



UNIVERSITAS INDONESIA

**BIOFILTRASI GAS DINITROGEN MONOKSIDA
MENGUNAKAN PELET KOMPOS BERBASIS KOTORAN
KAMBING SEBAGAI MEDIUM FILTER**

SKRIPSI

**IRWAN WARTA ARISANTORO
0606076495**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

HALAMAN JUDUL

**BIOFILTRASI GAS DINITROGEN MONOKSIDA
MENGUNAKAN PELET KOMPOS BERBASIS KOTORAN
KAMBING SEBAGAI MEDIUM FILTER**

SKRIPSI

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

IRWAN WARTA ARISANTORO

0606076495

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA

DEPOK

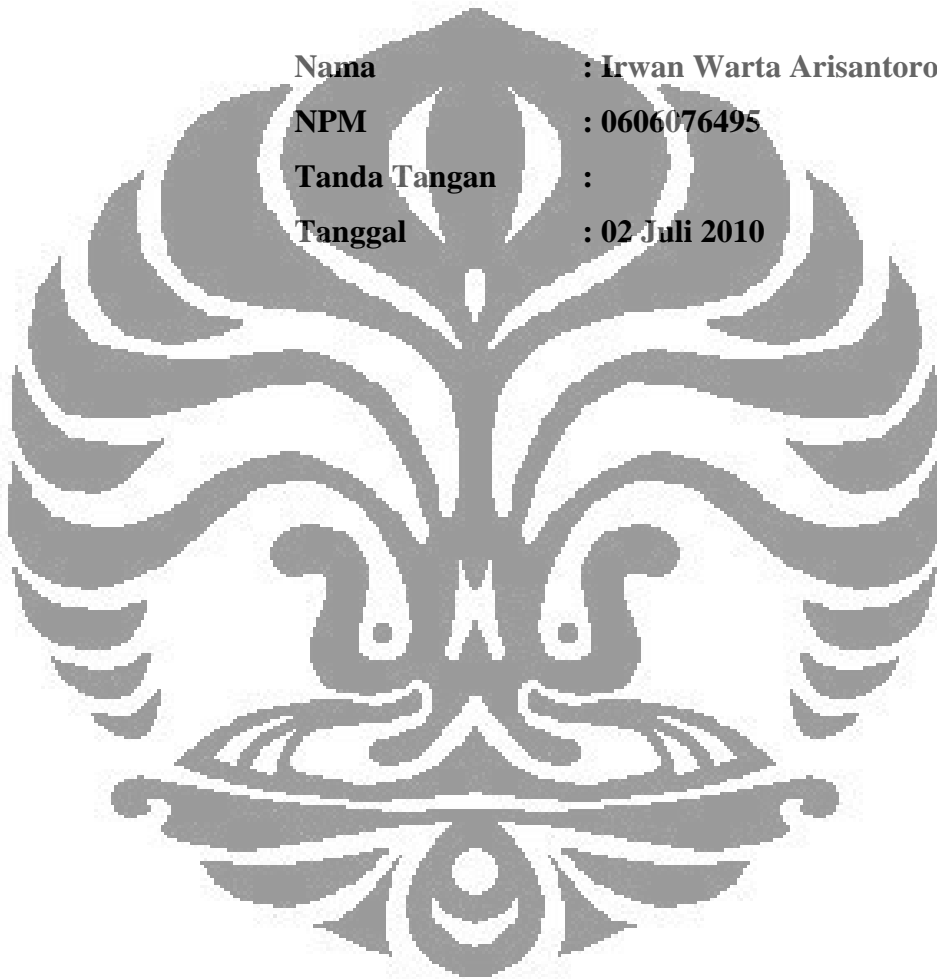
JULI 2010

ii

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Irwan Warta Arisantoro
NPM : 0606076495
Tanda Tangan :
Tanggal : 02 Juli 2010



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Irwan Warta Arisantoro

NPM : 0606076495

Program Studi : Teknik Kimia

Judul Skripsi : Biofiltrasi Gas Dinitrogen Monoksida Menggunakan Pelet Kompos Berbasis Kotoran Kambing Sebagai Medium Filter

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, S.T., M.T. ()

Pembimbing : Dr. Heri Hermansyah, S.T., M.Eng. ()

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

Penguji : Ir. Dianursanti, M.T. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 02 Juli 2010

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 Departemen 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., M.Eng., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran serta kesabaran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Kang Jajat, Mang Ijal, dan Ius sebagai teknisi laboratorium yang telah membantu saya secara teknis;
3. Orang tua dan keluarga saya tercinta dan teman-teman teknik kimia seangkatan yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral;
4. Mei Linda sebagai teman seperjuangan biofilter (terima kasih telah banyak membantu). Erica, nova, lia pejuang biofilter (selamat berjuang untuk penelitian biofilter selanjutnya);
5. Semua pihak yang tak dapat disebutkan satu persatu terima kasih.

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, 02 Juli 2010

Penulis

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

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

Nama : Irwan Warta Arisantoro
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
NPM : 0606076495

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:

“Biofiltrasi Gas Dinitrogen Monoksida Menggunakan Pelet Kompos
Berdasarkan Kotoran Kambing Sebagai Medium Filter”

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya 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 : 02 Juli 2010

Yang menyatakan

(Irwan Warta Arisantoro)

ABSTRAK

Nama : Irwan Warta Arisantoro
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Biofiltrasi Gas Dinitrogen Monoksida Menggunakan Pelet
Kompos Berbasis Kotoran Kambing Sebagai Medium Filter

Penelitian ini dilaksanakan untuk mengevaluasi pengaruh ukuran pelet kompos dan penambahan kandungan nutrisi terhadap efisiensi reduksi N_2O dan pertumbuhan mikroorganisme pada medium filter. Selain itu juga diteliti perubahan sifat medium filter yang terjadi sebelum dan setelah biofiltrasi serta karakteristik medium filter. Penelitian dilakukan pada laju alir konstan sebesar 88 cc/menit dengan sistem aliran *batch* selama 12 jam. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi reduksi N_2O terbaik sebesar 62,25% didapatkan pada ukuran pelet kompos 5x5 mm dengan penambahan kandungan nutrisi 40% serta pelet kompos sebelum biofiltrasi mengandung lebih sedikit mikroorganisme dibandingkan pelet kompos setelah biofiltrasi. Estimasi parameter dengan persamaan adsorpsi Langmuir menunjukkan bahwa kapasitas biosorpsi maksimum pada pelet ukuran 5x5 mm dengan penambahan kandungan nutrisi 40% mencapai 1,996 g/kg. Parameter yang diestimasi menggunakan persamaan Michaelis-Menten menunjukkan bahwa *maximum removal rate* (V_m) dan K_s (konstanta saturasi) pada pelet 5x5 mm dengan kandungan nutrisi 40% berturut-turut mencapai 1.215,89 $gm^{-3}h^{-1}$ dan 8,51126 $g m^{-3}$. Nilai ini lebih tinggi dari pelet ukuran 5x8 mm di mana V_m -nya mencapai 688,29 $g m^{-3} h^{-1}$ dengan K_s yang lebih rendah yaitu 4,2654 $g m^{-3}$.

Kata kunci:

Biosorpsi, efisiensi reduksi, nutrisi, *maximum removal rate*, mikroorganisme, N_2O , pelet kompos, persamaan Michaelis-Menten, persamaan Langmuir.

ABSTRACT

Name : Irwan Warta Arisantoro
Study Program : Chemical Engineering
Title : Nitrous Oxide Biofiltration using Goat-Manure Base Pelletized Compost as Filter Media

This research was conducted for evaluation influence of compost pellet size and nutrition supplementation to N_2O reduction efficiency and microorganisms growth at medium filter. Properties of the filter medium before and after biofiltration and characteristics of the filter medium also be examined. The biofilter was operated at constant flow rates 88 cc/minute by batch flow system for 12 hours. The research indicated that the highest N_2O removal efficiency as 62,25% is reached to be obtained at 5x5 mm compost pellet size with containing 40% nutrition, and initial compost pellets before biofiltration contains less microorganisms than compost pellets after biofiltration. Parameter estimation by adsorption Langmuir equation indicated that maximum biosorption capacities at 5x5 mm pellets size with 40% nutrition supplementation reached to 1,996 g/kg. Parameter which were estimated using Michaelis Menten equation indicated that maximum removal rate (V_m) and K_s (saturation constant) at pellet 5x5 mm with 40% nutrition content respectively reaches to $1215,89 \text{ gm}^{-3}\text{h}^{-1}$ and $8,51126 \text{ g m}^{-3}$. This value were higher than pellet 5x8 mm where the V_m reaches to $688,29 \text{ g m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ with lower K_s which just reaches to $4,2654 \text{ g m}^{-3}$.

Key words:

Biosorption, Langmuir equation, maximum removal rate, microorganism, Michaelis Menten equation, nutrition supplement, N_2O , pelletized compost, reduction efficiency.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
HALAMAN PERNYATAAN	vi
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Permasalahan	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Sistematika Penulisan	7
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Gas Dinitrogen Monoksida (N ₂ O)	8
2.1.1 Sifat Fisika dan Kimia N ₂ O	8
2.1.2 Efek N ₂ O	9
2.2 Teknologi Reduksi N ₂ O Konvensional	10
2.3 Teknologi Biofilter	11
2.3.1 Biofilter	13
2.3.2 Prinsip Kerja	13
2.3.3 Terminologi Biofilter	16
2.3.4 Performansi Biofilter	17
2.3.5 Parameter yang Mempengaruhi Kinerja Biofilter	19
2.3.6 Kelebihan dan Kekurangan Biofilter	25
2.4 Medium Filter	26
2.4.1 Kompos Sebagai Medium Filter	29

2.4.2	Kompos Kambing Sebagai Medium Filter	33
2.4.3	Kompos dalam Bentuk Pelet	34
2.5	<i>State of The Art</i>	37
2.5.1	Biofiltrasi Dengan Medium Filter Berupa Pelet	37
2.5.2	Biofiltrasi Menggunakan Medium Filter Dengan Tambahan Nutrisi	41
2.5.3	Biofiltrasi Amonia dengan Medium Sintetik	42
2.5.4	Biofiltrasi Terhadap NOx	44
BAB 3 METODE PENELITIAN		50
3.1	Diagram Alir Penelitian	50
3.2	Peralatan dan Bahan Penelitian	53
3.2.1	Peralatan	53
3.2.2	Bahan	55
3.3	Prosedur Penelitian	56
3.3.1	Instalasi <i>Mass Flowmeter</i> dan Manometer Digital Sistem Biofilter ..	56
3.3.2	Preparasi dan Pembentukan Pelet Kompos Sebagai Medium Filter ..	56
3.3.3	Uji Kebocoran Alat dan Uji Blangko	59
3.3.4	Kalibrasi Konsentrasi N ₂ O	61
3.3.5	Pengujian Karakteristik Kompos	61
3.4	Pengujian Kinerja Biofilter	61
3.4.1	Variasi Ukuran Pelet Kompos Sebagai Medium Filter	62
3.4.2	Variasi Kandungan Larutan Nutrisi Sintetik Pada Medium Filter	62
3.4.3	Pengujian Sifat Fisik dan Kimia Kompos	63
3.5	Data Penelitian	65
3.6	Pengukuran dan Analisis	65
3.6.1	Analisis Gas N ₂ O	65
3.6.2	Analisis perkembangan bakteri	66
3.7	Variabel Penelitian	70
3.8	Teknik Pengumpulan dan Analisis Data	70
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		71
4.1	Instalasi <i>Mass Flow Regulator</i> dan Manometer Digital Pada Biofilter	71
4.2	Preparasi Medium Pelet Kompos	73
4.3	Persiapan Eksperimen	76

4.3.1 Uji Kebocoran dan Uji Blangko.....	76
4.3.2 Uji Waktu Tinggal.....	78
4.3.3 Kalibrasi Gas N ₂ O.....	79
4.3.4 Uji Karakteristik Pelet Kompos Berbasis Kotoran Kambing.....	81
4.4 Uji Kinerja Biofilter	83
4.4.1 Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N ₂ O	83
4.4.2 Pengaruh Ukuran Pelet Terhadap Reduksi N ₂ O	86
4.4.3 Pengaruh Kandungan Larutan Nutrisi Medium Pelet Kompos Terhadap Reduksi N ₂ O.....	91
4.4.4 Sifat Medium Pelet Kompos Sebelum dan Sesudah Biofiltrasi.....	97
4.4.5 Hasil Uji Perkembangan Mikroba pada Pelet Kompos.....	99
4.5 Pemodelan Hasil Eksperimen.....	105
4.5.1 Pemodelan Adsorpsi.....	105
4.5.2 Pemodelan Kinetika Michaelis Menten Biofiltrasi.....	110
BAB 5 KESIMPULAN.....	117
DAFTAR ISTILAH	118
DAFTAR REFERENSI	119
LAMPIRAN.....	125

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Komposisi gas rumah kaca setiap tahun	1
Gambar 1.2	Penyumbang emisi gas N ₂ O di alam	2
Gambar 2.1	Struktur Molekul Gas Dinitrogen Monoksida.....	8
Gambar 2.2	Perbandingan emisi gas rumah kaca pada hasil pembakaran transportasi	10
Gambar 2.3	Skema proses biodegradasi kontaminan oleh bakteri pada biofilm ..	14
Gambar 2.4	Proses adsorpsi pada biofilter.....	14
Gambar 2.5	Aliran kontaminan udara dalam biofilter	15
Gambar 2.6	Model gas transfer	15
Gambar 2.7	Tipe Kurva EC vs <i>Loading</i>	18
Gambar 2.8	% pengilangan amoniakal nitrogen (NH ₃) selama operasi.....	38
Gambar 2.9	Tekanan maksimum selama operasi.....	38
Gambar 2.10	Skema sistem biofilter yang digunakan	39
Gambar 2.11	Pengaruh luas permukaan spesifik terhadap EC	40
Gambar 2.12	Pengaruh diameter partikel pelet terhadap <i>pressure drop</i>	40
Gambar 2.13	Konsentrasi outlet vs inlet sebelum inokulasi	42
Gambar 2.14	Pengaruh Suplai nutrisi terhadap performansi biofilter	42
Gambar 2.15 (a)	<i>Pall ring</i> yang digunakan secara komersial	43
Gambar 2.15 (b)	Tampak atas biofilter yang diisi dengan <i>pall ring</i> yang berisi sel terimobilisasi.....	43
Gambar 2.16	<i>Mapping State of The Art</i> biofilter terhadap berbagai emisi gas polutan.....	48
Gambar 2.17	<i>Mapping State of The Art</i> biofilter terhadap gas N ₂ O	49
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian Secara Umum	51
Gambar 3.2	Diagram Skematik Biofilter	53
Gambar 3.3	Diagram Prosedur Pengomposan	57
Gambar 3.4	Skema Prosedur Preparasi Kompos Untuk Pembentukan Pelet Kompos	58
Gambar 3.5	Skema Uji Kebocoran Alat dan Uji Blangko (rute kanan).....	60
Gambar 3.6	Diagram Alir Prosedur Pengoperasian GC	66
Gambar 3.7	Metode Sterilisasi Cawan Petri	68
Gambar 3.8	Metode Sterilisasi Bahan-bahan yang Akan Digunakan.....	69
Gambar 4.1	Sistem Biofilter Skala Laboratorium Pada Penelitian Ini	72
Gambar 4.2	Skematik peralatan biofilter dalam bentuk 3 dimensi.....	73
Gambar 4.3	Proses pengeringan kompos dengan kondisi T= 26 ^o C	75
Gambar 4.4	Kompos sebagai bahan pelet medium filter	75
Gambar 4.5	Pelet kompos sebagai medium filter	76
Gambar 4.6	Uji Kebocoran dan Uji Blangko Biofilter	77
Gambar 4.7	Sampel Grafik yang Terdeteksi pada (a) Gas N ₂ O (b) Udara Bebas oleh GC	80
Gambar 4.8	Hasil Kalibrasi N ₂ O.....	81
Gambar 4.9	Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N ₂ O (h = 100 cm; v = 88 cc/menit, medium pelet kompos 5x8 mm).....	84

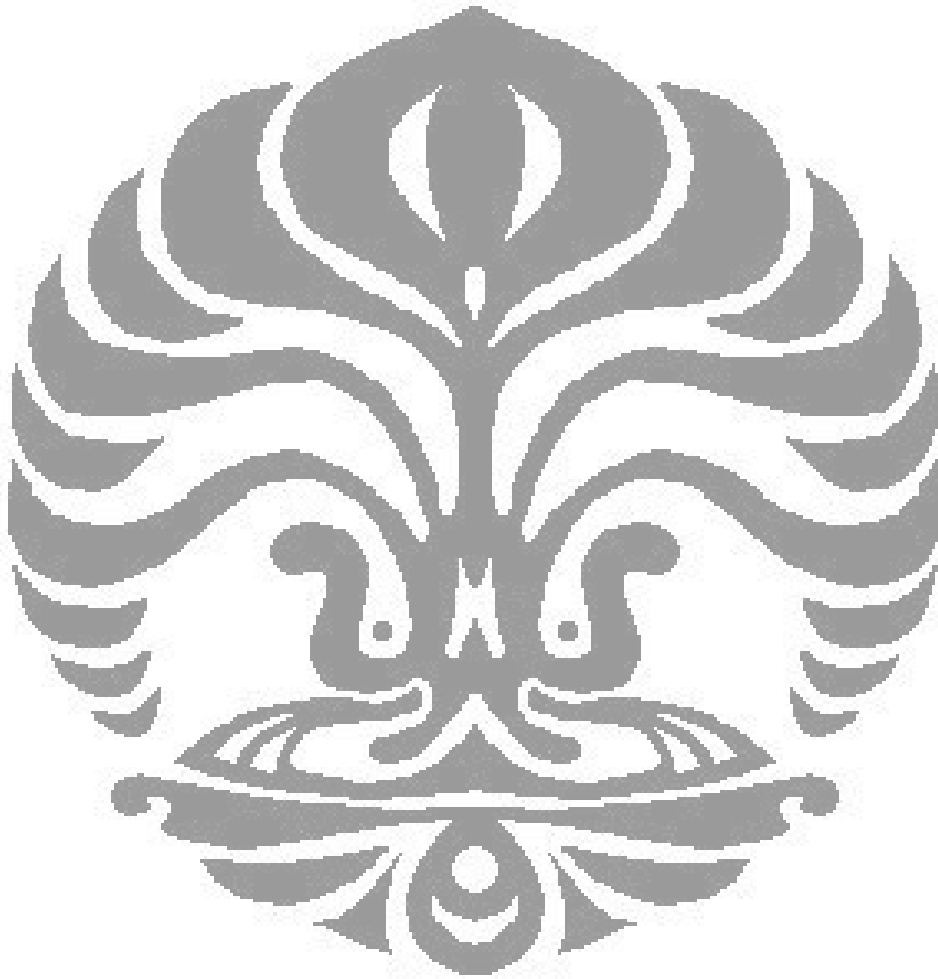
Gambar 4.10 Profil Variasi Ukuran Pelet Terhadap Reduksi N ₂ O (h = 100 cm, v = 88 cc/menit, medium pelet kompos kering).....	87
Gambar 4.11 Perbandingan Efisiensi Reduksi pada Uji Variasi Ukuran Pelet (h = 100 cm, , medium pelet/kompos kering, t = 12 jam).....	89
Gambar 4.12 Profil Variasi Kandungan Larutan Nutrisi Terhadap Reduksi N ₂ O (h = 100 cm, v = 88 cc/menit, medium pelet ukuran 5x5 mm).....	93
Gambar 4.13 Perbandingan Efisiensi Reduksi pada Uji Variasi Kandungan Nutrisi (h = 100 cm, , medium pelet ukuran 5x5 mm, t = 12 jam)	95
Gambar 4.14 Medium Agar Sebelum Digunakan Uji TPC	100
Gambar 4.15 Hasil uji TPC pada kompos awal sebelum biofiltrasi	101
Gambar 4.16 Hasil uji TPC pada kompos setelah biofiltrasi variasi ukuran pelet	101
Gambar 4.17 Hasil uji TPC pada kompos setelah biofiltrasi variasi nutrisi	102
Gambar 4.18 Hasil Uji SEM pada kompos awal sebelum biofiltrasi	103
Gambar 4.19 Hasil Uji SEM pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi ukuran pelet	104
Gambar 4.20 Hasil Uji SEM pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi kandungan nutrisi	104
Gambar 4.21 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 100 cm, , medium pelet 5x8 mm).....	107
Gambar 4.22 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 100 cm, , medium pelet 5x5 mm).....	108
Gambar 4.23 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 100 cm, medium pelet 5x5 mm, nutrisi 20%)	108
Gambar 4.24 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 100 cm, medium pelet 5x5 mm, nutrisi 40%)	108
Gambar 4.25 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 100 cm, medium pelet 5x5 mm, nutrisi 60%)	109
Gambar 4. 26 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir (h = 100 cm, medium pelet 5x5 mm, nutrisi 70%)	109
Gambar 4. 27 Kurva Michaelis Menten (h = 100 cm, medium pelet 5x8 mm)...	113
Gambar 4. 28 Kurva Michaelis Menten (h = 100 cm, medium pelet 5x5 mm)...	114
Gambar 4. 29 Kurva Michaelis Menten (h = 100 cm, medium pelet 5x5 mm, nutrisi 20%)	114
Gambar 4. 30 Kurva Michaelis Menten (h = 100 cm, medium pelet 5x5 mm, nutrisi 40%)	114
Gambar 4. 31 Kurva Michaelis Menten (h = 100 cm, medium pelet 5x5 mm, nutrisi 60%)	115
Gambar 4. 32 Kurva Michaelis Menten (h = 100 cm, medium pelet 5x5 mm, nutrisi 70%)	115

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Tingkat Emisi Bahan Bakar Fosil	1
Tabel 2.1 Sifat Kimiawi Gas N ₂ O.....	8
Tabel 2.2 Perbandingan Design Biofilter Beserta Keuntungannya	12
Tabel 2.3 Keuntungan dan kerugian dari Beberapa Medium Filter	27
Tabel 2.4 Bahan-bahan yang Dapat Dijadikan Sebagai Kompos	31
Tabel 2.5 Jenis-Jenis <i>Lubricant</i>	36
Tabel 2.6 Hasil eksperimen.....	41
Tabel 3.1 Rincian Peralatan yang Akan Digunakan Dalam Penelitian	54
Tabel 3.2 Spesifikasi Kromatografi Gas Dalam Penelitian	65
Tabel 4.1 Perbandingan komposisi unsur yang terdapat pada kompos berbasis kotoran kambing dan kompos berbasis kotoran sapi	82
Tabel 4.2 <i>Pressure drop</i> dan sifat fisis terukur pada kolom biofilter untuk variasi ukuran pelet	90
Tabel 4.3 <i>Pressure drop</i> terukur pada kolom biofilter selama penelitian variasi penambahan kandungan nutrisi pada pelet kompos ukuran 5x5mm	96
Tabel 4.4 Sifat Medium Pelet Kompos Sebelum dan Sesudah Biofiltrasi.....	98
Tabel 4.5 Hasil uji TPC sebelum dan setelah biofiltrasi	102
Tabel 4.6 Daftar Persamaan Adsorpsi Langmuir Sesuai Grafik Adsorpsi Langmuir.....	109
Tabel 4.7 q_m dan K_L Persamaan Adsorpsi Langmuir Pada Variasi Ukuran Pelet dan Kandungan Nutrisi.....	110
Tabel 4.8 V_m dan K_S Persamaan Adsorpsi Langmuir Pada Variasi Ukuran Pelet dan Kandungan Nutrisi.....	116

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Hasil Kalibrasi N ₂ O	125
Lampiran 2. Data Hasil Uji Kebocoran dan Uji Blangko	126
Lampiran 3. Data Hasil Uji Ukuran Pelet Kompos	128
Lampiran 4. Data Hasil Uji Variasi Kandungan Nutrisi Pelet Kompos	129
Lampiran 5. Pengolahan Data Hasil Langmuir Model	133
Lampiran 6. Pengolahan Data Hasil Total Plate Count (TPC)	139
Lampiran 7. Dokumentasi Eksperimen.....	143



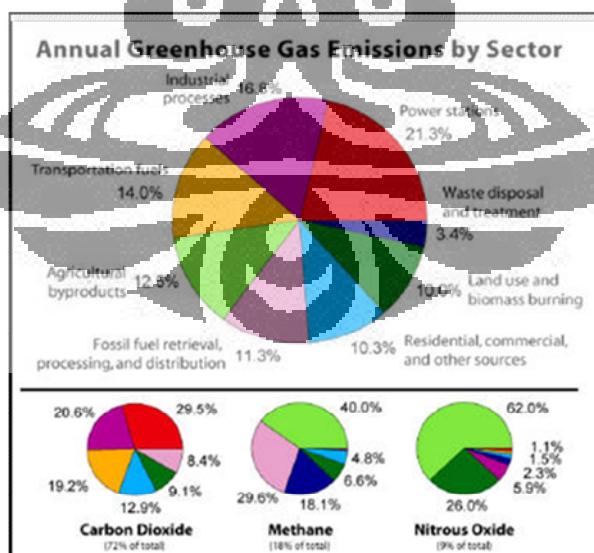
BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Pemanasan global (*global warming*) pada dasarnya merupakan fenomena peningkatan temperatur global dari tahun ke tahun karena terjadinya efek rumah kaca (*greenhouse effect*) yang disebabkan oleh meningkatnya emisi gas-gas seperti karbondioksida (CO_2), metana (CH_4), NO_x dan CFC sehingga energi matahari terperangkap dalam atmosfer bumi (<http://geo.ugm.ac.id/archieve/28>). Pemanasan global mengakibatkan dampak yang luas dan serius bagi lingkungan bio-geofisik seperti pelelehan es di kutub, kenaikan muka air laut, peningkatan hujan dan banjir, punahnya flora dan fauna tertentu, hama penyakit bahkan sampai pada pergeseran ekosistem dan degradasi lingkungan.

Nitrogen oksida (NO_x) merupakan salah satu dari gas buang atau emisi dari pembakaran bahan bakar fosil, yang diakibatkan oksidasi senyawa nitrogen organik yang terkandung dalam material yang dibakar, dan thermal NO_x yang terjadi akibat proses oksidasi senyawa nitrogen di udara dalam temperatur yang tinggi. Sekitar 10% pencemar udara setiap tahun adalah gas NO_x . Berikut ini adalah gambar komposisi gas rumah kaca setiap tahunnya.



Gambar 1.1 Komposisi gas rumah kaca setiap tahun

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

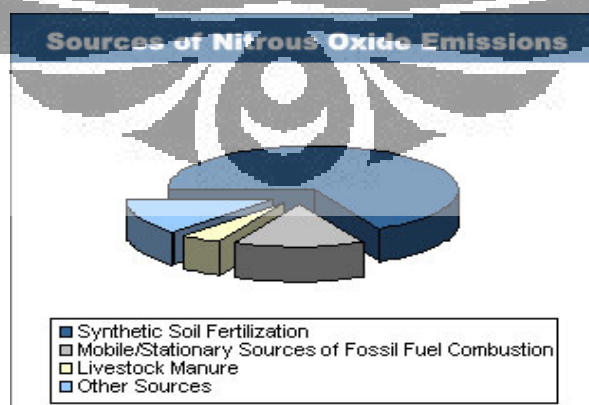
Dari gambar tersebut terlihat bahwa N_2O berperan penting dalam proses terjadinya pemanasan global. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Klimont (1999) bahwa emisi NO_x akan selalu meningkat hingga mencapai 95% pada tahun 2030 nanti dimana sumber polutan ini sebagian besar dihasilkan dari aktivitas sehari-hari. Berikut merupakan tabel mengenai tingkat emisi bahan bakar fosil dalam pon/miliar Btu dari input energi :

Tabel 1.1 Tingkat Emisi Bahan Bakar Fosil dalam lb/miliar Btu dari Input Energi

No.	Polutan	Gas Alam	Minyak	Batubara
1	Karbon dioksida (CO_2)	117.000	164.000	208.000
2	Karbonmonoksida (CO)	40	33	208
3	Nitrogen Oksida (NO_x)	92	448	457
4	Sulfur Dioksida (SO_x)	1	1.112	2.591
5	Partikel	7	84	2.744
6	Merkuri	0	0.007	0.016

Sumber : <http://wikipedia.org>

Hasil reaksi nitrogen yang bereaksi dengan oksigen yang jumlahnya cukup banyak ialah NO , N_2O , dan NO_2 . NO_x sendiri biasanya 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). Gas dinitrogen monoksida (N_2O) merupakan gas polutan yang dihasilkan oleh asap buangan kendaraan bermotor dan proses industri. Penyumbang emisi terbesar dari gas N_2O berasal dari pemupukan tanah secara buatan, yang ditunjukkan oleh gambar di bawah ini.



Gambar 1.2 Penyumbang emisi gas N_2O di alam
(Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks ,2008, EPA)

Tidak seperti gas nitrogen oksida lainnya, N_2O adalah salah satu gas yang memberi kontribusi terbesar pada pemanasan global. Meskipun emisi gas N_2O jauh lebih rendah daripada emisi gas CO_2 , namun dampaknya terhadap pemanasan global 310 kali lebih besar dibandingkan CO_2 . Meskipun konsentrasinya relatif rendah, akan tetapi gas N_2O sangat sulit terurai di atmosfer. Gas N_2O di atmosfer bisa tinggal lebih lama (± 166 tahun) dan lebih stabil daripada gas CO_2 ataupun gas CH_4 . Konsentrasi N_2O di atmosfer kini mencapai 310 ppbv dengan laju peningkatan konsentrasi berkisar 0,6-0,9 ppbv/tahun (A.Wihardjaka, 2004).

Terjadinya pemanasan global berawal dari adanya perubahan iklim yang muncul karena dihasilkan polutan seperti N_2O . 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 N_2O sebagai gas polutan menuntut dilakukannya pencegahan emisi yang ditimbulkan.

Pengendalian jumlah emisi polutan N_2O sangat diperlukan sebagai salah satu cara untuk mengendalikan emisi gas rumah kaca. Terdapat berbagai teknologi pengendalian NO_x seperti *Selective Catalytic Reduction* (SCR) dan *Selective Non-Catalytic Reduction* (SNCR) yang telah diaplikasikan untuk mengontrol emisi NO_x pada beberapa industri. Namun, proses-proses tersebut membutuhkan suhu tinggi, penggunaan katalis, biaya instalasi dan operasi yang tinggi serta menghasilkan limbah lain yang membutuhkan biaya untuk penanganannya (Y.Jing, M.Viega, C.Kennes, 2005). Adanya kelemahan dari segi ekonomi dan teknik dari metode SCR dan SNCR, menjadikan kedua metode ini kurang efektif. 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 memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan metode lainnya, antara lain biaya investasi dan operasional yang rendah, stabil pada waktu yang relatif lama, memiliki daya degradasi gas polutan yang tinggi, tidak menghasilkan produk yang berbahaya pada lingkungan, dan dapat mengkonversi campuran organik dan inorganik menjadi pupuk oksidasi yang tidak berbahaya (Yang, 2007). Prinsip

teknologi ini adalah pemanfaatan kemampuan mikroba untuk mendegradasi pencemar organik yang digunakan sebagai sumber karbon dan pertumbuhan sel. Pada kondisi ini, semua pencemar diubah menjadi produk akhir yang tidak berbahaya seperti CO₂, H₂O., dan biomassa (Gede H. Cahyani, 2006), hal ini mengingat 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).

Adapun biofiltrasi yang dilakukan pada penelitian ini ialah dengan medium filter berupa kompos kambing berbentuk pelet dengan bahan pengikat kanji tergelatinisasi (amilum kanji). Kompos memiliki retensi air yang baik dan kandungan zat organik yang cocok. Selain itu, kompos juga merupakan media yang murah dan banyak tersedia. Kompos digunakan sebagai medium filter karena kaya akan kandungan mikroorganisme (Rakesh Govind, 2009). Amilum merupakan bahan perekat yang sering digunakan karena sifatnya yang *inert*, tidak menimbulkan reaksi kimia, murah, dan mudah untuk didapatkan. Akan tetapi terdapat beberapa kekurangannya, seperti sifat alir dan kompresibilitasnya kurang baik.

Pelet memiliki keunggulan antara lain kemudahan aplikasi, pengemasan, transportasi, dan proses pembuatan yang lebih singkat dan mudah. Keunggulan penting lainnya adalah dari sisi teknik dan biaya produksi. Medium filter berbentuk pelet juga dapat membunuh bakteri patogen, menjamin keseimbangan zat-zat nutrisi dalam kompos, dan mencegah oksidasi vitamin (Patrick dan Schaible, 1980). Medium filter yang berbentuk pelet berpori dengan adanya nutrisi tambahan memiliki kelebihan dan keuntungan di dalam penghilangan kontaminan-kontaminan dalam udara dibandingkan dengan medium filter konvensional seperti kompos, tanah, dan gambut (Rakesh Govind, 2009).

Alasan penggunaan kompos kambing sebagai medium filter dalam penelitian ini berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Cynthia, 2009, bahwa kompos kambing memiliki kandungan organik yang lebih tinggi daripada kompos sapi seperti ditunjukkan pada Tabel 4.1 Bab 4 yang menjelaskan perbandingan komposisi unsur yang terdapat pada kompos berbasis kotoran kambing dan kompos berbasis kotoran

sapi Dengan demikian mikroorganisme yang diperlukan dalam proses biofiltrasi dapat berkembang baik dalam medium ini. Selain itu, kompos kambing memiliki kadar air yang lebih rendah daripada kompos sapi (Sosrosoedirdjo, dkk, 1992). Dengan kadar kelembaban air yang tidak terlalu besar merupakan tempat yang cocok bagi kelangsungan hidup mikroorganisme.

Secara umum, akumulasi biomassa pada biofilter akan lebih besar dibandingkan keadaan awal dan hal ini akan memudahkan terjadi perubahan karakteristik dari medium filter dalam mereduksi kontaminan. Apabila keadaan medium filter menjadi lebih padat, maka akan dapat meningkatkan *pressure drop*. Partikel yang lebih kecil akan mempunyai *pressure drop* yang tinggi dan sebaliknya. *Pressure drop* pada biofilter akan memengaruhi waktu tinggal biofiltrasi, sehingga akan mempengaruhi pertumbuhan mikroorganisme dan akhirnya mempengaruhi efisiensi penurunan polutan organik, disamping itu kandungan *moisture* juga sangat memengaruhi *pressure drop* sampai 100% (Ottengraft et al., 1992).

Berdasarkan uraian di atas, diharapkan penelitian ini akan menghasilkan performansi biofilter yang lebih baik dengan melihat parameter-parameter yang diteliti. Adapun parameter-parameter yang akan diteliti dalam biofiltrasi ini antara lain adalah pengaruh variasi ukuran pelet kompos dan variasi penambahan larutan nutrisi pada medium filter terhadap performansi biofilter dalam mereduksi N_2O . Selain itu juga akan diteliti juga pertumbuhan dan perkembangan mikroba pada pelet kompos serta uji sifat fisik dan kimia terhadap kompos yang digunakan dalam penelitian ini antara lain densitas, pH, *water content*, dan porositas pelet kompos. Adapun aspek kinetika biofiltrasi dilihat dari nilai laju penghilangan maksimum (V_m) dan konstanta saturasi *half* (K_s) berdasarkan persamaan kinetika Michaelis Menten. Selain itu juga hasil penelitian ini dalam model adsorpsi langmuir.

1.2 Perumusan Permasalahan

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh variasi ukuran pelet kompos kambing terhadap efisiensi biofiltrasi gas N_2O dan pertumbuhan mikroorganisme pada medium filter?
2. Bagaimana pengaruh penambahan larutan sintetik terhadap efisiensi biofiltrasi gas N_2O dan pertumbuhan mikroorganisme pada medium filter?

3. Bagaimana kemampuan biofilter dalam menurunkan konsentrasi gas N_2O berdasarkan penurunan konsentrasi maksimum yang dihasilkan ?
4. Bagaimanakah analisis besaran laju penghilangan maksimum (V_m) dan konstanta saturasi *half* (K_s) berdasarkan persamaan kinetika Michaelis Menten?
5. Bagaimanakah perilaku adsorpsi dalam biofilter menurut adsorpsi langmuir?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengkaji pengaruh variasi ukuran pelet kompos kambing terhadap efisiensi biofiltrasi gas N_2O dan pertumbuhan mikroorganisme pada medium filter.
2. Mengkaji pengaruh penambahan larutan sintetik terhadap efisiensi biofiltrasi gas N_2O dan pertumbuhan mikroorganisme pada medium filter.
3. Mengkaji kemampuan biofilter dalam menurunkan konsentrasi gas N_2O berdasarkan penurunan konsentrasi maksimum yang dihasilkan.
4. Mengkaji besaran laju penghilangan maksimum (V_m) dan konstanta saturasi *half* (K_s) berdasarkan persamaan kinetika Michaelis Menten.
5. Mengkaji perilaku adsorpsi dalam biofilter menurut adsorpsi langmuir.

1.4 Batasan Masalah

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

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Rekayasa Bioproses Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia, Depok.
2. Peralatan biofilter yang digunakan untuk penelitian merupakan peralatan dalam skala laboratorium.
3. Gas NO_x yang digunakan adalah gas N_2O .
4. Konsentrasi gas N_2O sebagai gas sampel adalah 15.000 ppm dalam udara.
5. Tinggi dan diameter luar kolom biofilter berturut-turut adalah 120 cm dan 8 cm.
6. Medium filter yang digunakan adalah kompos yang terdiri dari bahan organik berupa kotoran kambing dan *bulking agent* berupa *cocopeat* dan sekam beras.

7. Medium filter yang digunakan berbentuk pelet dengan ukuran 5 x 8 mm dan 5 x 5 mm dengan pengikat kanji gelatinasi.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari makalah ini adalah sebagai berikut:

BAB 1: PENDAHULUAN

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

BAB 2: TINJAUAN PUSTAKA

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

BAB 3: METODE PENELITIAN

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

BAB 4: HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisikan hasil dan pembahasan dari kalibrasi laju alir dan N_2O , uji kebocoran, uji blangko, uji kemampuan alat biofilter dalam mereduksi N_2O dengan variasi ukuran pelet medium filter dan kandungan larutan nutrisi pada medium filter.

BAB 5: KESIMPULAN

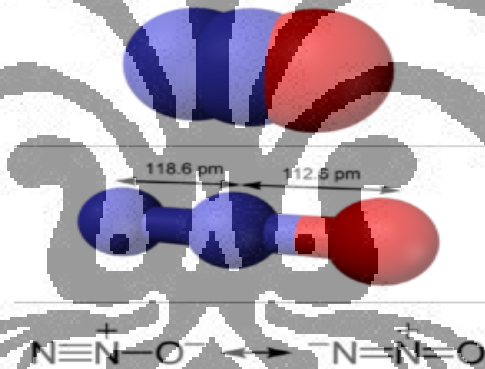
Berisikan kesimpulan dari hasil penelitian dan pembahasan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gas Dinitrogen Monoksida (N₂O)

2.1.1 Sifat Fisika dan Kimia N₂O

Gas ini yang umum dikenal sebagai gas ketawa adalah senyawa kimia dengan rumus kimia N₂O. Gas N₂O disebut sebagai “gas ketawa” karena efek euforia yang ditimbulkan ketika menghirup gas tersebut. Dinitrogen Monoksida (N₂O) umumnya digunakan sebagai senyawa anestetik di dalam dunia kedokteran. Adapun ambang batas terekspos gas ini ialah sekitar 50-100 ppm. N₂O memiliki ciri- ciri fisik sebagai suatu gas yang tak berwarna, tidak bereaksi dengan ozon, oksigen, dan hidrokarbon yang ada di udara. Sedangkan berdasarkan sifat kimianya, gas ini memiliki struktur molekul yang linear dan mempunyai momen dipol sebesar 0,166D. Gambar 2.1 memperlihatkan struktur molekul gas N₂O, dan Tabel 2.1 yang berisi mengenai sifat kimawi dari N₂O :



Gambar 2.1 Struktur Molekul Gas Dinitrogen Monoksida
(Sumber : http://en.wikipedia.org/wiki/Nitrous_oxide)

Tabel 2.1 Sifat Kimiawi Gas N₂O

(Sumber : http://en.wikipedia.org/wiki/Nitrous_oxide)

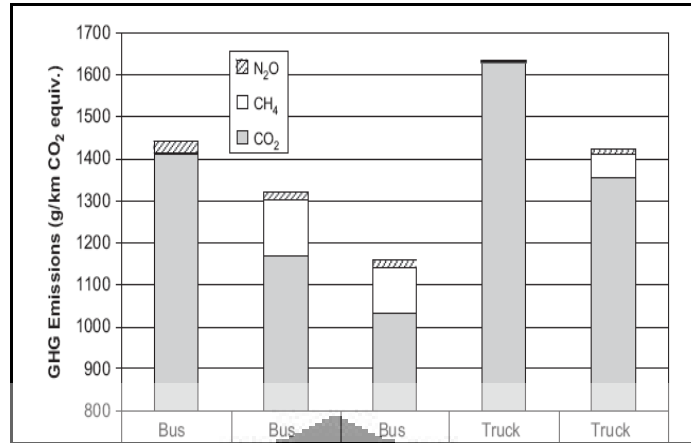
Sifat	
Rumus Molekul	N ₂ O
Masa Molar	44.0128 g/mol
Wujud	Tidak Berwarna
Densitas	1222.8 kgm-3 (liq.)
	1.8 kgm-3 (gas STP)
Titik Leleh	182 K, -90.86°C, -132°F
Titik Didih	185 K, -88.48°C, -127°F

Lanjutan Tabel 2.1 Sifat Kimiawi Gas N ₂ O	
Struktur	
Bentuk Molekul	Linear
Momen Dipol	0.165 D
Termodinamika	
Entalpi Pembentukan $\Delta H_f^{\circ} 298$	82.05

2.1.2 Efek 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 duniaomotif 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 N₂O memiliki potensi penyebab gas rumah kaca 310 kali lipat dibandingkan CO₂ dimana sebagian besar gas polutan N₂O berasal dari hasil pembakaran (Ashok Pandey, 2004). 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 CO₂.



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

2.2 Teknologi Reduksi N₂O Konvensional

Teknologi yang digunakan untuk mereduksi emisi N₂O secara konvensional antara lain melalui *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 (NH₃) atau urea (NH₂CONH₂) 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 Biofilter

Sistem pengolahan fisiokimia yang didasarkan pada teknik-teknik fisiokimia seperti adsorpsi, absorpsi, *scrubbing*, dan kondensasi untuk mengontrol emisi, merupakan sistem yang kurang efektif, membutuhkan banyak energi, menggunakan banyak zat kimia atau menggunakan pengoperasian yang rumit (Khan dan Ghosal, 2000; Burgess et al., 2001).

Dengan dikembangkannya perhatian mengenai peraturan tentang emisi nitrogen oksida sebagai salah satu hasil oleh proses perlakuan panas dan meningkatnya protes masyarakat mengenai emisi bau dari *plant* pengolahan air limbah, industri pabrik, dan juga fasilitas pengolahan limbah padat, semakin mendesak keberadaan teknologi yang ramah lingkungan dan membutuhkan biaya rendah. Salah satu sistem pengolahan konvensional sebagai alternatif dari pengolahan gas buang adalah pengolahan secara biologis. Hal ini dikarenakan oleh keefektifannya dalam menangani kontaminan dalam konsentrasi rendah dengan laju alir yang tinggi (Kennes dan Thalasso, 1998; Devinny et al., 1999; Rene et al., 2005). Beberapa kelebihan dari teknik biofilter antara lain adalah tercapainya efisiensi yang tinggi dalam mereduksi gas polutan, biaya instalasi dan operasi yang rendah, kondisi operasi yang aman dan konsumsi energi yang rendah, tidak menghasilkan produk samping, dan dapat mengkonversi banyak campuran organik dan inorganik menjadi produk oksidasi yang tak berbahaya (B.A. Sheridan, T.P. Curran, V.A. Dodd, 2002; J.S. Devinny, M.A. Deshusses, T.S., 1999). Keefektifan dari biofilter dipengaruhi pada aktivitas populasi mikroba yang terdapat pada material isian biofilter.

Biofilter dapat didefinisikan sebagai reaktor biokimia *fixed-bed* dimana terdapat mikroorganisme pada permukaan medium filter untuk mengkonsumsi udara yang terserap. Zat-zat kontaminan yang terdapat di udara diserap dan dikonsumsi oleh mikroorganisme (M. Schlegelmilch, J. Streese, R. Stegmann, 2005). Prinsip dari biofiltrasi relatif sederhana, mula-mula aliran udara yang terkontaminasi dialirkan melalui suatu unggun berpori dimana suatu kultur mikroorganisme pengurai polutan diimobilisasi. Udara berbau dan terkontaminasi kemudian melewati *porous packed bed*, dan zat kontaminan dalam aliran udara diadsorpsi oleh *biofilm*, kemudian zat kontaminan tersebut dioksidasi untuk menghasilkan biomassa, CO₂, H₂O, NO₃⁻ dan SO₄²⁻ (Ashok Pandey, 2004).

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 sangat tergantung pada aktivitas populasi mikroba dan jenis pengayaan (*enrichment*) yang dilakukan selama tahap inokulasi. Selain itu, jenis matriks support juga mempengaruhi stabilitas jangka panjang dan kinerja dari biofilter. Bahan *packing* yang paling sering digunakan dalam biofilter adalah *peat*, kompos, karbon teraktivasi, tanah, *heather*, serpihan kayu, dan batu lava (Charles Arnold, 2001)

Selain merupakan pendegradasi polutan yang sangat efisien, investasi modal dan biaya operasi yang rendah, memiliki kondisi operasional yang aman, dan konsumsi energi yang rendah, biofilter juga tidak mengeluarkan produk samping yang tidak diinginkan dan dapat mengkonversi banyak senyawa organik dan anorganik ke dalam produk oksidasi yang tidak berbahaya (Govind, 1998). Selain itu, kesederhanaan desain biofilter juga merupakan alasan mengapa biofilter sering digunakan. Terdapat banyak jenis design biofilter yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan dalam mereduksi kontaminan yang ada. Berikut merupakan Tabel 2.2 yang berisi tentang informasi jenis-jenis biofilter dan kelebihannya :

Tabel 2.2 Perbandingan Design Biofilter Beserta Keuntungannya

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

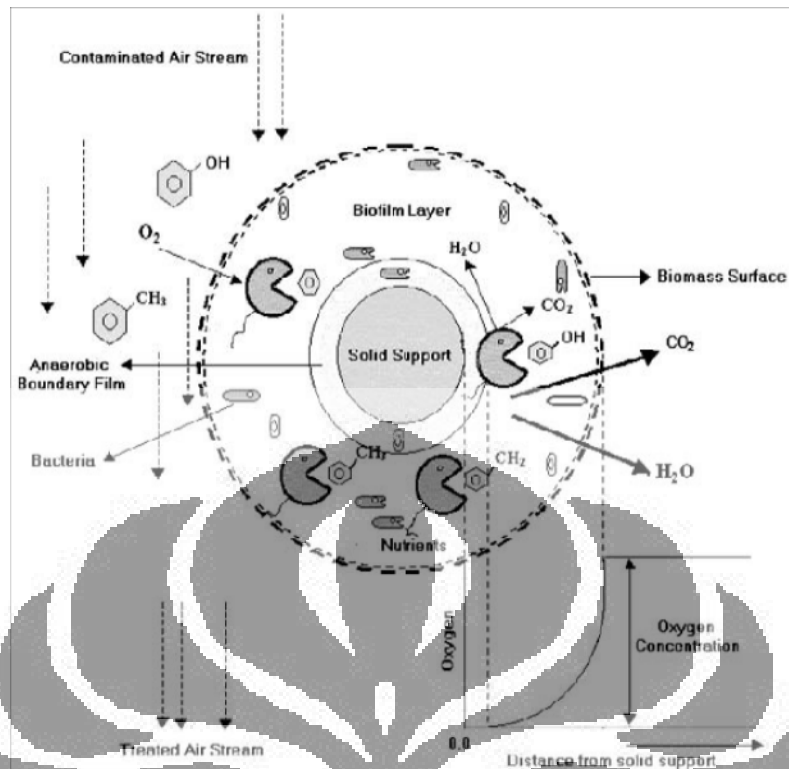
Sumber: Deviny et al., 1999

2.3.1 Biofilter

Teknologi biofiltrasi telah sukses digunakan untuk mengontrol polutan seperti senyawa organik volatil (VOC) dari berbagai macam industri dan kegiatan publik (Bohn, 1975; Leson and Winer, 1991). Pada biofiltrasi, sejumlah faktor dikontrol sehingga mikroba dapat mengabsorb dan mendekomposisi secara efisien. Temperatur, kandungan kelembaban, pH, laju alir, besarnya kandungan polutan, dan struktur fisika biofilter adalah faktor yang mempengaruhi efisiensi biofiltrasi. Biofiltrasi beroperasi paling efisien pada kandungan kelembaban antara 50-70% dan suhu antara 15 dan 35°C (Janni dan Nicolai, 2000). Pada jurnal "*Removal of ternary VOCs in air streams at high loads using a compost-based biofilter*", Yonghui Liu et al.(2007) dikatakan bahwa terdapat tiga faktor yang diasumsikan menyebabkan penurunan performansi biofilter antara lain adalah pepadatan media/*channeling*, pengasaman, dan pembatasan nutrisi.

2.3.2 Prinsip Kerja

Biofilter adalah pionir bioreaktor yang mekanisme interaksi proses fisika dan biologinya menggunakan media kompos, tanah dan material kasar untuk mencegah penurunan tekanan yang terlalu tinggi. Luas permukaan gas-cairan relatif besar antara 300 - 1.000 m²/m³. Transfer massa polutan terjadi pada media yang diselimuti *biofilm* (Devanny et al.,2007). Pada penggunaan biofilter dengan medium kompos, kontaminan dari gas akan berdifusi ke dalam pori-pori partikel kompos, terlarut ke dalam lapisan bio film, 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 2.3.



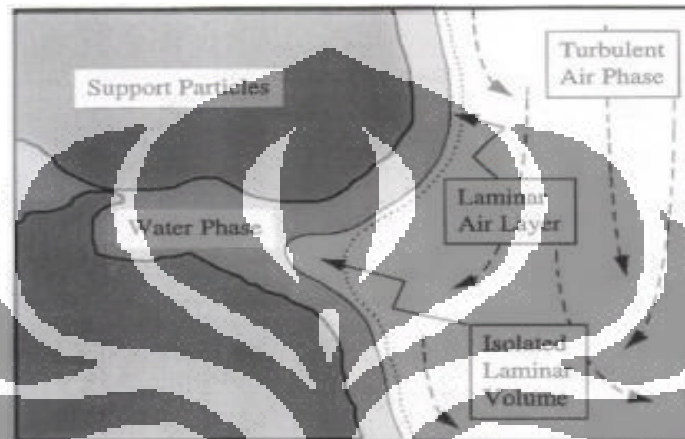
Gambar 2.3 Skema proses biodegradasi kontaminan oleh bakteri pada biofilm (Pandey, 2004)



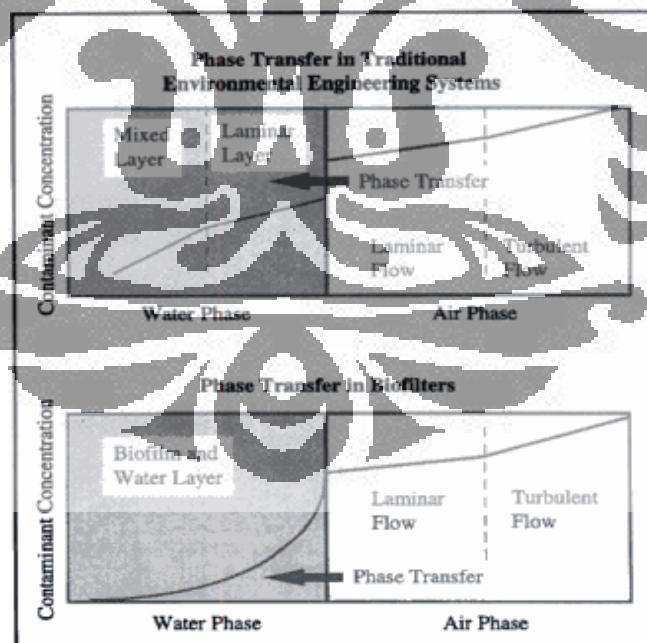
Gambar 2.4 Proses adsorpsi pada biofilter (Deviny et.al, 1999)

Gambar 2.4 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 berdifusi masuk ke bagian dalam dari poros medium filter untuk diadsorpsi.



Gambar 2.5 Aliran kontaminan udara dalam biofilter (Devinny et.al, 1999)



Gambar 2.6 Model gas transfer (Devinny et.al, 1999)

Pada Gambar 2.5 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 2.6 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 (Devinny et.al, 1999). Total jumlah rasio kontaminan pada lapisan air dan padatan medium mempengaruhi waktu tinggal kontaminan dalam biofilter. Jenis kontaminan yang akan direduksi dengan teknologi biofilter juga berpengaruh terhadap efisiensi reduksi. Hal ini dikarenakan daya tarik kontaminan pada air, medium, dan bahan organik pada medium filter beragam dan berpengaruh terhadap daya adsorpsi dan absorpsi.

2.3.3 Terminologi Biofilter

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

a) EBRT (*Empty Bed Residence Time*)

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

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

Di mana : V_f = volum kolom biofilter kosong (m^3)

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

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

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

Di mana: τ = Waktu tinggal sebenarnya (s)

θ = Porositas = volum ruang kosong/ volum medium filter

b) *Loading* massa

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

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

$$\text{Massa loading(permukaan)} = \frac{Q \times C}{V_f} \dots\dots\dots(2.4)$$

Di mana : C = Konsentrasi inlet (g/m^3)

2.3.4 Performansi Biofilter

Kinerja dari suatu biofilter dapat ditentukan melalui suatu penentuan karakteristik performansi biofilter. Parameter-parameter yang berpengaruh menurut Devigny et al. (1999), antara lain :

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

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

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

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

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

b) Kapasitas eliminasi

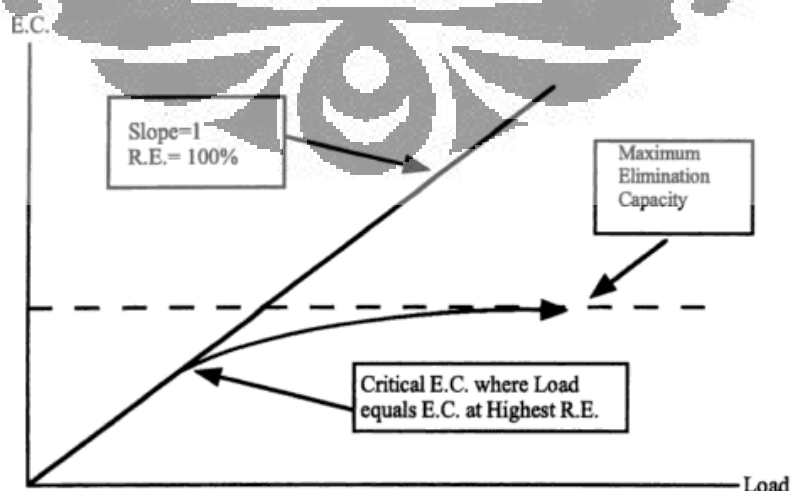
EC (*Elimination Capacity*) adalah massa kontaminan yang terdegradasi per satuan volum medium filter per satuan waktu. Tipe unit untuk kapasitas eliminasi adalah jumlah gram polutan per m^3 dari medium filter setiap jam. Secara keseluruhan EC (*Elimination Capacity*) dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$EC = \frac{(C_i - C_o) \times Q}{V_f} \dots \dots \dots (2.6)$$

Kinerja dari suatu biofilter tidak hanya ditentukan oleh efisiensi reduksi gas polutan, tetapi juga ditentukan oleh konsentrasi kontaminan, laju alir, serta dimensi biofilter, dan kondisi operasi yang digunakan. Selain itu kinerja sistem biofilter dapat dinilai berdasarkan beberapa hal berikut (Wahyuni, Ahnur, 2004) :

1. Laju atau kapasitas degradasi maksimum (g/kg-media 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.

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



Gambar 2.7 Tipe Kurva EC vs Loading

(Sumber : Devinnny et al, 1999)

Berdasarkan Gambar 2.7 diatas, dapat dikatakan belum mencapai titik maksimum apabila hasil EC belum mendekati konstan selama kenaikan nilai *loading* pada suatu biofilter. Grafik ini mengkorelasikan rasio antara EC (*Elimination Capacity*) dan *loading* adalah RE (*Removal Efficiency*) suatu biofilter.

2.3.5 Parameter yang Mempengaruhi Kinerja Biofilter

Pada teknologi biofilter terdapat beberapa parameter penting yang perlu diperhatikan guna mencapai kinerja yang tinggi selama proses absorpsi dan dekomposisi polutan oleh mikroba. Hal-hal yang dapat mempengaruhi kinerja biofilter diantaranya adalah medium filter, kelembaban, pH, nutrisi, temperatur, kandungan oksigen, *pressure drop*, dan kedalaman medium.

Berikut merupakan parameter-parameter penting yang akan menentukan efisiensi reduksi gas polutan yang dihasilkan pada biofiltrasi :

a) **Medium Filter**

Medium filter merupakan salah satu parameter penting yang mempengaruhi kinerja biofilter. Kinerja optimal dari biofilter dapat diperoleh dengan cara mengoptimalkan: area permukaan untuk pertumbuhan *biofilm*, kestabilan fisik jangka panjang, *pressure drop* yang rendah, retensi kelembaban yang baik, kapasitas *buffer* pH yang baik, dan ketersediaan nutrisi. Jenis medium filter juga akan mempengaruhi stabilitas jangka panjang dan kinerja biofilter (Kennes dan Thalasso et al., 2005). Untuk itu perlu pertimbangan karakteristik fisika, kimia dan biologinya untuk mendapatkan medium filter yang baik (Christian Kennes et al., 1998).

Pada umumnya, yang digunakan sebagai medium filter adalah kompos, *peat*, serbuk kayu, tanah, dll (Shareefdeen & Singh, 2005). Beberapa diantaranya juga menggunakan karbon teraktivasi sebagai medium filter (Aizpuru et al., 2003). Dalam metode biofilter, pemilihan medium filter sebagai tempat hidup mikroorganisme merupakan hal sangat penting untuk mendukung kehidupan mikroorganisme (Hirai et al, 2001). Namun, bila dibandingkan dengan medium filter lainnya, kompos sangatlah efisien untuk digunakan sebagai medium filter karena sangat mudah diperoleh, dan mengandung banyak sekali kompleks mikroba didalamnya.

b) Kelembaban

Kandungan kelembaban atau *moisture* merupakan salah satu parameter yang sangat penting terhadap kinerja biofiltrasi, karena mikroorganisme yang terdapat di dalam medium filter sangat membutuhkan keberadaan air sebagai penunjang proses metabolisme. Kekeringan pada medium filter dapat menimbulkan celah pada medium filter yang dapat mengakibatkan terjadinya channeling. Selain itu, rendahnya tingkat kelembaban juga dapat menyebabkan penurunan laju biodegradasi polutan.

Perbedaan medium filter yang digunakan juga akan menghasilkan variasi kelembaban optimumnya (Hodge et al., 1991). Kandungan kelembaban yang efisien pada biofiltrasi berkisar antara 50%-70% dengan suhu berkisar antara 15-35 °C (Janni dan Nicolai et al., 2000). Kelembaban yang direkomendasikan untuk media filter organik berkisar antara 40-60% (berdasarkan berat) (Ottengraf 1992). Karena terlalu tingginya kelembaban pada medium filter juga akan menyebabkan kondisi menjadi anaerob dan terhambatnya proses difusi serta naiknya *pressure drop*. Pengaturan kelembaban dapat dilakukan dengan cara humidifikasi gas masuk (*incoming gas*), cara ini membutuhkan biaya yang lebih besar karena harus membuat unit peralatan tersendiri namun hasilnya kurang optimal. Cara lain dapat dilakukan yaitu dengan menggunakan penyemprot air agar dapat langsung memberikan air ke medium filternya. Kelembaban *biofilm* merupakan salah satu langkah 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).

c) Suhu

Suhu pengoperasian merupakan salah satu variabel yang paling penting dalam menentukan laju pertumbuhan mikrobial dan jenis spesies dalam komunitas mikrobial (Wani et al., 1997). Suhu operasi ini biasanya oleh peristiwa kimia, fisika dan biologi. Pada biofilter ini biasanya terjadi pada temperatur *mesophilic* berkisar antara 25 – 40 °C, meskipun terkadang terjadi juga *psychophilic* (temperatur rendah) dan *thermophilic* (suhu tinggi). Proses reaksi eksotermis juga akan mempengaruhi

suhu karena akan menghasilkan panas, disamping itu juga dipengaruhi oleh kondisi cuaca (suhu lingkungan) dan suhu dari gas masuk (Corsi & Seed, 1995).

Seiring meningkatnya suhu, metabolisme dan laju pertumbuhan sel juga meningkat, akan tetapi kemampuan biosorpsi menurun (McNevin & Barford, 2000). Namun, di atas suhu kritis tertentu, inaktivasi beberapa protein penting dan penghentian pertumbuhan secara mendadak akan terjadi. Suhu optimum untuk berbagai spesies memiliki jangkauan yang luas, tetapi sebagian besar aplikasi biofilter telah dilakukan pada suhu dalam rentang *mesophilic* (20 – 45°C), dengan temperatur 35-37°C dianggap sebagai suhu optimum (Swanson & Loehr et al., 1997 ; Wani et al., 1997).

Aktivitas biologi bakteri akan menjadi dua kali lipat untuk kenaikan suhu sebesar 10°C untuk bakteri *mesophilic*. Suhu yang direkomendasikan oleh Lesson dan Winter et al. (1991) untuk biofiltrasi yaitu berkisar antara 15 – 40°C. Beberapa studi mengenai operasi *thermophilic* (45 – 75°C) juga telah dilaporkan (Dhamwichukorn et al., 2001). Sementara itu, Giggey et al., (1994) melaporkan bahwa biofilter yang mereduksi gas-gas belerang dan terpenes menunjukkan performa yang baik pada musim dingin dengan temperature ambient di bawah 0°C bersama dengan salju. Namun, Shareefdeen et al., (2004) mencatat penurunan reduksi H₂S ketika suhu 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.

d) Kandungan Oksigen

Oksigen merupakan suatu parameter operasi yang sangat penting bagi biofiltrasi karena kebanyakan mikroorganisme yang digunakan dalam biofiltrasi bersifat aerobik dan membutuhkan oksigen untuk metabolisme. Bakteri heterotrofik aerobik yang ada dalam medium filter membutuhkan paling sedikit 5 - 15% oksigen pada aliran gas masukan untuk bertahan hidup (Dharmvaram, 1991). Namun, dikarenakan jumlah oksigen yang terkandung dalam aliran udara masukan cukup besar dan relatif sedikit pada *biofilm*, parameter kandungan oksigen ini tidak menjadi permasalahan dalam upaya optimalisasi kinerja biofiltrasi.

e) pH

Masing-masing mikroorganisme mempunyai kisaran pH optimum yang berbeda untuk menunjang aktivitasnya. Tidak semua bahan-bahan yang digunakan sebagai medium filter bersifat netral, ada juga diantaranya yang bersifat sebagai penyangga yang diperlukan untuk mendapatkan kondisi yang optimum terutama untuk mengolah gas polutan yang mengandung klorin, sulfida, dan amonia. Pada berbagai penelitian menunjukkan tanah mempunyai sifat buffer yang lebih baik dibandingkan dengan kompos yang memiliki kemampuan buffer 5 kali lebih besar dari pada serpihan / kulit kayu (Christian Kennes, 1998). pH optimum berkisar antara 6.5 – 7.5 sedangkan pada pH > 8.5 dan pH < 5, kecepatan mikroorganisme akan menjadi turun, sehingga efisiensi kurang optimal (Ottograft et al., 1992).

f) Nutrisi

Mikroba memerlukan makanan dengan nutrisi seimbang untuk dapat bertahan hidup dan berkembang biak. Kandungan nutrisi yang baik harus tersedia, agar diperoleh performa yang baik dari biofilter. Oleh karena itu, selain karbon dan energi dari degradasi kontaminan, mikroba juga memerlukan nutrisi utama untuk memperpanjang hidup. Karbon dan energi yang dibutuhkan oleh mikroorganisme dapat berasal dari gas kontaminan, sementara kontaminan lainnya seperti nitrogen, fosfor, mineral, dan *trace element* harus disediakan untuk mikroorganisme dalam biofilter agar didapatkan kinerja yang baik (Auria et al., 1996).

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

penggabungan penyubur agrikultural ke dalam medium filter (Sudhakar Viswanathan, Hao Pham & Robert F. Kelly, 2007). Kandungan nutrisi filter juga harus diperiksa secara periodik dengan mengumpulkan sampel untuk laboratorium tanah dengan tujuan analisis.

g) Penurunan Tekanan (*Pressure Drop*)

Adanya sintesis biomassa pada proses biofiltrasi, memudahkan proses akumulasi pertumbuhan massa mikroba dalam waktu yang lama, dimana hal ini berhubungan dengan peningkatan resistensi aliran pada medium filter (Kinney et al., 1996; Mohseni et al., 1998). Akumulasi biomassa akan lebih besar 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*.

Pressure drop tergantung pada kondisi, jenis medium filter dan juga kandungan *moisture*. Bahan filter yang berasal dari tanah mempunyai *pressure drop* yang paling tinggi, kemudian menyusul kompos, peat dan serpihan / kulit kayu. Partikel yang lebih kecil akan mempunyai *pressure drop* yang tinggi dan sebaliknya. Jika *pressure drop* semakin kecil maka waktu tinggal akan semakin berkurang, sehingga akan mempengaruhi pertumbuhan mikroorganisme menjadi lebih lambat dan akhirnya mempengaruhi efisiensi penurunan polutan organik, disamping itu kandungan *moisture* juga sangat mempengaruhi *pressure drop* sampai 100% (Ottengraft et al., 1992).

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.

h) Kedalaman Medium Filter

Kedalaman medium filter pada biofiltrasi berkisar antara 0.5 – 2.5 meter dengan kedalaman yang umum digunakan yaitu sebesar 1 meter, merupakan kedalaman medium filter yang menyediakan waktu tinggal yang cukup pada saat meminimalkan kebutuhan luas area medium filter (Shareefdeen et al., 2005).

i) Mikrobiologi pada Biofilter

Diperkirakan terdapat 1 milyar mikroorganisme yang merupakan populasi dari mikroba dalam biofilter pada setiap gram material organik. Beberapa kelompok mikroorganisme tersebut diketahui termasuk mikroorganisme pereduksi polutan udara pada biofilter, termasuk bakteri, *actinomycetes* dan jamur (Ottengraf, 1987). Komposisi dan kondisi hidup mikroba tersebut tergantung pada kondisi fisika dan kimia pada medium filter. Keanekaragaman mikroorganisme tersebut merupakan suatu fungsi dari komposisi aliran gas polutan yang masuk dan medium filter yang digunakan.

Medium filter alami seperti kompos mengandung sejumlah jenis mikroorganisme yang cukup untuk biodegradasi kontaminan. Pada tahap awal, dibutuhkan waktu bagi mikroorganisme untuk beradaptasi yaitu waktu yang dibutuhkan selama periode aklimatisasi pada mikroorganisme tersebut. Efisiensi dalam proses biofilter umumnya ditingkatkan oleh pertumbuhan mikroorganisme yang aktif saat fase adaptasi berlangsung.

Periode aklimatisasi untuk senyawa organik yang mudah didegradasi, biasanya kurang dari 10 hari dan untuk senyawa yang sulit didegradasi dan untuk kontaminan dimana mikroorganisme hanya sedikit ada dalam medium filter, periode aklimisasinya dapat menjadi lebih lama (Ottengraf, 1986; Lesson dan Winter, 1991). Proses inokulasi pada medium filter dengan kultur spesifik yang diketahui dapat mendegradasi kontaminan tertentu, maka waktu adaptasi dapat berkurang menjadi hanya beberapa hari. Mikroorganisme dapat hidup dalam waktu yang cukup lama jika biofilter tidak digunakan yaitu hingga 2 bulan, jika nutrisi yang cukup tersedia dari medium filter (Lesson dan Winter, 1991).

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

1. Laju atau kapasitas degradasi maksimum (g/kg-medium kering/hari).
2. Kecepatan tercapainya kondisi aklimatisasi mikroba. Parameter ini akan menunjukkan kinerja dari bioavailibilitas konsorsium mikroba yang dikembangkan untuk mendegradasi gas polutan. Semakin cepat masa adaptasi mikroba (*log phase*), maka kinerja biofilter akan semakin baik.

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

2.3.6 Kelebihan dan Kekurangan Biofilter

Biofiltrasi adalah teknologi yang menawarkan beberapa keuntungan dibandingkan metode-metode tradisional pengendalian polusi udara untuk perlakuan aliran polusi udara dengan konsentrasi kecil. Biofilter merupakan teknologi yang memiliki sejumlah kelebihan dibandingkan metode tradisional dalam pengontrolan polusi udara. Kelebihan biofiltrasi yaitu:

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

Disamping kelebihanannya, biofiltrasi juga memiliki kekurangan yaitu:

1. Biofiltrasi tidak dapat secara sukses menghilangkan beberapa senyawa organik, terutama yang memiliki adsorpsi rendah atau laju degradasi rendah. Ini biasanya berlaku untuk VOC terklorinasi.
2. Gas polutan dengan emisi senyawa kimia tinggi membutuhkan unit biofilter besar atau area terbuka untuk menginstalasi sistem biofiltrasi.
3. Gas polutan dengan emisi yang sering berfluktuasi dapat menyebabkan kerusakan pada populasi mikroba biofilter dan kinerja keseluruhan.
4. Adanya periode aklimasi pada populasi mikroba selama berminggu-minggu atau bahkan berbulan-bulan, terutama saat kontaminan adalah VOC.
5. Biofilter yang mengandung konsentrasi mikroorganisme dalam jumlah yang tinggi dapat melepaskan mikroorganisme tersebut ke atmosfer (Martens et.al., 2001).

2.4 Medium Filter

Medium-filter yang basah dapat memberikan kondisi fisik dan kimia yang sesuai untuk proses perpindahan kontaminan dari udara ke fasa *liquid* dan selanjutnya menuju lapisan biofilm, di mana terjadi proses pendegradasian dari bakteri di dalam lapisan tersebut. Proses mekanisme biofiltrasi meliputi proses-proses seperti adsorpsi, absorpsi, dan proses pendegradasian oleh bakteri. Bakteri-bakteri tersebut akan menyerap kontaminan-kontaminan dan mengkonversinya menjadi air, CO₂, dan garam. Jenis-jenis medium filter dapat berupa kompos, plastik, kayu, *heather*, dan lain-lain. Medium-medium di atas dapat ditambahkan bahan nutrisi tambahan untuk pertumbuhan dan kelangsungan hidup bakteri pendegradasi. Pada umumnya, alat biofilter dapat beroperasi 5-7 tahun sebelum penggantian medium filternya.

Beberapa pertimbangan dalam memilih medium filter antara lain :

- Kemampuan untuk mempertahankan kelembaban untuk lapisan biofilm.
- Memiliki luas permukaan yang luas untuk proses absorpsi kontaminan dan perkembangan bakteri pendegradasi.
- Kemampuan untuk menghasilkan nutrisi untuk kelangsungan hidup bakteri pendegradasi.

- Memiliki resistansi yang rendah terhadap laju alir udara.
- Karakteristik fisik yang sesuai.

Sedangkan ciri – ciri medium filter yang baik (Rakesh Govind, 2009) :

1. Memiliki fraksi kekosongan (*void fraction*) yang tinggi. Fraksi kekosongan dalam media sintetik harus besar (>80%). Hal ini memungkinkan biofilm untuk berkembang dan perkembangan dari biomassa tidak mudah untuk menyumbat media filter.
2. Luas permukaan / unit volume dari *bed* biofilter yang tinggi. Biofilm hanya dapat berkembang pada permukaan media pendukung.
3. Memiliki *pressure drop* yang rendah. Pada umumnya total *pressure drop* gas kurang dari 0,3 inch dari air.
4. Memiliki permukaan yang hidrofilik, untuk membantu menyerap air. Sangatlah penting untuk menjaga dan mempertahankan kandungan air dalam lapisan biofilm.
5. Memiliki harga yang murah dan terjangkau. Faktor ini merupakan faktor terpenting dalam memilih medium filter yang akan digunakan.

Tabel 2.3 Keuntungan dan kerugian dari Beberapa Medium Filter

Medium Filter	Keuntungan	Kerugian
Tanah	<ul style="list-style-type: none"> • Teknologi sederhana. • Cocok digunakan untuk kontaminan berkonsentrasi rendah dan untuk pengontrolan terhadap bau. • Harga yang murah. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dapat menimbulkan <i>channeling</i> sehingga mengakibatkan <i>pressure drop</i> tinggi. • Diperlukan proses humidifikasi. • Kemampuan terbatas untuk menetralsasi komponen yang bersifat asam dalam proses pendegradasiannya.

Lanjutan Tabel 2.3 Keuntungan dan kerugian dari Beberapa Medium Filter		
		<ul style="list-style-type: none"> • Kapasitas adsorpsi yang rendah. • Kapasitas biodegradasi yang rendah (0,02-0,1 gms/L hari). <p>Kandungan nutrisi yang rendah.</p>
Gambut dan Kompos	<ul style="list-style-type: none"> • Teknologinya sudah umum untuk digunakan. • Sangat cocok untuk kontaminan yang berkonsentrasi rendah. • Harga terjangkau 	<ul style="list-style-type: none"> • Dapat menimbulkan <i>channeling</i> sehingga mengakibatkan <i>pressure drop</i> tinggi. • Kemampuan terbatas untuk menetralkan komponen yang bersifat asam dalam proses pendegradasiannya. • Kapasitas biodegradasi yang rendah (0,02-0,4 gms/L hari).
Medium sintetik	<ul style="list-style-type: none"> • Mudah dibersihkan. • Dapat digunakan untuk kontaminan konsentrasi tinggi (>25ppmv). • Lebih murah dibandingkan dengan medium filter berupa karbon aktif yang dilapisi dengan bahan sintetik. • Nutrien dihasilkan oleh cairan <i>trickling</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Mahal. • Harus mengisi <i>bed</i> secara kontinu meskipun sudah adanya media pendukung .

Lanjutan Tabel 2.3 Keuntungan dan kerugian dari Beberapa Medium Filter		
	<ul style="list-style-type: none"> • pH dapat dikontrol. • Kapasitas biodegradasi yang tinggi (0,2-0,7 gms/L hari). 	
Karbon aktif yang dilapisi dengan bahan sintetik	<ul style="list-style-type: none"> • Kapasitas adsorpsi yang tinggi. • Memiliki adhesi biomassa yang baik. • pH dapat dikontrol. • Dapat digunakan untuk kontaminan berkonsentrasi tinggi (>20ppmv). • Nutrien dihasilkan oleh cairan <i>trickling</i>. • Kapasitas biodegradasi yang tinggi (0,4-1,5 gms/L hari). 	<ul style="list-style-type: none"> • Harga paling mahal. • Proses pengisian <i>bed</i> membutuhkan media pengganti dan proses pembersihan secara kontinu meskipun sudah adanya media pendukung.

Sumber : Rakesh Govind, 2009

2.4.1 Kompos Sebagai Medium Filter

Kompos adalah hasil penguraian parsial/tidak lengkap dari campuran bahan-bahan organik yang dapat dipercepat secara artifisial oleh populasi berbagai macam mikroba dalam kondisi lingkungan yang hangat, lembab, dan aerobik atau anaerobik (Modifikasi dari J.H. Crawford, 2003). Sedangkan pengomposan adalah proses dimana bahan organik mengalami penguraian secara biologis, khususnya oleh mikroba-mikroba yang memanfaatkan bahan organik sebagai sumber energi. Membuat kompos adalah mengatur dan mengontrol proses alami tersebut agar kompos dapat terbentuk lebih cepat. Proses ini meliputi membuat campuran bahan yang seimbang, pemberian air yang cukup, pengaturan aerasi, dan penambahan aktivator pengomposan. Sampah terdiri dari dua bagian, yaitu bagian organik dan

anorganik. Rata-rata persentase bahan organik sampah mencapai $\pm 80\%$, sehingga pengomposan merupakan alternatif penanganan yang sesuai (Ottengraf, 1987).

Secara alami bahan-bahan organik akan mengalami penguraian di alam dengan bantuan mikroba maupun biota tanah lainnya. Namun proses yang terjadi secara alami tersebut berlangsung lama dan lambat. Oleh karena itu, sekarang ini banyak dikembangkan teknologi-teknologi pengomposan. Baik pengomposan dengan teknologi sederhana, sedang, maupun teknologi tinggi. Pada prinsipnya pengembangan teknologi pengomposan didasarkan pada proses penguraian bahan organik yang terjadi secara alami. Proses penguraian dioptimalkan sedemikian rupa sehingga pengomposan dapat berjalan dengan lebih cepat dan efisien. Teknologi pengomposan saat ini menjadi sangat penting artinya terutama untuk mengatasi permasalahan limbah organik, seperti untuk mengatasi masalah sampah di kota-kota besar, limbah organik industri, serta limbah pertanian dan perkebunan (Sutanto, Rachman, 2002).

Pengomposan secara aerobik paling banyak digunakan, karena mudah dan murah untuk dilakukan, serta tidak membutuhkan kontrol proses yang terlalu sulit. Dekomposisi bahan dilakukan oleh mikroorganisme di dalam bahan itu sendiri dengan bantuan udara. Sedangkan pengomposan secara anaerobik memanfaatkan mikroorganisme yang tidak membutuhkan udara dalam mendegradasi bahan organik (George Mason, 2007).

Hasil akhir dari pengomposan ini merupakan bahan yang sangat dibutuhkan untuk kepentingan tanah-tanah pertanian di Indonesia, sebagai upaya untuk memperbaiki sifat kimia, fisika dan biologi tanah, sehingga produksi tanaman menjadi lebih tinggi. Kompos yang dihasilkan dari pengomposan sampah dapat digunakan untuk menguatkan struktur lahan kritis, menggemburkan kembali tanah pertanian, menggemburkan kembali tanah, sebagai bahan penutup sampah di TPA (Tempat Pembuangan Akhir), reklamasi pantai pasca penambangan, dan sebagai media tanaman, serta mengurangi penggunaan pupuk kimia (George Mason, 2007).

Bahan baku pengomposan adalah semua material organik yang mengandung karbon dan nitrogen, seperti kotoran hewan, sampah hijau, sampah kota, lumpur cair dan limbah industri pertanian. Berikut merupakan Tabel 2.4 mengenai bahan-bahan yang umum dijadikan bahan baku pengomposan :

Tabel 2.4 Bahan-bahan yang Dapat Dijadikan Sebagai Kompos

Asal	Bahan
1. Pertanian	
Limbah dan residu tanaman	Jerami dan sekam padi, gulma, batang dan tongkol jagung, semua bagian vegetatif tanaman, batang pisang dan sabut kelapa
Limbah & residu ternak	Kotoran padat, limbah ternak cair, limbah pakan ternak, cairan biogas
Tanaman air	Azola, ganggang biru, enceng gondok, gulma air
2. Industri	
Limbah padat	Serbuk gergaji kayu, blotong, kertas, ampas tebu, limbah kelapa sawit, limbah pengalengan makanan dan pemotongan hewan
Limbah cair	Alkohol, limbah pengolahan kertas, ajinomoto, limbah pengolahan minyak kelapa sawit
3. Limbah rumah tangga	
Sampah	Tinja, urin, sampah rumah tangga dan sampah kota

Sumber : Wilyan Djaya et al., 2008

Adapun alasan penggunaan kompos kotoran hewan ternak kambing sebagai medium filter adalah karena jumlah ternak di Indonesia cukup banyak, volum kotoran ternak yang cukup besar, harga yang terjangkau, mudah diperoleh, mengandung mikroorganisme yang kompleks yang memiliki kemampuan mendegradasi beberapa jenis polutan. Kelebihan lain penggunaan kompos sebagai medium filter adalah mempunyai sifat tahan terhadap air. Selain itu, pupuk kandang secara kualitatif relatif lebih kaya hara dan mikrobial dibandingkan dengan limbah pertanian. Secara umum dapat disebutkan bahwa setiap ton pupuk kandang mengandung 5 kg N, 3 kg P₂O₅, dan 5 kg K₂O serta unsur-unsur hara esensial lain dalam jumlah yang relatif kecil (Knuti, Korpi dan Hide, 1970).

Sifat-sifat pupuk kandang dari tiap-tiap jenis hewan yang dipelihara menghasilkan pupuk kandang dengan sifat yang berbeda-beda seperti diuraikan berikut :

- Kotoran ayam mengandung unsur N tiga kali lebih besar dari pada pupuk kandang yang lain.
- Kotoran kambing mengandung unsur N dan K masing-masing dua kali lebih besar dari pada kotoran sapi.
- Kotoran babi mengandung unsur P dua kali lebih banyak dari kotoran sapi.
- Pupuk kandang dari kuda atau kambing mengalami fermentasi dan menjadi panas lebih cepat dari pada pupuk kandang sapi dan babi.
- Petani biasanya menyebut pupuk kandang sapi sebagai pupuk dingin (*Cold manures*).
- Dalam semua pupuk kandang unsur P selalu terdapat dalam kotoran padat, sedang sebagian besar unsur K dan N terdapat dalam kotoran cair (urine).
- Kandungan unsur K dalam urin adalah lima kali lebih banyak daripada dalam kotoran padat, sedang kandungan unsur N adalah dua kali lebih banyak.
- Kandungan unsur hara dalam kotoran ayam adalah yang paling tinggi, karena bagian cair (urin) tercampur dengan bagian padat. (Hardjowigeno, 1987).

Ciri-ciri umum kompos didasarkan pada sifat-sifat berikut (George Mason, 2007) :

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.

2.4.2 Kompos Kambing Sebagai Medium Filter

Salah satu alasan penggunaan kompos sebagai medium filter adalah nutrisi dari kompos dapat dibentuk melalui mineralisasi dan terdifusi ke dalam *biofilm* untuk menggantikan yang telah dikonsumsi oleh mikroorganisme. Walaupun demikian, kompos memiliki variasi rasio C:N tertentu dan yang lebih penting, beberapa kompos melepaskan seluruh nutrisinya dalam waktu beberapa minggu, sementara yang lain mempunyai laju pelepasan yang rendah tetapi dapat menyediakan nutrisi selama bertahun-tahun. Nitrogen merupakan salah satu nutrisi yang dapat habis karena nitrogen adalah konstituen utama protein mikroorganisme dan asam nukleat serta menyumbang 15% berat kering dari sel mikroba. Jadi, nitrogen dapat menjadi nutrisi pembatas jika jumlah yang memadai tidak tersedia dalam biofilter.

Selain itu, dari hasil penelitian diketahui bahwa kompos memiliki kapasitas penyimpanan air yang baik, pH netral, dan nutrient. Penurunan tekanan pada kompos pada umumnya lebih tinggi daripada *peat*, dan menjadi persoalan pemadatan isian (Devanny dkk., 1999; Ottengraph, 1977). Oleh karena itu, sangatlah penting untuk membuat kompos berbentuk pelet. Hal ini dilakukan untuk mengurangi *pressure drop* yang terjadi. Kompos merupakan media yang telah digunakan secara ekstensif dalam beberapa tahun terakhir karena mereka memiliki komunitas mikroba kompleks yang mampu mendegradasi beberapa polutan, dan memiliki retensi air yang baik dan kandungan zat organik yang cocok. Kompos merupakan media yang murah dan banyak tersedia; karena itu kompos digunakan dalam biofilter. Tambahan nutrisi biasanya tidak diperlukan untuk biofilter karena telah memiliki jumlah nitrogen organik dan mikronutrien lain.

Kadar nitrogen dari pupuk kambing adalah tinggi. Kadar airnya lebih rendah daripada pupuk kandang sapi oleh sebab itu perubahannya berlangsung cepat seperti pupuk kandang kuda (Sosrosoedirdjo, dkk, 2002). Kompos kambing memiliki kemampuan reduksi N_2O yang lebih tinggi daripada kompos sapi (Cynthia, 2009). Dengan demikian mikroorganisme yang diperlukan dalam proses biofiltrasi dapat berkembang baik dalam medium ini. Kompos kambing juga memiliki kadar nitrogen yang tinggi sehingga tidak diperlukan nutrisi tambahan untuk medium filter. Selain itu, kompos kambing memiliki kadar air yang lebih rendah daripada kompos sapi

(Sosrosoedirdjo, *dkk*, 1992). Dengan kadar kelembaban air yang tidak terlalu besar merupakan tempat yang cocok bagi kelangsungan hidup mikroorganismenya.

2.4.3 Kompos dalam Bentuk Pelet

Secara umum, pelet kompos akan menurunkan jumlah kompos yang tercecer, memperpanjang lama penyimpanan, menjamin keseimbangan zat-zat nutrisi kompos, (Patrick and Schaible, 1980), meningkatkan densitas kompos, menekan biaya transportasi, memudahkan penanganan dan penyajian pakan, Sebagai medium filter maka pelet kompos mempunyai performa yang baik untuk pertukaran gas (*biolayer*), akan tetapi perlu diperhatikan bahwa ukuran pelet yang terlalu kecil akan menghasilkan resistansi/tahanan terhadap aliran gas dan juga jika ukuran pelet terlalu besar maka itu baik untuk aliran gas akan tetapi akan mengurangi jumlah *potential sites* untuk aktivitas mikrobial (Marie-Caroline et al., 2002).

Dengan demikian maka perlu diperhatikan ukuran pelet yang optimum agar biodegradasi polutan akan berjalan lebih baik. Dengan mengkombinasikan aksi biologis dari mikroorganismenya dengan kapasitas adsorpsi medium filter, maka akan kinerja penghilangan polutan dapat ditingkatkan (Janni et al., 2001; Devinny, Deshusses, & Webster, 1999). Pelet berbentuk silinder terkadang dengan lubang di pusatnya yang memiliki rasio antara tinggi dengan diameternya, kurang dari 1. Namun dalam beberapa kasus adapula pelet yang rasionya mencapai hingga 50-200%. Karakteristik material yang dapat dibuat pelet antara lain memiliki ukuran partikel yang seragam, material memiliki kandungan moisture tertentu, partikel dapat mengisi cetakan, dapat menggumpal pada saat dipadatkan.

Proses pembuatan pelet pada prinsipnya sama dengan proses pembuatan pil pada industri farmasi, dimana sejumlah bahan dicampur dengan sejumlah kecil binder (guna mempertahankan bentuk baru yang permanen) lalu dimasukkan ke dalam suatu cetakan yang sebelumnya telah diolesi sejumlah kecil *lubricant*, kemudian ditekan. Jadi faktor-faktor yang mempengaruhi pembuatan pelet adalah:

a. Pengikat

Pengikat berfungsi untuk merekatkan bahan sehingga kekuatan pelet meningkat. Kelebihan pengikat menyebabkan berkurangnya luas permukaan material yang dipeletkan. Sebaliknya jumlah binder yang terlalu sedikit akan

menyebabkan pelet mudah pecah. Bahan pengikat adalah bahan yang digunakan untuk mengikat serbuk menjadi granul. Bahan pengikat yang biasa digunakan yaitu gula, jenis pati, gelatin, turunan selulosa, polivinil pirolidon (PVP), gom arab, dan tragakan (Voigt, 1984). Bahan pengikat ditambahkan dalam bentuk kering atau cairan selama granulasi basah untuk membentuk granul atau menaikkan kekompakan kohesi bagi tablet yang dicetak langsung (Banker dan Anderson, 1986). Pada umumnya bahan pengikat dapat dibedakan menjadi :

- Pengikat yang berupa gula dan polimer.
- Pengikat yang berupa polimer alam: *starch*(amilum) dan *gum* (acacia, tragacanth, gelatin).
- Pengikat yang berupa polimer sintetik: PVP, metilselulosa, etilselulosa.

Larutan pengikat yang dicampurkan pada serbuk sampai homogen, maka larutan pengikat akan terdistribusi di antara partikel-partikel. Dengan kata lain, partikel-partikel akan diselubungi oleh larutan pengikat. Hal ini disebabkan karena adanya adhesi antara pengikat dan serbuk (Aulton, 2002).

b. *Lubricant*

Air sering digunakan sebagai *lubricant* pada pembuatan pelet karena ketersediaannya dan harganya yang lebih murah. *Lubricant* berfungsi untuk membantu pemindahan gaya-gaya tekanan dan mengurangi tertinggalnya material pada permukaan cetakan. Terdiri atas *internal lubricant* (yang dicampurkan bersama dengan material) dan *external lubricant* (yang dioleskan pada permukaan cetakan). *Internal lubricant* umumnya dapat mengurangi sifat-sifat ikatan. Jika terlalu sedikit *lubricant* yang digunakan maka pelet akan sulit dikeluarkan dari dalam cetakan, sehingga besar kemungkinan pelet akan retak atau pecah. Penggunaan *lubricant* yang berlebihan juga akan merugikan karena tertutupnya pori-pori material yang hendak dipeletkan. Klasifikasi *lubricant* yang digunakan dalam pembuatan pelet pada berbagai material dapat dilihat pada Tabel 2.5 berikut.

Tabel 2.5 Jenis-Jenis *Lubricant*

<i>Lubricant</i>	% Berat Kering	Nilai
Grafit	0.25 – 2	A
Stearat:		
Aluminium	0.25 – 2	B
Magnesium, Kalsium	0.25 – 2	A
Lithium, Zinc	0.25 – 2	A
Asam stearat	0.25 – 2	B
Sterotex	0.25 – 2	A
Bedak	1 – 5	C
Air	0.1 – 5	A

Keterangan : A = sangat bagus C = cukup
B = bagus D = bagus

2.4.3.1 Amilum Gelatinasi Sebagai Pengikat/*Binder* Pelet

Amilum sangat luas pemakaiannya karena bersifat inert dan tidak bereaksi samping. Kekurangan dari penggunaan amilum adalah sifat alir dan kompresibilitasnya kurang baik, sehingga dibuat pregelatinasi amilum (Bolhuis dan Chouhan, 1996).

Amilum gelatinasi merupakan amilum yang dibuat menjadi gelatin dengan pemanasan larutan tepung hingga suhu 100°C (sampai mendidih) dan menjadi gelatin. Amilum gelatinasi mengandung 15 % amilosa, 15% amilopeptin, dan 80% amilum yang tak termodifikasi. Pengembangan amilum oleh adanya suhu yang optimal akan menghasilkan gelatin yang mempunyai ikatan antar granul yang kuat. Sebaliknya, bahan pengikat juga memiliki kekurangan yaitu bahan pengikat akan menghasilkan daya rekat yang lemah sehingga kompos akan rapuh dan terjadi *crapping* (Parrott, 1971). Penggunaan bahan pengikat yang berlebihan akan menghasilkan massa yang terlalu basah dan granul terlalu keras, sehingga produk yang dihasilkan mempunyai waktu hancur yang lama.

2.5 *State of The Art*

Telah dilakukan berbagai penelitian yang menggunakan prinsip biofiltrasi dengan menggunakan medium filter yang berbeda-beda pula untuk mereduksi gas kontaminan di udara. Berbagai medium tersebut dapat berupa medium alami, sintetik, serta campuran antara alami dan sintetik. Dan tentunya setiap medium filter memiliki kekurangan dan kelebihan masing-masing.

2.5.1 Biofiltrasi Dengan Medium Filter Berupa Pelet

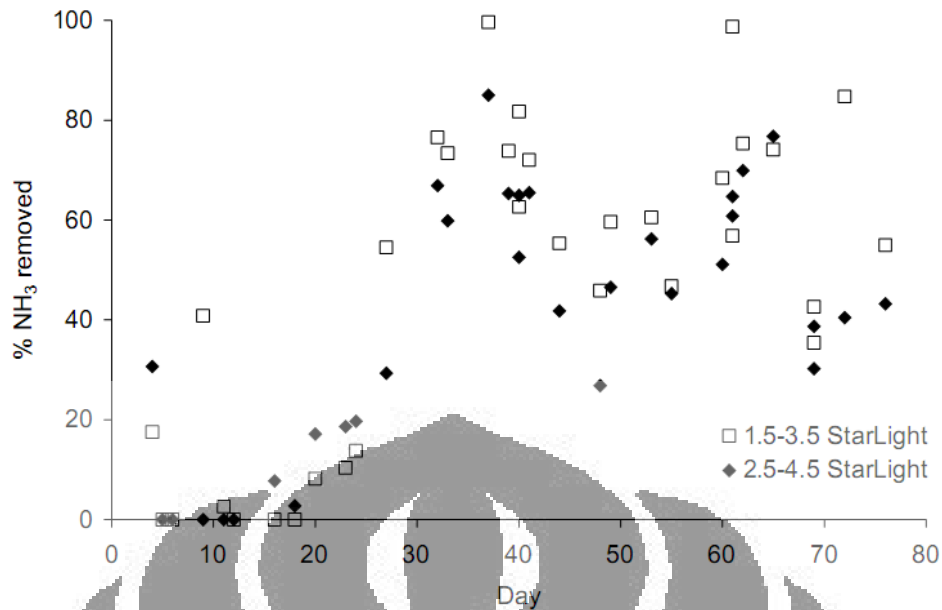
2.5.1.1 Biofiltrasi Dengan Medium Pelet Sintetis

Penelitian untuk mereduksi *ammoniacal* nitrogen dilakukan oleh Rebecca Moore, Joanne Quarmby dan Tom Stephenson (2001). Penelitian ini menggunakan BAF (*Biological Aerated filters*) sebagai medium filter dengan waktu operasi dilakukan selama 76 hari. Filter merupakan *foamed clay* (StarLight C) yang digunakan pada reaktor skala pilot dan mempunyai dua rentang ukuran yaitu 1.5-3.5 mm dan 2.5-4.5 mm.

Dalam penelitian ini, untuk mencapai pemahaman lebih baik mengenai pengaruh ukuran media, kinerja dari dua rentang ukuran *foamed clay* dianalisis dalam kaitan dengan penghilangan substrat. Reaktor yang digunakan menggunakan PVC dengan panjang 3,15 m dan diameter 0,2 m dengan laju alir bersifat *downflow*. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kemampuan reduksi menggunakan medium filter dengan dua rentang ukuran yang berbeda yaitu 1.5-3.5 mm dan 2.5-4.5 mm.

Adapun hasil yang diperoleh :

- Menggunakan kedua rentang ukuran BAF StarLight C, laju *loading* dapat lebih dari 4 kg/m³ hari.
- BAF dengan medium lebih kecil mencapai 70% lebih singkat/ maksimum dalam hal penghilangan *ammoniacal* nitrogen dari BAF dengan medium lebih besar.



Gambar 2.8 % pengilangan amoniakal nitrogen (NH_3) selama operasi

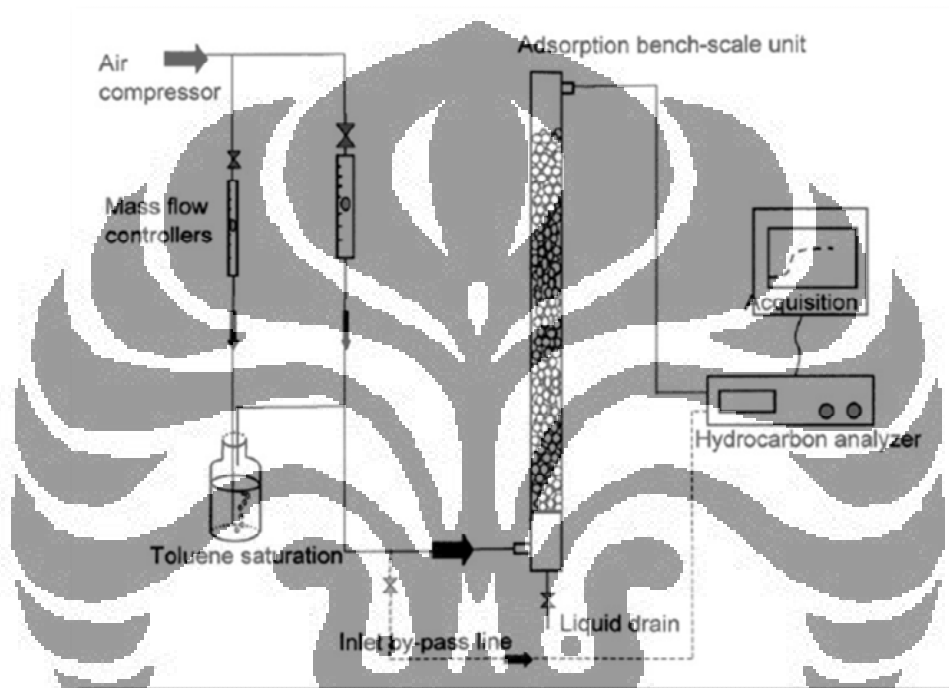


Gambar 2.9 Tekanan maksimum selama operasi

2.5.1.2 Biofiltrasi Dengan Medium Pelet Alami

Suatu penelitian untuk mereduksi konsentrasi toluena dilakukan oleh Marie-Caroline Delhomenie, Louise Bibeau, dan Michele Heitz (2002). Medium filter yang digunakan adalah pelet kompos. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari diameter pelet yang digunakan dalam proses biofiltrasi dengan diameter pelet

yang digunakan adalah 5,10, dan 20 mm. Laju alir yang digunakan adalah $1\text{m}^3\text{h}^{-1}$, konsentrasi masukan toluena adalah 2-3 g of NI^{-1} . Laju alir dikontrol dengan menggunakan MFC (*Mass Flow Controllers*) (Brooks, Series 5800) dan penghubung dari sistem komponen berbahan teflon. Medium filter yang digunakan berupa kompos dengan adanya bahan pengikat, dengan rasio kompos (90% v/v) dan bahan pengikat (10% v/v). Untuk mendapatkan performansi biofilter yang terbaik dapat dilihat dari nilai EC (*Elimination Capacity*) dan PCO_2 (*Production CO}_2*).

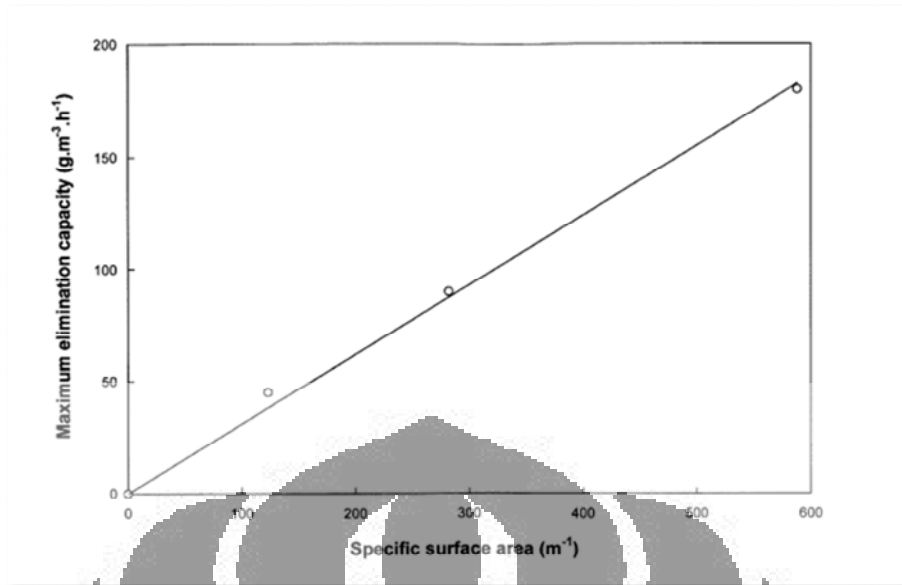


Gambar 2.10 Skema sistem biofilter yang digunakan

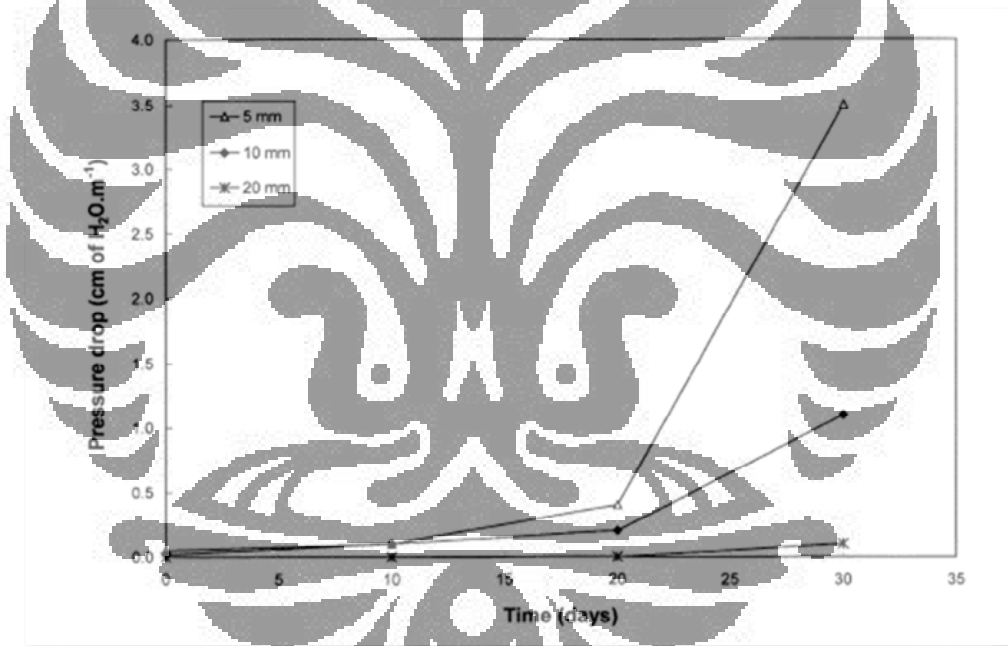
Adapun hasil yang diperoleh :

- Performansi meningkat seiring dengan penurunan diameter partikel pelet yang digunakan. Cara yang digunakan untuk mengetahui pengaruh dari karakteristik granumetrik adalah dengan menggunakan persamaan luas permukaan spesifik (a_s).

$$a_s = \frac{\text{Particle surface}}{\text{Particel volume}} = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_p} \dots\dots\dots(2.7)$$



Gambar 2.11 Pengaruh luas permukaan spesifik terhadap EC



Gambar 2.12 Pengaruh diameter partikel pelet terhadap *pressure drop*

Dari gambar-gambar di atas maka dapat disimpulkan bahwa dengan diameter pelet yang kecil dapat meningkatkan luas permukaan area spesifik, akan tetapi dapat meningkatkan *pressure drop*. Selain itu juga laju degradasi kontaminan oleh mikroba amat tergantung pada luas permukaan spesifik. Performansi biofilter yang terbaik didapatkan pada diameter pelet yang kecil (5mm). Akan tetapi dengan semakin kecil diameter pelet yang digunakan, maka *pressure drop* yang dihasilkan juga semakin

besar. Untuk itulah disarankan adanya penambahan *polystyrene spheres* dalam kolom biofilter (Ottengraf, Meesters, Van den Oever, dan Rezema, 1986).

- Penambahan luas permukaan area spesifik dan peningkatan nilai EC seiring dengan penurunan diameter pelet yang digunakan.

Tabel 2.6 Hasil eksperimen

No..	Diameter Pelet	Luas Permukaan Spesifik	EC
1	5 mm	590 m ⁻¹	180 gm ⁻³ h ⁻¹
2	10 mm	280 m ⁻¹	90 gm ⁻³ h ⁻¹
3	20 mm	120 m ⁻¹	45 gm ⁻³ h ⁻¹

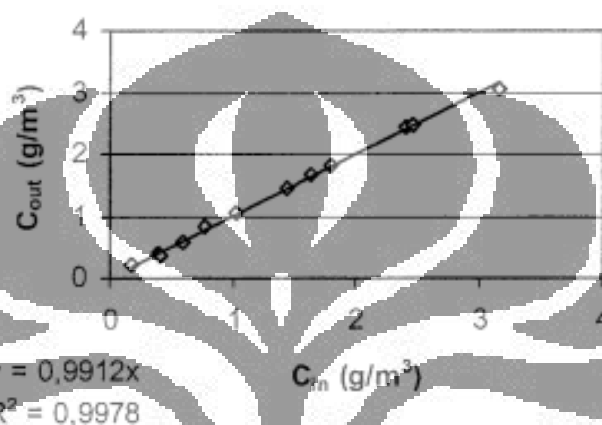
2.5.2 Biofiltrasi Menggunakan Medium Filter Dengan Tambah Nutrisi

Penelitian lain dilakukan dengan medium filter sintetik perlite (O.J. Prado et al., 2002). Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem biofilter dalam mereduksi toluena dengan mengkombinasikan pengaruh suplai nutrisi dan pengaruh temperatur. Medium filter ini diinokulasikan dengan bakteri *Pseudomonas sp.*, *Bacillus sp.*, dan *Tricosporon beigellii*. Larutan nutrisi yang ditambahkan mengandung (g/l) KH₂PO₄, 4.5; K₂HPO₂, 0.5; NH₄Cl, 2.0; and MgSO₄·7H₂O, 0.1 yang ditambahkan secara periodik. Laju alir diukur dengan menggunakan *thermal mass flow controller* (MKS Industries, Type 1259, Control channel type 247) dan konsentrasi dari isopentana akan diambil dengan menggunakan *syringe pump* (Harvard Apparatus, model 14). Gas toluena diukur dengan HP-6890 *gas chromatograph* (GC) (Agilent Technologies, Spain).

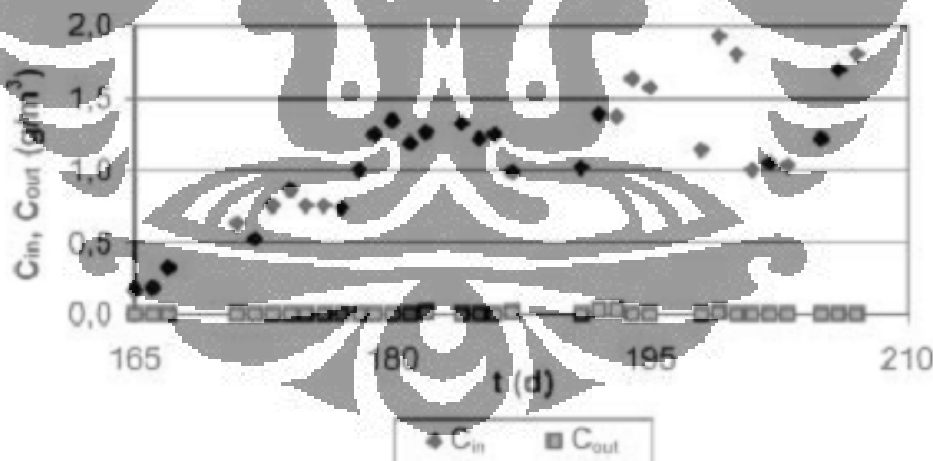
Adapun hasil yang diperoleh :

- Penambahan nutrisi akan meningkatkan kinerja biofilter dengan cara menyediakan nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan mikroba yang mampu mendegradasi polutan.
- Dalam biofilter, sintesis mikoba (biomassa) dengan mineralisasi polutan *biodegradable* untuk pertumbuhan biomassa dan akumulasi dari waktu ke waktu, yang mana hal ini berhubungan dengan peningkatan terhadap resistensi aliran gas pada *bed*.

- Reduksi polutan (*contaminant removal*) merupakan proses yang *multi-step* di mana dalam proses ini terjadi penyekatan (*partitioning*) ke fasa cair/ liquid, transport ke sel bakteri pada biofilm, yang diikuti dengan transpor melalui membran sel untuk terjadinya metabolisme.
- RE (*removal efficiency*) pada biofilter terutama terkontrol oleh laju transfer massa substrat di biofilm dan pada *boundary layer* fasa gas, di mana dipengaruhi oleh waktu retensi dalam biofilter.



Gambar 2.13 Konsentrasi outlet vs inlet sebelum inokulasi



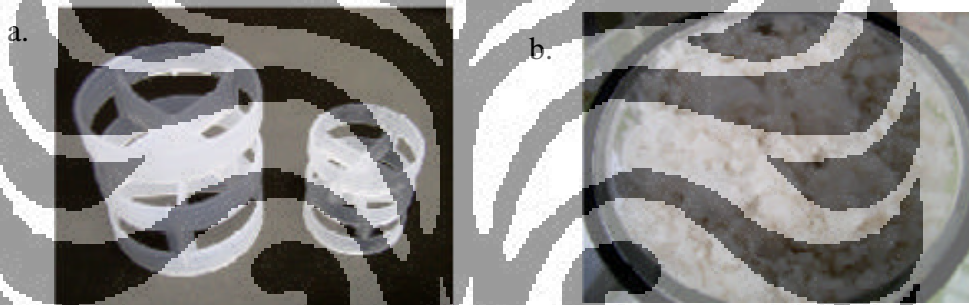
Gambar 2.14 Pengaruh Suplai nutrisi terhadap performansi biofilter

2.5.3 Biofiltrasi Amonia dengan Medium Sintetik

Medium sintetik dapat pula digunakan sebagai medium dalam proses biofiltrasi. Beberapa keunggulan medium sintetik daripada medium alami, seperti : Mudah dibersihkan, dapat digunakan untuk kontaminan berkonsentrasi tinggi (>25ppmv), lebih murah dibandingkan dengan medium filter berupa karbon aktif

yang dilapisi dengan bahan sintetik, pH dapat dikontrol, nutrisi dapat dihasilkan oleh cairan *trickling*, dan kapasitas biodegradasi yang tinggi (0,2-0,7 gms of kontaminan/Liter day). Akan tetapi, medium ini jarang digunakan karena mahal harganya dari medium ini. Contoh medium sintetik adalah *pall rings* dengan sel terimobilisasi, ametal oksida seperti keramik yang dapat menyerap, dan *calcinate cristobalite* atau *perlite*, serta UP20.

Penelitian skala laboratorium untuk mereduksi konsentrasi amonia dilakukan oleh Jung Hoon Kim, Eldon R. Rene, dan Hung Suck Park (2007) dengan menggunakan medium sintetik berupa biomedium yang dienkapsulasi oleh sodium *alginate* dan polivinil alkohol. Dalam penelitian ini juga digunakan *pall rings* yang berisi sel mikrobial terimobilisasi yang diisi secara acak ke dalam kolom filter, seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.15 (a) *Pall ring* yang digunakan secara komersial, (b) Tampak atas biofilter yang diisi dengan *pall ring* yang berisi sel terimobilisasi

Pall rings ini dapat menyediakan volum isian sebesar 6,5 L. Untuk meningkatkan karakteristik pencampuran NH_3 dan mengontrol konsentrasi inlet ke dalam biofilter dengan cara mencampurnya dengan udara yang berasal dari kompresor, biofilter dilengkapi dengan suatu alat pencampuran yang dilengkapi dengan *baffles* dan regulator. Untuk menjaga kebutuhan nutrisi, digunakan sistem *recycle*.

Dalam penelitian ini akan ditinjau pengaruh dari konsentrasi masukan NH_3 dengan *range* 10-150 ppm dengan konsentrasi keluaran rendah (<1ppm). Parameter yang dibuat tetap adalah laju alir untuk memperoleh EBRT sebesar 85, 64, 51, dan

32 s. Laju alir dipertahankan tetap rendah ketika pertama kali operasi agar sel yang terimobilisasi mengalami kontak dengan NH_3 .

Adapun hasil yang diperoleh :

- Untuk mencapai keadaan *steady* , dibutuhkan waktu beberapa hari untuk mendapatkan validasi data.
- Dengan adanya sel terimobilisasi yang memiliki aktivitas yang baik akan membuat daya reduksi yang lebih stabil dan konsisten.
- Sistem sel terimobilisasi yang dinilai sangat efektif digunakan untuk mereduksi konsentrasi amonia dan H_2S adalah *Thiobacillus thioparus*, *Nitrosomonas europaea*, *Arthobacter oxydans*, dan *Pseudomonas putida*.
- Sel terimobilisasi tidak menunjukkan periode aklimasi dan memiliki efisiensi penghilangan amonia tinggi pada awal percobaan kontinu.
- Daya reduksi amonia mencapai 100% ketika *loading* masukan amonia $4,5 \text{ g m}^{-3} \text{ jam}^{-1}$.

2.5.4 Biofiltrasi Terhadap NO_x

2.5.4.1 Kontaminan NO

Yang et al., 2007 melakukan penelitian tentang reduksi gas NO dengan medium filter kompos dengan campuran serbuk kayu sebagai *bulking agents*. Penambahan *bulking agent* adalah untuk meningkatkan ruang kosong, mengurangi kepadatan, dan meningkatkan ventilasi di dalam sistem. Di dalam penelitian ini, ditinjau pengaruh konsentrasi NO dan O_2 , ketinggian kolom, laju alir, dan sumber karbon eksternal terhadap efisiensi reduksi NO. Selain *bulking agents*, ditambahkan pula nutrisi ke dalam biofilter sebagai sumber karbon (glukosa), nutrisi inorganik, dan kelembaban. Laju alir yang digunakan adalah 30 L/jam, konsentrasi NO inlet 200 ppm, kandungan oksigen 6%, dan penambahan glukosa 1 g/hari. Adapun hasil yang diperoleh :

- Mengamati pengaruh dari konsentrasi O_2 pada reduksi gas NO. Hasilnya didapatkan bahwa efisiensi reduksi NO terbaik dihasilkan pada keadaan anaerob, dimana efisiensinya dapat mencapai 99%.

- Jumlah mikroorganisme yang bertambah besar setelah enam hari waktu operasi. Menggunakan NO sebagai akseptor elektron untuk meningkatkan metabolisme.
- Semakin panjang kolom biofilter yang digunakan, maka daya reduksi NO akan semakin meningkat karena waktu kontak yang lebih lama.
- Reduksi gas NO berbanding terbalik dengan konsentrasi NO dalam gas masuk. Semakin banyak NO akan meningkatkan pertumbuhan mikroorganisme pada kondisi nutrisi yang sesuai.
- Penambahan glukosa ke dalam medium filter tidak memberikan efek yang signifikan terhadap daya reduksi NO. Hal ini disebabkan sedikitnya glukosa yang ditambahkan sehingga materi-materi organik dalam medium filter sulit untuk mengalami degradasi dibandingkan dengan glukosa. Penambahan glukosa ke dalam biofilter dapat meningkatkan efisiensi reduksi NO untuk kedua kondisi baik aerobik maupun anaerobik.

2.5.4.2 Kontaminan N₂O

Penelitian untuk mereduksi konsentrasi N₂O skala laboratorium dilakukan dengan menggunakan medium filter berupa pupuk kandang dan serpihan kayu (Utami dkk.,2009). Penelitian ini dilakukan di Departemen Teknik Kimia UI. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh kedalaman medium, laju alir, dan penggunaan nutrisi terhadap performansi biofilter di dalam mereduksi N₂O.

Adapun hasil yang diperoleh :

- Kedalaman medium filter yang menghasilkan efisiensi reduksi tertinggi (67,86%) adalah pada kedalaman medium filter yang paling tinggi = 50 cm karena semakin dalam medium filternya, maka waktu kontak antara gas N₂O dengan medium filter akan semakin lama.
- Laju alir gas N₂O yang menghasilkan efisiensi reduksi tertinggi (70,22%) adalah pada Laju alir gas N₂O yang paling tinggi = 200 cc/menit karena pada laju alir sirkulasi gas N₂O yang lebih tinggi, aliran gas lebih banyak bersirkulasi di dalam sistem sehingga waktu kontak antara gas dan medium biofilter lebih lama.

- Dengan adanya penambahan nutrisi pada ketinggian medium filter 50 cm dan laju alir 200cc/menit, akan menghasilkan efisiensi reduksi 91,49 % dan tanpa penambahan nutrisi 70,217%. Di mana nutrisi yang digunakan adalah C,N, dan P dengan rasio C:N:P=100:10:1 dalam satu liter air.

Penelitian dilanjutkan dengan menggunakan medium filter berupa kompos berbasis kotoran kambing dengan sekam beras dan *cocopeat* sebagai *bulking agent* (Utami dkk.,2009). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh laju alir gas dan kandungan air pada medium filter terhadap efisiensi reduksi N₂O, serta menganalisis dan membandingkan pengaruh penambahan nutrisi alami dan sintetik terhadap efisiensi biofiltrasi.

Adapun hasil yang diperoleh :

- Laju alir gas N₂O yang menghasilkan efisiensi reduksi tertinggi (56,7%) adalah pada laju alir gas N₂O yang terkecil = 72 cc/menit.
- Kandungan air optimum untuk menghasilkan efisiensi reduksi yang optimum (70,13%) adalah sebesar 60% (w/w) kompos.
- Penambahan nutrisi alami (limbah cair dari peternakan sapi) dan nutrisi sintetik (*trace element*) dilakukan pada kedalaman filter 50 cm, laju alir 72 cc/menit, dan kelembaban 60% (w/w) kompos. Nutrisi sintetik dapat meningkatkan efisiensi reduksi N₂O 2,2% lebih tinggi daripada nutrisi alami.
- Efisiensi reduksi sebesar 75,9% dapat dicapai dengan ketinggian medium filter 50 cm, laju alir N₂O 72 cc/menit, dan penambahan nutrisi sintetik serta *Nitrobacter, sp* pada kompos.

Penelitian lain dilakukan untuk mereduksi konsentrasi N₂O (Cynthia ,2009). Penelitian ini juga dilakukan di Departemen Teknik Kimia UI dengan menggunakan medium filter berbasis kotoran sapi dengan *cocopeat* dan sekam beras sebagai *bulking agentnya*. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh laju alir dan kedalaman medium filter terhadap efisiensi reduksi N₂O dan pertumbuhan mikroorganisme di dalam kompos. Penelitian ini dilakukan dengan sistem *batch* selama 9 jam waktu operasi dengan memvariasikan laju alir dan kedalaman medium filter.

Adapun hasil yang diperoleh :

- Efisiensi reduksi tertinggi terdapat pada laju alir gas N_2O 88 cc/menit yaitu sebesar 61,3 %.
- Efisiensi reduksi tertinggi pada kedalaman medium filter 50 cm yaitu sebesar 61,35 %.
- Sifat-sifat dari kompos adalah :densitas=0,5554 g/mL, *water content* kompos awal=57,72%, *water content* kompos akhir=65,10% dengan variasi laju alir, *water content* kompos akhir dengan variasi kedalaman medium=63,65%, dan porositas kompos awal: 80,2%.
- Rasio C/N kompos berbasis kotoran sapi:12,93 dan rasio C/N kompos berbasis kotoran kambing: 17,44.
- Efisiensi reduksi N_2O pada kompos berbasis kotoran sapi pada laju alir 88 cc/menit dengan kedalaman medium 50 cm adalah sebesar 61,35%.
- Berdasarkan metode-metode uji yang telah dilakukan, dapat dikatakan bahwa kompos berbasis kotoran kambing merupakan medium filter yang lebih baik dalam dalam mereduksi gas N_2O .

Emisi Gas

N ₂ O				Utami dkk.,2009 (Pupuk kandang); Utami dkk.,2009 (Kompos berbasis kotoran kambing); Cynthia,2010 (Kompos berbasis kotoran sapi) Mei, 2010 (Kompos berbasis kotoran kambing)	Penelitian ini, 2010 (Pelet kompos berbasis kotoran kambing dengan amilum gelatinasi sebagai zat pengikat).
NO				Yang et al.,2007	
Amonia	Jung Hoon Kim, Eldon R. Rene, dan Hung Suck Park,2007	Taghipour et al.,2007	Hong dan Park, 2005; Baquerizo et al.,2005; Gabriel et al.,2007.	Estel la Pagans, Xavier Font, dan Antono Sanchez,2005	Rebecca Moore, Joanne Quarmby dan Tom Stephenson , 2001.
VOCs (toluena, etil asetat,isopropanol)	O.J. Prado et. al., 2002 Marie-Caroline et al., 2008		Liu et al.,2005		Marie-Caroline Delhomenie, Louise Bibeau, dan Michele Heitz, 2002.
Triethylamine				Torkian et al.,2005	
Etanol				M. Ardjmand, A. Safekordi, dan S. Farjadfard,2005	
H ₂ S	Dumont et.al.,2008; Z.M. Shareefdeen,2009				
Stirena		Bina et al.,2004			
Isopentana					Zhao Wang dan Rakesh Govind,1998 (Celite pelet)
	Sintetik	Sintetik + Alami	Alami	Kompos	Pelet

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

	Parameter Operasi				
Emisi Gas	Ketinggian medium	Masa Inkubasi	Penambahan nutrisi	Laju alir	Ukuran Partikel dan Bahan pengikat
N₂O	Utami dkk.,2009 (Pupuk kandang); Utami dkk.,2009 (Kompos berbasis kotoran kambing); Mei, 2010 (Kompos berbasis kotoran kambing)	Mei.,2010 (Kompos berbasis kotoran kambing);	Utami dkk.,2009 (Pupuk kandang); Utami dkk.,2009 (Kompos berbasis kotoran kambing) Penelitian ini,2010 (Pelet kompos berbasis kotoran kambing dengan amilum gelatinasi sebagai zat pengikat)	Utami dkk.,2009 (Pupuk kandang); Utami dkk.,2009 (Kompos berbasis kotoran kambing); Cynthia,2010 (Kompos berbasis kotoran sapi)	Penelitian ini,2010 (Pelet kompos berbasis kotoran kambing dengan amilum gelatinasi sebagai zat pengikat)

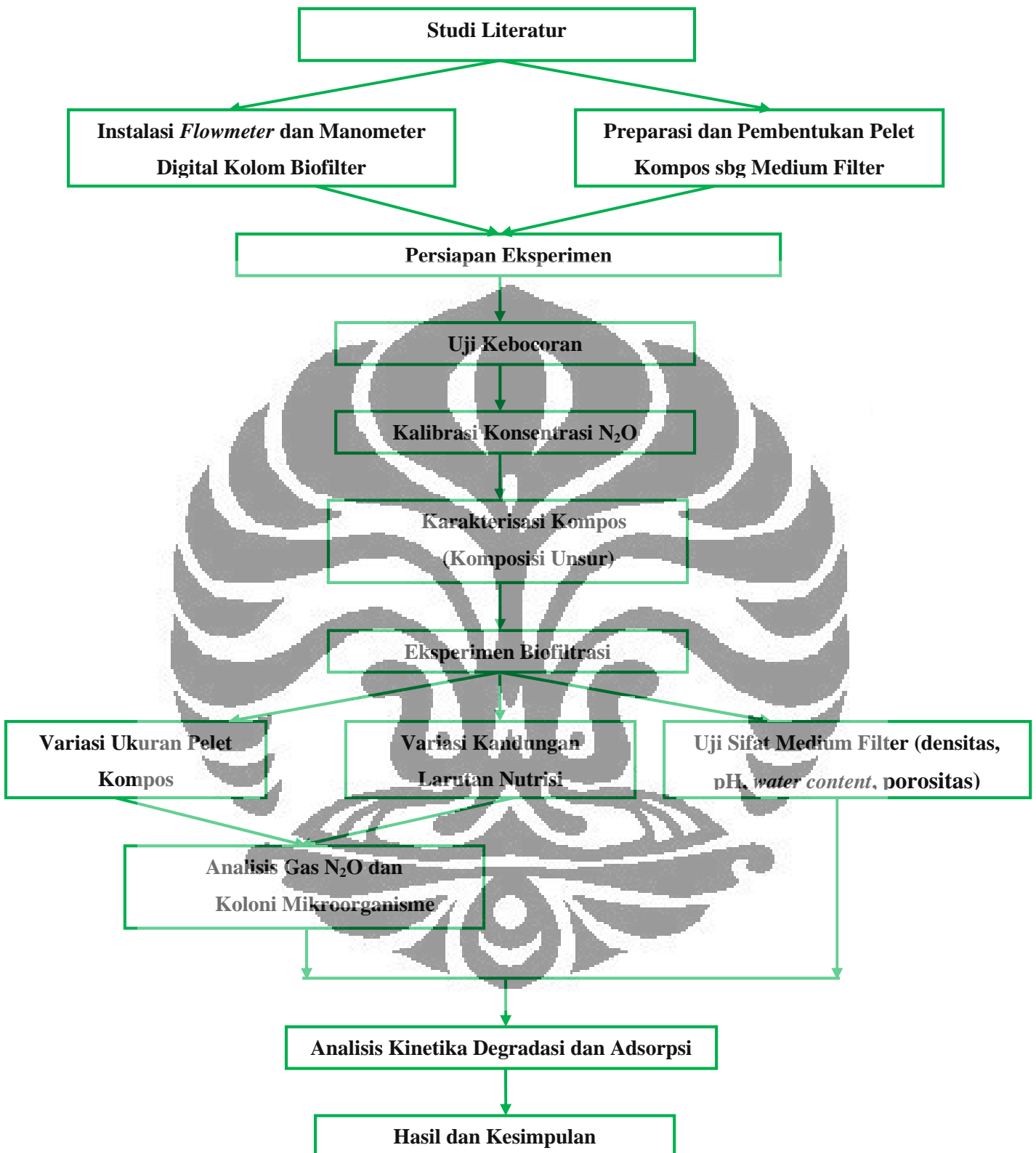
Gambar 2.17 Mapping State of The Art biofilter terhadap gas N₂O

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dari penelitian ini secara umum ditunjukkan oleh Gambar 3.1 di bawah. Medium filter yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelet kompos berbasis kotoran kambing. Untuk membentuk kompos kambing berbentuk pelet maka digunakan cetakan pelet. Sebelum kompos kambing itu dicetak dalam bentuk pelet, dilakukan penambahan zat perekat berupa amilum kanji gelatinasi. Tahap berikutnya adalah eksperimen biofiltrasi yang bertujuan untuk mereduksi N_2O menggunakan biofilter dengan mengevaluasi pengaruh variasi ukuran pelet dan pengaruh kandungan nutrisi rasio pada pelet kompos terhadap performansi biofilter dan terhadap pertumbuhan mikroorganisme dalam kompos. Analisis dilakukan dengan menggunakan GC (*Gas Chromatography*), uji SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan uji TPC (*Total Plate Count*).





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Secara Umum

Tahap pertama penelitian diawali dengan studi literatur berupa studi jurnal-jurnal publikasi baik nasional maupun internasional mengenai biofiltrasi. Tahap berikutnya adalah melakukan instalasi *mass flowmeter* dan manometer digital pada peralatan sistem biofilter guna mendapatkan desain bentuk biofilter yang sesuai dengan kebutuhan eksperimen biofiltrasi. Sistem peralatan biofilter yang digunakan pada penelitian ini adalah sistem biofilter yang digunakan oleh Utami et al. (2009) dengan penambahan instalasi *mass flowmeter* digital dan manometer digital pada kolom biofilter, adapun sistem aliran biofilter pada penelitian ini adalah sistem *batch* (sekali jalan). Setelah itu, *T-junction* dipasang pada bagian dasar kolom untuk memisahkan fasa gas dan cair secara sederhana. Pada bagian keluaran untuk fasa gas dari *T-junction*, dipasang *sampling port* gas keluaran biofiltrasi yang dihubungkan oleh pipa silikon sepanjang satu setengah meter mengarah ke bagian atas kolom, agar posisi *sampling port* gas masukan dan gas keluaran sejajar. Setelah modifikasi biofilter berupa pemasangan *mass flow meter*, *flow regulator*, *T-junction*, dan relokasi *sampling port* keluaran gas biofiltrasi selesai dilakukan dan setelah dipastikan tidak ada kebocoran gas sepanjang persambungan melalui uji kebocoran, kolom biofilter siap dioperasikan.

Langkah selanjutnya adalah preparasi kompos sebagai medium filter. Preparasi diawali dengan pembuatan kompos di Sekolah Alam, Ciganjur. Kemudian dilakukan langkah preparasi lanjutan yaitu dengan mengeringkan kompos yang telah jadi. Pengeringan dilakukan pada suhu 33°C dengan humiditas ruang 81%, lalu dilakukan pengayakan guna mendapatkan partikel kompos yang seragam. Setelah preparasi tersebut dilakukan maka kemudian dilakukan pembentukan pelet kompos dengan cetakan pelet.

Dalam tahap persiapan eksperimen, tahapan ini diawali dengan uji kebocoran alat yang bertujuan untuk memastikan bahwa konsentrasi N₂O berkurang karena proses adsorpsi dan degradasi, bukan karena kebocoran. Selanjutnya, dilakukanlah kalibrasi gas N₂O untuk mengetahui luas *peak* N₂O pada volum sampel NO standar. Kalibrasi terhadap laju alir N₂O tidak perlu dilakukan karena digunakan *flowmeter* digital pada sistem peralatan biofiltrasi.

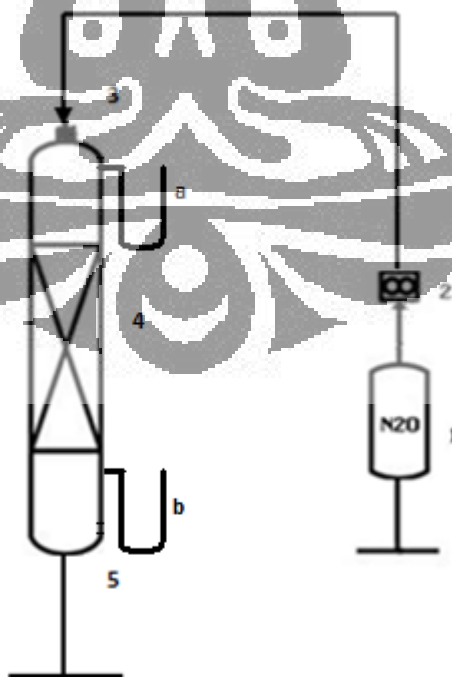
Tahap berikutnya adalah uji karakteristik kompos melalui uji komposisi unsur-unsur yang terdapat dalam pelet kompos berbasis kotoran kambing.

Selanjutnya dilakukan eksperimen biofiltrasi yang bertujuan untuk mereduksi N_2O menggunakan biofilter dengan mengevaluasi pengaruh variasi ukuran pelet kompos, pengaruh variasi penambahan larutan nutrisi terhadap performansi biofilter dalam mereduksi N_2O . Gas yang keluar dari medium filter dianalisis dengan kromatografi gas (GC) dan kompos akan diteliti perkembangan populasi mikroorganismenya dengan menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC) dan uji SEM (*Scanning Electron Microscope*). Pada tahap ini juga akan dilakukan uji sifat fisika dan kimia kompos, baik sebelum maupun setelah melalui biofiltrasi. Uji sifat fisik dan kimia yang dilakukan antara lain meliputi pengukuran densitas, pH, *water content*, dan porositas kompos. Tahap terakhir adalah perolehan hasil dan pengambilan kesimpulan.

3.2 Peralatan dan Bahan Penelitian

3.2.1 Peralatan

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



Gambar 3.2 Diagram Skematik Biofilter

Keterangan:

1. *Supply* gas N₂O
2. *Flow Control* (*mass flowregulator* dan *mass flowmeter*)
3. Tempat pengambilan sampel (sebelum biofiltrasi)
4. Kolom media filter
 - a. Tempat pengukuran *pressure* di atas kolom (dengan manometer digital)
 - b. Tempat pengukuran *pressure* di bawah kolom (dengan manometer digital)
5. Tempat pengambilan sampel (setelah biofiltrasi)

Perincian keseluruhan peralatan yang akan digunakan dalam laboratorium bioproses pada penelitian ini adalah:

Tabel 3.1 Rincian Peralatan yang Akan 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.	Ayakan/ Saringan	Mengayak kompos dan menghasilkan partikel kompos yang homogen
4.	Ember	Wadah untuk kompos yang telah diayak (sebelum dimasukkan ke dalam kolom biofilter)
5.	Gelas ukur	Tempat untuk memasukkan kompos ke dalam kolom biofilter
6.	<i>Bubble soap</i>	Kalibrasi laju alir
7.	<i>Gas Chromatograph</i> (GC)	Menganalisa konsentrasi N ₂ O dalam sampel
8.	<i>Syringe</i>	Mengambil gas sampel
9.	Timbangan	Menimbang berat
10.	Tabung Reaksi	Tempat pengenceran larutan
11.	Cawan Petri	Perhitungan populasi/koloni bakteri

12.	Presto	Mensterilisasi alat-alat yang akan digunakan pada metode TPC
13.	<i>Transfer Box</i>	Tempat melakukan metode TPC
14.	Bunsen	Memanaskan peralatan yang akan digunakan agar tetap steril
15.	Inkubator	Menginkubasi bakteri
16.	<i>Hot Plate</i>	Mencampur, memanaskan, dan menghomogenisasi larutan agar
17.	<i>Micropipet</i>	Mengambil larutan dalam jumlah sedikit
18.	Oven	Mensterilisasi alat-alat yang akan digunakan pada metode TPC
19.	Cetakan Pelet	Membuat pelet kompos

3.2.2 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi gas sampel yang mengandung N_2O , kompos sebagai bahan pengisi biofilter, nutrisi agar, *aquadest*, larutan nutrisi sintetik, serta bahan-bahan kimia lainnya. Perincian bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- ❖ **Kompos** yang terdiri dari bahan organik berupa kotoran sapi dan *bulking agent* berupa *cocopeat* dan sekam beras.
- ❖ **Gas sampel N_2O** , dimana gas yang akan digunakan untuk pengujian ini merupakan gas N_2O dengan konsentrasi sebesar 15.000 ppm dalam udara.
- ❖ **Nutrien agar** sebagai media agar untuk perhitungan bakteri.
- ❖ ***Aquadest*** sebagai penambah kandungan air dalam medium filter yang berfungsi untuk meningkatkan kelembaban sehingga bakteri pada medium filter dapat berkembang dengan lebih baik.
- ❖ **Larutan nutrisi** sebagai pemberi nutrisi tambahan untuk bakteri nitrifikasi. Adapun nutrisi yang akan ditambahkan berupa:
 - **Nutrisi Sintetik**, yang terdiri dari komponen K_2HPO_4 (0.4g), KH_2PO_4 (0.15g), NH_4Cl (0.3g), $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ (0.4g), dan CH_3COONa (2.93g), yang dilarutkan dalam 1L *aquadest*.

- **Larutan *trace element***, yang terdiri dari komponen Titriplex (50g), $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ (2.2g), $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ (5.5g), $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ (5.06g), $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (5.0g), $(NH_4)_6.Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ (1.1g), $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (1.57g), dan $CoCl_2 \cdot H_2O$ (1.61g), yang dilarutkan dalam 1L aquadest.

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

3.3 Prosedur Penelitian

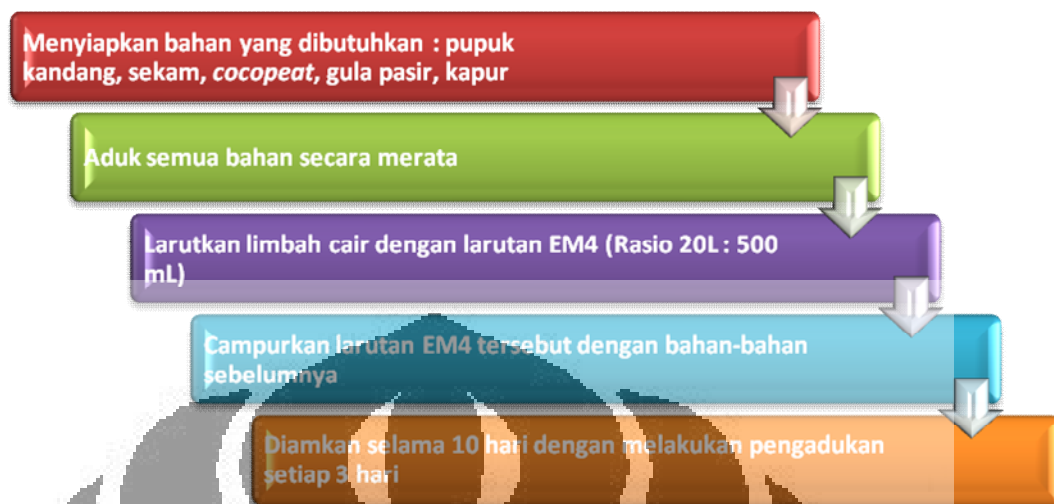
3.3.1 Instalasi *Mass Flowmeter* dan Manometer Digital Sistem Biofilter

Adapun peralatan biofilter yang digunakan adalah peralatan pada penelitian sebelumnya oleh Cinthia Noviani dan Shilfa Filayuri pada tahun 2009 yang ditambahkan dengan *mass flow regulator*. Sistem biofilter yang digunakan terdiri dari bagian utama berupa kolom biofilter yang terbuat dari bahan *acrylic* dengan dimensi tinggi 120 cm dan diameter dalam 7,35 cm. Untuk melihat penurunan tekanan sepanjang kolom, maka diinstal manometer digital pada kolom biofilter. Sedangkan instalasi *mass flowmeter* digital pada peralatan biofilter dilakukan agar laju alir gas N_2O aktual yang digunakan dipastikan lebih akurat dan stabil. Aliran gas N_2O dalam udara akan dialirkan melalui bagian atas kolom biofilter (*down-flow mode*), perlu diketahui bahwa laju alir gas berhubungan dengan kinerja biofiltrasi.

3.3.2 Preparasi dan Pembentukan Pelet Kompos Sebagai Medium Filter

Medium filter yang digunakan untuk biofiltrasi ini adalah kompos yang terdiri dari bahan organik berupa kotoran sapi dan *bulking agent* berupa *cocopeat* (sabut kelapa yang telah dikeringkan dan dihancurkan), gula pasir, kapur, dan sekam beras. Kompos yang digunakan berasal dari "Green Lab" Sekolah Alam, Ciganjur. Persiapan kompos sebagai medium filter ini dilakukan dengan pengeringan dan pengayakan, dimana ayakan yang digunakan memiliki 100 *Mash*. Salah satu tujuan dari pengayakan adalah untuk menghasilkan partikel medium filter yang homogen sehingga dapat mengurangi *pressure drop*. Sebelum digunakan untuk eksperimentasi biofiltrasi, maka kompos haruslah dibuat dulu menjadi bentuk pelet melalui serangkaian tahap pembentukan pelet kompos. Pelet

kompos yang dibuat sendiri terdiri dari dua ukuran yaitu ukuran 5x5 mm dan ukuran 5x8 mm.



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
 - Sekam dan *cocopeat* : sebagai *bulking agent* kompos
 - Gula pasir : sebagai sumber glukosa
 - Kapur/kapstan : meningkatkan pH pupuk
 - Dedak : sumber protein mikroba
- b. Membuat komposisi pembuatan kompos dari bahan-bahan di atas dengan rasio (kg) = 2 pupuk kandang: 2 sekam: 2 *cocopeat* : 2 dedak : 1 gula pasir : ¼ kapur.
- c. Mencampur komponen di atas, lalu di aduk dengan larutan EM4 (*Effective Microorganism*) 500 ml, dengan penambahan 20 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 diameter 100 *mash* (sekitar 2 mm). Salah satu tujuannya adalah untuk

menghasilkan partikel medium filter yang homogen sehingga dapat mengurangi *pressure drop*.

Berikut ini adalah diagram prosedur preparasi kompos sebelum digunakan untuk pembentukan pelet kompos.



Gambar 3.4 Skema Prosedur Preparasi Kompos Untuk Pembentukan Pelet Kompos

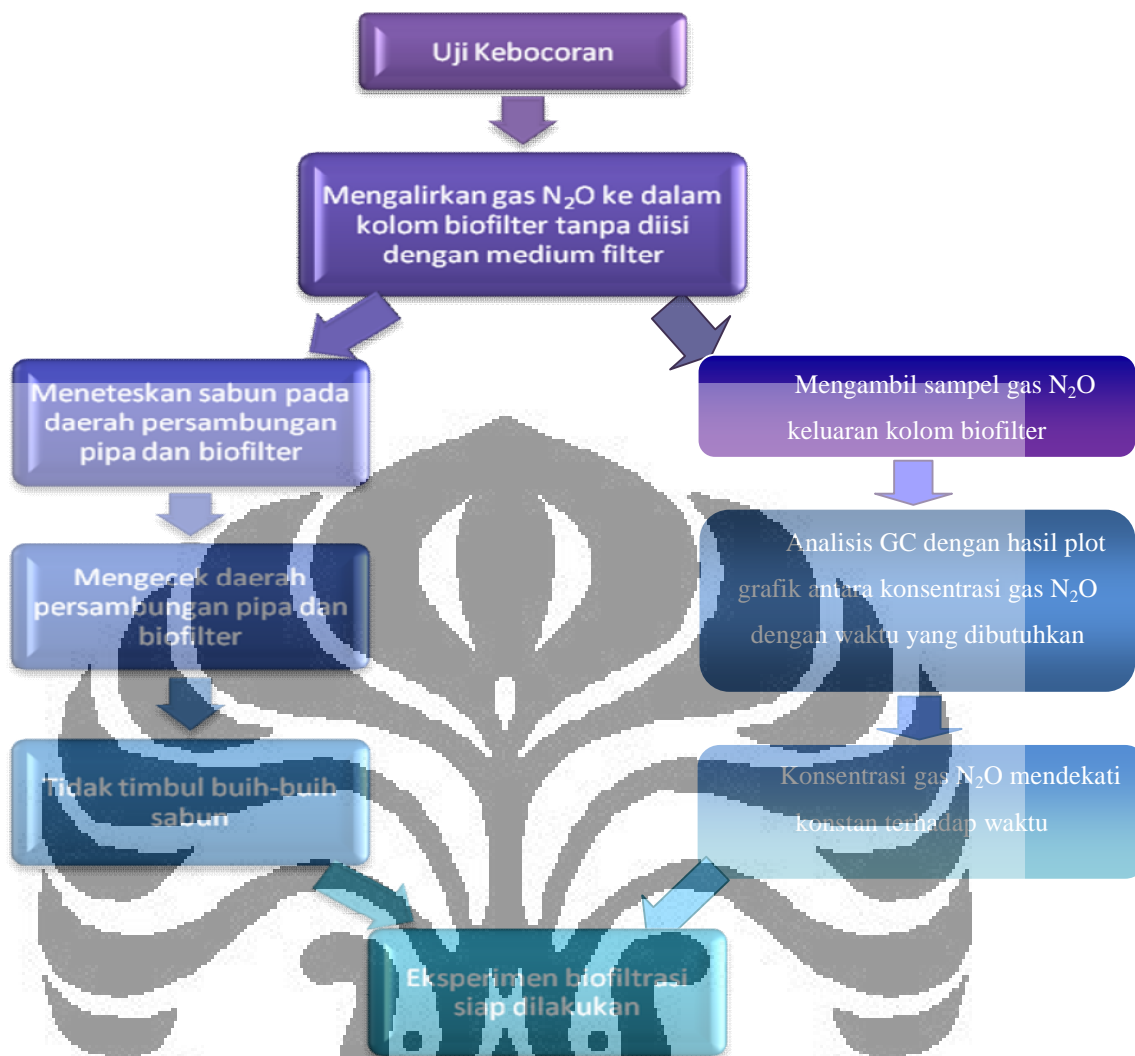
Adapun perincian prosedur pembuatan pelet kompos sebagai berikut:

- Memasukkan 100 mL air demin di dalam *beaker glass*.
- Menimbang 10 gram tepung kanji dan kemudian mencampurkannya ke dalam air demin untuk kemudian dipanaskan menggunakan *hot plate stirrer*, dan mengaduknya dengan menggunakan pengaduk kaca hingga kental dan bening.
- Mencampurkan kompos hasil preparasi dengan larutan kanji yang telah dibuat, dengan perbandingan 140 gram kompos : 30 gram larutan kanji.
- Mencetak campuran/adonan tersebut dalam cetakan pelet dengan disertai penekanan.
- Mengeringkan pelet yang sudah tercetak selama 3 hari hingga pelet baik secara mekanik.

3.3.3 Uji Kebocoran Alat dan Uji Blangko

Uji kebocoran pada biofilter dilakukan untuk menghindari ketidakakuratan data percobaan sehingga diperoleh hasil yang baik. Cara yang dilakukan untuk menguji kebocoran adalah dengan mengalirkan gas N_2O ke dalam kolom biofilter tanpa diisi dengan medium filter, lalu sampel gas N_2O keluaran kolom biofilter tersebut diambil dan dilakukan analisis pada kromatografi gas. Dari hasil kromatografi gas diplot grafik antara konsentrasi gas N_2O 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.

Selain itu, uji kebocoran juga dilakukan dengan meneteskan sabun pada daerah persambungan pipa, kemudian melihat apakah terjadi kebocoran pada setiap komponen sistem tersebut. Jika diketahui terjadi kebocoran pada selang atau sambungan pipa, maka dilakukan isolasi pada bagian yang bocor. Sedangkan jika kebocoran terjadi pada komponen/alat tertentu seperti kolom biofilter, atau tempat pengambilan sampel maka dilakukan penggantian dengan alat yang baru untuk menjaga agar sistem tetap berjalan dengan baik. Berikut adalah tahapan pengerjaan uji kebocoran alat biofilter:



Gambar 3.5 Skema Uji Kebocoran Alat dan Uji Blangko (rute kanan)

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 pada rute kanan pada Gambar 3.5 dalam menguji kebocoran alat.

3.3.4 Kalibrasi Konsentrasi N₂O

Selanjutnya, dilakukan kalibrasi gas N₂O dengan tujuan untuk mengetahui volum dan konsentrasi aktual gas N₂O, serta waktu retensi dan letak *peak* udara dan gas N₂O. Langkah-langkah yang dilakukan pada uji kalibrasi gas N₂O ini adalah sebagai berikut:

- Mengalirkan gas N₂O ke dalam *gas sampling*.
- Sampel diambil dari *gas sampling* dengan menggunakan *syringe*, dimana volum gas yang diambil divariasikan dari 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 dan 1,0 mL.
- *Syringe* diinjeksikan ke dalam *Gas Chromatography* (GC) yang akan mendeteksi keberadaan gas beserta konsentrasinya.
- Membuat plot grafik antara luas *peak* N₂O terhadap volum gas N₂O.

Pengambilan data pada kalibrasi gas N₂O dilakukan sebanyak dua kali/ duplikasi dengan tujuan untuk memastikan keakuratan hasil yang diperoleh.

3.3.5 Pengujian Karakteristik Kompos

Pengujian karakteristik yang dilakukan meliputi uji komposisi unsur yang terdapat di dalam kompos. Pengujian komposisi unsur-unsur yang terdapat di dalam kompos dilakukan terhadap kompos yang terdiri dari bahan organik berupa kotoran sapi dan *bulking agent* berupa *cocopeat* dan sekam beras, serta terhadap kompos yang digunakan pada penelitian sebelumnya (Utami dkk., 2009) dimana bahan organik yang digunakan adalah kotoran kambing dan sampah rumah tangga, serta *bulking agent* berupa sekam dan *cocopeat*. Adapun unsur-unsur yang ingin diketahui antara lain adalah komposisi Nitrogen (N), P₂O₅, K₂O, Sulfur (S), dan karbon organik dari kedua jenis kompos tersebut. Uji komposisi unsur ini dilakukan oleh Laboratorium Sucofindo, Cibitung.

3.4 Pengujian Kinerja Biofilter

Pada tahapan ini, ada dua bagian besar pengujian yang akan dilakukan yakni pengujian dalam hal kemampuan mereduksi gas N₂O dan dalam hal perkembangan jumlah mikroba sebelum dan setelah biofiltrasi pada kompos. Pengujian kinerja biofilter pada penelitian ini dilakukan melalui eksperimen dengan sistem aliran *batch* (sekali jalan) terhadap variasi yang akan dilakukan.

Variasi yang dilakukan antara lain: faktor operasi seperti pengaruh variasi kedalaman medium filter, variasi penambahan larutan nutrisi, dan pengaruh bentuk pelet kompos terhadap daya adsorpsi dan degradasi biofilter dengan menggunakan bakteri penitrifikasi dalam mereduksi N_2O .

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

3.4.1 Variasi Ukuran Pelet Kompos Sebagai Medium Filter

- a. Melakukan uji sifat dan karakter pelet kompos sebelum digunakan sebagai medium filter biofiltrasi seperti densitas, kandungan air, porositas, pH, kandungan C, N, P, K, dan S.
- b. Menyiapkan medium filter yaitu pelet kompos yang telah dipreparasi
- c. Memvariasikan ukuran pelet kompos yang digunakan untuk biofiltrasi yaitu ukuran 5x5 mm dan 5x8 mm.
- d. Memasukkan medium filter tersebut ke dalam kolom biofilter dengan kedalaman yang menghasilkan efisiensi paling efektif.
- e. Mengalirkan gas N_2O dengan konsentrasi 15.000 ppm dalam udara dengan laju alir 88 cc/menit.
- f. Membaca perbedaan tekanan kolom (bagian atas dan bawah kolom) yang terukur pada manometer air sebelum dan setelah biofiltrasi.
- g. Mengambil gas sampel yang telah dibiofiltrasi dengan *syringe*. untuk uji GC
- h. Mengambil sampel kompos setelah biofiltrasi untuk dilakukan uji TPC (*Total Plate Count*), uji kandungan air, uji pH, dan analisa SEM .

3.4.2 Variasi Kandungan Larutan Nutrisi Sintetik Pada Medium Filter

- a. Melakukan uji sifat dan karakter pelet kompos sebelum digunakan sebagai medium filter biofiltrasi seperti densitas, kandungan air, porositas, pH, luas permukaan, kandungan C, N, P, K, dan S.
- b. Menyiapkan medium filter yaitu pelet kompos yang menghasilkan efisiensi paling efektif dan yang telah dipreparasi.

- c. Menimbang pelet kompos yang dibutuhkan dan menambahkan larutan nutrisi pada pelet kompos dengan variasi kandungan nutrisi: 20, 40, 60, dan 70 % berat kompos.
- d. Memasukkan medium filter tersebut ke dalam kolom biofilter dengan kedalaman yang menghasilkan efisiensi paling efektif.
- e. Mengalirkan gas N₂O dengan konsentrasi 15.000 ppm dalam udara dengan laju alir 88 cc/menit.
- f. Membaca perbedaan tekanan kolom (bagian atas dan bawah kolom) yang terukur pada manometer air sebelum dan setelah biofiltrasi.
- g. Mengambil gas sampel yang telah dibiofiltrasi dengan *syringe* untuk uji GC.
- h. Mengambil sampel kompos setelah biofiltrasi untuk dilakukan uji TPC (*Total Plate Count*, uji kandungan air, uji pH, dan analisa SEM).

3.4.3 Pengujian Sifat Fisik dan Kimia Kompos

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

3.4.3.1 Perhitungan densitas pelet kompos

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

3.4.3.2 Pengukuran pH

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

3.4.3.3 Pengukuran *water content* pelet kompos

- 1) Menyiapkan cawan keramik kosong dan memasukkannya ke dalam oven untuk dipanaskan pada temperatur 105⁰C selama 2 jam.
- 2) Mengeluarkan cawan keramik dari dalam oven dan memasukkannya ke dalam desikator untuk kemudian ditimbang.
- 3) Memasukkan 5 g pelet kompos yang akan dihitung kandungan airnya ke dalam cawan keramik tersebut dan memasukkannya kembali ke dalam oven untuk dipanaskan pada temperatur 105⁰C selama 2 jam.
- 4) Mengeluarkan cawan keramik berisi pelet kompos tersebut dan memasukkannya ke dalam desikator untuk kemudian ditimbang.
- 5) Menghitung massa sisa padatan kompos dengan cara mengurangkan massa cawan keramik berisi pelet kompos tersebut dengan massa cawan keramik kosong.
- 6) Menghitung massa air yang menguap dengan cara mengurangkan massa kompos awal (5 g) dengan massa sisa padatan pelet kompos.
- 7) Menghitung *water content* kompos melalui persamaan berikut:

$$\text{Water content} = \frac{\text{massa air yang menguap (g)}}{\text{massa kompos awal (g)}} \times 100\% \dots\dots\dots(3.1)$$

3.4.3.4 Pengukuran porositas pelet kompos

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

$$\phi = \frac{V_{\text{kompos}}}{V_{\text{kolom}}} = \frac{M_{\text{kompos}}}{\rho_{\text{pelet}} \cdot (L_{\text{kolom}} - L_{\text{air}}) \cdot \pi \cdot R_{\text{kolom}}^2} \quad (3.2)$$

3.5 Data Penelitian

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

- a. Konsentrasi gas N₂O sebelum dan sesudah dilakukan biofiltrasi.
- b. Jumlah mikroorganisme yang terdapat pada medium filter sebelum dan setelah dilakukan biofiltrasi.
- c. Sifat fisik dan kimia kompos sebelum dan setelah biofiltrasi yang meliputi densitas, pH, *water content*, dan porositas.
- d. Komposisi unsur-unsur yang terdapat di dalam kompos berbasis kotoran sapi dan kompos berbasis kotoran kambing.

3.6 Pengukuran dan Analisis

3.6.1 Analisis Gas N₂O

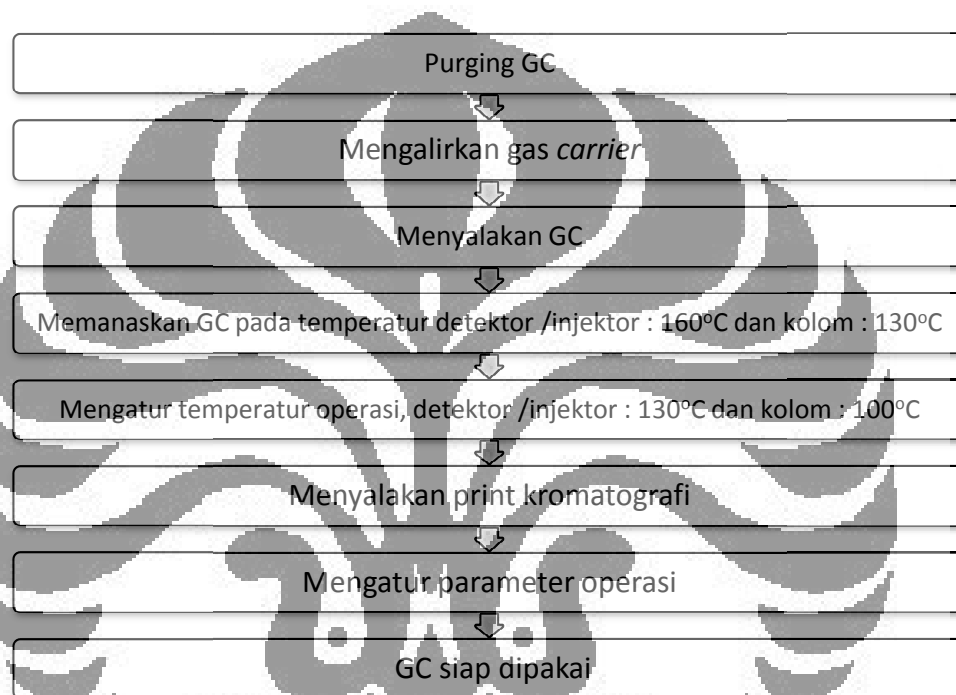
Konsentrasi efluen gas N₂O kemudian diukur dengan menggunakan kromatografi gas (GC) jenis TCD. Spesifikasi kromatografi gas (GC) yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 3.2 Spesifikasi Kromatografi Gas Dalam Penelitian

Merek dan Tipe	Shimadzu
Kolom	Porapak Q
Suhu :	
- Injektor/detektor	130°C

Lanjutan Tabel 3.2 Spesifikasi Kromatografi Gas Dalam Penelitian	
- Kolom (<i>initial-final</i>)	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 adalah sebagai berikut:



Gambar 3.6 Diagram Alir Prosedur Pengoperasian GC

3.6.2 Analisis perkembangan bakteri

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

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

Metode yang akan digunakan untuk melakukan analisis komunitas mikroorganisme pada sampel kompos dalam proses biofiltrasi adalah metode *Total Plate Count* (TPC). *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 dari $1:10^4$, $1:10^5$, $1:10^6$, $1:10^7$, $1:10^8$ hingga $1:10^9$ agar keakuratan penghitungan jumlah koloni bakteri dapat terjaga. Langkah-langkah adalah sebagai berikut:

1. Mengambil sampel kompos sebanyak 0,97 gram.
2. Melarutkan sampel kompos tersebut sebanyak 1 mL kemudian menambahkan air aquades sebanyak 9 mL (untuk membuat rasio dilusi 1:10).
3. Mengambil 1 mL larutan dari dilusi 1:10 kemudian menambahkan aquades sebanyak 9 mL (untuk membuat rasio dilusi 1:100).
4. Mengulangi langkah di atas hingga diperoleh larutan dilusi kompos dengan rasio dilusi $1:10^9$.
5. Untuk setiap rasio dilusi yang diinginkan, diambil 1 mL larutan sampel pengenceran dan dimasukkan ke dalam medium agar yang telah dituangkan ke dalam cawan petri untuk diinkubasikan selama satu hingga dua hari.
6. Setelah diinkubasikan, dilakukan penghitungan jumlah koloni bakteri setiap cawan secara manual. Perhitungan jumlah bakteri per mL dengan rumus sebagai berikut:

$$\sum \text{bakteri} \left(\frac{\text{CFU}}{\text{g}} \right) = \frac{\text{jumlah koloni bakteri}}{\text{Volume pengenceran} \cdot \text{volume sampel pada cawan petri}} \dots\dots\dots (3.3)$$

Langkah – langkah pembuatan medium agar adalah sebagai berikut:

- a. Melarutkan bubuk nutrien agar sebanyak 6,9 gr kemudian menambahkan air aquades sebanyak 300 ml.
- b. Didihkan larutan tersebut dengan agitasi pada *hot plate* selama 15 menit hingga mendidih dan larutan homogen.
- c. Diamkan larutan tersebut selama 1 menit.

d. Sterilisasi dengan autoklaf sebelum digunakan selama 15 menit.

Dalam metode TPC, setiap alat dan bahan yang akan digunakan harus dalam keadaan steril dan aseptis agar bakteri yang terdapat pada sampel yang akan diujicoba tidak terkontaminasi. Oleh karena itu, sebelum melakukan metode ini perlu dilakukan sterilisasi alat dan bahan terlebih dahulu. Dua metode sterilisasi yang digunakan pada uji TPC antara lain adalah dengan menggunakan panas lembab dengan uap jenuh bertekanan dan panas kering. Sterilisasi dengan cara yang pertama dilakukan dengan menggunakan autoklaf. Metode sterilisasi ini memiliki suhu efektif 121°C pada tekanan tinggi dengan waktu standar 15 menit. Cara ini dipakai untuk melakukan sterilisasi bahan-bahan yang digunakan untuk uji TPC. Hal ini disebabkan karena cara ini menyediakan suhu yang jauh di atas titik didih, memiliki daya tembus yang kuat dan kelembaban sangat tinggi sehingga mempermudah koagulasi protein sel-sel mikroba yang menyebabkan sel hancur. Sementara itu, metode pemanasan dengan metode panas kering memiliki suhu efektif 150°C selama 2 jam. Alat yang digunakan pada metode ini adalah oven. Berikut adalah penjabaran dari kedua metode sterilisasi yang digunakan.

a) Sterilisasi Alat

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



Gambar 3.7 Metode Sterilisasi Cawan Petri

b) Sterilisasi Bahan

Bukan hanya alat saja yang harus steril pada metode TPC ini, melainkan segala bahan yang digunakan selain sampel yang diuji juga harus dalam keadaan steril sehingga dapat dipastikan bahwa jumlah mikroba yang terhitung dalam

metode TPC berasal dari sampel yang akan diuji dan tanpa adanya kontaminasi. Gambar 3.8 di bawah ini menunjukkan metode sterilisasi terhadap bahan-bahan yang akan digunakan.



Gambar 3.8 Metode Sterilisasi Bahan-bahan yang Akan Digunakan

c) Teknik Transfer Aseptis

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

3.6.2.2 Analisis perkembangan bakteri dengan SEM

Uji ini dilakukan untuk melihat morfologi dari sampel yang akan diuji dengan cara *mescanningnya*. Sampel akan di-*scan* dengan tumbukan energi tinggi dari elektron-elektron yang bergerak secara acak. Kemudian, elektron-elektron berinteraksi dengan atom dan membuat sampel mengeluarkan sinyal yang mengandung informasi mengenai topografi permukaan sampel, komposisi, dan properti lainnya seperti konduktivitas elektrik. Jumlah koloni bakteri sebelum dan sesudah biofiltrasi dapat diketahui dari uji TPC dan diperkuat dengan adanya uji SEM ini. Uji SEM ini dilaksanakan di Laboratorium Material BATAN, Serpong dengan menggunakan *Analytical Scanning Electron Microscope JEOL JSM-6390A*.

3.7 Variabel Penelitian

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi ukuran pelet kompos sebagai medium filter dan variasi kandungan larutan sintetik. Sedangkan variabel terikat dalam penelitian ini adalah efisiensi reduksi gas N_2O yang diperoleh setelah melalui proses biofiltrasi dan jumlah populasi mikroorganisme yang terdapat dalam medium filter setelah proses biofiltrasi. Selanjutnya, kedua variabel terikat akan diteliti terhadap variabel bebas yang divariasikan, sehingga diperoleh variabel bebas yang tepat untuk menghasilkan efisiensi reduksi gas N_2O optimal.

3.8 Teknik Pengumpulan dan Analisis Data

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

1. Jumlah koloni bakteri pada medium filter sebelum dan setelah dilakukan biofiltrasi untuk melihat pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme di dalam medium filter menggunakan metode TPC.
2. Konsentrasi gas N_2O yang di dalam kolom biofilter, di daerah masukan kolom (sebelum biofiltrasi) dan keluaran kolom (setelah biofiltrasi) untuk mengamati aktivitas reduksi gas N_2O oleh bakteri menggunakan metode *Gas Chromatography*.
3. Beberapa uji sifat fisik dan kimia kompos berupa uji densitas menggunakan wadah *beaker glass*, uji pH menggunakan pHmeter dan pH indikator, uji *water content* menggunakan oven, dan uji *pressure drop* dalam kolom menggunakan manometer digital.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

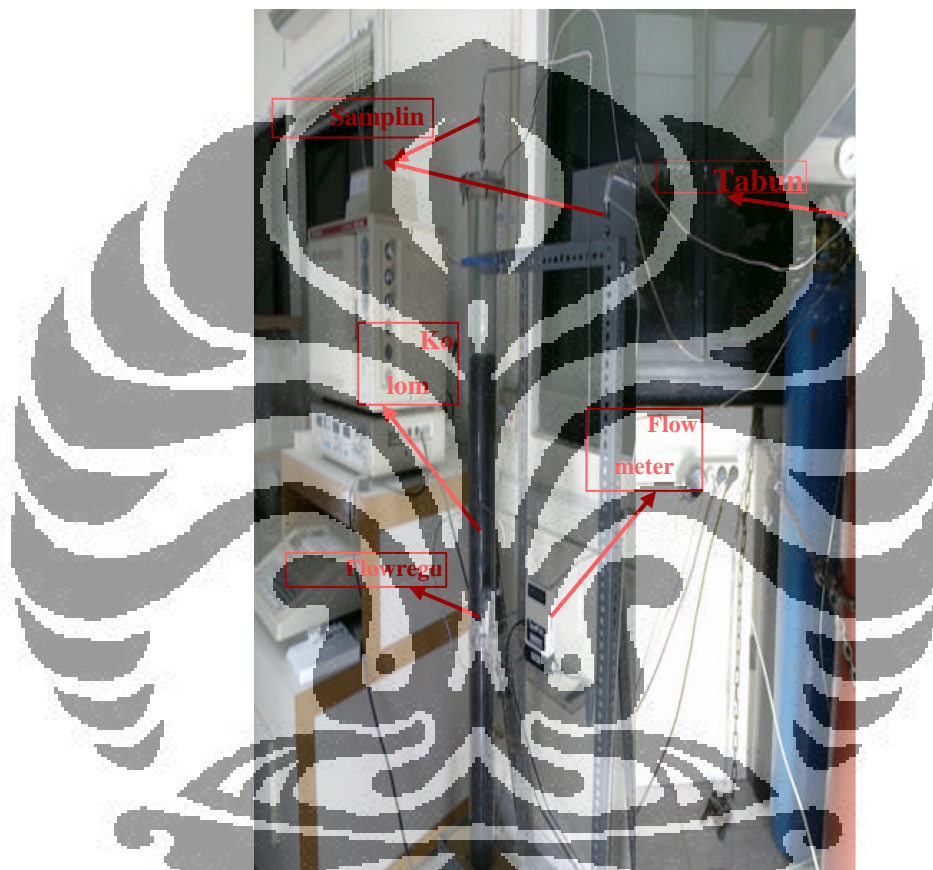
Pembahasan berikut ini akan menganalisa mengenai kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O , sifat dan karakteristik medium filter pelet kompos sebelum dan setelah biofiltrasi, serta jumlah koloni mikroorganisme sebelum dan sesudah proses biofiltrasi dengan metode *Total Plate Count* dan *Scanning Electron Microscope*. Kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O ditunjukkan oleh berkurangnya luas area N_2O pada GC karena adsorpsi dan biodegradasi oleh medium filter berupa pelet kompos. Dalam penelitian ini, pengamatan biofiltrasi dilakukan setiap jam selama 12 jam dengan menggunakan GC (*Gas Chromatography*) jenis GC-TCD.

4.1 Instalasi *Mass Flow Regulator* dan Manometer Digital Pada Biofilter

Penelitian biofilter di Departemen Teknik Kimia, UI telah dilakukan sebelumnya oleh Utami et al. (2009). Sistem peralatan biofilter yang digunakan pada penelitian ini adalah sistem biofilter yang digunakan oleh Utami et al. (2009) dengan penambahan instalasi *mass flow regulator* digital dan manometer digital pada kolom biofilter. Peralatan biofilter ini terbuat dari *acrylic* dengan dimensi tinggi kolom 120 cm, diameter dalam 7,35 cm, dan tebal bahan 0,325 cm. Sistem biofilter terdiri dari tabung gas yang akan menyuplai gas N_2O , kolom biofilter sebagai tempat berlangsungnya biofiltrasi dan perpipaan yang menghubungkan keduanya serta *sampling port* untuk pengambilan sampel N_2O . Penggunaan *stainless steel* sebagai *tube* juga bertujuan untuk menghindari timbulnya korosi (Yang, et al, 2007).

Instalasi *mass flow regulator* digital pada peralatan biofilter dilakukan agar laju alir gas N_2O aktual yang digunakan dipastikan lebih akurat dan stabil. Aliran gas N_2O dalam udara akan dialirkan melalui bagian atas kolom biofilter (*down-flow mode*), perlu diketahui bahwa laju alir gas berhubungan dengan kinerja biofiltrasi. Adanya instalasi *mass flow regulator* digital dan manometer digital pada kolom maka pengukuran terhadap laju alir gas inlet dan *pressure drop* sepanjang kolom biofilter akan lebih akurat. Pengukuran ini dilakukan

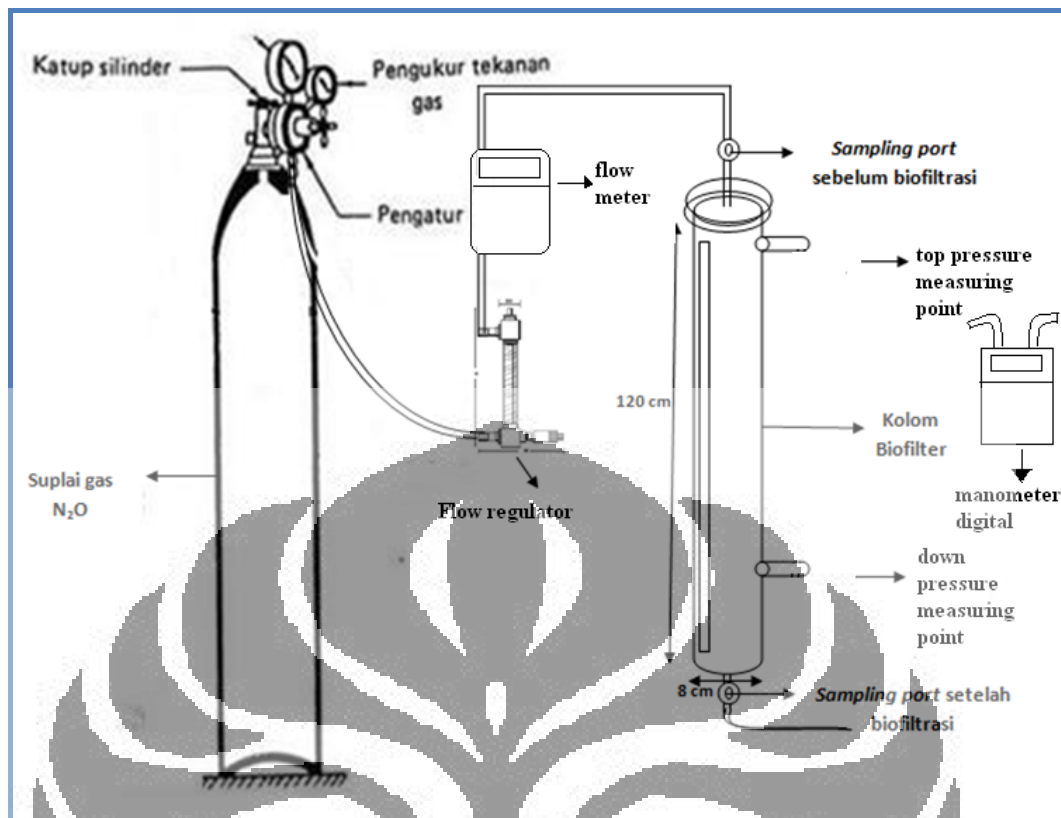
mengingat *pressure drop* berhubungan dengan adanya resistansi aliran gas yang melewati medium filter (Kinney et.al., 1996; Mohseni et.al., 1998). Resistansi aliran gas terjadi karena akumulasi pertumbuhan mikroorganisme selama biofiltrasi yang menyebabkan terjadinya perubahan pada karakteristik medium seperti reduksi pori interpartikel dan kompaksi medium filter alami. Sistem peralatan biofilter pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 4. 1 Sistem Biofilter Skala Laboratorium Pada Penelitian Ini

Komponen-komponen desain biofilter diatas adalah sebagai berikut:

- Suplai gas N_2O dengan konsentrasi 15.000 ppm dalam udara
- *Flowregulator* dengan laju alir 0-473 cc/menit (N.T.K 94-4095)
- *Flowmeter digital* dengan laju alir 0 – 450 cc/menit (SIERRA Ins. T.T 820)
- 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*



Gambar 4.2 Skematik peralatan biofilter dalam bentuk 3 dimensi

4.2 Preparasi Medium Pelet Kompos

Medium filter yang digunakan adalah medium filter kompos berbasis kotoran kambing dengan kandungan *cocopeat* dan sekam sebagai *bulking agent*. 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). Kompos juga memiliki komunitas mikroba yang kompleks dan memiliki kandungan nutrisi (organik nitrogen dan mikronutrisi lainnya) yang tinggi sehingga tidak memerlukan penambahan nutrisi (Pagans et.al., 2005).

Medium filter berbentuk pelet memiliki beberapa keuntungan yang antara lain adalah meningkatkan kadar energi metabolis, membunuh bakteri patogen, menurunkan jumlah kompos yang tercecce, memperpanjang lama

penyimpanan, menjamin keseimbangan zat-zat nutrisi kompos, dan mencegah oksidasi vitamin (Patrick and Schaible,1980).

Tahap preparasi medium filter berbentuk pelet diawali dengan preparasi medium filter *bulk* itu sendiri yang terdiri dari dua langkah, dan kemudian dilakukan preparasi medium filter *bulk* menjadi berbentuk pelet. Dalam preparasi medium filter berbentuk *bulk*, maka pertama yang dilakukan ialah 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 temperatur ruang sekitar 26°C dan humiditas ruangan 81% selama 10 hari.

Proses pengeringan ini dilakukan dengan menggunakan tampah yang terbuat dari bambu sehingga memudahkan proses pengeringan kompos dibanding dengan menggunakan wadah dengan bahan dasar plastik. Proses pengeringan kompos ini dilakukan selama sepuluh hari hingga dihasilkan kompos yang agak kering. Setelah proses pengeringan berakhir dilanjutkan dengan pengayakan kompos yang ada dengan menggunakan ayakan. Pengayakan ini bertujuan untuk menghasilkan partikel kompos yang homogen, dengan ukuran yang seragam dan cocok sebagai medium filter (sekitar 2mm).

Setelah medium filter kompos *bulk* telah melalui tahap - tahap seperti diatas maka dilakukan preparasi medium pelet kompos. Dalam tahap ini, kompos dicampur dengan binder/pengikat yang berupa kanji tergelatinasi. Pertama yang dilakukan ialah membuat kanji gelatinasi dengan cara mencampurkan 10 gram kanji dalam 100 mL, kemudian memanaskan campuran pada hot plate stirer sambil dibantu pengadukan dengan pengaduk kaca hingga kental dan bening (terbentuk 110 gram gelatin kanji). Kedua, mencampurkan kompos *bulk* yang telah dipreparasi (perbandingan 140 gram kompos *bulk* : 30 gram kanji gelatinasi). Dengan kata lain pada pelet, terkandung 17,65 % gelatin kanji atau 2,73 % *raw* kanji). Ketiga, dilakukan pencetakan campuran tersebut dengan cetakan berbentuk silinder ukuran 5 x 5 mm dan 5 x 8 mm melalui penekanan (*pressing*) sehingga diperoleh pelet dengan ukuran 5 x 5 mm dan 5 x 8 mm.

Proses pengeringan pelet kompos yang terbentuk sama seperti pada proses pengeringan kompos berbentuk *bulk*. 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 tiga hari hingga dihasilkan pelet kompos yang kuat secara mekanik.



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

Hasil medium biofilter yang sudah dikeringkan dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut ini.



Gambar 4.4 Kompos sebagai bahan pelet 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.



Gambar 4.5 Pelet kompos sebagai medium filter

4.3 Persiapan Eksperimen

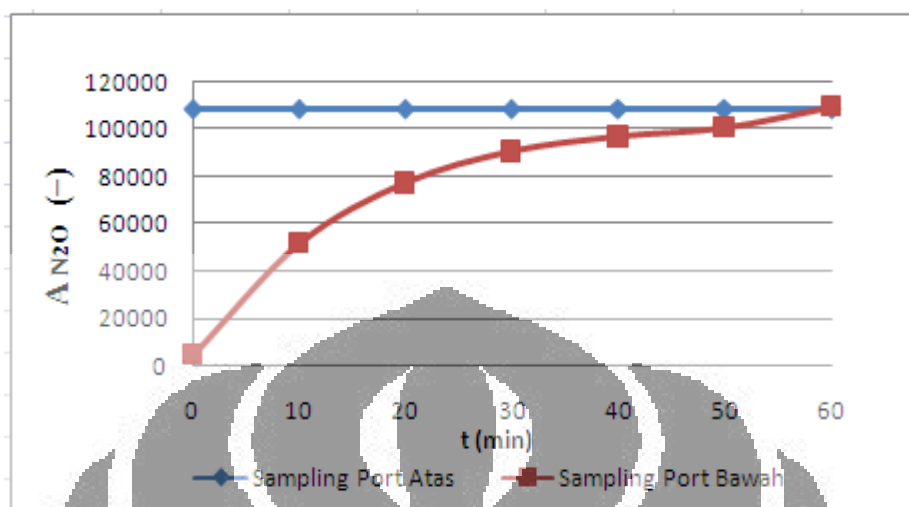
4.3.1 Uji Kebocoran dan Uji Blangko

Uji kebocoran pada sistem peralatan biofilter dilakukan untuk mengecek dan memastikan keakuratan data percobaan sehingga akan didapatkan hasil yang baik. Keakuratan berhubungan dengan penurunan konsentrasi N_2O saat uji kinerja biofilter disebabkan oleh adanya adsorpsi dan degradasi, bukan karena kebocoran. 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 . Jika buih semakin banyak dalam waktu yang lebih cepat, maka tingkat kebocoran lebih tinggi, namun jika tidak bocor maka tidak akan berbuih.

Selain dengan buih sabun (cara mekanik), uji kebocoran juga dilakukan dengan cara analitik yaitu dengan cara mengalirkan udara sampel ke dalam kolom biofilter kemudian dicek luas area pada *sampling port* atas (sebelum biofiltrasi)

dan *sampling port* bawah (setelah biofiltrasi). Gambar 4.6 menunjukkan hasil uji blanko pada sistem biofilter yang digunakan.



Gambar 4. 6 Uji Kebocoran dan Uji Blangko Biofilter

Pada uji kebocoran ini, diperoleh hasil yang dapat dilihat pada Gambar 4.6 dan data dapat dilihat di Lampiran 2. Dari hasil ini dapat jelas terlihat bahwa sesaat setelah penginjeksian gas N_2O ke dalam kolom biofilter ($t = 0$ menit) sampai t mendekati 60 menit, distribusi gas belum homogen pada *sampling port* bawah. Artinya, gas N_2O memerlukan waktu untuk berdistribusi di dalam kolom biofilter dari *inlet* hingga menuju *sampling port* bawah. Setelah mencapai sekitar menit ke-60, maka konsentrasi gas N_2O di dalam kolom selama waktu pengamatan dapat dikatakan konstan. Hal ini dapat terlihat dengan membandingkan grafik tersebut dengan grafik konsentrasi gas N_2O yang diperoleh pada *sampling port* atas. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa alat biofilter tidak bocor dan siap digunakan dalam penelitian dan terjadinya penurunan konsentrasi saat penelitian nanti bukan disebabkan oleh adanya kebocoran. Setelah homogen, maka konsentrasi gas N_2O di dalam kolom selama waktu pengamatan dapat dikatakan konstan jika dibandingkan dengan konsentrasi pada sampel yang diinjeksikan pada *sampling port* atas.

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 pelet kompos. Sesuai dengan Gambar 4.6 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 Uji Waktu Tinggal

Uji waktu tinggal merupakan pengujian untuk mengetahui berapa lama waktu tinggal aktual gas N₂O di dalam kolom biofilter kosong (*empty bed*). Uji waktu tinggal ditentukan dengan persamaan EBRT (*Empty Bed Residence Time*). EBRT dapat didefinisikan sebagai volum total kolom biofilter kosong dibagi dengan laju alir udara kontaminan. Nilai EBRT yang terlalu rendah berarti laju alir gas tinggi, *pressure drop* tinggi, dan konsumsi energi besar. Sedangkan nilai EBRT yang terlalu tinggi membutuhkan medium filter dengan volum yang banyak dan biaya kapital yang tinggi.

Lamanya waktu tinggal gas N₂O 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. Dalam penelitian ini, EBRT dapat diartikan sebagai jumlah volum total kolom biofilter kosong dibagi dengan laju alir gas N₂O dengan panjang 120 cm dan diameter dalam 7,35 cm.

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

$$EBRT = \frac{3,14 \times (3,675\text{cm})^2 \times 120\text{cm}}{88\text{ cc/menit}} = 57,83\text{ menit} = 0,96\text{ jam}$$

Selain dengan analisis empiris dengan formula EBRT, uji waktu tinggal juga dilakukan secara eksperimental seperti pada saat uji blangko, yaitu dengan cara mengalirkan gas N₂O pada laju alir 88 cc/menit ke dalam kolom biofilter kosong (*empty bed*), kemudian *syringe* diinjeksikan pada *sampling port* bawah untuk selanjutnya *syringe* tersebut diinjeksikan ke dalam *Gas Chromatography* (GC) untuk mendeteksi keberadaan gas N₂O beserta konsentrasinya. Pengukuran rentang waktu yang dibutuhkan oleh gas N₂O mulai dari gas tepat dialirkan ke

dalam kolom hingga gas tersebut diperoleh pada *sampling port* bawah dapat dibandingkan dengan hasil perhitungan empiris EBRT di atas.

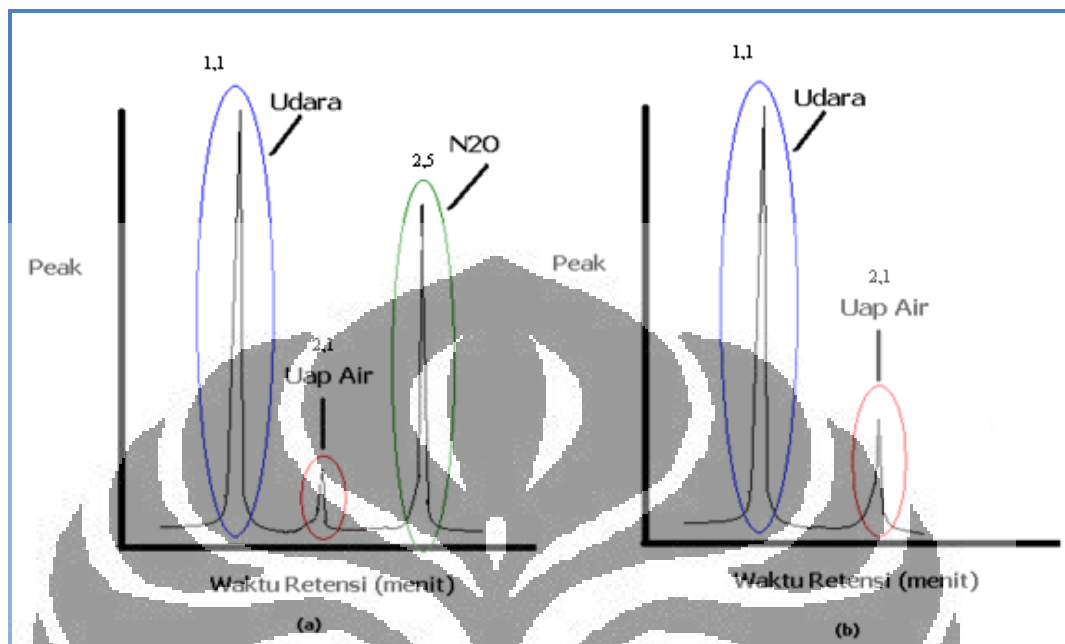
Dari eksperimen, fakta menunjukkan bahwa gas tersebut dapat dideteksi pada kolom biofilter beberapa menit kemudian setelah gas dialirkan ke dalam kolom biofilter. Akan tetapi, konsentrasi gas N_2O pada belum sama seperti konsentrasi gas N_2O yang masuk dari atas tabung. Hal ini dapat dibuktikan dengan mengecek luas area *peak* gas N_2O dengan GC. Meskipun demikian, konsentrasi gas N_2O yang diperoleh *sampling port* bawah belum sama seperti konsentrasi gas N_2O yang masuk dari atas tabung. Hal ini dapat dibuktikan dengan membandingkan luas area *peak* gas N_2O antara *sampling port* atas dan bawah dengan *Gas Chromatography* (GC).

Berdasarkan Gambar 4.6 pada uji blangko yang dilakukan setiap 10 menit, dapat dilihat bahwa luas area *peak* keluaran N_2O akan mendekati luas area *peak* masukan N_2O sekitar menit ke 60 atau 1 jam. Hal tersebut memperkuat hasil perhitungan EBRT yang dilakukan (nilai EBRT empiris = 57,83 menit ~ 58 menit). Dari hasil tersebut dapat diperkirakan bahwa kemungkinan pada menit ke-58 (menit yang tidak dilakukan pengambilan data) luas area *peak* N_2O *sampling port* bawah telah sama dengan nilai luas area *peak* N_2O *sampling port* atas (pada menit ke-58, gas N_2O telah mengalir ke dalam kolom hingga menuju *sampling port* bawah dan terdistribusi secara merata/homogen di dalam kolom biofilter).

4.3.3 Kalibrasi Gas N_2O

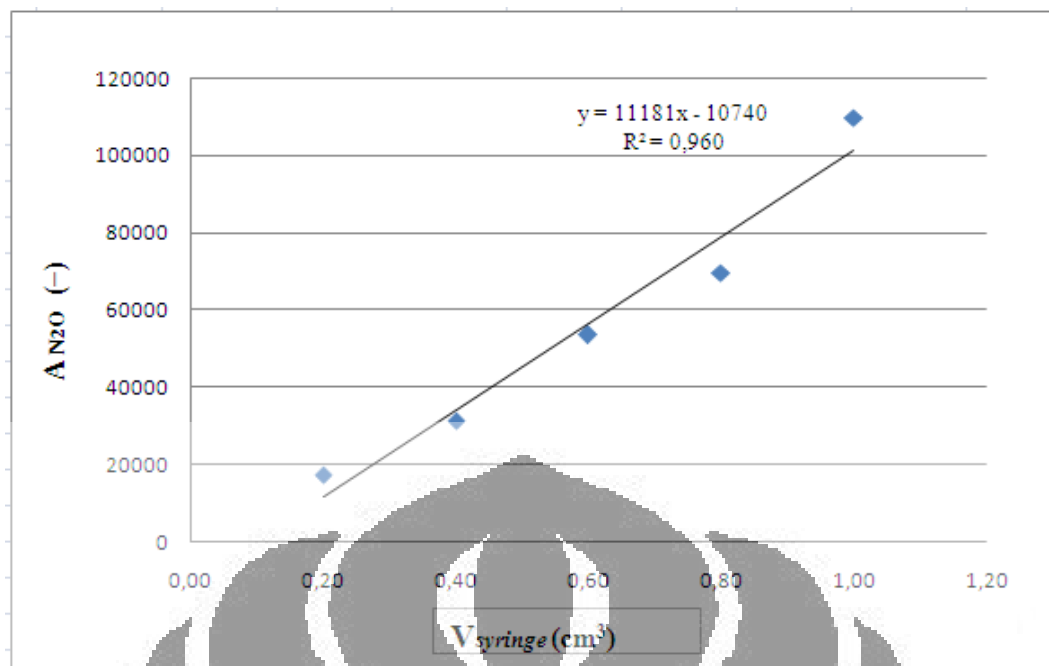
Untuk mengetahui letak *peak* N_2O , waktu retensi udara dan gas N_2O , serta volum dan konsentrasi aktual gas N_2O maka harus dilakukan prosedur kalibrasi gas N_2O . Konsentrasi gas sampel N_2O belum dapat diketahui sehingga untuk sementara gas N_2O dianggap 100% dengan menyesuaikannya terhadap luas *peak* yang tertera dari pembacaan GC. Cara pengukuran uji kalibrasi gas dengan mengalirkan gas N_2O ke dalam *gas sampling* yang kemudian ditutup dengan rapat. Lalu sampel diambil dari *gas sampling* dengan menggunakan *syringe*. *Syringe* kemudian diinjeksikan ke dalam *Gas Chromatography* (GC) yang akan mendeteksi keberadaan gas beserta konsentrasinya.

Hasil yang terbaca berupa *peak* dengan luas area tertentu. Contoh pembacaan hasil kromatograf pada sampel gas N_2O dengan volum 1.0 ml dapat dilihat pada Gambar 4.7 berikut ini.



Gambar 4.7 Sampel Grafik yang Terdeteksi pada (a) Gas N_2O (b) Udara Bebas oleh GC

Dari hasil perbandingan antara sampel udara dan sampel gas N_2O (gas N_2O yang digunakan merupakan gas N_2O dengan konsentrasi 15.000 ppm dalam udara) maka dapat diketahui letak *peak* N_2O yang terletak setelah udara dan uap air. Pada kalibrasi udara hanya menghasilkan dua *peak* (Gambar 4.7 b). Langkah selanjutnya adalah memvariasikan volum gas (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 ml) di dalam *syringe* untuk membuat plot antara volum gas N_2O terhadap luas *peak* area N_2O sehingga didapat garis linear.



Gambar 4. 8 Hasil Kalibrasi N₂O

Dari hasil kalibrasi di atas didapat persamaan linear $y = 11.181x - 10.740$ dimana dari persamaan tersebut dapat diketahui volum N₂O pada setiap penurunan luas area *peak*.

4.3.4 Uji Karakteristik Pelet Kompos Berbasis Kotoran Kambing

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

Uji komposisi unsur-unsur di dalam kompos dilakukan terhadap kompos berbasis kotoran kambing dan kompos berbasis kotoran sapi. Adapun unsur-unsur yang ingin diketahui antara lain adalah komposisi Nitrogen (N), P₂O₅, K₂O, Sulfur (S), dan karbon organik dari kedua jenis kompos tersebut. Uji komposisi unsur ini

dilakukan di Laboratorium Sucofindo, Cibitung, yang mana hasilnya telah ditampilkan dalam Tabel 4.1.

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

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

Sumber: Lab. Sucofindo, Cibitung, Bekasi.

Berdasarkan hasil uji komposisi unsur di atas, dapat diketahui bahwa seluruh komposisi unsur yang terdapat pada kompos berbasis kotoran kambing lebih tinggi apabila dibandingkan dengan kompos berbasis kotoran sapi. Demikian pula halnya dengan rasio C/N yang dihasilkan oleh kedua jenis kompos tersebut. Aspek paling penting dari hasil uji komposisi unsur untuk biofiltrasi adalah rasio C/N. Rasio C/N yang terlalu kecil menghambat pertumbuhan bakteri karena keterbatasan nitrogen sedangkan jika terlalu besar menyebabkan proses pengasaman yang menghambat pertumbuhan bakteri (Praswasti PDK Wulan et al., 2004). Organisme mendekomposisi bahan organik menggunakan karbon sebagai sebuah sumber energi dan nitrogen untuk membangun struktur sel. Organisme memerlukan lebih banyak karbon dibandingkan nitrogen. Jika karbon terlalu banyak, dekomposisi melambat ketika nitrogen habis dan beberapa organisme mati (<http://whatcom.wsu.edu/ag/compost/fundamentals>).

Mikroorganisme memerlukan sekitar 30 bagian karbon terhadap setiap bagian nitrogen untuk metabolisme, di mana sekitar 20 bagian dari karbon

tersebut dioksidasi menjadi CO_2 (ATP) dan 10 bagian lagi digunakan untuk mensintesis protoplasma untuk berkembang biak (<http://whatcom.wsu.edu/ag/compost/fundamentals>). Oleh karena itu, untuk medium filter yang memiliki rasio C/N kurang dari rasio C/N optimumnya (yaitu 30), dibutuhkan suatu nutrisi tambahan yang mengandung karbon untuk membantu mikroorganisme mengoptimalkan aktivitas biologisnya dalam mereduksi gas polutan .

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

4.4 Uji Kinerja Biofilter

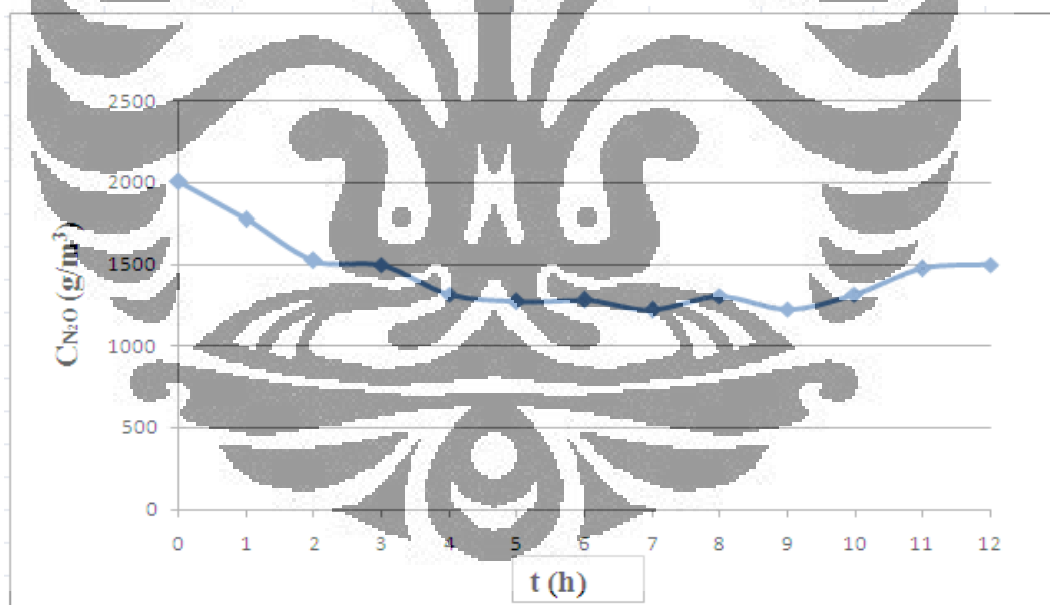
Uji ini bertujuan mengetahui kinerja biofilter dengan menganalisis parameter yaitu pertama, pengaruh variasi ukuran pelet kompos kambing terhadap efisiensi biofiltrasi gas N_2O . Kedua, pengaruh penambahan larutan sintetik terhadap efisiensi biofiltrasi gas N_2O . Pengujian kinerja biofilter dilakukan melalui eksperimen dengan menggunakan sistem aliran *batch* selama 12 jam. Uji kinerja biofilter dilakukan pada ketinggian 100 cm berdasarkan hasil penelitian sebelumnya Mei Linda (2010). Selain itu juga akan dilakukan uji sifat fisik dan kimia terhadap kompos yang digunakan dalam penelitian ini antara lain densitas, pH, *water content*, dan porositas. Pengambilan data pada uji kinerja biofilter dilakukan dengan memperhatikan prinsip replikasi.

4.4.1 Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N_2O

Dalam sub-bab ini akan dianalisis mengenai kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O . Hasil uji kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O ditunjukkan oleh adanya penurunan luas area di bawah *peak* untuk setiap waktu tertentu. Penurunan

luas area ini akan sebanding dengan penurunan konsentrasi (Harris, 1995). Dalam penelitian ini, pengamatan biofiltrasi dilakukan setiap jam selama 12 jam dengan menggunakan GC.

Uji kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O dapat dianalisis melalui hasil biofiltrasi pada pelet kompos ukuran 5x8 mm pada laju alir 88 cc/menit dengan kedalaman medium filter 100 cm. Adapun laju alir gas sebesar 88 cc/menit didasarkan pada laju alir optimum biofiltrasi (Utami dkk., 2009), sedangkan kedalaman medium filter ini didasarkan pada basis massa medium sebesar 1890 g untuk kedalaman 100 cm (Utami dkk., 2009). Alasan penggunaan massa medium filter sebagai basis dalam pengukuran kedalaman medium dalam percobaan yang akan dilakukan adalah untuk mengantisipasi penggunaan medium filter dengan jenis yang berbeda, dimana massa medium yang sama akan menghasilkan kedalaman medium yang berbeda. Berikut ini adalah grafik uji biofiltrasi medium pelet kompos 5x8 mm yang dilakukan pada panjang biofilter 100 cm dan laju alir gas N_2O 88 cc/menit:



Gambar 4.9 Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N_2O
(h = 100 cm; v = 88 cc/menit, medium pelet kompos 5x8 mm)

Dengan cara perhitungan yang dapat dilihat pada Lampiran, dapat dilihat pada Gambar 4.9 bahwa profil konsentrasi N_2O yang berkurang. Hal ini dapat terjadi karena adanya daya adsorpsi pelet kompos yang dilewati gas N_2O . Profil hubungan antara konsentrasi N_2O selama 12 jam yang turun secara perlahan-

lahan, walaupun agak fluktuatif karena terjadi kenaikan dan penurunan konsentrasi keluaran secara relatif dari biofilter. Konsentrasi N_2O keluaran mengalami penurunan dimulai pada jam ke 0 hingga jam 2 dan kemudian antara jam ke-2 sampai jam ke-5 terjadi kenaikan dan penurunan konsentrasi (kenaikan konsentrasi terjadi pada jam ke-3 dan jam ke-5), walaupun secara menyeluruh antara jam ke-2 dan ke-5 terjadi penurunan konsentrasi N_2O .

Dari grafik juga terlihat bahwa mulai jam ke-5 sampai jam ke-9 terjadi penurunan konsentrasi N_2O secara gradual melandai (penurunan antara jam ke-5 sampai jam ke-6 lebih tajam dari pada penurunan antara jam ke-6 sampai jam ke-9) dan kemudian mulai jam ke-9 sampai jam ke-12 terjadi kenaikan konsentrasi N_2O dari jam sebelumnya pada rentang waktu ini. Kenaikan ataupun penurunan konsentrasi N_2O dipengaruhi oleh aktivitas adsorpsi dan biodegradasi pada biofilm medium filter. Gas N_2O pertama kali melewati pelet kompos diadsorpsi sesuai kemampuan pelet kompos dalam mereduksi N_2O , sedangkan peningkatan efisiensi reduksi pada rentang waktu berikutnya disebabkan adanya proses degradasi N_2O oleh mikroba. Kenaikan konsentrasi N_2O secara relatif mulai jam ke-9 sampai jam ke-12 terjadi dikarenakan pada rentang waktu tersebut diperkirakan juga terjadi penenuhan karena telah melewati kesetimbangan adsorpsi. Hal ini karena 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.

Pada percobaan ini, penurunan konsentrasi N_2O yang terjadi mulai awal percobaan terjadi karena adanya proses adsorpsi yang dilakukan medium pelet kompos. Konsentrasi N_2O akan menurun karena teradsorpsi oleh medium biofilter (pelet kompos) pada setiap interval waktu tertentu sebelum medium biofilter mengalami penenuhan. Ketika medium filter pelet kompos dialiri kontaminan, terjadi kontak antara fasa gas sebagai kontaminan, fasa cair dan *biofilm* sebagai permukaan medium filter, dan fasa padat sebagai partikel padatan medium filter. Area permukaan spesifik (*biofilm*) pada medium pelet berpengaruh terhadap kinerja biofiltrasi, dimana area permukaan yang lebih tinggi itu lebih baik untuk penempatan mikroorganisme dan pertukaran/difusi antara fasa gas dan lapisan

biofilm, dengan begitu mendorong aktivitas degradasi oleh mikroba (Kent et al. , 2000).

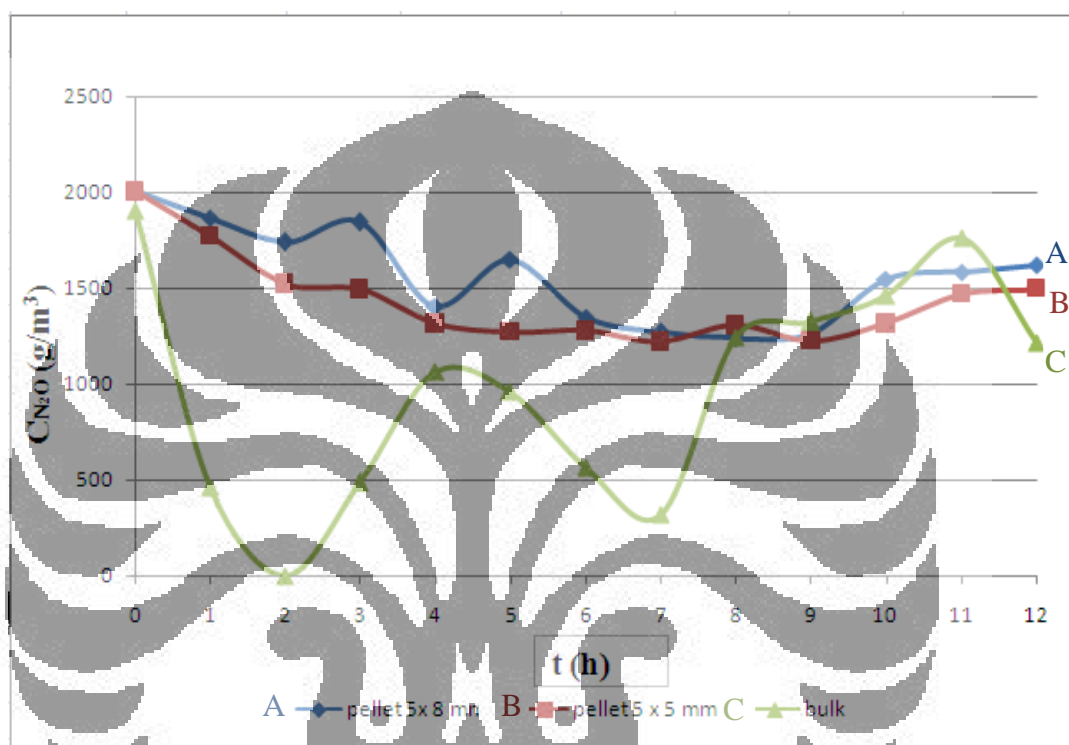
Reduksi polutan (*contaminant removal*) merupakan proses yang multi-step di mana dalam proses ini terjadi penyekatan (*partitioning*) ke fasa cair/ liquid, transport ke sel bakteri pada biofilm, yang diikuti dengan transpor melalui membran sel untuk terjadinya metabolisme (Edward D. Schroeder, 2002). Transformasi kontaminan dari fasa gas ke air dan padat pada partikel kompos adalah langkah dasar dari perlakuan degradasi kontaminan dengan adsorpsi. Molekul kontaminan dengan mudah terlarut di fasa cair bukan hanya akan didegradasi oleh mikroba tetapi juga diadsorpsi oleh permukaan medium filter pada lapisan *biofilm*. Oleh karena itu, konsentrasi suatu adsorbat akan menurun karena diserap oleh adsorben hingga pada waktu tertentu sebelum mengalami kesetimbangan adsorpsi. Tingkat biodegradasi secara jelas berhubungan dengan aktivitas mikroorganisme yang sangat bergantung pada permukaan yang tersedia untuk pertukaran gas pada *biofilm* (R. Ravi et. al., 2009).

4.4.2 Pengaruh Ukuran Pelet Terhadap Reduksi N₂O

Percobaan variasi ukuran pelet kompos terhadap reduksi N₂O bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh ukuran pelet kompos terhadap kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O. Karakteristik media filter antara lain luas permukaan spesifik, densitas, porositas, kandungan *moisture*, dan ketersediaan nutrisi merupakan karakteristik penting dari (Janni et al., 2001; Bohn, 1996). Adu dan Otten (1996) telah melaporkan bahwa ukuran partikel merupakan parameter yang lebih berpengaruh terhadap kinerja biofilter dibandingkan laju alir gas. Pada percobaan ini ukuran pelet kompos yang divariasikan ialah 5x5 mm dan 5x8 mm. Ukuran ini sesuai dengan yang diusulkan oleh Eitner dan Gethke (1987) serta Leson dan Winer (1991) bahwa ukuran minimal pelet sebesar 4 mm untuk meminimalkan *pressure drop* melalui *bed*. Dalam hal ini material filter harus memenuhi beberapa desain spesifikasi yang menyediakan lingkungan yang cocok untuk pertumbuhan mikrobial dan untuk aliran gas melalui media filter.

Adapun ketinggian medium filter yang digunakan adalah 100 cm serta laju alir gas yang digunakan ialah 88 cc/menit. Penggunaan ketinggian ini berdasarkan

ketinggian optimum dalam mereduksi N_2O pada penelitian sebelumnya di Departemen Teknik Kimia, UI (Mei Linda, 2010), sebagaimana ketinggian maka penggunaan laju alir ini juga berdasarkan laju alir optimum dalam mereduksi N_2O pada penelitian sebelumnya di Departemen Teknik Kimia, UI (Cintya, 2009). Hasil dari uji kemampuan biofilter dalam mereduksi N_2O terhadap variasi ukuran pelet dilihat pada Gambar 4.10 berikut.



Gambar 4.10 Profil Variasi Ukuran Pelet Terhadap Reduksi N_2O
($h = 100$ cm, $v = 88$ cc/menit, medium pelet kompos kering)

Dalam penelitian ini, pengamatan biofiltrasi dilakukan setiap jam selama 12 jam dengan menggunakan GC. Fenomena yang terjadi pada biofiltrasi ini adalah adanya daya adsorpsi pelet kompos dalam mereduksi N_2O . Grafik ini menunjukkan bahwa semakin kecil ukuran partikel medium filter (ukuran pelet lebih kecil) maka konsentrasi gas N_2O lebih rendah. Grafik ini juga menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak yang terjadi antara kompos dan gas N_2O , maka konsentrasi N_2O cenderung semakin rendah. (walaupun agak fluktuatif naik turun, untuk medium filter bentuk pelet terutama).

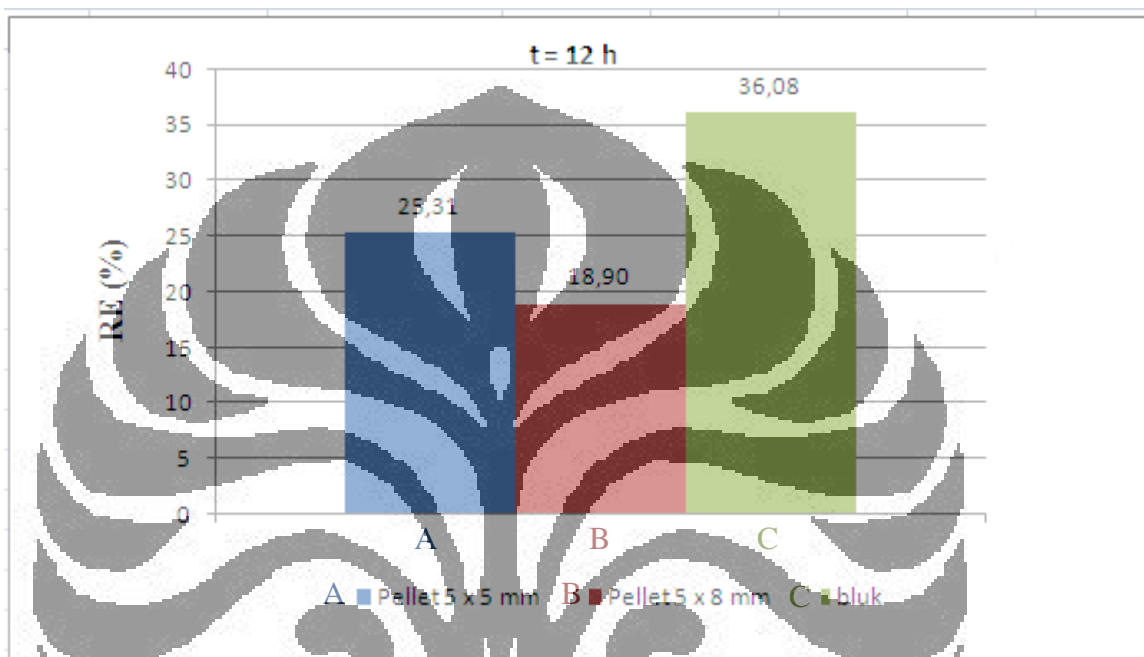
Pengaruh ukuran *bed pelet* pun merupakan karakteristik mendasar. Jika terlalu kecil ukurannya akan menghasilkan luas permukaan spesifik besar, cocok

untuk pertukaran gas (*biolayer*), akan tetapi ukuran terlalu kecil akan menghasilkan resistansi/tahanan terhadap aliran gas. Akan tetapi jika ukuran pelet terlalu besar maka itu baik untuk aliran gas akan tetapi akan mengurangi jumlah *potential sites* untuk aktivitas mikrobial (Marie-Caroline et al., 2002). Dengan mengkombinasikan aksi biologis dari mikroorganisme dengan kapasitas adsorpsi medium filter, maka akan kinerja penghilangan polutan dapat ditingkatkan (Janni et al., 2001; Devinny, Deshusses, & Webster, 1999).

Gambar 4.10 menunjukkan profil reduksi gas N_2O , dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa terjadi penurunan konsentrasi yang lebih gradual sampai $t = 2$ jam. Pada $t = 0-5$ jam merupakan daerah dimana pada keadaan ini aliran gas polutan melewati medium masih belum stabil terutama untuk ukuran pelet 5×8 mm, dari gambar dapat dilihat bahwa penurunan konsentrasi N_2O untuk pelet kompos ukuran 5×5 mm lebih stabil dibandingkan pada pelet kompos ukuran 5×8 mm. Hal ini dikarenakan pada laju alir yang sama dengan diameter yang berbeda maka profil aliran secara mikroskopis juga berbeda pada biofilm. Ketika kontaminan telah mencapai daerah *biofilm* pada medium filter yang digunakan, maka akan terjadi proses degradasi dalam mereduksi konsentrasi kontaminan. Proses degradasi tersebut berada dalam daerah laminar (Devinny et al., 1999). Pada diameter yang lebih besar ini (pelet ukuran 5×8 mm) dimana proses lebih tidak stabil, kemungkinan terjadinya aliran yang lebih turbulen lebih sering sehingga memengaruhi daerah laminar *biofilm* (maka) selain itu juga karena pengaruh luas permukaan spesifik pelet kompos. Pada kompos bentuk *bulk* sendiri, profil reduksi kontaminan lebih tinggi karena luas area permukaan biofilm yang lebih luas untuk mendukung degradasi dan adsorpsi kontaminan. Namun ketidakstabilan yang lebih tinggi dari profil reduksi kontaminan pada medium filter bentuk pelet yang ditunjukkan selama proses, diperkirakan karena adanya turbulensi lokal pada sekeliling *biofilm* sehingga menginhibisi daerah laminar *biofilm* dimana terjadi proses degradasi dan adsorpsi. Kemungkinan lain dapat disebabkan *overgrowth* mikroorganisme yang terjadi selama proses biofilter ini.

Kemudian mulai jam ke-5, biofiltrasi telah mengalami fase yang lebih stabil. Dari Gambar 4.10 terlihat bahwa antara $t = 5$ jam sampai $t = 9$ jam, penurunan konsentrasi N_2O lebih stabil. Dan kemudian dari jam ke-9 sampai jam

ke-12 terjadi kenaikan konsentrasi N_2O secara relatif dari jam-jam sebelumnya pada rentang waktu ini. Konsentrasi N_2O akan menurun karena teradsorp oleh medium biofilter (pelet kompos) pada setiap interval waktu tertentu sebelum medium biofilter mengalami penjenruhan. Pada Gambar 4.11 terlihat bahwa semakin kecil ukuran pelet maka persentase efisiensi reduksi N_2O cenderung semakin besar.



Gambar 4. 11 Perbandingan Efisiensi Reduksi pada Uji Variasi Ukuran Pelet (h = 100 cm, , medium pelet/kompos kering, t = 12 jam)

Pada Gambar 4.11 dapat dilihat bahwa efisiensi reduksi tertinggi untuk medium filter bentuk pelet terdapat pada ukuran pelet 5x5 mm dimana efisiensi reduksi mencapai 25,31 %, walaupun kompos bulk memiliki efisiensi reduksi yang lebih tinggi yaitu 36,08 %, Pada *biofilm* pelet kompos terjadi proses adsorpsi dan degradasi pada *biolayer*. Dikaitkan antara kinerja biofilter yang meningkat dengan menurunnya ukuran pelet (Delhomenie et al., 2001) maka data ini menggambarkan fakta bahwa pada kondisi eksperimen, luas area permukaan spesifik merupakan batas substansial terhadap proses biodegradasi (kinerja penghilangan biofilter meningkat saat luas permukaan spesifik meningkat (atau ukuran pelet berkurang). Tingkat biodegradasi (RE/*Removal Efficiency*) secara jelas berhubungan aktivitas mikroorganismenya yang bergantung pada permukaan

yang tersedia untuk pertukaran antara biomassa dan gas. Hal ini meyakinkan kita adanya hubungan karakteristik pelet dengan mekanisme transfer yang terjadi.

Pada biofilter, sintesis biomassa memudahkan terjadinya akumulasi pertumbuhan massa mikroba dalam waktu yang lama, dimana hal ini berhubungan dengan peningkatan resistensi aliran pada medium filter (Kinney et al. 1996; Mohseni et al. 1998). Akumulasi biomassa akan menyebabkan terjadinya perubahan karakteristik medium seperti reduksi ruang kosong antar partikel, dan kompaksi medium filter. Kondisi ini dapat menyebabkan terjadinya *channeling* dan peningkatan *pressure drop*. Tabel 4.2 di bawah ini menunjukkan *pressure drop* terukur pada kolom biofilter yang terjadi selama penelitian variasi ukuran pelet terhadap laju reduksi gas N₂O.

Tabel 4.2 *Pressure drop* dan sifat fisis terukur pada kolom biofilter untuk variasi ukuran pelet

Sifat fisis		Medium Filter (h = 100 cm)			
		(5 x 5) mm		(5 x 8) mm	
		Awal	Akhir	Awal	Akhir
Bioreaktor	Suhu kolom (°C)	28,8	27,9	27,6	27,8
	Humiditas kolom (%)	69	69	73	69
	<i>Pressure Drop</i> (mH ₂ O)	0,02	0,12	0,02	0,09
	<i>Total Pressure Drop</i> (mH ₂ O)	0,10		0,07	
Pelet Kompos	pH	7,11	6,97	6,98	6,96
	Densitas (g/mL)	0,698	0,6308	0,6154	0,5826
	Porositas dalam kolom (%)	53,87%	53,62%	61,10%	59,42%
	<i>Water content</i>	20,74%	15,65%	22,72%	16,06%
	Tinggi aktual (cm)	84,5		89	

Sifat-sifat fisis seperti ditunjukkan pada Tabel 4.2 diatas merupakan parameter-parameter penting yang memengaruhi kinerja biofilter. Parameter-parameter tersebut baik secara langsung ataupun tidak langsung akan memengaruhi *pressure drop* pada biofilter. Pada Tabel 4.2 terlihat bahwa ukuran pelet 5x8 mm dalam biofilter mempunyai *pressure drop* yang lebih kecil dibandingkan dengan ukuran pelet 5x5 mm. Hal ini dapat dianalisis bahwa dorongan terhadap reaksi biologis akan mendorong ke arah formasi, dan akumulasi biomassa (bioproduk) pada permukaan pelet (Morgan-Sagastume, Sleep, & Allen, 2001) di mana berpengaruh terhadap peningkatan *pressure drop*.

Lebih lanjut, selama keseluruhan periode, ukuran pelet yang lebih kecil (atau area permukaan spesifik lebih tinggi), nilai *pressure drop* lebih tinggi. Titik ini sejalan dengan observasi bahwa area permukaan spesifik yang lebih tinggi itu baik untuk aktivitas mikrobial dengan cara menyediakan banyak titik lokasi pertukaran pada pelet. Lokasi yang tersedia ini juga akan meningkatkan pembentukan biomassa pada medium dan berperan pada penyumbatan *bed filter*.

Allen dan Yang (1991) telah mengamati partikel kompos yang berukuran kurang dari 1mm mendorong *pressure drop* yang signifikan, dan Kent et al. (2000) melaporkan bahwa penyumbatan *bed* terjadi lebih dengan cepat pada pelet Lytag yang lebih kecil (2– 4mm), sementara Leson (1998) mengobservasi bahwa partikel yang kurang dari 3 mm, cenderung mengalami penyumbatan (*bed clogging*). Untuk mengurangi *pressure drop*, Ottengraf, Meesters, Van den Oever, dan Rezema (1986) mengusulkan polistirena (3–5mm) dapat ditambahkan pada *bed*, dan Williams serta Miller (1992) menyebutkan *filter bed* haruslah berisi paling tidak 60% partikel berukuran lebih besar dari 4mm. Karakteristik *filter bed*, seperti susunan partikel dalam bioreaktor, area yang tersedia untuk pertukaran gas/mikroorganisme, aliran gas, dan lain-lain., secara langsung berhubungan dengan parameter granulometrik pelet (ukuran, densitas, dan porositas), tetapi juga membangun fenomena perpindahan dalam bed (konveksi, dispersi, difusi).

4.4.3 Pengaruh Kandungan Larutan Nutrisi Medium Pelet Kompos Terhadap Reduksi N₂O

Percobaan variasi kandungan larutan nutrisi pada pelet kompos terhadap reduksi N₂O bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh kandungan larutan nutrisi terhadap kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O. Pada percobaan ini kandungan larutan nutrisi divariasikan terhadap persen berat pelet kompos ukuran 5x5 mm. Variasi kandungan larutan nutrisi yang digunakan pada penelitian ini adalah 20%, 40%, 60%, dan 70% (w/w) berat pelet kompos.

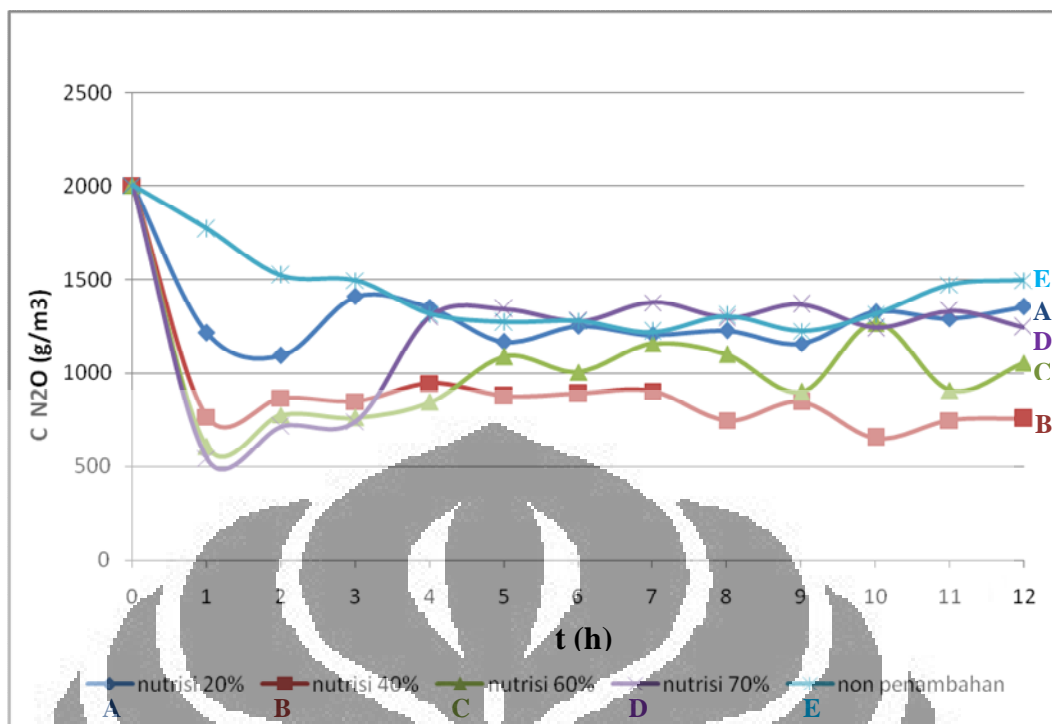
Percobaan ini dilakukan pada pelet kompos ukuran 5x5 mm, ketinggian medium filter 100 cm, laju alir 88 cc/menit dengan waktu inkubasi 26,5 jam, pemilihan kondisi ini didasarkan pada ukuran pelet yang optimum (penelitian ini), ketinggian optimum biofiltrasi (Mei, 2010) dan laju alir optimum biofiltrasi

(utami et. al., 2009), serta waktu inkubasi didasarkan oleh penelitian yang dilakukan Mei Linda, 2010. Dalam hal ini, nutrisi yang diberikan terdiri dari larutan nutrisi sintetik dan larutan *trace element*. Komposisi nutrisi yang diberikan terdiri dari K_2HPO_4 , KH_2PO_4 , NH_4Cl , $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, CH_3COONa . 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 merupakan senyawa yang telah digunakan sebelumnya untuk menumbuhkan bakteri nitrifikasi aerobik (Yang, et.al.,2007). 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.

Pengaruh dari kandungan larutan nutrisi tersebut dilihat dari penurunan /efisiensi reduksi N_2O yang dihasilkan. Medium filter pelet kompos ditambahkan nutrisi yang diharapkan dapat meningkatkan kinerja mikroba menjadi lebih baik dalam mereduksi N_2O . Mikroba memerlukan makanan dengan nutrisi seimbang untuk metabolisme dirinya dan juga mendukung dalam bereproduksi. 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).

Penambahan nutrisi dipertimbangkan sebagai metode efektif yang dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja biofilter dengan cara menyediakan nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan mikroba yang mampu mendegradasi polutan (Kiares et al. 1996; Mallakin & Ward 1996; Smith et al. 1996; Wu et al. 1999). Akan tetapi, suplai nutrisi yang berlebih dapat menyebabkan pertumbuhan biomassa yang lebih juga (*over growth*) yang dapat menyebabkan *clogging* pada biofilter yang menghasilkan penurunan efisiensi reduksi polutan (Abum aizar et al. 1998; Gribbins & Loehr 1998).

Hasil dari uji kemampuan biofilter dalam mereduksi N_2O terhadap variasi kandungan larutan nutrisi di dalam medium filter pelet kompos dapat dilihat pada Gambar 4.12 berikut.



Gambar 4. 12 Profil Variasi Kandungan Larutan Nutrisi Terhadap Reduksi N_2O
($h = 100$ cm, $v = 88$ cc/menit, medium pelet ukuran 5×5 mm)

Pada Gambar 4.12 menunjukkan profil penambahan nutrisi pada pelet kompos terhadap laju penurunan konsentrasi/efisiensi reduksi N_2O , di mana terjadi penurunan yang gradual pada saat $t = 1$ jam. Pada $t = 1-4$ jam merupakan daerah dimana pada keadaan ini aliran gas polutan melewati medium masih belum stabil. Dari Gambar 4.11 di atas dapat ditunjukkan bahwa penurunan konsentrasi N_2O memiliki profil yang berturut-turut turun, naik, turun, dan kemudian mendekati konstan. Secara umum, perbedaan penambahan nutrisi selain meningkatkan kandungan air juga meningkatkan performa biofilter yang berhubungan dengan kinerja mikroba dalam mendegradasi N_2O . Pada kompos yang ditambahkan nutrisi memiliki laju reduksi/efisiensi reduksi N_2O yang lebih tinggi.

Pada jam ke 1 hingga jam ke-3, pada pelet kompos dengan persentase kandungan nutrisi lebih besar maka efisiensi reduksi/penurunan konsentrasi N_2O lebih besar. Hal karena pada awal-awal waktu biofiltrasi, dengan semakin besarnya kandungan nutrisi maka akan mendorong lebih banyak terbentuk biomassa yang mendegrasi N_2O sehingga penurunan konsentrasi N_2O lebih tinggi.

Populasi mikroba tersebut akan tumbuh dari energi (ATP) yang berasal dari transformasi polutan udara yang mengalir pada biofilter dengan didukung oleh ketersediaan nutrisi yang cukup (Shuler & Kragi, 1992).

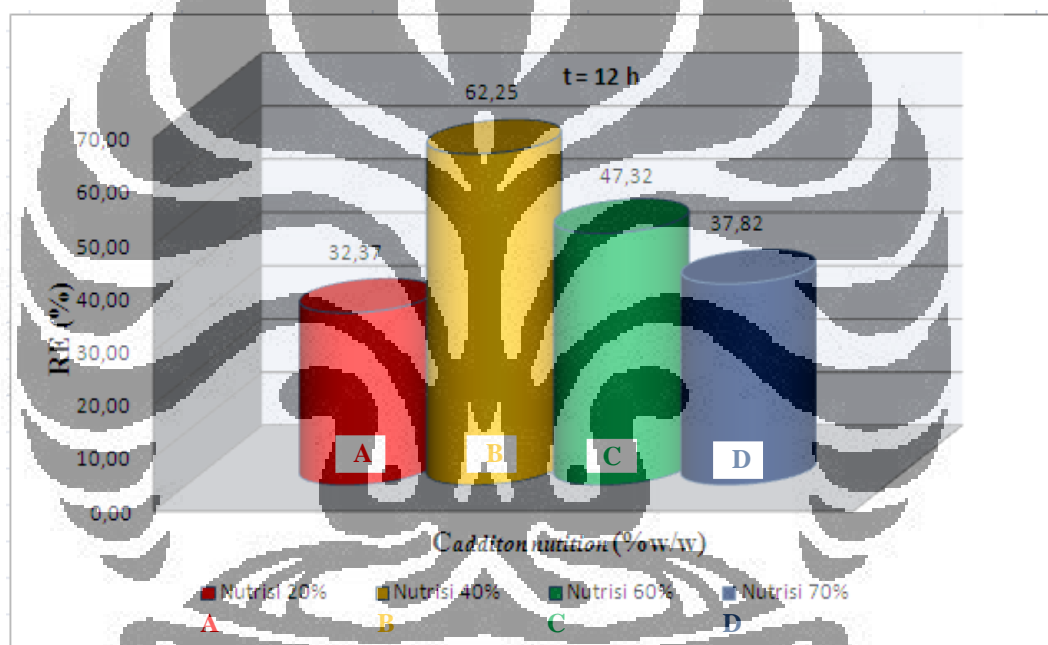
Pada jam ke-4, pelet kompos dengan kandungan nutrisi 40% dan 60% memiliki /penurunan konsentrasi/efisiensi reduksi gas N_2O yang lebih baik dari pada pelet kompos dengan kandungan nutrisi 20% dan 70%. Fenomena yang terjadi pada jam ke-4 ini dapat dimengerti bahwa adanya dorongan reaksi biologis karena pengaruh nutrisi juga mendorong ke arah formasi, dan akumulasi biomassa (bioproduk) pada permukaan pelet, dan kelembaban yang lebih tinggi (Morgan-Sagastume, Sleep, & Allen, 2001). Kondisi ini dapat mengganggu mekanisme tranfer pada biofilm. *Biofilm* haruslah menyediakan nutrisi penting untuk aktivitas biologis, menjaga kelembaban untuk pertumbuhan bakteri. Pada daerah biofilm, mikroba akan 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.

Mulai jam ke-5 sampai jam ke-12, efisiensi reduksi/laju penurunan konsentrasi gas N_2O cenderung konstan/stabil. Efisiensi reduksi pada biofilter terutama terkontrol oleh laju transfer massa substrat di biofilm dan pada *boundary layer* fasa gas, di mana dipengaruhi oleh waktu retensi dalam biofilter. Dalam rentang waktu ini, pelet kompos dengan kandungan nutrisi 40% memiliki profil efisiensi reduksi/ laju penurunan konsentrasi gas N_2O yang paling besar dibandingkan pelet kompos tanpa nutrisi tambahan ataupun dengan persentase penambahan kandungan nutrisi lainnya (20%, 60%, dan 70%). Dari Gambar 4.11, dapat dilihat profil laju penurunan konsentrasi gas N_2O terbesar pada pelet kompos 40%, kemudian diikuti oleh pelet kompos dengan kandungan nutrisi 60% yang memiliki profil efisiensi reduksi yang lebih rendah.

Dapat dilihat juga bahwa pada $t = 5$ jam sampai $t = 12$ jam, kecenderungan profil penurunan konsentrasi N_2O pada pelet kompos dengan kandungan nutrisi 20% mendekati sama dengan pelet kompos dengan kandungan nutrisi 70%. Keadaan ini dapat dimengerti bahwa performa biofiltrasi akan bergantung pada ketersediaan nutrisi yang cukup. Laju biodegradasi akan lebih tinggi pada penambahan nutrien yang lebih tinggi, terutama pada awal-awal biofiltrasi.

Namun pada penambahan nutrisi yang lebih tinggi nantinya berakibat pada dihasilkannya eksres pertumbuhan biomassa dan *pressure drop* yang lebih tinggi. Pada penambahan nutrisi yang terlalu rendah, *pressure drop* akan lebih rendah dan tidak banyak akumulasi biomassa yang menyebabkan *pressure drop* yang tinggi. Namun hal ini berarti ketersediaan nutrisi kurang yang pada *biofilm* sehingga pertumbuhan mikrobial tidak optimal ataupun kelembaban juga berkurang sehingga laju biodegradasi oleh bakteri juga menurun.

Berikut ini adalah gambar perbandingan efisiensi reduksi N_2O (% RE) pada $t = 12$ jam. Dari Gambar 4.13 dibawah ini dapat dilihat dengan profil efisiensi reduksi pada variasi penambahan nutrisi.



Gambar 4. 13 Perbandingan Efisiensi Reduksi pada Uji Variasi Kandungan Larutan Nutrisi ($h = 100$ cm, medium pelet ukuran 5×5 mm, $t = 12$ jam)

Gambar 4.13 diatas menunjukkan bahwa efisiensi reduksi terbesar adalah pada penambahan nutrisi sebesar 40% di mana efisiensi reduksi N_2O yang dihasilkan sebesar 62,25%. Peningkatan efisiensi reduksi N_2O karena penambahan nutrisi yang memiliki mineral-mineral yang dibutuhkan mikroba khususnya mikroba yang berkaitan langsung dengan degradasi N_2O . Dalam hal ini, terlihat bahwa melalui penambahan nutrisi terhadap medium filter pelet kompos akan cenderung meningkatkan efisiensi reduksi N_2O , namun jika

penambahan nutrisi terlalu banyak maka akan mengurangi efisiensi biofiltrasi N_2O .

Akumulasi biomassa yang terlokalisasi pada biofilter merupakan faktor kunci yang meningkatkan *pressure drop*, yang mana disebabkan oleh *clogging bed* lokal karena pertumbuhan biomassa itu sendiri. *Pressure drop* tidak bernilai linear dengan jumlah akumulasi biomassa dan jumlah polutan yang dikonsumsi (Fernando et. al., 2001). Tabel 4.3 di bawah ini menunjukkan *pressure drop* terukur pada kolom biofilter yang terjadi selama penelitian variasi penambahan nutrisi terhadap efisiensi reduksi gas N_2O .

Tabel 4.3 *Pressure drop* terukur pada kolom biofilter selama penelitian variasi penambahan kandungan nutrisi pada pelet kompos ukuran 5x5 mm

Kandungan Nutrisi	<i>Pressure Drop</i> Awal (t=0, mH ₂ O)	<i>Pressure Drop</i> Akhir (t=12, mH ₂ O)	<i>Pressure Drop</i> Total (mH ₂ O)
20%	0,09	0,16	0,07
40%	0,06	0,14	0,08
60%	0,12	0,46	0,34
70%	0,14	0,94	0,80

Beberapa penelitian menyebutkan bahwa terdapat hubungan antara peningkatan *pressure drop* dengan pertumbuhan biofilm dan *clogging* oleh biomassa (Utkin et al. 1989; Hodge et al. 1992). Secara umum, peningkatan *pressure drop* sebagai hasil pengembangan biomass dalam biofilter yang dapat diterangkan dengan adanya penurunan ruang kosong antar partikel atau porositas efektif atau keduanya dan dengan degradasi mikrobial pada medium. (Sorial et al. 1997; Okkerse et al. 1999). *Pressure drop* yang tinggi tidak diharapkan dalam operasi biofilter karena biaya operasional yang meningkat (Oscar Kibazohi et. al., 2003).

Pada Tabel 4.3 di atas, terlihat bahwa *pressure drop* yang terjadi pada setiap penambahan kandungan nutrisi tidak terlalu signifikan, namun *pressure drop* pada kandungan nutrisi 60% dan 70% cukup naik signifikan dibandingkan dengan *pressure drop* pada kandungan nutrisi 20% dan 40%. *Pressure drop* yang

meningkat sampai 0,80 mH₂O disebabkan adanya *clogging*. *Clogging* berakibat tidak hanya terhadap *pressure drop* yang meningkat, namun juga *channeling* aliran dan peningkatan *head loss*. Dari Tabel 4.3 terlihat, bahwa *pressure drop* tertinggi terjadi pada pelet kompos ukuran 5x5 mm dengan kandungan nutrisi tertinggi yaitu 70%, pada kandungan nutrisi optimum (40%) nilai *pressure drop*nya tidak terlalu besar dan hanya selisih 0,01 mH₂O dengan pelet kompos ukuran 5x5 mm dengan kandungan nutrisi terendah yaitu 20%.

Konsumsi nutrisi yang cepat juga akan mengakibatkan pada laju reduksi polutan yang menurun dan rekovery yang lebih cepat ketika nutrisi ditambahkan (Morgenroth et al. 1996; Eweis 2000). Meningkatnya *pressure drop* dapat terjadi jika adanya eksesi/akumulasi pada media. Laju lokal yang lebih tinggi, waktu kontak yang berkurang, pengeringan lokal, dan tekanan kontaminan pada bed yang meningkat mengakibatkan *channeling*. (Edward D. Schroeder, 2002).

Untuk mencegah peningkatan *pressure drop* yang diakibatkan dari eksesi pertumbuhan biomassa, penambahan nutrisi yang lebih rendah dapat dipertahankan. Hal ini dapat dimengerti bahwa ini merupakan metode untuk mereduksi eksesi biomassa dari biofilter, biofilter dapat dioperasikan pada penambahan nutrisi yang tinggi namun secara periodik saja untuk mengurangi eksesi biomassa. Beberapa operasi akan meningkatkan biofiltrasi secara keseluruhan dan mengurangi volume biofilter pada operasi jangka panjang (*long-term basis*) (Oscar Kibazohi et. al., 2003).

4.4.4 Sifat Medium Pelet Kompos Sebelum dan Sesudah Biofiltrasi

Sifat fisik dan kimia pelet kompos yang diteliti antara lain meliputi densitas, porositas, pH, dan *water content*. Uji sifat ini dilakukan sebelum dan setelah biofiltrasi dilakukan pada medium filter. Tabel 4.4 berikut menunjukkan karakteristik dari medium kompos sebelum dan setelah biofiltrasi selama 12 jam.

Tabel 4.4 Sifat Medium Pelet Kompos Sebelum dan Sesudah Biofiltrasi

Data	Sebelum Biofiltrasi				Setelah Biofiltrasi			
	Densitas (g/mL)	Porositas	pH	Water Content	Densitas (g/mL)	Porositas	pH	Water Content
Kompos Awal								
• 5x8 mm	0,6154	61,10%	6,98	22,72%	0,5826	59,42%	6,96	16,06%
• 5x5 mm	0,698	53,87%	7,11	20,74%	0,6308	53,62%	6,97	15,65%
Kompos Variasi Kandungan Nutrisi	0,7626	69,00%	6,78	39,72%	0,7124	67,02%	6,72	39,07%

Secara umum, mikroorganisme memiliki rentang pH optimum tertentu untuk dapat melakukan aktivitasnya (Shareefdeen dan Singh, 2005). Banyak bakteri memiliki pH optimum antara 6 dan 8 (Leson and Winer, 1991; Ottengraf, 1986). Aktivitas mikroba dalam suatu populasi akan menurun jika pH berada di bawah 4 atau di atas 8. Sifat-sifat fisis seperti ditunjukkan pada Tabel 4.4 diatas merupakan parameter-parameter penting yang memengaruhi kinerja biofilter. Parameter-parameter tersebut baik secara langsung ataupun tidak langsung akan memengaruhi *pressure drop* pada biofilter.

Pada Tabel 4.4 ditunjukkan bahwa pelet kompos berbasis kotoran kambing yang digunakan pada biofiltrasi ini, memiliki pH awal yang mendekati 7. Nilai pH tersebut ternyata masih mendekati pH 7 yang masuk ke dalam kisaran pH yang disukai oleh mikroorganisme. Dari tabel di atas dapat dilihat bahwa pH setelah biofiltrasi mengalami penurunan. Penurunan pH tersebut dapat disebabkan oleh mikroorganisme dalam metabolismenya menghasilkan suatu senyawa asam yang dapat menyebabkan penurunan pH pada medium filter. Namun penurunan pH dalam medium filter tidaklah signifikan sehingga tidak mutlak diperlukan penambahan kontrol pH atau *buffer*. Meskipun demikian, sedikit pengasaman dari medium tidak berpengaruh pada efisiensi reduksi yang dihasilkan (Dumont et al, 2008).

Adanya penurunan *water content* pada medium filter disebabkan oleh adanya absorpsi *moisture* dari aliran gas yang masuk ke dalam kolom biofilter.

Namun demikian, seperti dilihat pada tabel diatas, hanya sedikit perbedaan yang terjadi antara *water content* awal dan *water content* akhir selama biofiltrasi. Dari Tabel 4.4 dapat dilihat bahwa porositas kompos setelah biofiltrasi akan berkurang dibandingkan kompos awal karena adanya kompaksi medium akibat adanya aliran gas polutan di dalam medium filter. Secara umum, adanya porositas dan luas permukaan yang besar dapat mendukung terjadinya adsorpsi kontaminan maupun untuk pertumbuhan mikroba.

4.4.5 Hasil Uji Perkembangan Mikroba pada Pelet Kompos

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

4.4.5.1 Metode TPC (*Total Plate Count*)

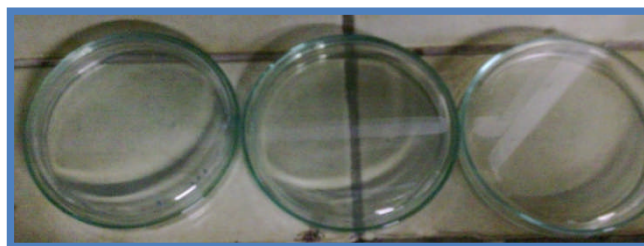
TPC (*Total Plate Count*) merupakan salah satu metode analisis yang bertujuan untuk mengetahui jumlah koloni mikroba pada suatu sampel. Dalam TPC, perhitungan bakteri dilakukan dengan menggunakan asumsi bahwa satu koloni bakteri dihasilkan oleh satu sel bakteri. TPC pada penelitian ini menggunakan nutrisi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

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

koagulasi protein sel-sel mikroba yang menyebabkan sel hancur. Sementara itu, metode pemanasan dengan metode panas kering memiliki suhu efektif 170°C selama 2 jam. Alat yang digunakan pada metode ini adalah oven. Metode ini biasanya digunakan untuk mensterilisasi alat-alat laboratorium.

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

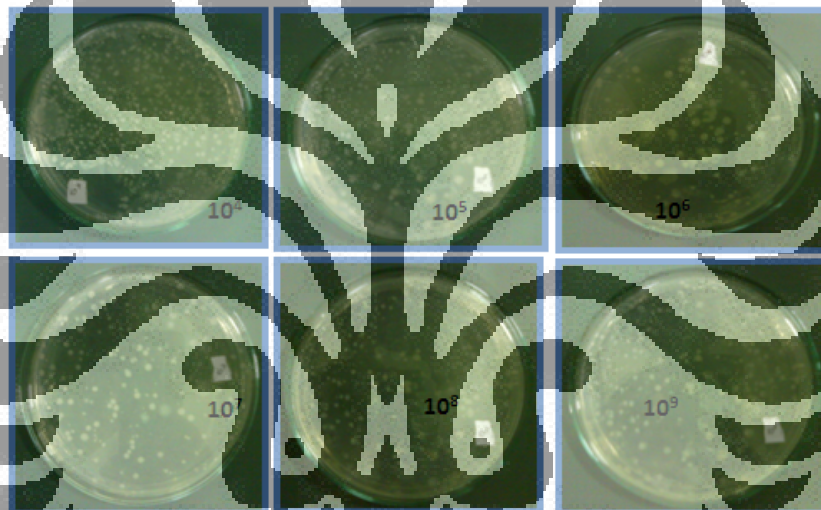
Selain sterilisasi alat dan bahan serta teknik transfer aseptis, metode TPC juga meliputi dilusi/pengenceran sampel, pembuatan nutrisi agar sebagai medium pengembangbiakan mikroorganisme, serta inkubasi sampel TPC dengan suhu $34-35^{\circ}\text{C}$ selama 1 – 2 hari. Inkubasi dilakukan dengan tujuan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



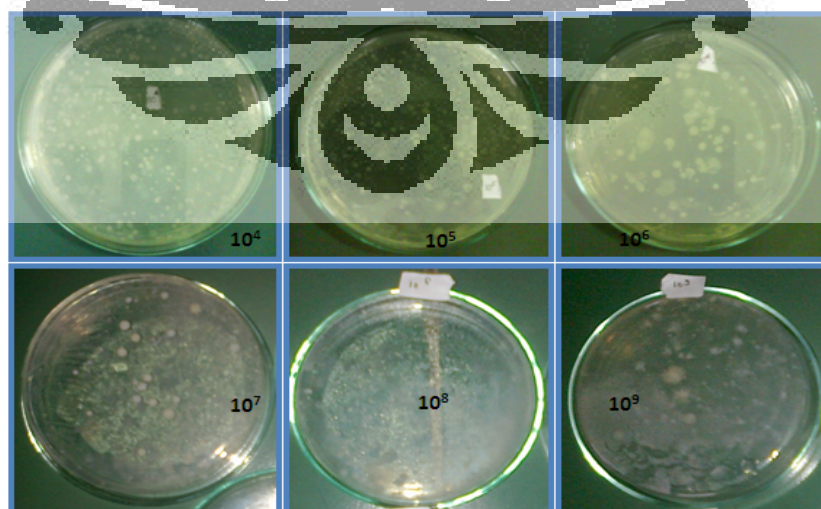
Gambar 4. 14 Medium Agar Sebelum Digunakan Uji TPC

Gambar 4.14 menunjukkan hasil uji blangko medium. Sebelum dilakukan TPC, adalah penting untuk melakukan uji blangko medium agar terlebih dahulu untuk menguji ketepatan dan keefektifan prosedur TPC yang telah dirancang. Hal ini dilakukan untuk mengetahui apakah metode dan prosedur yang akan digunakan telah efektif untuk menjamin bebasnya medium nutrisi agar dari kontaminasi.

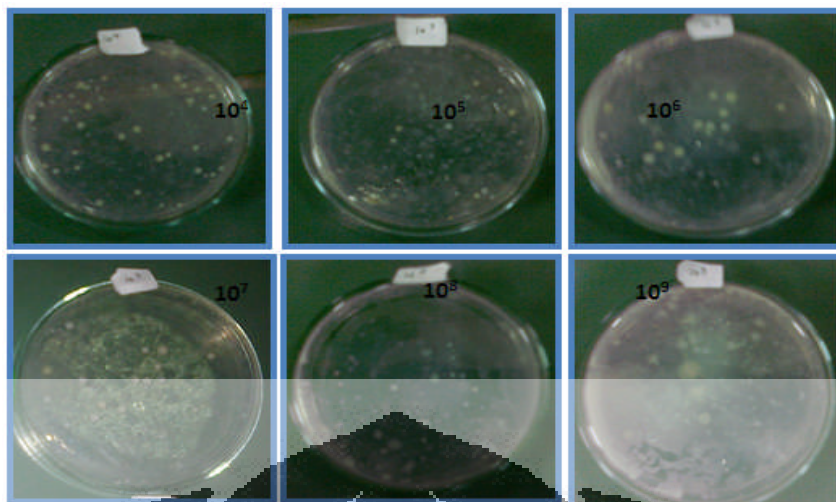
Sementara itu, hasil uji TPC dapat dilihat pada gambar berikut, di mana Gambar 4.15 merupakan hasil TPC kompos awal sebelum biofiltrasi, Gambar 4.16 menunjukkan hasil TPC kompos setelah biofiltrasi dengan variasi ukuran pelet, dan Gambar 4.17 menunjukkan kompos setelah biofiltrasi dengan variasi kandungan larutan nutrisi sintetik.



Gambar 4.15 Hasil uji TPC pada kompos awal sebelum biofiltrasi



Gambar 4.16 Hasil uji TPC pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi ukuran pelet



Gambar 4.17 Hasil uji TPC pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi larutan nutrisi

Tabel 4.5 Hasil uji TPC sebelum dan setelah biofiltrasi

Sampel Uji TPC	Σ Mikroorganisme (CFU/g)	RE(%)
Kompos Awal Sebelum Biofiltrasi	$5,54.10^8$	-
Kompos Setelah Biofiltrasi Seluruh Variasi Ukuran Pelet	$7,05.10^9$	25,31
Kompos Setelah Biofiltrasi Seluruh Variasi Kandungan Larutan Nutrisi	$1,85. 10^{10}$	62,25

Peningkatan jumlah mikroorganisme tersebut menunjukkan bahwa mikroba dapat bertahan hidup dan memperbanyak diri selama proses biofiltrasi berlangsung. Peningkatan jumlah mikroorganisme pendegradasi akan meningkatkan besar *removal efficiency* (%RE) biofilter karena biodegradasi dilakukan oleh mikroorganisme pendegradasi pada lapisan *biofilm*. Namun pertumbuhan yang berlebih (*overgrowth*) malahan akan menurunkan kinerja biofilter yang ditandai dengan penurunan *removal efficiency* (%RE).

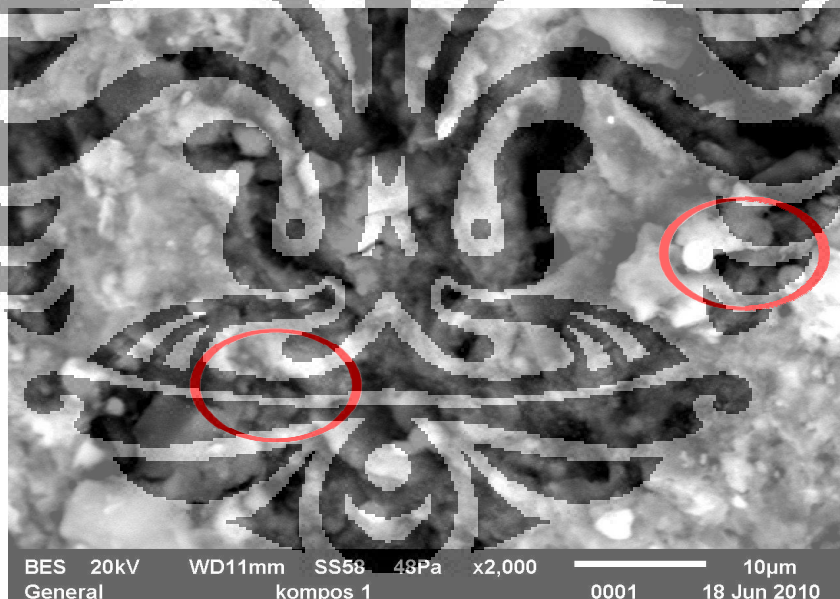
Berdasarkan Tabel 4.5 dapat diketahui bahwa setelah biofiltrasi dilakukan, jumlah mikroba yang dihitung dengan metode TPC meningkat. Hal tersebut dapat dilihat dari peningkatan hasil perhitungan uji TPC dari $5,54.10^8$ CFU/g sebelum biofiltrasi menjadi $7,05.10^{11}$ CFU/g pada variasi ukuran pelet setelah biofiltrasi dan $1,85. 10^{10}$ CFU/g pada variasi kandungan larutan nutrisi setelah biofiltrasi. Untuk bisa bertahan hidup, mikroba memerlukan makanan dengan nutrisi seimbang dan medium filter alami seperti kompos mampu menyediakan nutrisi

untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme. Sedangkan karbon dan energi yang dibutuhkan oleh mikroorganisme dapat berasal dari gas kontaminan NO. Kontaminan ditransfer dari aliran udara ke dalam *biofilm* yang tumbuh pada medium filter dan akan terdegradasi oleh mikroorganisme.

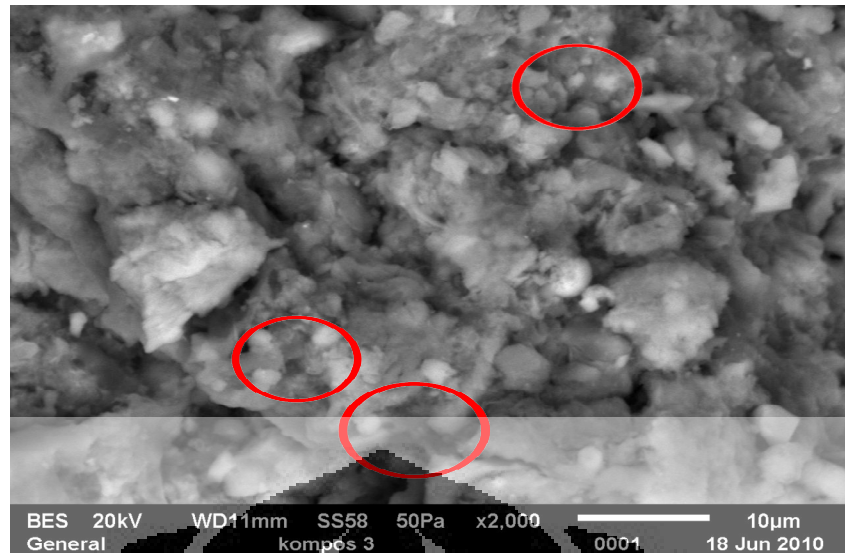
Oleh karena itu, adanya perkembangan dan pertumbuhan mikroorganisme pada medium filter selama proses biofiltrasi dimungkinkan karena terjadinya degradasi kontaminan oleh mikroorganisme untuk bisa mendapatkan karbon dan energi yang diperlukan untuk bertahan hidup dan memperbanyak diri.

4.4.5.2 Uji SEM (*Scanning Electron Microscope*)

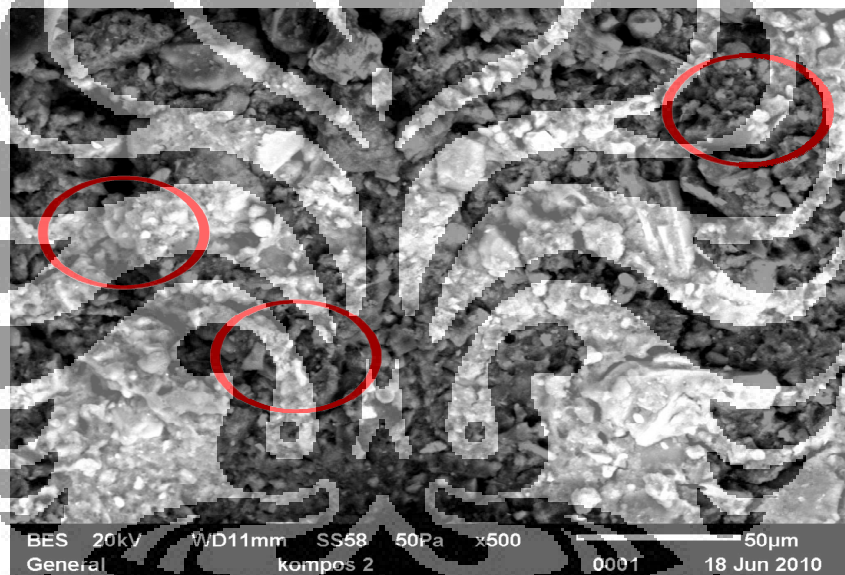
Jumlah mikroorganisme sebelum dan setelah biofiltrasi juga dapat diamati secara visual melalui uji SEM (*Scanning Electron Microscope*) untuk melihat morfologi kompos secara mikroskopik. Gambar 4.18 hingga Gambar 4.20 di bawah ini menunjukkan jumlah mikroorganisme yang terlihat pada medium filter yang diuji dengan menggunakan SEM.



Gambar 4.18 Hasil Uji SEM pada kompos awal sebelum biofiltrasi



Gambar 4.19 Hasil Uji SEM pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi ukuran pellet



Gambar 4.20 Hasil Uji SEM pada kompos setelah biofiltrasi dengan variasi kandungan nutrisi

Perbesaran yang digunakan untuk uji SEM ini adalah 2000 x sehingga mikroorganisme yang terdapat di dalam medium filter dapat terlihat dengan jelas. Lingkaran berwarna merah pada gambar hasil SEM diatas menunjukkan adanya koloni mikroorganisme pada medium filter pelet kompos. Secara visual dari hasil SEM, koloni mikroorganisme berbentuk seperti bintil-bintil kecil pada permukaan *biofilm* medium filter.

Berdasarkan hasil SEM di atas, dapat dilihat perbedaan pada kompos awal yang belum digunakan untuk biofiltrasi dengan kompos yang telah digunakan untuk biofiltrasi variasi ukuran pelet dan variasi larutan nutrisi sintetik. Kompos

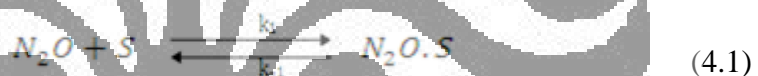
awal sebelum biofiltrasi mengandung lebih sedikit mikroorganisme yang terlihat daripada kompos yang sudah digunakan untuk biofiltrasi. Fenomena peningkatan jumlah mikroorganisme pada kompos setelah dilakukan biofiltrasi memperkuat analisis bahwa terjadi proses degradasi oleh mikroorganisme untuk metabolisme dan reproduksinya dengan mereduksi polutan berupa N_2O dalam aliran gas umpan penelitian ini.

4.5 Pemodelan Hasil Eksperimen

4.5.1 Pemodelan Adsorpsi

Pemodelan hasil eksperimen biofiltrasi pelet kompos menggunakan persamaan adsorpsi Langmuir. Adsorpsi yang terjadi merupakan adsorpsi fisika karena tidak ada reaksi yang terjadi pada biofilm, dan proses adsorpsi terjadi pada suhu ruang yang cenderung konstan dan tekanan atmosferik, sehingga persamaan yang lebih cocok untuk digunakan adalah persamaan adsorpsi isotermis Langmuir.

Reaksi adsorpsi yang terjadi dituliskan sebagai berikut:



di mana konsentrasi adsorbent (dalam penelitian ini adalah N_2O) dapat dituliskan ke dalam bentuk berikut (Lin et.al., 2004):

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

di mana q_e , setara dengan $C_{N_2O \cdot S}$, adalah konsentrasi ekuilibrium pada adsorbent (g/kg), C_0 adalah konsentrasi *inlet* gas N_2O (g/m^3), C_t adalah konsentrasi gas N_2O pada waktu t (g/m^3), V adalah volume *pack bed* pada kolom biofilter (m^3), dan m adalah massa adsorben yang dipakai (kg).

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

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

maka $P \propto n$ (kondisi isotermik, isovolumik)

$$m = n \times Mr$$

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

sehingga

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

Persamaan (4.3) digunakan jika data N_2O teradsorp diperoleh dalam satuan mol. Dengan mengadaptasikan rumus (4.2) dan (4.3), persamaan laju adsorpsi dan desorpsi untuk persamaan reaksi adsorpsi N_2O ke permukaan biofilm dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$\text{laju desorpsi } N_2O = k_{-1} C_{N_2O \cdot S} = k_{-1} q_e$$

$$\text{laju adsorpsi } N_2O = k_1 C_v p_{N_2O} = k_1 C_v C_e$$

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

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

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

$$r_{AD} = k_1 C_v C_e - k_{-1} q_e$$

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

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

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

$$r_{AD} = 0$$

sehingga

$$0 = k_1 \left(C_v C_e - \frac{q_e}{K_L} \right)$$

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

$$\frac{q_e}{K_L} = (q_m - q_e) C_e$$

$$q_e = (q_m - q_e) K_L C_e$$

$$q_e = q_m K_L C_e - q_e K_L C_e$$

$$q_e + q_e K_L C_e = q_m K_L C_e$$

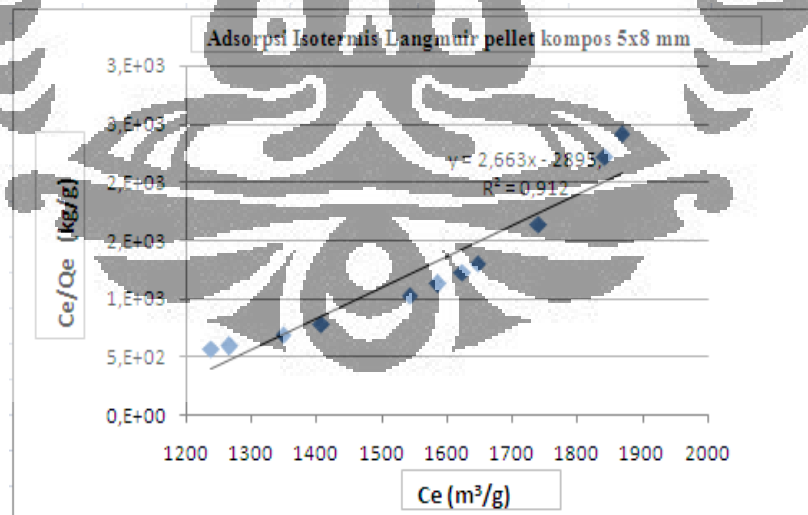
$$q_e (1 + K_L C_e) = q_m K_L C_e$$

$$\frac{q_e}{C_e} = \frac{q_m K_L}{1 + K_L C_e}$$

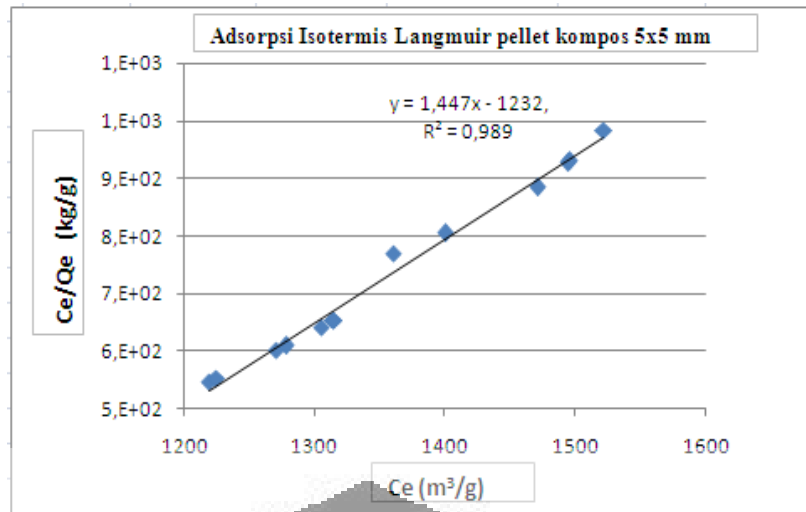
$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1 + K_L C_e}{q_m K_L}$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (4.5)$$

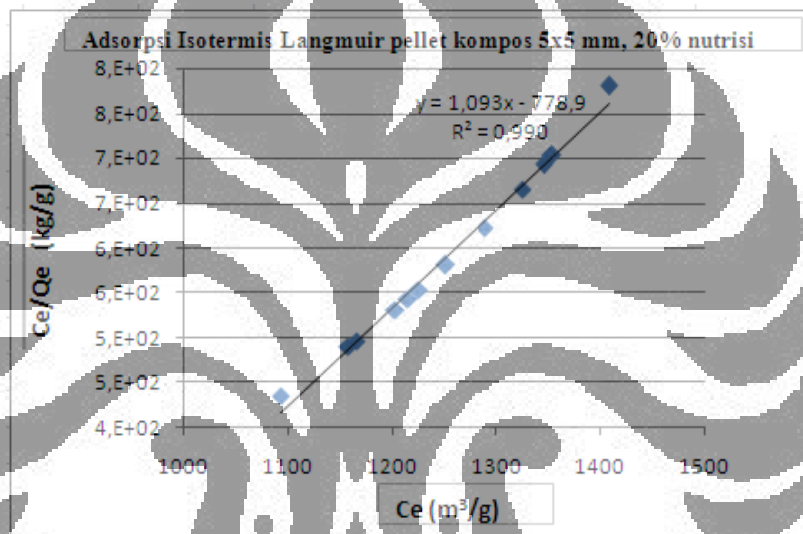
Pengolahan data dilakukan terhadap data yang diperoleh pada selama 12 jam pengoperasian biofilter. Data-data tersebut kemudian diplot antara C_e/q_e vs C_e sesuai dengan persamaan adsorpsi Langmuir yang terlinearisasi, yaitu persamaan (4.5). Berikut ini dapat dilihat grafik-grafik linearisasi adsorpsi isotermis pada eksperimen biofiltrasi pelet kompos.



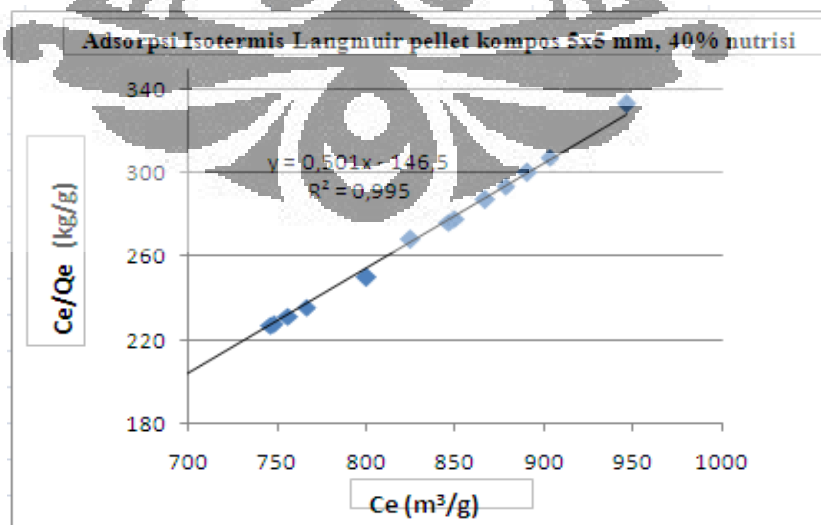
Gambar 4. 21 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir ($h = 100$ cm, , medium pelet 5x8 mm)



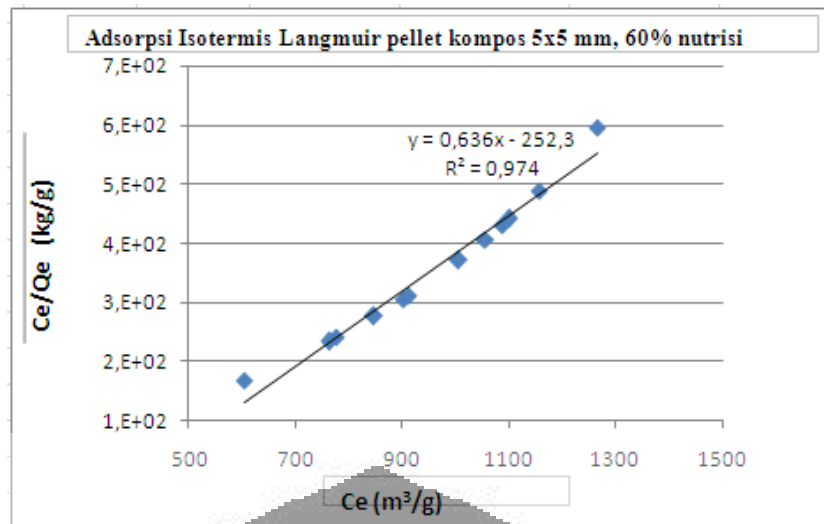
Gambar 4. 22 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir ($h = 100$ cm, , medium pelet 5x5 mm)



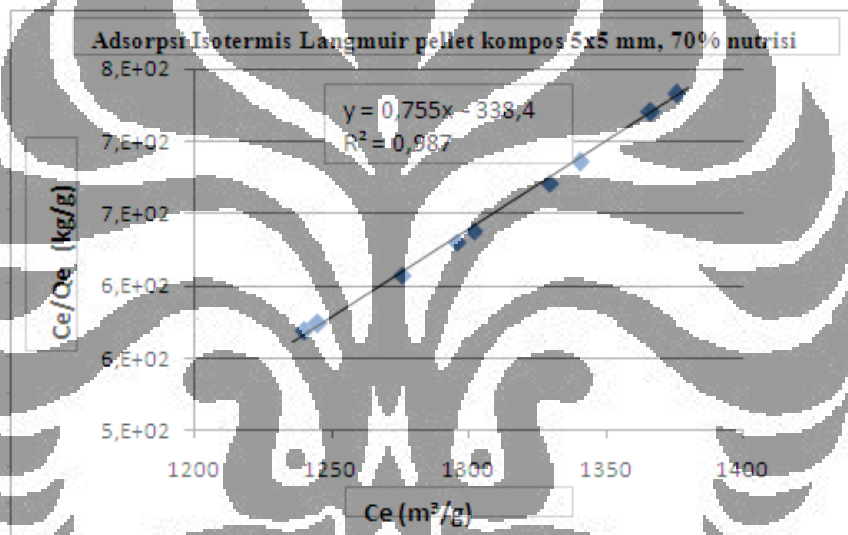
Gambar 4. 23 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir
($h = 100$ cm, medium pelet 5x5 mm, nutrisi 20%)



Gambar 4. 24 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir
($h = 100$ cm, medium pelet 5x5 mm, nutrisi 40%)



Gambar 4. 25 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir
($h = 100$ cm, medium pelet 5x5 mm, nutrisi 60%)



Gambar 4. 26 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir
($h = 100$ cm, medium pelet 5x5 mm, nutrisi 70%)

Daftar persamaan linearisasi langmuir pada berbagai eksperimen biofilter:

Tabel 4.6 Daftar Persamaan Adsorpsi Langmuir Sesuai Grafik Adsorpsi Langmuir
(Gambar 4.21 sampai Gambar 2.26)

Eksperimen Biofilter	Persamaan Linearisasi Langmuir
Pelet ukuran 5x8 mm	$y = 2,663x - 2895$
Pelet ukuran 5x5 mm	$y = 1,447x - 1232$
Pelet ukuran 5x5 mm + 20% nutrisi	$y = 1,093x - 778,9$
Pelet ukuran 5x5 mm + 40% nutrisi	$y = 0,501x - 146,5$
Pelet ukuran 5x5 mm + 60% nutrisi	$y = 0,636x - 252,3$
Pelet ukuran 5x5 mm + 70% nutrisi	$y = 0,755x - 380,4$

Konstanta Langmuir dapat dicari dari gradien $(q_m)^{-1}$ dan intersep $(q_m K_L)^{-1}$ dari persamaan linearisasi, di mana :

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (4.5)$$

maka nilai q_m dan K_L dapat dicari sesuai persamaan di atas.

Tabel 4.7 Nilai q_m dan K_L Persamaan Adsorpsi Langmuir Pada Variasi Ukuran Pelet dan Kandungan Nutrisi

Pelet Kompos	q_m (g/kg)	K_L (m ³ /g)
ukuran 5x8 mm	0,376	-0,00061
ukuran 5x5 mm	0,691	-0,00031
ukuran 5x5 mm + 20% nutrisi	0,915	-0,00023
ukuran 5x5 mm + 40% nutrisi	1,996	-0,00021
ukuran 5x5 mm + 60% nutrisi	1,572	-0,00028
ukuran 5x5 mm + 70% nutrisi	1,325	-0,00041

Nilai q_{max} ini menunjukkan keterbatasan kapasitas biosorpsi bila permukaan tertutup penuh dengan adsorbat dan konstanta langmuir K_L menunjukkan kemampuan adsorben untuk mengikat adsorbat, maka semakin tinggi nilai K_L berarti semakin tinggi kemampuan adsorben untuk mengikat adsorbat. Adapun konstanta tersebut bernilai negatif dikarenakan gas N_2O yang dapat diadsorp semakin berkurang.

4.5.2 Pemodelan Kinetika Michaelis Menten Biofiltrasi

Pemodelan hasil eksperimen biofiltrasi menggunakan persamaan Michaelis-Menten (Chiu et. al., 2006, Kim et al., 2000). Parameter Kinetik V_m dan K_s ditentukan oleh persamaan Michaelis-Menten sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (4.1) dan (4.2) (Chiu et. al., 2006, Kim et al., 2000). Nilai laju reduksi (*removal rate*) dari eksperimen yang ditentukan dengan persamaan (4.1). Dimana R ialah *removal rate* ($g\ m^{-3}\ h^{-1}$), V_m ialah *removal rate* maksimum ($g\ m^{-3}\ h^{-1}$), dan K_s konstanta saturasi ($g\ m^{-3}$), C_{in} atau C_o dan C_{out} atau C_e berturut-turut ialah konsentrasi terukur N_2O inlet dan outlet ($g\ m^{-3}$), sedangkan t

merupakan waktu tinggal pada kolom reaktor/*residence time*. S_a = *cross sectional area* (m^2); F = laju alir gas (m^3/jam); L = tinggi kolom *packed bed* (m); SV = *space velocity* (jam^{-1}) = $Fs_a^{-1}L^{-1}$; α = koefisien konversi unit satuan. Data C_{in}/C_o dan C_{out}/C_e pun dapat dilihat pada Lampiran 3 dan 4.

$$\frac{-dC}{dl} = \frac{VmC}{K_s+C} \left(\frac{S_a}{F} \right) \alpha \quad (4.6)$$

$$-dC = \frac{VmC}{K_s+C} \left(\frac{S_a}{F} \right) \alpha dl \quad (4.7)$$

$$-\frac{dC}{\frac{VmC}{K_s+C}} = \left(\frac{S_a}{F} \right) \alpha dl \quad (4.8)$$

$$-\frac{(K_s+C) dC}{VmC} = \left(\frac{S_a}{F} \right) \alpha dl \quad (4.9)$$

$$-\frac{(K_s+C) dC}{VmC} = \left(\frac{S_a}{F} \right) \alpha dl \quad (4.10)$$

Integrasi persamaan diferensial pada keadaan dimana $C = C_o$ pada $l = 0$ dan $C = C_e$ pada $l = L$.

$$\int -\left(\frac{K_s}{VmC} + \frac{C}{VmC} \right) dC = \int \left(\frac{S_a}{F} \right) \alpha dl \quad (4.11)$$

$$\int -\left(\frac{K_s}{VmC} + \frac{1}{Vm} \right) dC = \int \left(\frac{S_a}{F} \right) \alpha dl \quad (4.12)$$

$$\int -\frac{K_s}{VmC} dC + \int -\frac{1}{Vm} dC = \int \left(\frac{S_a}{F} \right) \alpha dl \quad (4.13)$$

$$-\frac{K_s}{Vm} \int \frac{1}{C} dC - \frac{1}{Vm} \int dC = \left(\frac{S_a}{F} \right) \alpha \int dl \quad (4.14)$$

$$-\frac{K_s}{Vm} (\ln C_e - \ln C_o) - \frac{1}{Vm} (C_e - C_o) = \left(\frac{S_a}{F} \right) \alpha (L - 0) \quad (4.15)$$

$$-\frac{K_s}{V_m} (\ln C_e - \ln C_o) - \frac{1}{V_m} (C_e - C_o) = \left(\frac{S_a}{F}\right) \alpha L \quad (4.16)$$

$$\frac{K_s}{V_m} (\ln C_o - \ln C_e) + \frac{1}{V_m} (C_o - C_e) = \left(\frac{S_a L}{F}\right) \alpha \quad (4.17)$$

$$\frac{K_s}{V_m} (\ln C_o - \ln C_e) + \frac{1}{V_m} (C_o - C_e) = \left(\frac{1}{S V}\right) \alpha \quad (4.18)$$

$$\frac{K_s}{V_m} (\ln C_o / C_e) + \frac{1}{V_m} (C_o - C_e) = \left(\frac{\alpha}{S V}\right) \quad (4.19)$$

$$\text{-----} \times (1 / (C_o - C_e))$$

$$\frac{K_s}{V_m} (\ln C_o / C_e) \left(\frac{1}{C_o - C_e}\right) + \frac{1}{V_m} = \left(\frac{\alpha}{S V (C_o - C_e)}\right) \quad (4.20)$$

$$\frac{K_s}{V_m} \left(\frac{1}{\frac{C_o - C_e}{\ln(C_o / C_e)}}\right) + \frac{1}{V_m} = \left(\frac{\alpha}{S V (C_o - C_e)}\right) \quad (4.21)$$

Dengan $R = S V (C_o - C_e) / \alpha = \frac{C_o - C_e}{t} \quad (4.22)$

$$C_{ln} = (C_o - C_e) / \ln(C_o / C_e) \quad (4.23),$$

maka akan didapatkan persamaan berikut ini:

$$\frac{K_s}{V_m} \left(\frac{1}{C_{ln}}\right) + \frac{1}{V_m} = \left(\frac{1}{R}\right) \quad (4.24)$$

$$\text{-----} \times C_{ln}$$

$$\frac{K_s}{V_m} + \frac{C_{ln}}{V_m} = \left(\frac{C_{ln}}{R}\right) \quad (4.25)$$

$$\left(\frac{C_{ln}}{R}\right) = \frac{K_s}{V_m} + \frac{C_{ln}}{V_m} \quad (4.26)$$

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

Pada linearisasi dimana :

$$y = \left(\frac{C_{ln}}{R} \right) \quad (4.28)$$

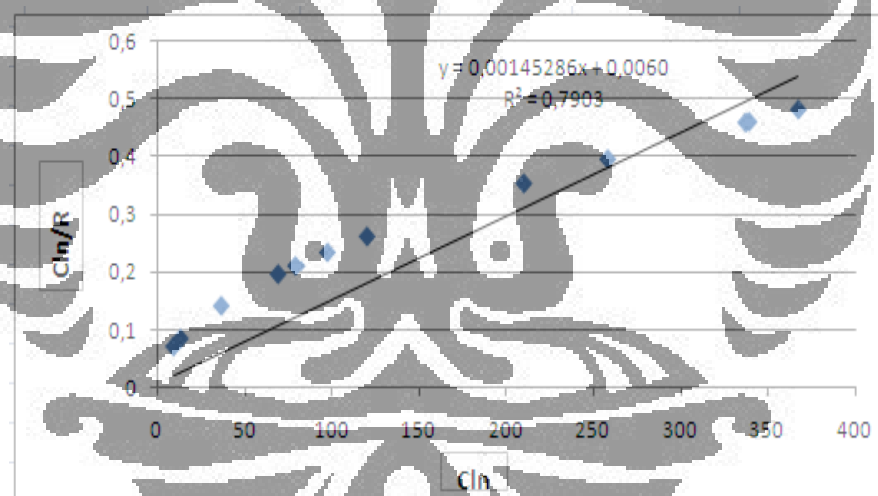
$$x = (C_{ln}) \quad (4.29)$$

maka:

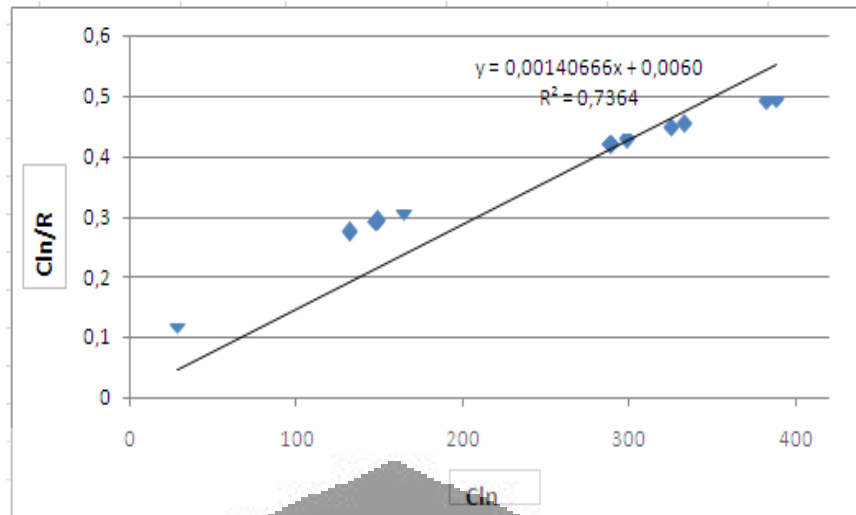
$$a = \frac{K_s}{V_m} \quad (\text{intersept}) \quad (4.39)$$

$$b = \frac{1}{V_m} \quad (\text{slope/gradien}) \quad (4.40)$$

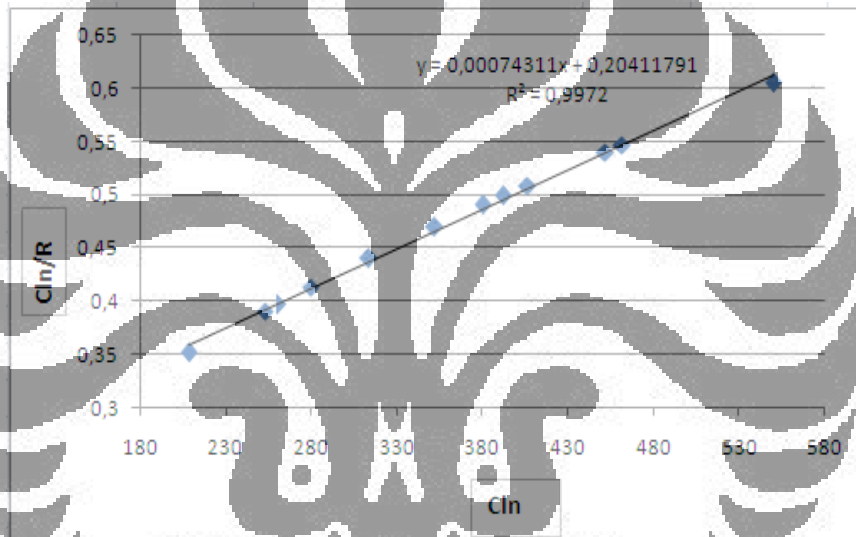
Pengolahan data dilakukan terhadap data-data yang diperoleh pada penelitian. Data-data kemudian diplot antara (C_{ln}) vs $\left(\frac{C_{ln}}{R} \right)$ sesuai dengan persamaan Michaelis Menten yang terlinearisasi. Berikut ini dapat dilihat grafik-grafik linearisasi Michaelis Menten pada variabel ukuran pelet dan kandungan nutrisi pada biofilter pada Gambar 4. 25, Gambar 4. 26, Gambar 4. 27, Gambar 4. 28, Gambar 4. 29, Gambar 4. 30 :



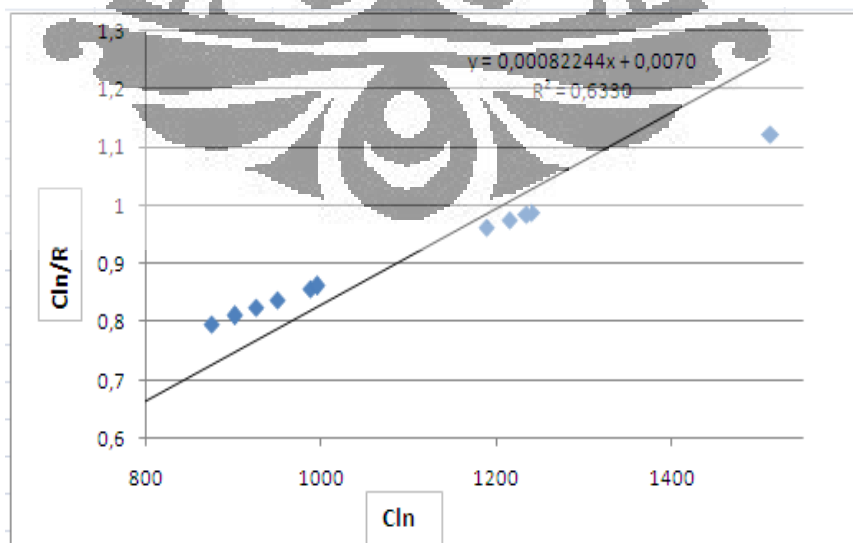
Gambar 4. 27 Kurva Michaelis Menten (h = 100 cm, , medium pelet 5x8 mm)



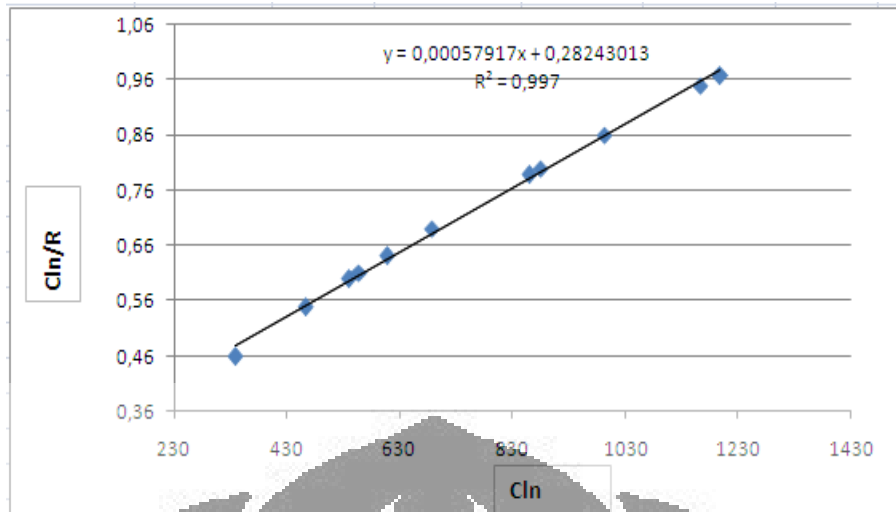
Gambar 4. 28 Kurva Michaelis Menten ($h = 100$ cm, medium pelet 5x5 mm)



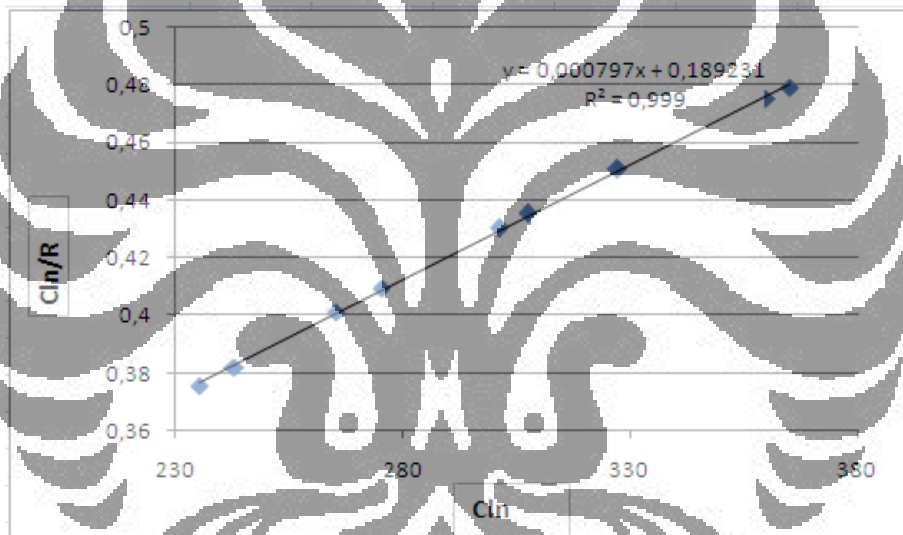
Gambar 4. 29 Kurva Michaelis Menten ($h = 100$ cm, medium pelet 5x5 mm, nutrisi 20%)



Gambar 4. 30 Kurva Michaelis Menten ($h = 100$ cm, medium pelet 5x5 mm, nutrisi 40%)



Gambar 4. 31 Kurva Michaelis Menten (h = 100 cm, medium pelet 5x5 mm, nutrisi 60%)



Gambar 4. 32 Kurva Michaelis Menten (h = 100 cm, medium pelet 5x5 mm, nutrisi 70%)

Karena persamaan linear Michaelis Menten (persamaan 4.27) adalah :

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

maka nilai V_m dan K_s dapat dicari sesuai persamaan di atas.

Tabel 4.8 Nilai V_m dan K_s Persamaan Michaelis Menten Pada Variasi Ukuran Pelet dan Kandungan Nutrisi

Pelet Kompos	V_m ($g\ m^{-3}\ h^{-1}$)	K_s ($g\ m^{-3}$)
ukuran 5x8 mm	688,29	4,1298
ukuran 5x5 mm	710,90	4,2654
ukuran 5x5 mm + nutrisi 20%	1345,69	274,6806
ukuran 5x5 mm + nutrisi 40%	1215,89	8,51126
ukuran 5x5 mm + nutrisi 60%	1726,61	487,6463
ukuran 5x5 mm + nutrisi 70%	1254,70	237,4291

Dari Tabel 4.8 tersebut maka V_m pada pelet 5x5 mm ialah $710,90\ g\ m^{-3}\ h^{-1}$ dan K_s pelet 5x5 mm ialah $4,2654\ g\ m^{-3}$. Nilai ini lebih tinggi dari pelet ukuran 5x8 mm di mana V_m dan K_s -nya berturut-turut adalah $688,29\ g\ m^{-3}\ h^{-1}$ dan $4,2654\ g\ m^{-3}$. Pada penambahan nutrisi optimum yaitu sebesar 40% nilai V_m mencapai $1215,89\ g\ m^{-3}\ h^{-1}$ dengan $K_s\ 8,51126\ g\ m^{-3}$. Dapat dilihat pula bahwa pada variasi kandungan nutrisi laju penurunan (*removal rate*) maksimum tidak terlalu signifikan berbeda. Secara umum, nilai K_s (konstanta saturasi-*half*) yang relatif lebih rendah cenderung pada afinitas terhadap N_2O yang lebih tinggi pada biofilter dan hal ini mengakibatkan pada laju penurunan konsentrasi N_2O yang lebih tinggi.

BAB 5

KESIMPULAN

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

- Efisiensi reduksi optimum dicapai pada ukuran pelet kompos 5x5 mm sebesar 25,31 %.
- Kandungan nutrisi 40% pada pelet kompos merupakan kandungan nutrisi optimum dalam mereduksi N₂O dengan efisiensi reduksi sebesar 62,25 %.
- pH medium awal sebelum biofiltrasi akan berkurang pada saat setelah biofiltrasi karena terjadi proses biodegradasi yang menghasilkan produk akhir asam.
- pH untuk biofiltrasi gas N₂O pada penelitian ini cenderung stabil di rentang pH 6 – 8 (pH untuk aktivitas optimum mikroorganisme).
- Porositas kompos setelah biofiltrasi akan berkurang dibandingkan kompos awal karena adanya kompaksi medium akibat adanya aliran gas polutan di dalam medium filter.
- Efisiensi reduksi N₂O yang dihasilkan pada jam ke-12 oleh pelet kompos lebih rendah dibandingkan dengan kompos bentuk *bulk/ruah*.
- Kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O hingga mencapai efisiensi reduksi optimum diperoleh pada ukuran pelet 5x5 mm dan kandungan nutrisi 40% berat pelet kompos.
- Kapasitas biosorpsi maksimum pada pelet ukuran 5x5 mm dengan penambahan kandungan nutrisi 40% mencapai 1,996 g/kg.
- Pada variasi kandungan nutrisi, perbedaan laju penurunan (*removal rate*) maksimum tidak terlalu signifikan.
- Nilai K_s (konstanta saturasi-*half*) yang relatif lebih rendah cenderung pada afinitas terhadap N₂O yang lebih tinggi pada biofilter dan hal ini mengakibatkan pada laju penurunan konsentrasi N₂O yang lebih tinggi.

DAFTAR ISTILAH

<i>Binder</i>	pengikat
<i>Biodegradable</i>	dapat didegradasi secara biologis
<i>Biofilm</i>	lapisan pada <i>bed</i> dimana mikroorganisme berkoloni
<i>Boundary layer</i>	lapisan batas
<i>Bubble soap</i>	gelembung sabun
<i>Buffering</i>	penyangga pH
<i>Bulk</i>	bentuk ruah
<i>Channeling</i>	pembentukan saluran aliran
<i>Clogging</i>	penyumbatan
<i>Colony forming unit</i>	satuan jumlah mikroorganisme (jumlah koloni terbentuk)
<i>Downflow</i>	sistem aliran dari atas ke bawah
<i>Half</i>	setengah
<i>Inert</i>	lembam
<i>Inlet</i>	aliran masuk
<i>Loading</i>	beban massa
<i>Lubricant</i>	pelumas
<i>Mash</i>	ukuran panjang
<i>Moisture</i>	kelembaban
<i>Outlet</i>	aliran keluar
<i>Overgrowth</i>	pertumbuhan mikroorganisme yang berlebihan
<i>Peak</i>	puncak
<i>Pelet</i>	butiran bentuk siinder kecil
<i>Porous</i>	berpori
<i>Potential sites</i>	tempat potensial degradasi polutan
<i>Pressure drop</i>	penurunan tekanan
<i>Recycle</i>	sistem aliran daur ulang
Saturasi	jenuh
<i>Steady</i>	tunak
<i>Trace element</i>	mikronutrien
<i>Water content</i>	kandungan air

DAFTAR REFERENSI

- Adriaty, Lila. (2009). "Pemanfaatan Kompos sebagai Biofilter untuk Mereduksi Emisi Gas N₂O". Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok.
- Adu, B., & Otten, L. (1996). *Modelling the bioltration characteristics of volatile compounds. Proceedings of the 89th annual meeting and exhibition of the air & waste management association*, June 23– 26, 1996, Nashville, TN. Pittsburgh, PA: Air & Waste Management Association.
- Allen, E.R., & Yang, Y. (1991). *Biofiltration control of hydrogen sulde emissions. Proceedings of the 84th annual meeting and exhibition of the air & waste management association*, June 16–21, 1991, Vancouver, BC, Canada. Pittsburgh, PA: Air & Waste Management Association.
- Amanullah, M. D., Farooq, S., & Viswanathan, S. (2000). *Effect of adsorption capacity of the solid support on the performance of a biofilter*. In D. D. Do (Ed.), *Adsorption science and technology, Proceedings of the second Pacific basin conference* (pp. 209–213). Singapore, Singapore: World Scientific Publishing.
- Barnes, J.M, W.A. Apel, K.B. Barrett. (1994). *Removal of nitrogen oxides from gas stream using biofiltration*, *J. Hazard. Matter.*
- Bohn, H. L. (1996). *Biofilter media. proceedings of the 89th annual meeting and exhibition of the air & waste management association*, June 23–26, 1996, Nashville, TN. Pittsburgh, PA: Air & Waste Management Association.
- Corsi, R.L., & Seed, L. (1995). *Bioltration of BTEX: media, substrate, and loadings effects*. *Environmental Progress*, 14, 151–158.
- Delhomenie, Marie-Caroline., Bibeau, L., Gendron, J., Brzezinski, R., & Heitz, M. (2001). *Air treatment by bioltration: Influence of nitrogen concentration on operational parameters*. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 40, 5405–5414.
- Delhomènie, Marie-Caroline, Louise Bibeau, and Michèle Heitz. (2002) *A Study of the impact of particle size and adsorption phenomena in a compost-based biological filter*. Department of Chemical Engineering Université de Sherbrooke, Canada. *Chem. Eng. Sci.* 57 (2002) 4999 – 5010.

- Devinny, 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
- Eitner, D., & Gethke, H. G. (1987). *Design, construction and operation of biofilters for odor control in sewage treatment plants. Proceedings of the 80th annual meeting of APCA*, June 21–26, 1987, New York, NY. Pittsburgh, PA: Air & Waste Management Association.
- Fernando Morgan-Sagastume, Brent E. Sleep, dan D. Grant Allen. (2001). *Effects of biomass growth on gas pressure drop in biofilters*. Journal of Environmental Engineering, Vol. 127, No. 5.
- Filayuri, Shilfa. (2009). *Evaluasi kinerja medium berbasis kompos sebagai material isian pada biofiltrasi gas dinitrogen monoksida*. Proposal Program Kreativitas Mahasiswa Penelitian Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok.
- Govind, R.. (1999). *Biotrickling filter*. In: *Resources*. ASAE, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659, USA.
- Govind, Rakesh (2010). *Biofiltration: An Innovative Technology for The Future*. University of Cincinnati, Cincinnati.
- Gribbins, M. J., & Loehr, R. C. (1998). *Effect of media nitrogen concentration on biofilter performance*. The Journal of the Air & Waste Management Association, 48, 216–226.
- H. Taghipour , M. R. Shahmansour , B. Bina dan H. Movahdian (2006). *Comparison of the biological NH₃ removal characteristics of a three stage biofilter with a one stage biofilter*. Int. J. Environ. Sci. Tech., 3 (4): 417-424,
- Hodge DS, Medina VF, Islander RL, Devinny JS. (1991). *Treatment of hydrocarbon fuel vapors in biofilters*. Environ Technol 12:655–662
- Hong, Jih Yung. (2003). *Manure compost biofilter*. Bioindustrial Machinery Engineering, Sonchon National University.

- Schroeder, Edward D. (2002). *Trends in application of gas-phase bioreactors*. Environmental Science & Bio/Technology 1: 65–74. University of California, Davis, CA, 95616, USA
- Hudepohl, Nate J. (1999). *Biofilter technology for NOx control*. University of California, Davis.
- Janni, K. A., Maier, W. J., Kuehn, T. H., Yang, C.-H., Bridges, B. B., Velsey, D., & Nellis, M. A. (2001). *Evaluation of biotration of air—an innovative air pollution control technology*. ASHRAE Transactions, 107, 198–214.
- Kaili Lin, Jiayong Pan, Yiwei Chen, Rongming Cheng, Xuecheng Xu. (2008). *Study the adsorption of phenol from aqueous solution on hydroxyapatite nanopowders*. Journal of Hazardous Materials 161 (2009) 231–240
- Kennes, C., & Thalasso F. (1998). *Waste gas biotreatment technology*. J. Chem. Technol. Biotechnol, 72, 303-319.
- Kennes, C., & Veiga, M.C. (2001). *Conventional biofilters*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 47-98.
- Kent, T.D., Williams, S.C., & Fitzpatrick, C.S.B. (2000). *Ammoniacal nitrogen removal in biological aerated filters: the effect of media size*. Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management, 14, 409–414.
- Kim, Ku-Yong, Hyun-Woo Kim, Sun-Kee Han, Eung-Ju Hwang, Chae-Young Lee, and Hang-Sik Shin. (2007). *Effect of granular porous media on the composting of swine manure*. Was. Man. 28 (2008) 2336 – 2343.
- 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. (1998). *Biofilters in practice*. In S. K. Sidkar & R. L. Irvine (Eds.), *Bioremediation* (Vol.3) (pp.601–632). Technomic Publishing Co., Lancaster, PA.
- Leson, G., & Winer, A. M. (1991). *Biofiltration: an innovative air pollution control technology for VOC emissions*. The Journal of the Air & Waste Management Association, 41, 1045–1054.

- Lim, Kwang-Hee dan Eun Ju Lee. (2003). *Biofilter modeling for waste air treatment: comparisons of inherent characteristics of biofilter models*. Korean J. Chem. Eng., 20(2), 315-327
- 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.
- Mohseni M, Allen DG, Nichols KM. (1998). *Biofiltration of α -pinene and its application to the treatment of pulp and paper air emissions*. TAPPI J81:205–211
- Morgan-Sagastume, F., Sleep, B. E., & Allen, D. G. (2001). *Effects of biomass growth on gas pressure drop in biolters*. Journal of Environmental Engineering—ASCE, 127, 388–396.
- Morgenroth, E., Schroeder, E. D., Chang, D. P. Y., & Scow, K. M. (1996). *Nutrient limitation in a compost biofilter degrading hexane*. The Journal of the Air & Waste Management Association, 46, 300–308.
- Nam-Jin Kim, Mitsuyo Hirai, Makoto Shoda, (1999). *Comparison of organic and inorganic packing materials in the removal of ammonia gas in biofilters*. Journal of Hazardous Materials B72 2000 77–90
- Noviani, Cynthia. (2009). *Reduksi gas dinitrogen monoksida melalui biofiltrasi dengan menggunakan material kompos termodifikasi*. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok.
- Ó. J. Prado · J. A. Mendoza · M. C. Veiga · C. Kennes, (2002). *Optimization of nutrient supply in a downflow gas-phase biofilter packed with an inert carrier*. Appl Microbiol Biotechnol (2002) 59:567–573
- Oscar Kibazohi, Soon- Il Yun and William A. Anderson. (2004). *Removal of hexane in biofilters packed with perlite and a peat-perlite mixture*. World Journal of Microbiology & Biotechnology 20: 337–343
- Ottengraf SPP. (1987). *Biological system for waste gas elimination*. TIBTECH 5:132–136
- Ottengraf, S. P. P., Meesters, J. J. P., Van den Oever, A. H. C., & Rezema, H. R. (1986). *Biological elimination of volatile xenobiotic compounds in biolters*. Bioprocess Engineering, 1, 61–69.

- Praswasti PDK Wulan, Misri Gozan, Berly Arby dan Bustomy Achmad. (2004). Penentuan rasio optimum C:N:P sebagai nutrisi pada proses biodegradasi benzena-toluena dan *scale up* kolom bioregenerator. Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia,
- Pandey, Ashok. (2004). *Concise encyclopedia of bioresource technology*. The Haworth Press, Inc :New York
- R. Ravi, Ligy philip, dan T. Swaminathan. (2009). *Performance Evaluation of a Compost Biofilter Treating Dichloromethane Vapors*. *International Journal of Chemical Engineering Research* ISSN 0975 – 6442 Volume 1, Number 2 (2009), pp. 63–76.
- Rebecca Moore, Joanne Quarmby* and Tom Stephenson, (2001). *The effects of media size on the performance and efficiency of biological aerated filters*. *Water research*, vol. 35 (2001) 2514-2522.
- 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
- Simanjuntak, Josia. (2008) Reduksi gas dinitrogen monoksida dengan menggunakan pupuk kompos sebagai biofilter. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok.
- Sorial GA, Smith FL, Suidan MT & Biswas P. (1995). *Evaluation of a trickle bed biofilter media for toluene removal*. *Journal Air and Waste Management Association* 45: 801–810
- Swanson WJ, Loehr RC. (1997). *Biofiltration: fundamentals, design and operations principles and applications of biological APC technology*. *J Environ Eng ASCE* 123:538–54
- Torkian, A., H. Keshavarzi Shirazi, and A. Azimi. (2005) *Effects of operational conditions on the performance of triethylamine biofiltration*. *Iranian J Env Health Sci Eng*, 2005, Vol.2, No.2, pp.31-40. 24 Juli.

- Uhl, Wolfgang. (2002). *Biofiltration processes for organic matter removal*. Mülheim, Germany.
- Utami dkk. (2009). Pengaruh parameter operasi dalam proses biofiltrasi N₂O dengan medium filter berbasis kompos. Makalah dipresentasikan pada Proceeding Seminar Tjipto Utomo 2009, Kampus ITENAS Bandung.
- Viswanathan, Sudhakar dan Hao Pham & Robert F. Kelly. (2007) *Addressing the nutrient crisis: evaluation of a biological filter to meet low total nitrogen discharge limits*. Water Environment Federation. Jackson St. Richmond, VA 23219 U.S.
- Webster, T.S., Torres, E.M., & Basrai, S. (1995). *Study of biotration for control of odor, VOC, and toxic emissions from wastewater treatment plants: Phase II bench- and pilot-scale studies*. University of Southern California and the Reynolds group conference on biotration, October, 5–6, 1995, Los Angeles, CA. Los Angeles, CA: University of Southern California.
- Williams, T.O., & Miller, F.C. (1992). *Biofilters and facility operations— Part II*. *Biocycle*, 33, 75–79.
- 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.
- Yi-Cheng Chiu, Chi-Wen Lin, Tsang-Chih Kao, dan Xiao-Yan Tang, (2006). *Biodegradation kinetics and effects of operating parameters on the performance of a methyl tert-butyl ether degrading biofilter*. *Spinger: Water, Air, and Soil Pollution* (2006) 177: 399–410
- Anonim. *greenhouse effect* (<http://geo.ugm.ac.id/archieve/28>). (Diakses tanggal 12 Februari 2010)
- Anonim. *Nitrous oxide* (en.wikipedia.org/wiki/Nitrous_oxide). (Diakses tanggal 10 Februari 2010)
- Anonim. *NOx removal*. (www.noxremoval.com/index). (Diakses tanggal 15 April 2010).
- Anonim. *Compost Fundamentals*. (<http://whatcom.wsu.edu/ag/compost/fundamentals>). (Diakses tanggal 05 Juli 2010)

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Hasil Kalibrasi N₂O

volume	Waktu Retensi		Luas Area	
	Udara	N ₂ O	Udara	N ₂ O
1.00E-06	1,218	2,523	7642712	109893
1.00E-06	1,192	2,723	7542564	108697
8.00E-07	1,187	2,693	5468466	79674
8.00E-07	1,118	2,53	5369450	78969
6.00E-07	1,198	2,533	3682888	53575
6.00E-07	1,2	2,527	3702987	54050
4.00E-07	1,14	2,515	2792654	31360
4.00E-07	1,207	2,535	2728837	32120
2.00E-07	1,233	2,687	1681763	16308
2.00E-07	1,238	2,698	1696788	16788
1.00E+00	0	0	0	0
1.00E+00	0	0	0	0

Keterangan :

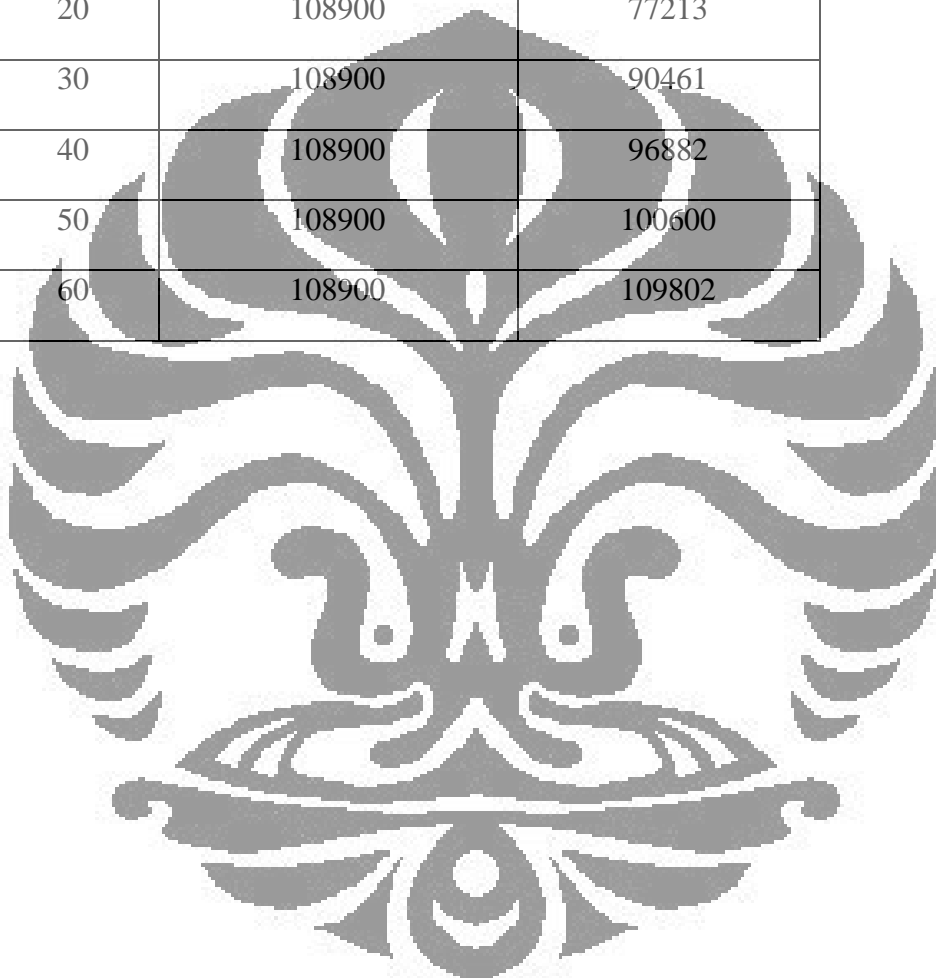
Kandungan uap air tidak terdeteksi pada hasil kalibrasi karena konsentrasinya sangat kecil.

Waktu Retensi Udara = 1,193 menit

Waktu Retensi N₂O = 2,596 menit

Lampiran 2. Data Hasil Uji Kebocoran dan Uji Blangko

t (menit)	Luas Area <i>Peak</i> N ₂ O	
	Sampling port atas	Sampling port bawah
0	108900	4708
10	108900	51810
20	108900	77213
30	108900	90461
40	108900	96882
50	108900	100600
60	108900	109802



Lampiran 3. Data Hasil Uji Variasi Ukuran Pelet 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) Pelet Kompos Ukuran 5x8 mm (Q= 88 cc/menit, h = 100 cm)

Waktu	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N2O (m3)	Massa N2O (gr)	konsentrasi N2O (g/m3)	% RE
	Uap air	N2O	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap Air	N2O	Udara				
0	1,180	2,641	7645057	0	109893	98,58293	0	1,417072	1,10504E-06	0,002002331	2002,330668	0	
1	1,197	2,620	7510844	18304	101646	98,42808	0,239868	1,332052	1,03082E-06	0,001867838	1867,837686	6,716821759	
2	1,183	2,644	7721145	26353	93833	98,46727	0,336078	1,196651	9,605E-07	0,001740426	1740,426	13,07999084	
3	1,169	2,682	7983200	42040	100082	98,25088	0,51739	1,231735	1,01674E-06	0,001842336	1842,336245	7,990409647	
4	1,174	2,689	7806231	17417	73413	98,84983	0,220545	0,929622	7,76715E-07	0,001407408	1407,407942	29,71151244	
5	1,191	2,687	7719614	207736	88126	96,30886	2,591689	1,099448	9,09134E-07	0,001647351	1647,350808	17,72833357	
6	1,177	2,703	7867335	20999	69834	98,85862	0,263866	0,877512	7,44505E-07	0,001349042	1349,042154	32,62640504	
7	1,186	2,665	7391539	11281	64759	98,98174	0,151061	0,867202	6,98831E-07	0,001266282	1266,281772	36,75960758	
8	1,175	2,607	7477366	10786	63023	99,02254	0,142842	0,834615	6,83209E-07	0,001237975	1237,975161	38,17329072	
9	1,172	2,666	7300980	8656	64647	99,00597	0,117383	0,876648	6,97819E-07	0,001264447	1264,447122	36,8512333	
10	1,166	2,667	7651971	8480	81734	98,83477	0,109535	1,055699	8,51608E-07	0,001543113	1543,113334	22,93414079	

11	1,161	2,259	2,666	7766407	9509	84384	98,80548	0,120975	1,073548	8,75457E-07	0,001586328	1586,328311	20,775907
12	1,151	2,239	2,646	7768415	9993	86689	98,77075	0,12706	1,102195	8,96199E-07	0,001623912	1623,911764	18,89892163

b) Pelet Kompos Ukuran 5x5 mm (Q= 88 cc/menit, h = 100 cm)

Waktu	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N2O (m3)	Massa N2O (gr)	konsentrasi N2O (g/m3)	% RE
		Uap air	N2O	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap Air	N2O				
0	1,180	—	2,641	7693611	0	108793	98,60565	0	1,394352	1,09514E-06	0,001984388	1989,388244	0
1	1,128	2,276	2,634	7256175	10497	95726	98,55723	0,142573	1,300201	9,77534E-07	0,001771292	1771,291608	11,53851
2	1,170	2,269	2,677	7162413	8730	80445	98,77027	0,12039	1,109343	8,40005E-07	0,001522089	1522,08906	23,98413
3	1,162	2,270	2,677	7297098	11049	78728	98,78464	0,149578	1,065782	8,24552E-07	0,001494088	1494,088224	25,38254
4	1,169	2,278	2,686	7305589	12067	67734	98,91948	0,163386	0,917131	7,25603E-07	0,001314793	1314,793413	34,33685
5	1,167	2,127	2,639	6910320	17464	65014	98,82052	0,249747	0,929734	7,0113E-07	0,001270447	1270,446835	36,5516
6	1,109	2,154	2,543	6755716	5036	65463	98,96723	0,073776	0,958998	7,0517E-07	0,001277767	1277,767263	36,186
7	1,105	2,138	2,534	6620532	3725	61867	99,01893	0,055715	0,925301	6,72801E-07	0,001219116	1219,115774	39,11516
8	1,107	2,152	2,534	7151568	3929	67145	99,01595	0,054398	0,929651	7,20308E-07	0,001305198	1305,198096	34,81606
9	1,098	2,140	2,527	6745194	23703	62205	98,7424	0,346986	0,910617	6,75847E-07	0,001224634	1224,633858	38,83958
10	1,100	2,127	2,515	6674485	21006	67736	98,68787	0,310598	1,001534	7,25624E-07	0,001314831	1314,830688	34,33499
11	1,085	2,121	2,506	6711638	5906	77301	98,77545	0,086911	1,137636	8,11706E-07	0,001470811	1470,810593	26,54507
12	1,089	2,072	2,509	6623165	25211	78818	98,4536	0,374769	1,171628	8,25359E-07	0,001495551	1485,550508	25,30951

Lampiran 4. Data Hasil Uji Variasi Kandungan Nutrisi Pelet Kompos

a) Penambahan kandungan air 20% berat pelet kompos ($Q = 88$ cc/menit, $h = 100$ cm, pelet kompos ukuran 5x5 mm)

Waktu	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N2O (m3)	Massa N2O (gr)	konsentrasi N2O (g/m3)	% RE
		Uap air	N2O	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap Air	N2O				
0	1,180	—	2,641	7546857	0	106691	98,63222	0	1,36778	1,07622E-06	0,001950109	1950,108828	0
1	1,090	2,074	2,548	4336836	70798	61653	97,03642	1,584093	1,379489	6,7088E-07	0,001215635	1215,63456	39,28902057
2	1,078	2,062	2,432	4893336	107530	54160	96,80141	2,127183	1,071407	6,03439E-07	0,001093431	1093,431242	45,3920744
3	1,063	2,061	2,438	6649255	185624	73473	96,24952	2,686947	1,063532	7,77253E-07	0,001408382	1408,38153	29,66288973
4	1,064	2,066	2,443	6718476	175813	69660	96,4751	2,524612	1,00029	7,42937E-07	0,001346202	1346,201844	32,76825524
5	1,072	2,053	2,426	4617297	138057	58632	95,91423	2,867826	1,217948	6,43687E-07	0,00116636	1166,360326	41,74986455
6	1,057	2,010	2,416	5869870	191404	63877	95,83225	3,124891	1,042861	6,90892E-07	0,001251895	1251,895398	37,47808901
7	1,064	2,042	2,413	4538992	155944	60913	95,4402	3,278994	1,280802	6,64217E-07	0,001203561	1203,561204	39,89198571
8	1,061	2,045	2,418	5241494	183168	62295	95,52643	3,338244	1,135325	6,76653E-07	0,001226096	1226,095598	38,76657747
9	1,056	2,043	2,417	5658695	157445	58152	96,32981	2,680243	0,989944	6,3937E-07	0,001158538	1158,538078	42,14052174
10	1,055	2,048	2,422	6394130	191814	68358	96,09016	2,882563	1,02728	7,31225E-07	0,00132498	1324,9797	33,82812733
11	1,049	2,044	2,418	6617142	443793	66160	92,84487	6,226841	0,928289	7,1144E-07	0,001289129	1289,12928	35,61856188
12	1,046	2,043	2,419	6505609	187214	70143	96,19461	2,768219	1,037169	7,4729E-07	0,00135409	1354,09016	32,37429855

b) Penambahan kandungan air 40% berat pelet kompos (Q= 88 cc/menit, h = 100 cm, pelet kompos ukuran 5x5 mm)

Waktu	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N2O (m3)	Massa N2O (gr)	konsentrasi N2O (g/m3)	% RE
	Uap air	N2O	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap Air	N2O	Udara				
0	1,180	—	2,641	7653611	0	107811	98,61806	0	1,38194	1,0863E-06	0,001968374	1968,373788	0
1	1,092	2,062	2,426	4091942	42628	34072	98,16007	1,022593	0,817333	4,22645E-07	0,000765833	765,83274	61,75293
2	1,076	2,047	2,414	3937672	71979	40274	97,22826	1,777303	0,994442	4,78467E-07	0,000866983	866,9827217	56,70132
3	1,067	2,041	2,409	4138467	68458	39212	97,46429	1,612246	0,923467	4,68905E-07	0,000849656	849,65586	57,56666
4	1,069	2,045	2,413	4275295	81240	45119	97,12929	1,845674	1,025037	5,22067E-07	0,000945986	945,9856629	52,75577
5	1,066	2,035	2,401	4436366	87874	40978	97,17753	1,924856	0,897613	4,84802E-07	0,000878461	878,461224	56,12806
6	1,057	2,021	2,385	4365302	75289	41715	97,38964	1,679696	0,930666	4,91438E-07	0,000890485	890,4848794	55,52758
7	1,058	2,033	2,384	4146993	56398	42487	97,67104	1,32829	1,000675	4,98387E-07	0,000903077	903,0769851	54,89871
8	1,053	2,015	2,379	4482340	65363	32866	97,85554	1,426957	0,717506	4,11793E-07	0,000746169	746,1686895	62,73499
9	1,050	2,018	2,375	4753311	67457	39003	97,80936	1,388066	0,802573	4,67029E-07	0,000846256	846,2561856	57,73644
10	1,048	2,012	2,376	4678440	68978	27143	97,98682	1,444688	0,568492	3,60287E-07	0,00065284	652,840044	67,39599
11	1,037	2,013	2,378	6261222	84057	32987	98,16496	1,317869	0,51717	4,12879E-07	0,000748136	748,135842	62,63675
12	1,032	2,017	2,379	6472832	13514	33456	99,27959	0,207272	0,513142	4,17103E-07	0,00075579	755,78973	62,2545

c) Penambahan kandungan air 60% berat pelet kompos (Q= 88 cc/menit, h = 100 cm, pelet kompos ukuran 5x5 mm)

Waktu	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N2O (m3)	Massa N2O (gr)	konsentrasi N2O (g/m3)	% RE
		Uap air	N2O	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap Air	N2O				
0	1,180	—	2,641	7645010	0	106324	98,63686	0	1,36314	1,07292E-06	0,001944124	1944,123792	0
1	1,117	2,130	2,526	5414516	377691	24161	93,09102	6,493589	0,415395	3,33448E-07	0,000604208	604,2075495	69,82478673
2	1,103	2,130	2,525	6860644	330680	34698	94,94357	4,576244	0,480187	4,28286E-07	0,000776054	776,0535072	61,24249008
3	1,110	2,132	2,523	5432222	203830	33852	95,808	3,594946	0,59705	4,20669E-07	0,000762253	762,2527457	61,93172497
4	1,118	2,131	2,534	4641653	196566	39071	95,16867	4,030238	0,801089	4,67643E-07	0,000847369	847,3688571	57,68087306
5	1,099	2,126	2,517	6778780	280913	53814	95,29448	3,94901	0,756508	6,00329E-07	0,001087795	1087,795371	45,6735399
6	1,094	2,126	2,519	6961987	266068	48751	95,67367	3,656383	0,669946	5,54756E-07	0,001005218	1005,217872	49,79760895
7	1,089	2,116	2,506	7087202	269920	58070	95,57678	3,640093	0,783122	6,3863E-07	0,001157198	1157,19756	42,2074696
8	1,088	2,111	2,500	6714886	242217	54586	95,76702	3,454478	0,7785	6,07274E-07	0,00110038	1100,380488	45,04501651
9	1,098	2,107	2,492	4958530	169971	42364	95,89362	3,287096	0,819288	4,97279E-07	0,000901069	901,0687714	54,99900262
10	1,087	2,109	2,494	6774654	279708	64705	95,1621	3,928998	0,908899	6,98346E-07	0,001265403	1265,403179	36,80348612
11	1,101	2,106	2,490	4996435	171617	42978	95,8819	3,293346	0,824758	5,02805E-07	0,000911083	911,0833395	54,49885705
12	1,091	2,104	2,490	6109033	191572	51796	96,16888	3,015742	0,815381	5,82167E-07	0,001054886	1054,885827	47,3171018

d) Penambahan kandungan air 70% berat pelet kompos (Q= 88 cc/menit, h = 100 cm, pelet kompos ukuran 5x5 mm)

Waktu	Waktu Retensi			Luas Area			Konsentrasi			Vol. N2O (m3)	Massa N2O (gr)	konsentrasi N2O (g/m3)	% RE
	Uap air	N2O	Udara	Uap air	N2O	Udara	Uap Air	N2O	Udara				
0	1,180	—	2,641	7545068	0	105899	98,61587	0	1,384126	1,06909E-06	0,001937193	1937,192892	0
1	1,104	2,099	2,508	5201074	637974	20261	88,76601	10,88821	0,345783	2,98345E-07	0,0005406	540,600234	73,00145063
2	1,099	2,111	2,510	5982725	406754	30933	93,18288	6,33533	0,481788	3,94395E-07	0,000714644	714,64374	64,30940446
3	1,100	2,118	2,516	6562671	482122	32593	92,72733	6,812145	0,460523	4,09337E-07	0,000741719	741,718644	62,95723499
4	1,105	2,132	2,524	5950228	308212	66964	94,06874	4,872609	1,058654	7,18677E-07	0,001302243	1302,242724	34,96365287
5	1,109	2,142	2,535	7039237	253984	69324	95,60875	3,44967	0,941577	7,39916E-07	0,001340728	1340,727792	33,04163925
6	1,109	2,144	2,535	6581291	238260	65360	95,59007	3,460612	0,949322	7,0424E-07	0,001276083	1276,08288	36,27012259
7	1,106	2,147	2,537	7050838	185644	71469	96,48174	2,540302	0,977959	7,59219E-07	0,001375705	1375,704828	31,29482308
8	1,105	2,148	2,539	7114924	170565	66567	96,77462	2,319959	0,905424	7,15106E-07	0,001295772	1295,771528	35,28683603
9	1,110	2,154	2,545	7134315	168839	70899	96,7489	2,28963	0,961467	7,54092E-07	0,001366415	1366,414704	31,7587886
10	1,111	2,154	2,544	7175361	176060	63165	96,7736	2,374502	0,851899	6,84483E-07	0,001240284	1240,283558	38,05800519
11	1,105	2,147	2,538	7167703	174354	68650	96,7209	2,352737	0,926361	7,33849E-07	0,001329735	1329,734717	33,5906532
12	1,107	2,146	2,535	6904554	190764	63462	96,44875	2,664752	0,886498	6,87162E-07	0,001245137	1245,137091	37,81561103

Lampiran 5. Pengolahan Data Langmuir Model

a) Pelet Kompos Ukuran 5x8 mm ($Q = 88$ cc/menit, $h = 100$ cm)

t (jam)	Luas Area N ₂ O pada t (Le)	Luas Area N ₂ O (diadsorp) Li - Le	Vol. N ₂ O (m ³) (diadsorp) Vi - Ve	Massa N ₂ O (gram) (diadsorp) mi-me	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³) (diadsorp)	Langmuir Model			
						Q _e (g/kg)	1/Q _e (kg/g)	C _e (g/m ³)	C _e /Q _e (kg/m ³)
0	109893	0	1,16000E-07	0,000210192	210,1920	0,4716270580	2,12	2002,3307	4,246E+03
1	101646	8247	1,90224E-07	0,000344685	344,6850	0,7734012902	1,29	1867,8377	2,415E+03
2	93833	16060	2,60539E-07	0,000472097	472,0967	1,0592865695	0,94	1740,4260	1,643E+03
3	100082	9811	2,04297E-07	0,000370186	370,1864	0,8306212107	1,20	1842,3362	2,218E+03
4	73413	36480	4,44324E-07	0,000805115	805,1147	1,8065097120	0,55	1407,4079	7,791E+02
5	88126	21767	3,11905E-07	0,000565172	565,1719	1,2681279097	0,79	1647,3508	1,299E+03
6	69834	40059	4,76535E-07	0,000863481	863,4805	1,9374703816	0,52	1349,0422	6,963E+02
7	64759	45134	5,22208E-07	0,000946241	946,2409	2,1231674371	0,47	1266,2818	5,964E+02
8	63023	46870	5,37830E-07	0,000974548	974,5475	2,1866815750	0,46	1237,9752	5,661E+02
9	64647	45247	5,23221E-07	0,000948076	948,0755	2,1272840095	0,47	1264,4471	5,944E+02
10	81734	28159	3,69431E-07	0,000669409	669,4093	1,5020150861	0,67	1543,1133	1,027E+03
11	84384	25509	3,45582E-07	0,000626194	626,1944	1,4050496811	0,71	1586,3283	1,129E+03
12	86689	23204	3,24840E-07	0,000588611	588,6109	1,3207202405	0,76	1623,9118	1,230E+03

b) Pelet Kompos Ukuran 5x5 mm (Q= 88 cc/menit, h = 100 cm)

t (jam)	Luas Area N2O pada t (Le)	Luas Area N2O (diadsorp) Li - Le	Vol. N2O (m3) (diadsorp) - Vi	Massa N2O (gram) (diadsorp) mi-me	Konsentrasi N2O (g/m3) (diadsorp)	Langmuir Model			
						Qe (g/kg)	1/Qe (kg/g)	Ce (g/m ³)	Ce/Qe (kg/m ³)
0	109893	0	1,16000E-07	0,000210192	210,1920	0,4716270580	2,12	2002,3307	4,246E+03
1	95726	14167	2,43505E-07	0,000441231	441,2311	0,9900305755	1,01	1771,2916	1,789E+03
2	80445	29448	3,81034E-07	0,000690434	690,4336	1,5491891760	0,65	1522,0891	9,825E+02
3	78728	31165	3,96487E-07	0,000718434	718,4344	1,6120172185	0,62	1494,0882	9,268E+02
4	67734	42160	4,95436E-07	0,000897729	897,7293	2,0143174223	0,50	1314,7934	6,527E+02
5	65014	44879	5,19909E-07	0,000942076	942,0758	2,1138219030	0,47	1270,4468	6,010E+02
6	65463	44430	5,15869E-07	0,000934755	934,7554	2,0973963871	0,48	1277,7673	6,092E+02
7	61867	48026	5,48238E-07	0,000993407	993,4069	2,2289981095	0,45	1219,1158	5,469E+02
8	67145	42748	5,00731E-07	0,000907325	907,3246	2,0358473136	0,49	1305,1981	6,411E+02
9	62205	47688	5,45193E-07	0,000987889	987,8888	2,2166166795	0,45	1224,6339	5,525E+02
10	67736	42157	4,95415E-07	0,000897692	897,6920	2,0142337840	0,50	1314,8307	6,528E+02
11	77301	32593	4,09333E-07	0,000741712	741,7121	1,6642473741	0,60	1470,8106	8,838E+02
12	78818	31076	3,95680E-07	0,000716972	716,9722	1,6087361578	0,62	1495,5505	9,296E+02

c) Penambahan kandungan air 20% berat pelet kompos ($Q = 88 \text{ cc/menit}$, $h = 100 \text{ cm}$, pelet kompos ukuran $5 \times 5 \text{ mm}$)

t (jam)	Luas Area N ₂ O pada t (Le)	Luas Area N ₂ O (diadsorp) Li - Le	Vol. N ₂ O (m ³) (diadsorp) Vi - Ve	Massa N ₂ O (gram) (diadsorp) mi-me	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³) (diadsorp)	Langmuir Model			
						Q _e (g/kg)	1/Q _e (kg/g)	C _e (g/m ³)	C _e /Q _e (kg/m ³)
0	109893	0	1,16000E-07	0,000210192	210,1920	0,4716270580	2,12	2002,3307	4,246E+03
1	61653	48240	5,50159E-07	0,000996888	996,8881	2,2368092293	0,45	1215,6346	5,435E+02
2	54160	55733	6,17600E-07	0,001119091	1119,0914	2,5110080170	0,40	1093,4312	4,355E+02
3	73473	36421	4,43787E-07	0,000804141	804,1411	1,8043251843	0,55	1408,3815	7,806E+02
4	69660	40234	4,78102E-07	0,000866321	866,3208	1,9438434456	0,51	1346,2018	6,925E+02
5	58632	51261	5,77352E-07	0,001046162	1046,1623	2,3473703443	0,43	1166,3603	4,969E+02
6	63877	46016	5,30148E-07	0,000960627	960,6273	2,1554474632	0,46	1251,8954	5,808E+02
7	60913	48980	5,56822E-07	0,001008961	1008,9615	2,2638993249	0,44	1203,5612	5,316E+02
8	62295	47598	5,44386E-07	0,000986427	986,4271	2,2133368385	0,45	1226,0956	5,540E+02
9	58152	51741	5,81669E-07	0,001053985	1053,9846	2,3649218407	0,42	1158,5381	4,899E+02
10	68358	41535	4,89814E-07	0,000887543	887,5430	1,9914615154	0,50	1324,9797	6,653E+02
11	66160	43733	5,09599E-07	0,000923393	923,3934	2,0719023890	0,48	1289,1293	6,222E+02
12	70143	39750	4,73749E-07	0,000858433	858,4325	1,9261437090	0,52	1354,0902	7,030E+02

d) Penambahan kandungan air 40% berat pelet kompos (Q= 88 cc/menit, h = 100 cm, pelet kompos ukuran 5x5 mm)

t (jam)	Luas Area N2O pada t (Le)	Luas Area N2O (diadsorp) Li - Le	Vol. N2O (m3) (diadsorp) Vi -Ve	Massa N2O (gram) (diadsorp) mi-me	Konsentrasi N2O (g/m3) (diadsorp)	Langmuir Model			
						Qe (g/kg)	1/Qe (kg/g)	Ce (g/m ³)	Ce/Qe (kg/m ³)
0	109893	0	1,16000E-07	0,000210192	210,1920	0,4716270580	2,12	2002,3307	4,246E+03
1	34072	75822	7,98394E-07	0,001446690	1446,6899	3,2460708047	0,31	765,8327	2,359E+02
2	40274	69619	7,42572E-07	0,001345540	1345,5399	3,0191113186	0,33	866,9827	2,872E+02
3	39212	70682	7,52134E-07	0,001362867	1362,8668	3,0579891866	0,33	849,6559	2,778E+02
4	45119	64775	6,98972E-07	0,001266537	1266,5370	2,8418451777	0,35	945,9857	3,329E+02
5	40978	68915	7,36237E-07	0,001334061	1334,0614	2,9933559509	0,33	878,4612	2,935E+02
6	41715	68178	7,29601E-07	0,001322038	1322,0378	2,9663773730	0,34	890,4849	3,002E+02
7	42487	67406	7,22652E-07	0,001309446	1309,4457	2,9381233111	0,34	903,0770	3,074E+02
8	32866	77027	8,09246E-07	0,001466354	1466,3540	3,2901928373	0,30	746,1687	2,268E+02
9	39003	70890	7,54010E-07	0,001366266	1366,2665	3,0656173477	0,33	846,2562	2,760E+02
10	27143	82750	8,60752E-07	0,001559683	1559,6826	3,4996028744	0,29	652,8400	1,865E+02
11	32987	76907	8,08161E-07	0,001464387	1464,3868	3,2857789570	0,30	748,1358	2,277E+02
12	33456	76437	8,03987E-07	0,001456733	1456,7329	3,2686052268	0,31	755,7897	2,312E+02

e) Penambahan kandungan air 60% berat pelet kompos ($Q = 88 \text{ cc/menit}$, $h = 100 \text{ cm}$, pelet kompos ukuran $5 \times 5 \text{ mm}$)

t (jam)	Luas Area N ₂ O pada t (Le)	Luas Area N ₂ O (diadsorp) Li - Le	Vol. N ₂ O (m ³) (diadsorp) Vi - Ve	Massa N ₂ O (gram) (diadsorp) mi-me	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³) (diadsorp)	Langmuir Model			
						Q _e (g/kg)	1/Q _e (kg/g)	C _e (g/m ³)	C _e /Q _e (kg/m ³)
0	109893	0	1,16000E-07	0,000210192	210,1920	0,4716270580	2,12	2002,3307	4,246E+03
1	24161	85732	8,87591E-07	0,001608315	1608,3151	3,6087240603	0,28	604,2075	1,674E+02
2	34698	75195	7,92753E-07	0,001436469	1436,4692	3,2231375324	0,31	776,0535	2,408E+02
3	33852	76041	8,00370E-07	0,001450270	1450,2699	3,2541035660	0,31	762,2527	2,342E+02
4	39071	70822	7,53396E-07	0,001365154	1365,1538	3,0631207445	0,33	847,3689	2,766E+02
5	53814	56079	6,20710E-07	0,001124727	1124,7273	2,5236537353	0,40	1087,7954	4,310E+02
6	48751	61143	6,66283E-07	0,001207305	1207,3048	2,7089404404	0,37	1005,2179	3,711E+02
7	58070	51823	5,82409E-07	0,001055325	1055,3251	2,3679296830	0,42	1157,1976	4,887E+02
8	54586	55307	6,13765E-07	0,001112142	1112,1422	2,4954153556	0,40	1100,3805	4,410E+02
9	42364	67529	7,23760E-07	0,001311454	1311,4539	2,9426293243	0,34	901,0688	3,062E+02
10	64705	45188	5,22693E-07	0,000947119	947,1195	2,1251388179	0,47	1265,4032	5,954E+02
11	42978	66915	7,18234E-07	0,001301439	1301,4393	2,9201587200	0,34	911,0833	3,120E+02
12	51796	58097	6,38872E-07	0,001157637	1157,6368	2,5974958959	0,38	1054,8858	4,061E+02

f) Penambahan kandungan air 70% berat pelet kompos ($Q = 88$ cc/menit, $h = 100$ cm, pelet kompos ukuran 5×5 mm)

t (jam)	Luas Area N ₂ O pada t (Le)	Luas Area N ₂ O (diadsorp) Li - Le	Vol. N ₂ O (m ³) (diadsorp) Vi - Ve	Massa N ₂ O (gram) (diadsorp) mi-me	Konsentrasi N ₂ O (g/m ³) (diadsorp)	Langmuir Model			
						Q _e (g/kg)	1/Q _e (kg/g)	C _e (g/m ³)	C _e /Q _e (kg/m ³)
0	109893	0	1,16000E-07	0,000210192	210,1920	0,4716270580	2,12	2002,3307	4,246E+03
1	20261	89633	9,22695E-07	0,001671922	1671,9224	3,7514456247	0,27	540,6002	1,441E+02
2	30933	78960	8,26644E-07	0,001497879	1497,8789	3,3609282563	0,30	714,6437	2,126E+02
3	32593	77300	8,11702E-07	0,001470804	1470,8040	3,3001778124	0,30	741,7186	2,248E+02
4	66964	42929	5,02362E-07	0,000910280	910,2799	2,0424785527	0,49	1302,2427	6,376E+02
5	69324	40569	4,81123E-07	0,000871795	871,7949	1,9561260778	0,51	1340,7278	6,854E+02
6	65360	44533	5,16799E-07	0,000936440	936,4398	2,1011757926	0,48	1276,0829	6,073E+02
7	71469	38424	4,61820E-07	0,000836818	836,8178	1,8776448959	0,53	1375,7048	7,327E+02
8	66567	43326	5,05933E-07	0,000916751	916,7511	2,0569985674	0,49	1295,7715	6,299E+02
9	70899	38994	4,66947E-07	0,000846108	846,1080	1,8984899987	0,53	1366,4147	7,197E+02
10	63165	46728	5,36556E-07	0,000972239	972,2391	2,1815020121	0,46	1240,2836	5,685E+02
11	68650	41243	4,87190E-07	0,000882788	882,7880	1,9807922469	0,50	1329,7347	6,713E+02
12	63462	46431	5,33877E-07	0,000967386	967,3856	2,1706116961	0,46	1245,1371	5,736E+02

Lampiran 6. 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	Rata-rata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Rata-rata jumlah (CFU/g)
1,00E-04	221	281	2,81E+06	5,54E+08
1,00E-04	308			
1,00E-04	313			
1,00E-05	212	255	2,55E+07	
1,00E-05	203			
1,00E-05	351			
1,00E-06	456	233	2,33E+08	
1,00E-06	127			
1,00E-06	115			
1,00E-07	259	195	1,95E+09	
1,00E-07	146			
1,00E-07	181			

b. Kompos kering setelah biofiltrasi pada variasi ukuran pelet

Pengenceran	Jumlah Koloni	Rata-rata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Rata-rata jumlah (CFU/g)
1,00E-04	300	242	2,42E+06	7,05E+09
1,00E-04	245			
1,00E-04	180			
1,00E-05	206	162	1,62E+07	
1,00E-05	156			
1,00E-05	124			
1,00E-06	174	132	1,32E+08	
1,00E-06	98			
1,00E-06	123			
1,00E-07	45	47	4,67E+08	
1,00E-07	56			
1,00E-07	39			
1,00E-08	59	79	7,90E+09	
1,00E-08	32			
1,00E-08	67			
1,00E-09	12	20	1,97E+10	
1,00E-09	19			
1,00E-09	28			

c. Kompos variasi penambahan kandungan larutan nutrisi

Pengenceran	Jumlah Koloni	Rata-rata Jumlah Koloni	Jumlah Sel	Rata-rata jumlah (CFU/g)
1,00E-04	250	210	2,10E+06	1,85E+10
1,00E-04	270			
1,00E-04	110			
1,00E-05	160	121	1,21E+07	
1,00E-05	123			
1,00E-05	80			
1,00E-06	74	72	7,20E+07	
1,00E-06	70			
1,00E-06	72			
1,00E-07	350	157	1,57E+09	
1,00E-07	50			
1,00E-07	70			
1,00E-08	80	85	8,50E+09	
1,00E-08	90			
1,00E-08	0			
1,00E-09	51	64	6,37E+10	
1,00E-09	60			
1,00E-09	80			

Lampiran 7. Dokumentasi Eksperimen

Gambar (a). Larutan Nutrisi Sintetik, Gambar (b) Nutrien Agar Untuk TPC



(a)

(b)

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

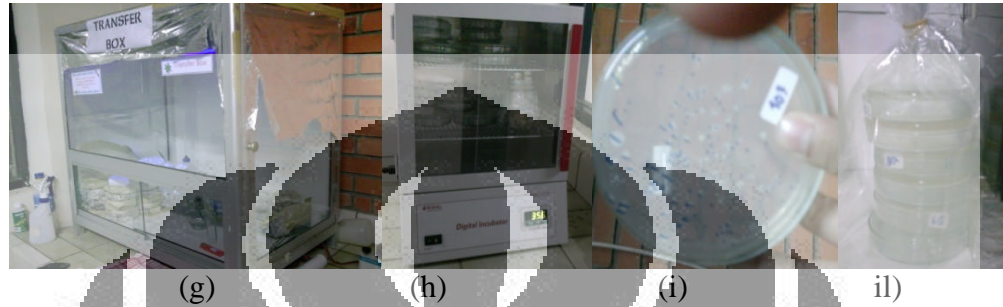


(c)

(d)

(e)

(f)



Keterangan :

a : Larutan nutrisi sintetik

b : Nutrien Agar

c : Cawan petri yang akan disteril di oven

d : Bahan yang akan disteril dengan autoklaf

e : Proses pembuatan nutrient agar sebagai medium TPC

f : Proses sterilisasi dengan autoklaf

g : Transfer box untuk memasukan sampel pada medium dengan kondisi steril dan aseptis

h : TPC yang akan diuji diinkubasi

i : Perhitungan bakteri dengan metode TPC

j : Sterilisasi sampel yang telah dianalisis

