.675	3831298	184398	35240	3.2905E-07	0.000596	596.2386	69.49003
5	0.14	0.497	0.645	3710248	187999	42434	4.0099E-07	0.000727	726.59388	62.81966
6	0.168	0.535	0.682	3655624	153112	40771	3.8436E-07	0.000696	696.46032	64.36161
7	0.2	0.662	0.842	4769500	239422	45592	4.3257E-07	0.000784	783.81684	59.89152
8	0.163	0.515	0.662	3742253	179687	36021	3.3686E-07	0.00061	610.39032	68.76588
9	0.16	0.515	0.662	3975967	185420	29595	2.726E-07	0.000494	493.9512	74.72415

Lampiran 9. Pengolahan Data Hasil *Total Plate Count* (TPC)

Berikut ini adalah langkah langkah perhitungan uji TPC.

- Melakukan pengenceran 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:

$$\Sigma \text{bakteri} = \frac{\text{Jumlah koloni bakteri}}{\text{Volume pengenceran} \cdot \text{volume sampel pada cawan petri}}$$

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

Contoh perhitungan

- Untuk pengenceran 10^6 :

$$\Sigma \text{bakteri} = \frac{40}{10^6 \cdot 0,1 \text{ ml}} = 4 \cdot 10^8$$

- Untuk pengenceran 10^7 :

$$\Sigma \text{bakteri} = \frac{25,5}{10^7 \cdot 0,1 \text{ ml}} = 2,55 \cdot 10^8$$

- Untuk pengenceran 10^8 :

$$\Sigma \text{bakteri} = \frac{13}{10^8 \cdot 0,1 \text{ ml}} = 1,30 \cdot 10^8$$

Dari hasil ketiga jumlah bakteri diatas untuk setiap pengenceran, dirata-ratakan sehingga dapat hasil $5,32 \cdot 10^9$ CFU/g

a. Kompos sebelum biofiltrasi

Pengenceran	Jumlah Koloni	Ratarata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Ratarata jumlah (CFU/g)
$1,00 \cdot 10^6$	41	40	$4,00 \cdot 10^8$	$5,32 \cdot 10^9$
$1,00 \cdot 10^6$	39			
$1,00 \cdot 10^7$	28	25,5	$2,55 \cdot 10^9$	
$1,00 \cdot 10^7$	23			
$1,00 \cdot 10^8$	11	13	$1,30 \cdot 10^{10}$	
$1,00 \cdot 10^8$	15			

b. Kompos kering setelah biofiltrasi pada variasi laju alir terbaik

Pengenceran	Jumlah Koloni	Ratarata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Ratarata jumlah (CFU/g)
$1,00 \cdot 10^6$	65	58	$5,80 \cdot 10^8$	$1,08 \cdot 10^{10}$
$1,00 \cdot 10^6$	51			
$1,00 \cdot 10^7$	33	37,5	$3,75 \cdot 10^9$	
$1,00 \cdot 10^7$	42			
$1,00 \cdot 10^8$	21	28	$2,80 \cdot 10^{10}$	
$1,00 \cdot 10^8$	35			

c. Kompos variasi penambahan kandungan air

- Kandungan air 30% (w/w)

Pengenceran	Jumlah Koloni	Ratarata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Ratarata jumlah (CFU/g)
$1,00 \cdot 10^6$	119	98,5	$9,85 \cdot 10^8$	$1,92 \cdot 10^{10}$
$1,00 \cdot 10^6$	78			
$1,00 \cdot 10^7$	74	66,5	$6,65 \cdot 10^7$	
$1,00 \cdot 10^7$	59			
$1,00 \cdot 10^8$	55	50	$5,00 \cdot 10^{910}$	
$1,00 \cdot 10^8$	45			

- Kandungan air 40% (w/w)

Pengenceran	Jumlah Koloni	Ratarata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Ratarata jumlah (CFU/g)
$1,00 \cdot 10^6$	106	111,5	$1,12 \cdot 10^9$	$1,98 \cdot 10^{10}$
$1,00 \cdot 10^6$	117			
$1,00 \cdot 10^7$	53	67,5	$6,75 \cdot 10^9$	
$1,00 \cdot 10^7$	82			
$1,00 \cdot 10^8$	56	51,5	$5,15 \cdot 10^0$	
$1,00 \cdot 10^8$	47			

- Kandungan air 50% (w/w)

Pengenceran	Jumlah Koloni	Ratarata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Ratarata jumlah (CFU/g)
$1,00 \cdot 10^6$	108	100,5	$1,01 \cdot 10^9$	$2,06 \cdot 10^{10}$
$1,00 \cdot 10^6$	93			
$1,00 \cdot 10^7$	87	88	$8,80 \cdot 10^9$	
$1,00 \cdot 10^7$	89			
$1,00 \cdot 10^8$	51	52	$5,20 \cdot 10^{10}$	
$1,00 \cdot 10^8$	53			

- Kandungan air 60% (w/w)

Pengenceran	Jumlah Koloni	Ratarata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Ratarata jumlah (CFU/g)
$1,00 \cdot 10^6$	129	113,5	$1,14 \cdot 10^9$	$2,03 \cdot 10^{10}$
$1,00 \cdot 10^6$	98			
$1,00 \cdot 10^7$	105	91,5	$9,15 \cdot 10^9$	
$1,00 \cdot 10^7$	78			
$1,00 \cdot 10^8$	49	50,5	$5,05 \cdot 10^{10}$	
$1,00 \cdot 10^8$	52			

- Kandungan air 70% (w/w)

Pengenceran	Jumlah Koloni	Ratarata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Ratarata jumlah (CFU/g)
$1,00 \cdot 10^6$	95	106,5	$1,07 \cdot 10^9$	$2,04 \cdot 10^{10}$
$1,00 \cdot 10^6$	118			
$1,00 \cdot 10^7$	84	81,5	$8,15 \cdot 10^9$	
$1,00 \cdot 10^7$	79			
$1,00 \cdot 10^8$	53	52	$5,20 \cdot 10^{10}$	
$1,00 \cdot 10^8$	51			

d. Kompos dengan penambahan *Nitrobacter, sp* tanpa nutrisi

Sebelum Biofiltrasi

Pengenceran	Jumlah Koloni	Ratarata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Ratarata jumlah
$1,00.10^6$	188	172	$1,72.10^9$	$2,63 .10^{10}$
$1,00.10^6$	156			
$1,00.10^7$	107	101,5	$1,02 . 10^{10}$	
$1,00.10^7$	96			
$1,00.10^8$	71	67	$6,70. 10^{10}$	
$1,00.10^8$	63			

Setelah Biofiltrasi

Pengenceran	Jumlah Koloni	Ratarata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Ratarata jumlah
$1,00.10^6$	225	207	$2,07.10^9$	$3,97.10^{10}$
$1,00.10^6$	189			
$1,00.10^7$	155	141,5	$1,42.10^{10}$	
$1,00.10^7$	128			
$1,00.10^8$	109	103	$1,03.10^{11}$	
$1,00.10^8$	97			

e. Komposdengn penambahan *Nitrobacter,sp* dengan nutrisi sintetik

Sebelum Biofiltrasi

Pengenceran	Jumlah Koloni	Ratarata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Ratarata jumlah
$1,00.10^6$	176	172,5	$1,73. 10^9$	$2,99. 10^{10}$
$1,00.10^6$	169			
$1,00.10^7$	139	121	$1,21.10^{10}$	
$1,00.10^7$	103			
$1,00.10^8$	89	76	$7,60. 10^{10}$	
$1,00.10^8$	63			

Setelah Biofiltrasi

Pengenceran	Jumlah Koloni	Ratarata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Ratarata jumlah
$1,00.10^6$	267	261	$2,61. 10^9$	$4,77. 10^{10}$
$1,00.10^6$	255			
$1,00.10^7$	195	185	$1,85. 10^{10}$	
$1,00.10^7$	175			
$1,00.10^8$	114	122	$1,22.10^{11}$	
$1,00.10^8$	130			

f. Komposdengen penambahan *Nitrobacter,sp* tanpa nutrisi alami

Sebelum Biofiltrasi

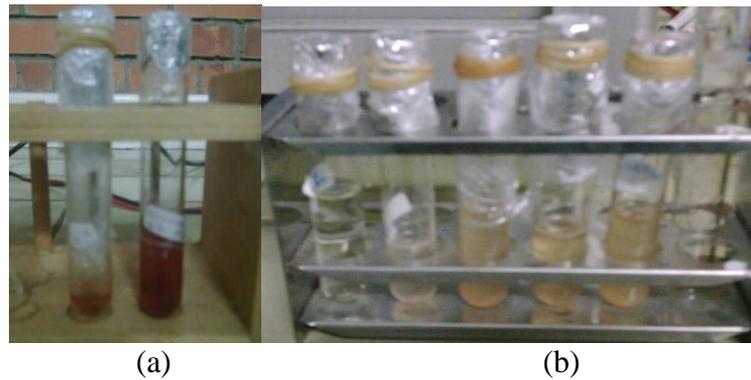
Pengenceran	Jumlah Koloni	Ratarata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Ratarata jumlah
$1,00.10^6$	189	192,5	$1,93 .10^9$	$3,36. 10^{10}$
$1,00.10^6$	196			
$1,00.10^7$	148	124,5	$1,25 . 10^{10}$	
$1,00.10^7$	101			
$1,00.10^8$	82	86,5	$8,65. 10^{10}$	
$1,00.10^8$	91			

Setelah Biofiltrasi

Pengenceran	Jumlah Koloni	Ratarata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Ratarata jumlah
$1,00.10^6$	220	237,5	$2,38. 10^9$	$4,90. 10^{10}$
$1,00.10^6$	255			
$1,00.10^7$	196	175,5	$1,76. 10^{10}$	
$1,00.10^7$	155			
$1,00.10^8$	133	127	$1,27. 10^{11}$	
$1,00.10^8$	121			

Lampiran 10. Dokumentasi Eksperimen

Gambar (a) dan (b) adalah *Nitrobacter, sp* sebagai bakteri nitrifikasi



Gambar (c) dan (d) adalah larutan nutrisi sintetik dan nutrisi alami (limbah cair)



(c)

(d)

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

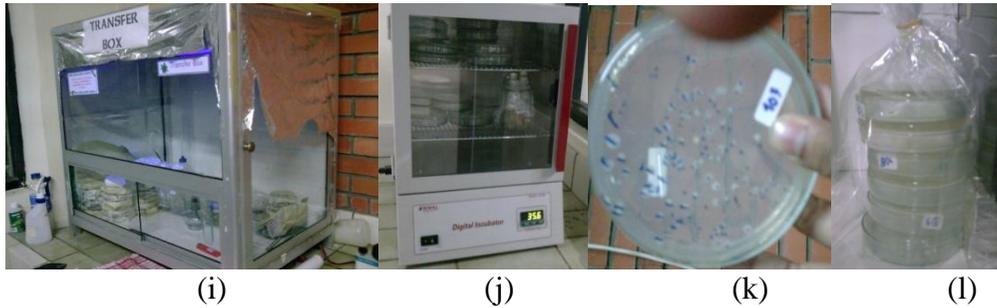


(e)

(f)

(g)

(h)



Keterangan :

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

Lampiran 11. Hasil GC Percobaan Penambahan *Nitrobacter,sp* dan Nutrisi Sintetik