



UNIVERSITAS INDONESIA

**EVALUASI pH AWAL MEDIADALAM BIOFILTRASI N_2O
DENGAN KARBON AKTIF YANG DIINOKULASI
OLEH *Nitrobacter winogradskyi***

SKRIPSI

QURROTA A'YUNIN

0906604344

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK
JULI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**EVALUASI pH AWAL MEDIADALAM BIOFILTRASI N₂O
DENGAN KARBON AKTIF YANG DIINOKULASI
OLEH *Nitrobacter winogradskyi***

SKRIPSI

Diajukan sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

QURROTA A'YUNIN

0906604344

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK
JULI 2012**

LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS

Makalah skripsi ini adalah hasil karya sendiri,
dan semua sumber baik dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Qurrota A'Yunin

NPM : 0906604344

Tanda Tangan :



Tanggal : 4 Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Qurrota A'yunin
NPM : 0906604344
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi :

**EVALUASI pH AWAL MEDIA DALAM BIOFILTRASI N₂O
DENGAN KARBON AKTIF YANG DIINOKULASI
OLEH *Nitrobacter winogradskyi***

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dr. Tania Surya Utami, S.T., M.T.
Penguji I : Ir. Rita Arbianti, M.Si.
Penguji II : Dr. Ir. Dianursanti, M.T.
Penguji III : Dr. Ir. Nelson Saksono, M.T.



Ditetapkan di : Depok, Jawa Barat, Indonesia

Tanggal : 4 Juli 2012

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Puji syukur bagi Allah SWT atas berkah, rahmat dan karunia yang berlimpah, akhirnya saya dapat menyelesaikan laporan skripsi ini tepat pada waktunya. Saya menyadari bahwa akan sangat sulit dalam mengerjakan laporan skripsi ini tanpa bantuan dan bimbingan dari banyak pihak. Oleh karenanya saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ibu Tania Surya Utami, ST., MT selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, pikiran untuk mengarahkan dan membimbing saya dalam penyusunan seminar ini.
2. Ir. Setiadi M.Eng selaku dosen pembimbing akademik yang telah menyediakan waktu dan membantu permasalahan akademik perkuliahan selama ini.
3. Kedua orang tua dan keluarga, atas dukungan dan semangatnya yang tak pernah putus.
4. Para dosen Departemen Teknik Kimia FTUI yang telah memberikan ilmu dan wawasannya.
5. Laili Purnamasari, rekan satu bimbingan dan penelitian yang saling membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Rekan-rekan seperjuangan selama penelitian: Khotib, Ius, Nindya, Fiza, Yongki, Chiya, Gege, Indri, Prima, Ingrid dan Renly atas kebersamaannya.
7. Teman-teman Program Studi Teknologi Bioproses dan Teknik Kimia 2008 atas suasana akademis dan kemahasiswaan yang telah mendukung selama ini.
8. Semua pihak yang telah membantu dan memberikan semangat dalam penyusunan skripsi yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Laporan skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan dan jauh dari sempurna. Untuk itu, saya mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan yang akan datang. Semoga makalah skripsi ini bermanfaat bagi para pembaca dan pendidikan ilmu pengetahuan kedepannya.

Depok, 4 Juli 2012

Qurrota A'Yunin

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

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

Nama : Qurrota A'yunin

NPM : 0906604344

Program Studi : Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

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 :

**Evaluasi pH awal media dalam biofiltrasi N₂O dengan karbon aktif
yang diinokulasi oleh *Nitrobacter winogradskyi***

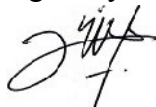
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok, Jawa Barat, Indonesia

Pada tanggal : 4 Juli 2012

Yang menyatakan



(Qurrota A'yunin)

ABSTRAK

Nama : Qurrota A'Yunin
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Evaluasi pH Awal Media dalam Biofiltrasi N₂O pada Karbon Aktif yang Diinokulasi oleh *Nitrobacter winogradskyi*

Gas dinitrogen monoksida (N₂O) merupakan salah satu gas polutan yang berkontribusi besar terhadap pemanasan global dampak gas rumah kaca. Metode biofilter digunakan sebagai salah satu alternatif pengolahan gas buang secara biologis. Penelitian dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi pH awal media terhadap reduksi gas N₂O dan pertumbuhan mikroba dalam media filter. Penelitian ini menggunakan peralatan berskala laboratorium pada proses biofiltrasi gas N₂O oleh mikroorganisme *Nitrobacter winogradskyi* menggunakan media filter berupa karbon aktif. Penelitian dilakukan dengan laju alir N₂O sebesar 88 cc/menit dengan sistem *batch* selama 24 jam. Analisa biofiltrasi dilakukan terhadap efisiensi reduksi gas N₂O menggunakan *Gas Chromatography* (GC). RE (*Removal Efficiency*) paling baik dicapai pada pH awal media 7 sebesar 93,8%. Penghitungan koloni mikroba dilakukan dengan metode TPC (*Total Plate Count*) dan SEM (*Scanning Electron Microscope*). Koloni mikroba paling sedikit berkurang pada pH awal media 7 setelah biofilter dibandingkan variasi pH lainnya. Proses biosorpsi karbon aktif memiliki kemampuan reduksi N₂O yang lebih baik dibandingkan dengan proses adsorpsi. Kemampuan adsorpsi karbon aktif sebagai medium filter dengan dan tanpa adanya bakteri pendegradasi direpresentasikan dengan persamaan *Langmuir* dan *Freundlich*. Performa biofiltrasi dalam mereduksi gas N₂O hasilnya baik dilakukan dengan menggunakan media filter karbon aktif maupun dengan zeolit alam.

Kata kunci :
biofilter, karbon aktif, N₂O, *Nitrobacter winogradskyi*

ABSTRACT

Name : Qurrota A'yunin
Study Program: Chemical Engineering
Title : Evaluation of Initial Medium pH in N₂O Biofiltration on The Activated Carbon inoculated by *Nitrobacetr winogradskyi*

Dinitrogen monoxide gas (N₂O) is one of the pollutant gases tahta contribute greatly to global warming effect greenhouse gases. Biofilter method used as an alternative biological waste gas treatment. This study was conducted to evaluated the effect of variation initial medium pH of N₂O gas reduction and growth of microba in filter medium. This study used a laboratory-scale equipment to process N₂O gas biofiltration use activated carbon as filter medium inoculated by microorganism *N. winogradskyi*. The study was conducted with N₂O flow rate of 88cc/min with a batch system for 24 hours. Biofiltration analysis conducuted on the removal efficiency (RE) of N₂O gas using GC (Gas Chromatography). Biofiltrasi analysis conducted on the efficiency of the reduction of N₂O gas using Gas Chromatography (GC). RE (Removal Efficiency) is best achieved at pH 7 for 93.8% of the initial media. Microbial colony counting was conducted by TPC (Total Plate Count) and SEM (Scanning Electron Microscope). Microbial colonies at least reduced at pH 7 after the initial medium biofilter compared other pH variations. Biosorpsi process of activated carbon has the ability to better N₂O reduction compared with the adsorption process. Adsorption capacity of activated carbon as filter medium with and without degrading bacteria repesented with Langmuir and Freundlich equations. Overall both of biofiltration N₂O gas using activated carbon and natural zeolite, has a good capability as filter medium.

Key word :
activated carbon, biofilter, N₂O, *Nitrobacter winogradskyi*

DAFTAR ISI

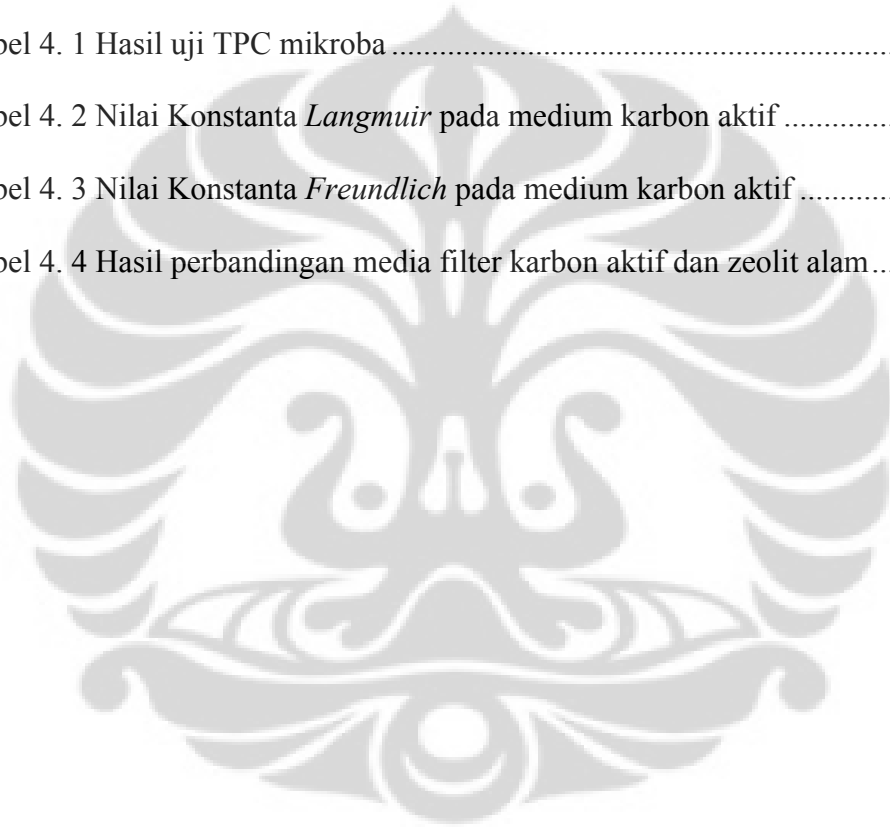
HALAMAN JUDUL	1
HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
BAB 1	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Sistematika Penulisan	5
BAB II	6
TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Gas Dinitrogen Monoksida (N ₂ O).....	6
2.1.1 Karakteristik N ₂ O.....	6
2.1.2 Efek N ₂ O	8
2.2 Teknologi Biofilter.....	9
2.2.1 Prinsip Kerja Biofilter	10
2.2.2 Terminologi Biofilter	11
2.2.3 Parameter Performasi Biofilter	11
2.2.4 Parameter yang Mempengaruhi Kinerja Biofilter.....	12

2.3 Medium Biofilter	18
2.4 Karbon aktif	18
2.4.1 Karakteristik Karbon aktif	19
2.5 Adsorpsi	20
2.5.1 Proses Adsorpsi	20
2.5.2 Adsorpsi Isoterm	21
2.5.3 Isoterm <i>Ferundlich</i>	23
2.6 Mikroorganisme	24
2.6.1 Mikroorganisme dalam Biofilter	26
2.6.2 <i>Nitrobacter Winogradskyi</i>	26
2.7 State of The Art	28
2.7.1 Biofiltrasi dengan Medium Filter Kompos	28
2.7.2 Biofiltrasi dengan Medium Filter Karbon Aktif	29
2.7.3 Biofiltrasi dengan Medium Filter Karbon Aktif dan Kompos	31
2.7.4 Biofiltrasi dengan Medium Filter Lumpur Aktif	32
2.7.5 Biofiltrasi dengan Medium Filter Sintetik	32
BAB 3	35
METODE PENELITIAN	35
3.1 Diagram Alir Penelitian	35
3.2 Alat dan Bahan	37
3.2.1 Alat	37
3.2.2 Bahan	39
3.3 Prosedur Penelitian	39
3.3.1 Preparasi Media Filter	39
3.3.2 Preparasi Kultur Bakteri	39
3.3.3 Kalibrasi Gas N ₂ O	41
3.3.4 Uji Kebocoran Alat Biofiltrasi	41
3.4 Eksperimen Biofiltrasi	42
3.4.1 Variasi pH Awal Media	42
3.4.2 Variasi Tanpa Medium Sintetik	42
3.5 Data Penelitian	43

3.6 Analisa Eksperimen Biofiltrasi	43
3.6.1 Analisa Gas N ₂ O	43
3.6.2 Analisa Perkembangan Bakteri	44
3.7 Variabel Penelitian	45
BAB 4	46
HASIL DAN PEMBAHASAN	46
4.1 Sistem Biofilter	46
4.2 Preparasi Medium Karbon Aktif	47
4.3 Preparasi Kultur Mikroba	48
4.4 Persiapan Eksperimen	48
4.1.1 Uji kebocoran Alat	48
4.1.2 Kalibrasi Luas <i>Peak</i> Gas N ₂ O	49
4.5 Uji Kinerja Biofilter	50
4.5.1 Uji Kinerja Biofilter dengan Media Filter Tanpa Mikroba	51
4.5.2 Pengaruh pH Awal Media Terhadap Efisiensi Reduksi gas N ₂ O	52
4.5.3 Perubahan Suhu Media Selama Proses Biofiltrasi	54
4.5.4 Tingkat Kelembaban pada Medium Filter	56
4.6 Hasil Uji Perkembangan Mikroba	57
4.6.1 Metode TPC (<i>Total Plate Count</i>)	57
4.6.2 Metode SEM (<i>Scanning Electron Microscope</i>)	59
4.7 Pemodelan Hasil Eksperimen	61
4.7.1 Pemodelan <i>Langmuir</i>	61
4.7.2 Pemodelan <i>Freundlich</i>	64
4.8 Perbandingan Hasil Biofiltrasi Gas N ₂ O	66
BAB 5	68
KESIMPULAN	68
DAFTAR PUSTAKA	69

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Karakteristik gas N ₂ O	7
Tabel 2. 2 Efisiensi Penghilangan Minimum, Maximum dan Rata-Rata Biofiltrasi	29
Tabel 3. 1 Rincian Peralatan yang Digunakan dalam Penelitian	38
Tabel 3. 2 Spesifikasi GC (<i>Gas Chromatography</i>).....	43
Tabel 4. 1 Hasil uji TPC mikroba	59
Tabel 4. 2 Nilai Konstanta <i>Langmuir</i> pada medium karbon aktif	63
Tabel 4. 3 Nilai Konstanta <i>Freundlich</i> pada medium karbon aktif	65
Tabel 4. 4 Hasil perbandingan media filter karbon aktif dan zeolit alam.....	66



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Struktur molekul gas dinitrogen monoksida	7
Gambar 2. 2 Perbandingan emisi gas rumah kaca pada hasil pembakaran transportasi (Graham, Rieout, Rosenblatt & Handren 2008).....	8
Gambar 2. 3 Prinsip kerja biofilter(Devinny et al.,2007)	10
Gambar 2. 4 Mekanisme proses adsorpsi	20
Gambar 2. 5 <i>Nitrobacter winogradskyi</i> (W.J. Hickey, 2006)	27
Gambar 2. 6 <i>Mapping State of The Art</i> Bofiltrasi Gas Polutan dengan Media Filter Kompos dan Karbon Aktif.....	34
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian	36
Gambar 3. 2 Diagram Skematik Biofilter	37
Gambar 4. 1 Sistem instalasi peralatan biofilter	46
Gambar 4. 2 Karbon aktif yang sudah dikeringkan	47
Gambar 4. 3 Media <i>nutrient</i> agar	48
Gambar 4. 4 <i>N. winogradskyi</i> pada media <i>nutrient</i> agar setelah inkubasi 24 jam	48
Gambar 4. 5 Grafik Terdeteksi GC pada: (a) Udara bebas dan (b) Gas N ₂ O	49
Gambar 4. 6 Hasil kalibrasi volume gas N ₂ O dalam syringe terhadap luas <i>peak</i>	50
Gambar 4. 7 Efisiensi reduksi biofiltrasi dengan medium filter tanpa mikroba	51
Gambar 4. 8 Profil efisiensi reduksi gas N ₂ O dengan variasi media	52
Gambar 4. 9 Nilai rata-rata efisiensi reduksi gas N ₂ O	53
Gambar 4. 10 perubahan suhu media dalam kolom biofilter dengan variasi media	55
Gambar 4. 11 Profil tingkat kelembaban medium filter dengan variasi media	56
Gambar 4. 12 Hasil uji TPC pada medium sintetik: (a) 0 jam dan (b) 48 jam	58

Gambar 4. 13 Hasil uji TPC pada karbon aktif: (a) sebelum biofiltrasi dan (b) setelah biofiltrasi	58
Gambar 4. 14 Hasil uji SEM karbon aktif	59
Gambar 4. 15 Hasil SEM karbon aktif sebelum biofiltrasi.....	60
Gambar 4. 16 Hasil SEM karbon aktif setelah biofiltrasi	60
Gambar 4. 17 Grafik adsorpsi isotermis <i>Langmuir</i> karbon aktif.....	62
Gambar 4. 18 Grafik adsorpsi <i>Freundlich</i> karbon aktif.....	64



BAB 1

PENDAHULUAN

Pada bab berikut ini akan diuraikan mengenai hal terkait dengan penelitian yang dilakukan, mulai dari latar belakang dilakukannya penelitian, perumusan masalah yang dikaji pada penelitian, tujuan dan batasan masalah penelitian yang akan dibahas dan dikaji, serta sistematika penulisan.

1.1 Latar Belakang Masalah

Akhir-akhir ini masalah lingkungan baru menjadi bahan pembicaraan dimana saja. Pencemaran lingkungan oleh limbah-limbah industri dan isu pemanasan global (*global warming*) merupakan topik yang menarik diperbincangkan. Pemanasan global tidak bisa terlepas dari adanya efek rumah kaca yang disebabkan oleh CO₂, CFC, metana, ozon, dan N₂O di lapisan troposfer yang menyerap radiasi panas matahari yang dipantulkan oleh permukaan bumi, akibatnya panas terperangkap dalam lapisan troposfer dan menimbulkan fenomena pemanasan global. Pemanasan global sendiri akan berakibat pada; pencairan es di kutub, perubahan iklim regional dan global serta perubahan siklus hidup flora dan fauna (Alamenda, 2009).

NO_x terdiri dari 95% nitrogen oksida dan 5% nitrogen dioksida (Yang, 2007). NO_x tersebut dapat berupa NO, N₂O, dan NO₂. Adapun dari ketiga oksida nitrogen tersebut N₂O merupakan jumlah oksida nitrogen terbanyak di atmosfer (Noviani, 2009), yaitu sekitar 320 ppm pada tahun 2005, yang merupakan gas rumah kaca ketiga terbanyak setelah CO₂ (380 ppm) dan CH₄ (1950 ppm) (IPCC, 2007). Meskipun konsentrasinya relatif lebih rendah dibandingkan dengan CO₂, CH₄ dan uap air, tetapi gas N₂O sangat sulit terurai di atmosfer dan memiliki waktu retensi di atmosfer sebesar 170 tahun (Adriaty, 2009). Selain sebagai gas rumah kaca, gas N₂O dapat memberikan dampak tidak langsung terhadap produksi ozon troposferik pada proses pembentukan *smog*. N₂O (*nitrous oxide*) merupakan senyawa antara dalam denitrifikasi yang menyerap sinar ultraviolet dan memainkan peranan penting dalam modifikasi iklim. Dengan meninjau efek negatif yang ditimbulkannya, sangatlah diperlukan adanya penanganan emisi N₂O

di udara. Akan tetapi, N_2O sangat sulit untuk dikumpulkan jika telah terdispersi di udara, sehingga akan lebih baik jika emisi N_2O dicegah terlebih dahulu sebelum terdispersi ke udara (Yang, 2007).

Teknik biofiltrasi merupakan salah satu alternatif yang tepat untuk dikembangkan dalam upaya penyisihan polutan. Teknik ini memanfaatkan kemampuan aktivitas mikroba dalam mendegradasi/mengeliminasi senyawa polutan. Saat ini, penerapannya tidak terbatas hanya pada penurunan bau, namun juga telah dikembangkan menjadi suatu teknik pengendalian pencemaran udara (Ottengraf, 1991). Pengembangan teknik biofiltrasi, memerlukan jenis media serta mikroba yang handal. Pemanfaatan karbon aktif merupakan alternatif yang perlu dikaji lebih jauh. Mikroba dibutuhkan dalam proses biodegradasi polutan, dan biofilter merupakan lingkungan yang baik bagi populasi mikroba. Sistem biofiltrasi yang dikembangkan menggunakan kultur mikroba campuran aerobik yang memiliki kapasitas dan laju biodegradasi yang tinggi (Rakesh Govind, 2009).

Sistem biofilter pada penelitian ini menggunakan karbon aktif sebagai medium filter yang dapat menghilangkan gas polutan yang beracun. Sifat adsorpsi karbon aktif juga tergantung pada luas permukaan internalnya. Daya guna permukaan karbon aktif, yaitu dinding porinya ditentukan oleh ukuran pori dan distribusinya. Aktivitas karbon aktif sebagai adsorben dibentuk salah satunya oleh unsur-unsur mineral dan senyawa kimia yang ditambahkan pada saat aktivasi, yang akan meresap ke dalamnya dan membuka permukaan yang tadinya tertutup oleh komponen-komponen kimia sehingga pori-pori akan semakin besar. Pori-pori yang terbuka ini menyebabkan karbon aktif dapat bertindak sebagai adsorben yang sangat tinggi kualitasnya. Semakin kecil ukuran partikel bahan penyerap berarti luas permukaannya semakin besar akan menghasilkan penyerapan yang lebih baik (Sontheimer *et al.*, 1988), sehingga diharapkan molekul N_2O dapat tertahan dengan baik dan cukup banyak agar lebih efektif pada proses interaksinya dengan mikroorganisme. Ukuran partikel yang lebih kecil juga dapat memperbesar *pressure drop* yang terjadi (Ottengraf *et al.*, 1986).

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 samping, dan dapat mengkonversi campuran organik dan inorganik menjadi pupuk oksidasi yang tidak berbahaya (Cahyani, 2006).

Mikroorganisme yang digunakan pada sistem biofilter ini adalah *Nitrobacter winogradskyi* Winslow *et al.* Bakteri ini dapat tumbuh dalam kondisi baik aerobik dan anaerobik dengan metabolisme nitrat sebagai sumber energi. Bakteri ini tergolong bakteri gram negatif fakultatif *chemolithautotrof* yang mampu mengoksidasi nitrit menjadi nitrat (Starkenburg, 2006). *N. winogradskyi* serta *nitrobacter* lainnya dapat menghilangkan sejumlah nitrogen yang berasal dari limbah buangan melalui penggunaan *biofilm*. Ketika gas polutan melewati media filter, akan diabsorb oleh lapisan *biofilm* yang kemudian didegradasi oleh kultur bakteri yang hidup di dalam lapisan tersebut (Devinny *et al.*, 2007).

Penelitian mengenai biofiltrasi polutan N_2O pernah dilakukan sebelumnya oleh Widyastuti (2008), menggunakan bakteri yang sama dengan penelitian ini tetapi dengan menggunakan media pendukung berupa zeolit alam melalui penentuan kondisi operasi optimum, yaitu tingkat keasamaan (pH) awal media. Hasil penelitian kali ini akan dibandingkan dengan menggunakan media pendukung pada penelitian sebelumnya.

Dalam penelitian ini dikaji mengenai penggunaan media biofilter berupa karbon aktif. Kontaminan yang digunakan adalah gas N_2O menggunakan mikroorganisme berupa *N. winogradskyi* dengan penentuan kondisi operasi optimum, yaitu tingkat keasamaan (pH) awal media.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana tingkat keasaman (pH) awal media yang optimum pada proses degradasi dinitrogen monoksida oleh *N. winogradskyi* dalam media karbon aktif?
2. Bagaimana perkembangan populasi mikroba sebelum dan sesudah mengalami proses biofilter?
3. Bagaimana pemodelan linearisasi *Langmuir* dan *Frundlich* terhadap adsorpsi isoteremis pada proses biofiltrasi?

4. Bagaimana perbandingan hasil biofiltrasi antara yang menggunakan karbon aktif dan medium zeolit?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menentukan tingkat keasamaan (pH) awal media yang optimum pada proses degradasi dinitrogen monoksida oleh *N. winogradskyi* dalam media karbon aktif.
2. Memperoleh hasil dan mengkaji populasi mikroba sebelum dan sesudah mengalami proses biofilter.
3. Mengkaji pemodelan linearisasi *Langmuir* dan *Frumlich* terhadap adsorpsi isothermis pada proses biofiltrasi.
4. Membandingkan hasil biofiltrasi antara yang menggunakan karbon aktif dan medium zeolit.

1.4 Batasan Masalah

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

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Bioproses Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia, Depok.
2. Peralatan biofilter yang digunakan untuk penelitian merupakan peralatan berskala laboratorium dengan tinggi dan diameter luar berturut-turut adalah 120 cm dan 8 cm.
3. Gas NO_x yang digunakan adalah gas N₂O dengan konsentrasi 15000 ppm dalam udara dan laju alir sebesar 88 cc/menit.
4. Bakteri yang digunakan adalah *N. winogradskyi* Winslow et al.
5. Medium filter yang digunakan adalah karbon aktif.

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 dinitrogenmonoksida, biofiltrasi, karbon aktif, bakteri pereduksi nitrogen, pembahasan jurnal-jurnal internasional dan nasional yang terkait dengan biofilter, serta *state of the art* penelitian.

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

Bab ini berisikan tentang hasil dan pembahasan mengenai uji kebocoran alat, kalibrasi gas N₂O, uji kinerja biofilter, uji kemampuan biofilter dalam mendegradasi gas N₂O dengan variasi pH awal media, dan uji perkembangan mikroba.

BAB 5. KESIMPULAN

Bab ini berisikan kesimpulan dari analisa hasil dan pembahasan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

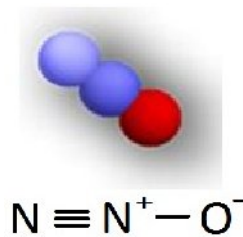
Pada bab ini akan diuraikan pengertian dan penjelasan mengenai tinjauan pustaka dan literatur yang terkait dengan penelitian yang dilakukan, serta *mappingstate of the art* dari penelitian sejenis yang pernah dilakukan sebelumnya.

2.1 Gas Dinitrogen Monoksida (N₂O)

Hasil pembakaran tidak sempurna ataupun produk samping dari pembakaran bahan bakar kendaraan bermotor merupakan salah satu penyebab terbentuknya gas NO_x, yang mana gas ini merupakan gas rumah kaca. NO_x tersebut dapat berupa NO, N₂O dan NO₂. Adapun dari ketiga oksida nitrogen tersebut, N₂O merupakan jumlah oksida nitrogen terbanyak di atmosfer (Noviani, 2009). N₂O sangat sulit untuk dikumpulkan jika telah terdispersi di udara, sehingga akan lebih baik jika emisi N₂O dicegah terlebih dahulu sebelum terdispersi ke udara (Yang, 2007).

2.1.1 Karakteristik N₂O

Gas dinitrogen monoksida umumnya dikenal sebagai gas ketawa adalah senyawa kimia dengan rumus kimia N₂O yang biasa digunakan sebagai senyawa anestetik di dalam dunia kedokteran. Gas N₂O disebut gas ketawa atau *laughing gas* karena efek euforia atau ketidakpekaan terhadap rasa sakit yang ditimbulkan ketika menghirup udara tersebut. Kandungan gas yang dipakai adalah 50-100 ppm yang merupakan ambang batas standar eksposur gas. Pada suhu tinggi, N₂O memiliki sifat oksidator sekuat oksigen, sehingga dipakai dalam pembakaran roket dan motor balap untuk meningkatkan tenaga kerja mesin. Sumber utama terbentuknya gas N₂O adalah adanya proses mikrobiologi. Berikut ini merupakan gambar struktur gas dinitrogen monoksida.



Gambar 2.1 Struktur molekul gas dinitrogen monoksida
(Sumber :<http://antoine.frostburg.edu>)

N_2O memiliki ciri-ciri fisik sebagai suatu gas tidak berwarna, memiliki aroma dan rasa manis, tidak mudah terbakar, dan bereaksi dengan ozon, oksigen, dan hidrokarbon yang ada di udara. Sedangkan berdasarkan sifat kimianya, gas ini memiliki struktur molekul linear dan mempunyai momen dipole sebesar 0,166D. Konsentrasi N_2O berasal dari sumber alam. Berikut ini adalah tabel yang berisi karakteristik gas dinitrogen monoksida.

Tabel 2.1 Karakteristik gas N_2O

Sifat	
Rumus Molekul	N_2O
Wujud	<i>Colourless</i> (Tidak Berwarna), memiliki bau dan rasa yang manis.
Masa Molar	44,0128 g/mol
Densitas	1,875 kg/m ³ (pada 1 bar)
Titik Didih	185 K, -88.48°C, -127°F
Struktur	
Bentuk Molekul	Linear
Momen Dipol	0.166 D

Sumber :Medical Gas Data Sheet (MDGS)

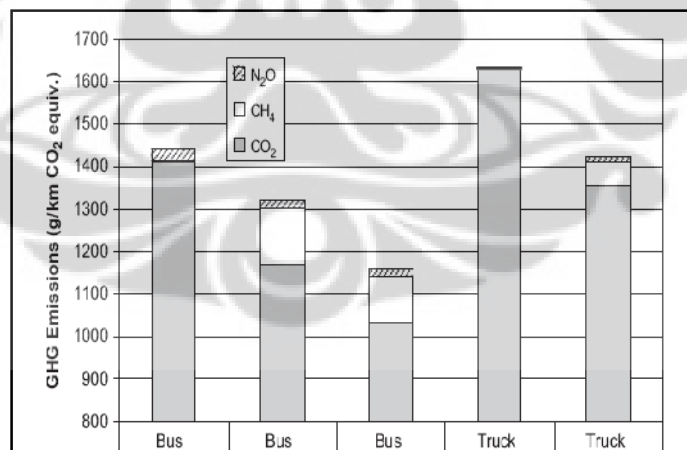
Kegiatan pertanian seperti penanganan limbah binatang dan penyuburan tanah dapat memicu bakteri untuk memproduksi N_2O lebih banyak. Oleh sebab itu, N_2O banyak diemisikan oleh bakteri pada tanah. Sumbangan gas rumah kaca dari industri peternakan (CO_2 , NH_4 , N_2O) diketahui 18% lebih besar dari emisi yang dikeluarkan oleh seluruh model transportasi di dunia (13%). Menurut U.N. News Centre beternak menghasilkan lebih banyak gas rumah kaca daripada mengendarai mobil. Sektor peternakan diketahui menghasilkan 65% emisi N_2O ,

sementara sektor perindustrian menghasilkan 17% emisi N_2O . Hal ini dapat pula terlihat pada produksi nilon dan asam nitrat serta pembakaran bahan bakar pada mesin pembakaran internal.

2.1.2 Efek N_2O

Gas N_2O merupakan salah satu gas yang berkontribusi besar terhadap pemanasan global dampak gas rumah kaca. 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 karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dinitrogen monoksida (N_2O).

Gas N_2O sangat sulit terurai di atmosfer dan diperkirakan mempunyai waktu tinggal di atmosfer sekitar 170 tahun. Dampak gas rumah kaca terhadap pemanasan global sangat bervariasi. N_2O memiliki potensi penyebab gas rumah kaca 310 kali lipat dibandingkan CO_2 dimana sebagian besar gas polutan N_2O berasal dari hasil pembakaran (Ashok Pandey, 2004). Berikut ini dapat dilihat polusi gas rumah kaca yang dihasilkan dari pembakaran pada alat transportasi berdasarkan GHG (*Green House Gas*) dengan tolak ukur CO_2 .



Gambar 2.2 Perbandingan emisi gas rumah kaca pada hasil pembakaran transportasi (Graham, Rieout, Rosenblatt & Handren 2008)

Pembakaran bahan bakar fosil besar-besaran seperti batu bara dan minyak bumi melepaskan kadar nitrogen oksida yang tinggi. Jika gas N_2O mencapai stratosfer, maka gas ini akan membantu merusak lapisan ozon, sehingga

menghasilkan tingkat radiasi UV yang lebih tinggi dan resiko kanker kulit serta katarak yang meningkat.

Selain N_2O , gas nitrogen oksida yang lain juga memberikan dampak terhadap pemanasan global secara tidak langsung melalui kontribusi terhadap produksi ozon troposferik pada proses pembentukan *smog*. Peran nitrogen amat penting dalam siklus unsur untuk keseimbangan alam. Sekitar 78% udara terdiri dari nitrogen dan 20% volume adalah oksigen.

2.2 Teknologi Biofilter

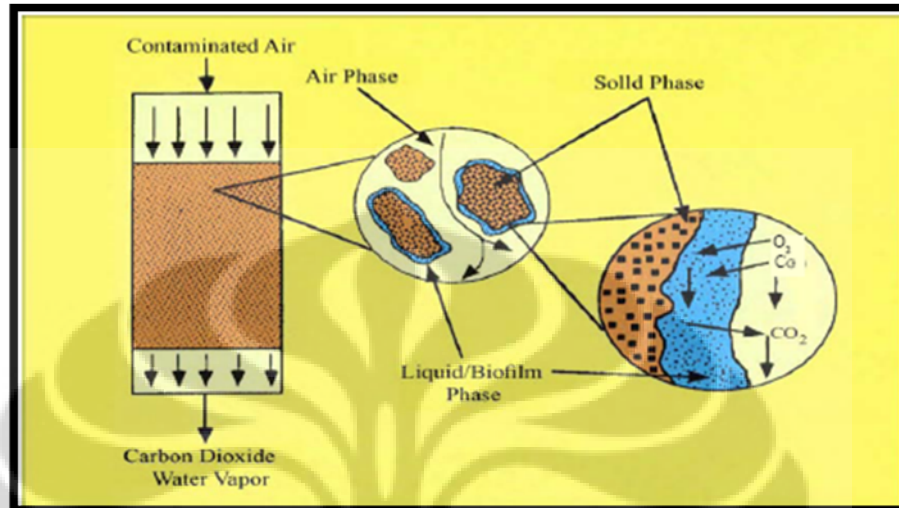
Dengan berkembangnya perhatian mengenai emisi gas buang sebagai salah satu hasil oleh proses perlakuan panas dan meningkatnya protes masyarakat mengenai emisi bau dari pengolahan air limbah, industri pabrik, dan juga fasilitas pengolahan limbah padat, semakin mendesak keberadaan teknologi yang ramah 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).

Biofilter dapat didefinisikan sebagai reaktor biokimia *fixed-bed* di mana terdapat mikroorganisme pada lapisan permukaan medium filter untuk mengkonsumsi udara yang terserap pada lapisan biofilm tersebut (Linda. M, 2010). Biofilter merupakan proses yang ekonomis, efisiensi yang tinggi serta ramah lingkungan (Wani *et al.*, 2007).

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).

2.2.1 Prinsip Kerja Biofilter

Ketika gas polutan melewati media filter, akan diadsorb oleh lapisan *biofilm* yang kemudian didegradasi oleh kultur bakteri yang hidup didalam lapisan tersebut (Devinny et al.,2007). Untuk lebih jelas dalam memahami proses dalam biofilter, dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.3 Prinsip kerja biofilter(Devinny et al.,2007)

Dari Gambar 2.3 di atas terlihat bahwa ketika polutan udara dilewatkan di dalam medium filter, maka terjadi proses adsorpsi pada lapisan *biofilm*. Pada proses ini terjadi kontak antara fasa gas sebagai kontaminan, fasa cair dan *biofilm* sebagai permukaan medium filter dan fasa padat sebagai partikel padatan medium filter. Transformasi kontaminan dari fasa gas ke air dan padatan pada partikel medium 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. Ketika kontaminan telah mencapai daerah *biofilm* pada medium filter yang digunakan, maka akan terjadi proses degradasi secara maksimum dalam mereduksi konsentrasi kontaminan tersebut.

Total jumlah rasio kontaminan pada lapisan air dan padatan medium mempengaruhi waktu tinggal kontaminan dalam biofilter. Jenis kontaminan yang akan direduksi dengan teknologi biofilter juga berpengaruh terhadap

efisiensi reduksi. Hal ini dikarenakan daya tarik kontaminan pada air, medium, dan bahan organik pada medium filter beragam dan berpengaruh terhadap daya adsorpsi dan absorpsi.

2.2.2 Terminologi Biofilter

Mekanisme biofiltrasi berkaitan dengan beberapa hal, antara lain seperti proses kimia, mikrobiologi, fisika, matematika, dan banyak terminologi lainnya. Terminologi yang mendeskripsikan biofiltrasi dengan menggunakan *Loading* massa (Indrani Datta, D. Grant Allen, 2005). Laju *loading* massa (baik permukaan maupun volumetrik) adalah massa udara terkontaminasi yang memasuki biofilter setiap unit area atau volum pada medium filter per satuan waktu. Jika aliran tetap konstan selama berada dalam kolom, *loading* massa sepanjang panjang kolom medium filter akan menurun sebagai penanda udara kontaminan telah tereduksi. *Loading* massa secara menyeluruh pada sebuah sistem dapat dirumuskan pada persamaan berikut:

$$\text{Massa Loading (permukaan)} = \frac{Q \cdot C}{A} \quad (2.1)$$

$$\text{Massa Loading (Volumetric)} = \frac{Q \cdot C}{V_f} \quad (2.2)$$

dengan: Q = Laju alir kontaminan (m^3/s)
 C = konsentrasi inlet (g/m^3)
 V_f = Volum kolom biofilter (m^3)

2.2.3 Parameter Performasi Biofilter

Kinerja dari suatu biofilter dapat ditentukan melalui penentuan karakteristik performansi biofilter. Parameter yang berpengaruh, antara lain Efisiensi Reduksi/ *Removal Efficiency* (RE) (Devinny *et al.*, 1999). Efisiensi reduksi pada biofiltrasi digunakan untuk mendeskripsikan hasil kerja suatu biofilter. RE adalah fraksi kontaminan yang dapat direduksi oleh biofilter dan dapat ditinjau sebagai suatu persentase.

$$RE = \left(\frac{C_i - C_o}{C_i} \right) \times 100\% \quad (2.3)$$

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

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 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 polutan (efisiensi degradasi) dalam waktu yang lama. Rasio degradasi gas polutan 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 gas polutan yang tinggi, kurangnya humidifikasi dan masa tidak terpakainya biofilter akibat fluktuasi proses produksi pada industri.

2.2.4 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 & 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. Dalam metode biofilter, pemilihan medium filter sebagai tempat hidup mikroorganisme merupakan hal sangat penting untuk mendukung kehidupan mikroorganisme (Irwan. W, 2010).

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 metabolismenya. 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, 2001). 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 (Irwan.W, 2010).

c. Suhu

Suhu pengoperasian merupakan salah satu variabel yang paling penting dalam menentukan laju pertumbuhan mikrobial dan jenis spesies dalam komunitas mikrobial. Suhu operasi ini biasanya oleh peristiwa kimia, fisika dan biologi. 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. 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).

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 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 (Irwan. W, 2010).

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 (Irwan. W, 2010).

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 sel 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. Nutrien utama penting lainnya adalah fosfor, potasium, sulfur, magnesium, kalsium, sodium, dan besi. (Irwan. W, 2010).

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% (Irwan. W, 2010).

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 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, *actinomyces* 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).

2.3 Medium Biofilter

Pemilihan bahan pengisi kolom biofilter sebagai medium untuk hidup dan pertumbuhan mikroorganisme merupakan hal yang sangat penting untuk mendukung kehidupan dari mikroorganisme yang digunakan. Material yang dapat digunakan sebagai bahan pengisian kolom biofilter harus mampu menjadi medium dimana mikroorganisme tumbuh, memiliki luas permukaan yang tinggi, daya serap air yang tinggi (Elias et al., 2002). Mikroorganisme akan terimmobilisasi secara alami ataupun buatan di dalam bahan pengisian kolom untuk selanjutnya membentuk lapisan tipis *biofilm* atau *biolayer*.

Proses inokulasi pada medium filter dengan kultur spesifik diketahui dapat mendegradasi kontaminan tertentu, maka waktu adaptasi dapat berkurang menjadi hanya beberapa hari. Ciri-ciri medium filter yang baik (Rakesh Govind, 2010) :

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 inchi dari air.
4. Memiliki permukaan 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.

2.4 Karbon aktif

Karbon aktif umumnya dibuat dengan dekomposisi termal dari material diikuti oleh aktivasi dengan steam atau CO₂ pada temperature elevasi (700-1100⁰C). Struktur karbon aktif terdiri atas mikrokristal dasar graphit, tetapi mikro

kristal ini berpotongan bersama secara acak dan permukaan antar kristalnya berbentuk mikroskopis (Figueredo, 1986).

2.4.1 Karakteristik Karbon aktif

Karakteristik fisik dari partikel karbon aktif dalam *bed* sangat penting untuk tujuan desain dan operasional. Beberapa karakteristik fisik dan partikel karbon aktif antara lain : ukuran partikel, densitas partikel, porositas, luas permukaan eksternal dan densitas filter. Karakteristik ini sangat berpengaruh dalam menentukan transfer massa internal dan eksternal, kapasitas adsorpsi dan transport karbon untuk reaktivitas. Partikel karbon terdiri dari material karbon dan pori intrapartikel.

Pori pada karbon dapat meningkat dengan adanya proses aktivasi dimana sebagian karbon akan terlepas dari lapisan gravit pada struktur kristalnya. Luas permukaan dalam pori jauh lebih besar daripada permukaan geometri dari partikel karbon itu sendiri (Reza. E, 2002). Ukuran pori karbon aktif dibedakan menjadi tiga, yaitu micropore (lebih kecil dari 20 Å), mesopore (diantara 20 sampai 500 Å) dan macropore (lebih besar dari 500 Å) (Khan, 2003). Diantara ketiga jenis pori, micropore merupakan pori-pori yang paling penting dari proses adsorpsi (penentu kapasitas adsorpsi karbon aktif) karena pori ini memiliki luas permukaan yang sangat besar. Sedangkan mesopore dan macropore memungkinkan molekul adsorbat dapat masuk ke micropore. Volume pori atau luas permukaan karbon aktif dapat berbeda satu dengan lainnya tergantung bahan baku, metode aktivasi dan tingkat aktivasi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa semakin besar volume pori maka kapasitas adsorpsi akan semakin besar, seperti pada percobaan yang dilakukan oleh Holzel dan Sontheimer pada tahun 1979, dengan menggunakan 9 jenis karbon aktif yang berbeda (Sontheimer *et al.*, 1988).

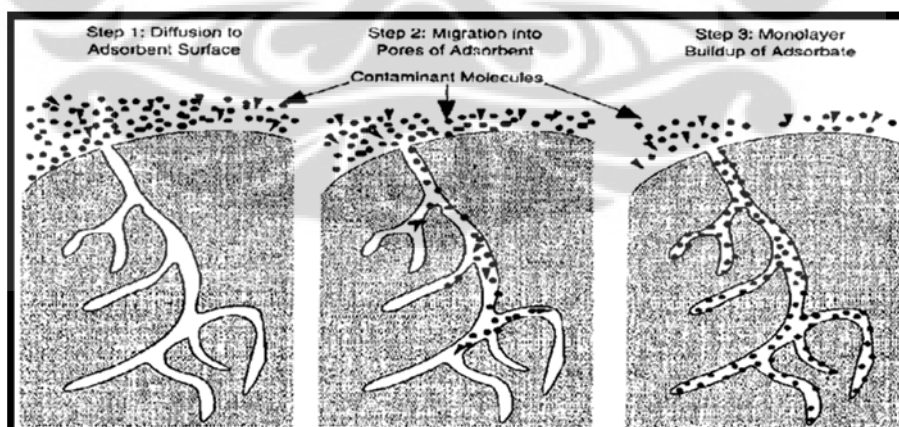
Beberapa penelitian menunjukkan adanya hubungan antara luas permukaan dengan kapasitas adsorpsi. Dengan semakin besarnya luas permukaan maka kemampuan adsorpsi akan semakin besar pula. Juhola adalah salah satu peneliti yang menentukan hal tersebut pada tahun 1975. Juhola menunjukkan peningkatan permukaan dari 8 jenis karbon aktif yang berbeda memberikan peningkatan kapasitas adsorpsi iodine (Sontheimer *et al.*, 1988).

2.5 Adsorpsi

2.5.1 Proses Adsorpsi

Adsorpsi adalah peristiwa terjerapnya suatu zat padat atau cair (molekul atau ion) yang kontak dengan permukaan adsorbent lainnya. Proses ini menghasilkan akumulasi konsentrasi zat tertentu di permukaan dalam waktu tertentu. Mekanisme penyerapan tersebut dapat dibedakan menjadi dua yaitu, secara fisika (*physical adsorption*) dan secara kimia (*chemisorption*). Pada proses *physical adsorption* gaya yang mengikat adsorbat oleh adsorben adalah gaya-gaya van der Waals. Molekul yang terikat sangat lemah dan energi yang dilepaskan pada adsorpsi fisika relatif rendah sekitar 20 kJ/mol (Castellan, 1982). Sedangkan pada proses *chemisorption*, interaksi adsorbat dengan adsorben melalui pembentukan ikatan kimia. *Chemosorption* terjadi dengan diawali dengan adsorpsi fisik, yaitu partikel-partikel adsorbat mendekat ke permukaan adsorben melalui gaya van der Waals atau melalui ikatan hidrogen, kemudian diikuti dengan adsorpsi kimia. Partikel mendekat pada permukaan dengan membentuk ikatan kimia (biasanya ikatan kovalen), dan cenderung mencari tempat yang memaksimalkan bilangan koordinasi dengan substrat (Raisuli.R.F., 2009).

Mekanisme terjadinya adsorpsi dapat dilihat dari gambar berikut ini :



Gambar 2.4 Mekanisme proses adsorpsi

Mekanisme terjadinya adsorpsi dibagi menjadi tiga langkah, yaitu (Gede H, Cahyana, 2009) :

1. *Makrotransport* : perpindahan zat kontaminan (disebut juga adsorbat atau zat yang diadsorpsi), di dalam air menuju permukaan adsorben.

2. *Mikrotransport* : perpindahan adsorbat menuju pori-pori atau jaringan di dalam adsorban.
3. *Sorpsi* : pelekatan zat adsorbat ke dinding pori-pori atau jaringan pembuluh kapiler mikroskopis.

2.5.2 Adsorpsi Isoterm

Adsorpsi isoterm menunjukkan hubungan antara adsorbat (zat yang diadsorpsi/diserap) di adsorben (permukaan tempat terjadinya penyerapan) dengan kesetimbangan tekanan atau konsentrasi pada suhu yang tetap / konstan. Isoterm adsorpsi dibuat untuk menjelaskan bentuk interaksi yang terjadi antara gas N₂O dengan sorben. Berikut dua jenis adsorpsi isoterm yang digunakan untuk mengkaji hasil penelitian.

1. Isoterm *Langmuir*

Persamaan *Langmuir* merupakan persamaan yang menghubungkan antara konsentrasi zat yang diserap oleh adsorben dengan konsentrasi zat adsorbat di fasa cair atau gas disekelilingnya pada keadaan setimbang dan pada suatu suhu. Isoterm *Langmuir* berlaku pada kondisi adsorpsi yang terjadi pada satu lapisan (*monolayer*). Persamaan *Langmuir* tidak dapat digunakan untuk campuran yang terdiri lebih dari satu komponen, hanya dapat digunakan larutan tunggal yang homogen.

Persamaan *Langmuir* dapat ditulis sebagai berikut (Lin et.al., 2004):

$$q_e = \frac{v}{m} (C_0 - C_t) \quad (2.4)$$

Dimana : q_e = Konsentrasi ekuilibrium pada adsorben (g/kg)

C_0 = Konsentrasi inlet gas N₂O (g/m³)

C_t = Konsentrasi gas N₂O pada waktu t (g/m³)

v = Volum pack bed pada kolom biofilter (m³)

m = Massa Adsorben yang dipakai

Persamaan gas ideal digunakan pada kondisi isothermal dan isovolum, dimana perubahan mol sebanding dengan perubahan tekanan dan perubahan massa per volum sampel. Dikarenakan dalam adsorpsi isotermis *Langmuir* ini

konsentrasi 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)

$$m = n \times Mr_{N_2O}$$

$$m_{N_2O} = n_{N_2O} \times Mr_{N_2O} \quad \text{dengan, } C_e = \frac{m_{N_2O}}{V}$$

$$\text{sehingga, } C_e = \frac{n_{N_2O} \times Mr_{N_2O}}{V} \quad (2.5)$$

Persamaan (2.5) digunakan jika data N_2O teradsorp diperoleh dalam satuan mol. Dengan mengadaptasi rumus (2.4) dan (2.5), persamaan laju adsorpsi dan desorpsi untuk persamaan biosorpsi N_2O ke permukaan *biofilm* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\text{Laju adsorpsi } N_2O = k_1 C_v P_{N_2O} = k_1 C_v C_e$$

$$\text{Laju desorpsi } N_2O = k_{-1} C_{N_2O.s} = k_{-1} q_e$$

Dimana: C_v = total masa *biofilm* yang dapat mengadsorp.

Dengan demikian, persamaan laju reaksi pada permukaan *biofilm* medium karbon aktif dituliskan sebagai berikut:

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

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

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

$$\text{maka, } r_{AD} = k_1 \left(C_v C_e - \frac{q_e}{K_L} \right) \quad (2.6)$$

Dimana: K_L = Konstanta *Langmuir* (m^3/g)

Pada kondisi setimbang adsorpsi dan desorpsi N_2O , laju kesetimbangannya adalah sama, maka persamaan (2.9) menjadi sebagai berikut:

$$\text{karena, } r_{AD} = 0$$

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

dengan mengasumsikan bahwa gas N_2O merupakan satu-satunya gas yang teradsorp ke lapisan permukaan karbon aktif, dapat dituliskan sebagai berikut:

$$q_m = q_e + C_v$$

Dimana: q_m = kapasitas penyerapan permukaan

Maka persamaan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 k_1 C_v C_e &= k_1 \frac{q_e}{k_L} \\
 (q_m - q_e) C_e &= \frac{q_e}{k_L} \\
 q_e &= (q_m - q_e) C_e k_L \\
 q_e &= q_m C_e k_L - q_e C_e k_L \\
 q_e + q_e C_e k_L &= q_m C_e k_L \\
 q_e (1 + C_e k_L) &= q_m C_e k_L \\
 \frac{q_e}{C_e} &= \frac{q_m k_L}{1 + C_e k_L} \\
 \frac{C_e}{q_e} &= \frac{1 + C_e k_L}{q_m k_L} \\
 \frac{C_e}{q_e} &= \frac{1}{q_m k_L} + \frac{C_e}{q_m} \tag{2.7}
 \end{aligned}$$

Kemudian plot C_e/q_e sebagai sumbu Y dan C_e sebagai sumbu X, maka akan didapat grafik linear dan slope = $1/q_m$ dan garis ini akan memotong sumbu Y pada $1/q_m k_L$. Jadi jumlah molekul gas yang diperlukan untuk menutupi seluruh permukaan padatan dapat dihitung. Bila diameter molekul adsorbat diketahui dan dianggap molekul-molekul tersusun rapat pada permukaan, maka luas permukaan padatan tersebut dapat diprediksi.

2. Isoterm *Ferundlich*

Isoterm *Freundlich* merupakan korelasi empirikal yang baik, khususnya untuk kesetimbangan dalam campuran dan banyak diaplikasikan untuk pembuatan desain. Persamaan *Freundlich* biasanya digunakan sebagai pendekatan saja karena persamaan ini tidak dapat digunakan untuk gas bertekanan tinggi karena kurva yang dihasilkan akan jauh dari linear dan akan venderung terbentuk *monolayer*. Diasumsikan bahwa proses adsorpsi terjadi pada permukaan yang heterogen dan kemampuan adsorpsi berhubungan dengan konsentrasi adsorbat pada saat setimbang (Kaili Lin, 2009). Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$y = K_f P^{\frac{1}{n}} \tag{2.8}$$

Dimana: q_e = berat/volum massa gas yang teradsorpsi tiap satuan luas
 massa adsorben (mg/g)
 P = Tekanan saat kesetimbangan (atm)
 K_f = Konstanta empiris yang bergantung pada keadaan
 adsorben dan adsorbat pada suhu yang diberikan

Dari persamaan ideal berikut :

$$PV = nRT$$

$$P = \frac{n}{V}RT$$

$$P = C_e RT \quad (2.9)$$

Dimana : C_e = Konsentrasi gas N_2O outlet (g/m^3)

Dari persamaan (2.9) dapat dilihat bahwa $P \propto C_e$, maka persamaan (2.8) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.10)$$

Jika persamaan (2.10) kedua sisinya dikalikan dengan logaritma, maka dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (2.11)$$

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e$$

Kemudian diplot grafiknya dengan $\log C_e$ sebagai sumbu X dan $\log q_e$ sebagai sumbu Y. Persamaan ini paling sesuai untuk gas yang bertekanan rendah, pada tekanan tinggi kurva jauh dari garis lurus. Ini menunjukkan persamaan ini tidak sesuai digunakan untuk gas bertekanan tinggi karena pada tekanan tinggi akan cenderung terbentuk monolayer.

2.6 Mikroorganisme

Proses biodegradasi ditentukan oleh mikroorganisme yang berperan penting dalam siklus nutrisi di planet bumi ini. Untuk meningkatkan proses biodegradasi perlu diketahui kemampuan mikroorganisme dalam mengubah atau mencerna pengotor organik. Berikut beberapa pendapat dari observasi mikroorganisme baik di alam maupun dilaboratorium (Singh *et al.*, 2004):

1. Dalam keadaan untuk bertahan hidup, maka nutrisi yang ada akan terbatas. Sebagai contoh mikroba yang ada di lingkungan tanah memiliki nutrisi

karbon yang terbatas dibandingkan nutrisi lain seperti nitrogen, fosfor, sulfur dan metal untuk membentuk struktur sel maupun menghasilkan energi. Jadi jika mikroorganisme ini dikenalkan dengan sumber karbon lain, yaitu dari pengotor organik, sel akan mampu mengekstrak karbon dari molekul senyawa organik untuk bertahan hidup.

2. Pengotor organik dapat memberikan tekanan pada sel dan memodifikasi enzim spesifik yang dapat digunakan untuk mengubah sifat-sifat pengotor.
3. Proses biodegradasi dapat berubah-ubah secara informal dan tidak tetap karena sistem enzim yang dapat mengizinkan organisme mendegradasi pengotor yang bervariasi. Itulah sebabnya mengapa proses biodegradasi tidak dapat dimengerti.

Ada beberapa jenis mikroorganisme yang istimewa karena dapat hidup di lingkungan tertentu dimana organisme lain belum tentu dapat hidup. Mikroorganisme yang dapat digunakan dalam proses biodegradasi adalah mikroorganisme yang memiliki kemampuan untuk hidup di lingkungan dengan kandungan hidrokarbon yang cukup tinggi. Ia justru membutuhkan komponen karbon tersebut sebagai sumber energi untuk mendukung fungsi metabolismenya (pertumbuhan dan reproduksi) (Singh et al., 2004).

Berdasarkan sumber karbonnya, mikroorganisme dapat diklasifikasikan menjadi : mikroorganisme yang menggunakan komponen karbon organik sebagai sumber karbonnya (heterotrop) dan mikroorganisme yang menggunakan komponen karbon organik, seperti CO₂ sebagai sumber karbonnya (autotrop). Sedangkan berdasarkan jenis penggunaan *electron acceptor*, mikroorganisme dapat diklasifikasikan menjadi :

1. Mikroorganisme yang menggunakan oksigen sebagai *electron acceptor* (aerob)
2. Mikroorganisme yang menggunakan komponen lain selain oksigen (nitrat, sulfat) sebagai *electron acceptor* (anaerob)
3. Fluktuatif, yaitu mikroorganisme yang dapat menggunakan baik oksigen maupun komponen lain sebagai *electron acceptor*-nya.

2.6.1 Mikroorganisme dalam 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 (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 masuk dan medium filter yang digunakan. Efisiensi dalam proses biofilter umumnya ditingkatkan oleh pertumbuhan mikroorganisme yang aktif saat fase adaptasi.

2.6.2 *Nitrobacter Winogradskyi*

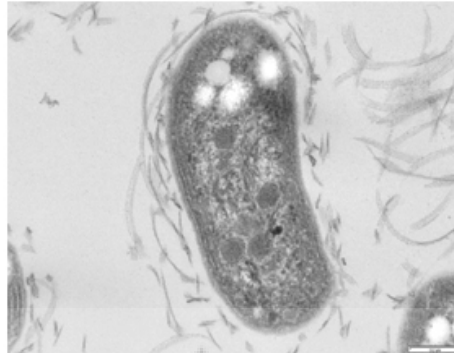
Pengoksidasi nitrit *lithotrophic* adalah bakteri gram negatif yang dapat menggunakan nitrit sebagai sumber energi dan CO₂ sebagai sumber utama karbon. Beberapa bakteri tersebut dapat tumbuh secara *mixotrophical*. *Nitrobacter* dapat tumbuh secara anaerob dengan mereduksi nitrat (Freitag *et al.*, 1987). Pengoksidasi nitrit adalah kelompok berbentuk batang, *coccus*, dan *spirilla*. Sejarahnya, klasifikasi gen berdasarkan bentuk sel dan pengaturan membrane intrasitoplasma, dan taksonomi berdasarkan hasil penemuan Segie dan Helene Winogradsky, 1892 (Waston *et al.*, 1989, Bock *et al.*, 1992).

Dalam siklus nitrogen di bumi, nitrifikasi dengan mikroba adalah proses yang sangat penting, baik dari sudut ekologi, dan fisiologi dan biokimia bakteri. Hampir semua penelitian biokimia terhadap nitrifikasi mikroba difokuskan kepada salah satunya *Nitrobacter winogradskyi* sebagai pengoksidasi nitrit (Wood, P. M., 1998).

Bakteri pengoksidasi nitrit telah tersedia di alam selama lebih dari satu abad, namun studi rinci pada tingkat molekuler masih langka. Sampai saat ini, penelitian tentang *N. winogradskyi* telah difokuskan terutama pada deskripsi fisiologi, yang dalam kebanyakan kasus terbatas pada protein yang terlibat dalam transpor elektron, oksidasi nitrit, fraksi karbon, dan perantara metabolisme karbon (Aleem, M.I.H, dan D.L. Sewell, 1984).

N. winogradskyi dapat ditemukan banyak hidup ditanah, batu alam serta air tawar dan air garam. Mereka memiliki banyak sel berbentuk batang berbeda-

beda yang membaginya dengan pembengkakan kutub selnya (Bock et al., 1986). Berikut ini adalah gambar *N. winogradskyi* dalam skala mikro :



Gambar 2.5 *Nitrobacter winogradskyi*(W.J. Hickey, 2006)

Nitrifikasi adalah proses mikrobiologi dimana ammonia diubah menjadi nitrat, yang merupakan komponen utama dari siklus nitrogen, berperan penting dalam transformasi nitrogen pupuk dalam sistem pertanian, dan merupakan komponen kunci dari *removal* nitrogen dalam pengolahan air limbah.

N. winogradskyi dan bakteri pengoksidasi nitrit lainnya berpartisipasi menitrifikasi dalam mengubah nitrit, menurut reaksi berikut (Madigan, MT., 2009): $2\text{HNO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{HNO}_3$. Nitrifikasi terjadi pada kondisi aerobik, dengan aktivitas optimal pada suhu mesofilik dan pH netral. Pada kondisi kekurangan oksigen, bakteri nitrifikasi telah diamati dapat melakukan reaksi denitrifikasi yang melibatkan NO dan N_2O pada tanah (Baumgartner dan Conrad, 1992). Reaksi metabolisme yang terjadi pada bakteri nitrifikasi sebagai berikut (Hudepohl, 1999): senyawa organik + O_2 + (nutrisi) \rightarrow sel baru + CO_2 + H_2O + (produk lain). Hasil keluaran setelah melalui medium filter berupa karbon dioksida dan uap air (Sanjaya E, 2010).

Sebagai *chemolithoautotroph* fakultatif, *N. winogradskyi* memperoleh energi dari oksidasi nitrit, dan asupan karbon dioksida (CO_2) sebagai sumber karbon. Selain itu, jika tidak ada nitrit, berbagai spesies *nitrobacter* dapat memanfaatkan senyawa organik sebagai asupan karbon dan sumber energi. Namun, pertumbuhannya biasanya jauh lebih lambat terjadi dibandingkan dengan memasok nitrit sebagai sumber energi (Bock E. et al., 1986).

2.7 State of The Art

Telah banyak penelitian yang dilakukan menggunakan proses biofiltrasi dengan berbagai jenis medium filter untuk mereduksi gas kontaminan di udara yang berbeda-beda. Berbagai jenis medium filter yang telah digunakan untuk berbagai penelitian menunjukkan medium filter yang paling sesuai beserta parameter yang harus diperhatikan untuk mencapai efisiensi reduksi gas kontaminan tertentu.

2.7.1 Biofiltrasi dengan Medium Filter Kompos

a. Biofiltrasi Terhadap N₂O

Penelitian ini dilakukan pada laju alir gas sampel N₂O konstan sebesar 88cc/menit dengan sistem aliran *batch* selama 12 jam. Irwan Warta Arisantoro (2010) mengevaluasi pengaruh ukuran pelet kompos dan penambahan kandungan nutrisi terhadap efisiensi reduksi N₂O dan pertumbuhan mikroorganisme pada medium filter. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi reduksi N₂O 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. Sedangkan Mei Linda (2010) mengevaluasi pengaruh kedalaman medium filter dan waktu inkubasi dengan larutan nutrisi sintetik terhadap efisiensi reduksi N₂O dan pertumbuhan mikroorganisme di dalam kompos berbasis kotoran kambing. Efisiensi reduksi N₂O terbaik dicapai sebesar 78,63% oleh kompos kedalaman 100 cm, dan 100% dengan sifat fisis paling stabil untuk kompos yang diinkubasikan selama 131 jam. Hasil kualitatif dan kuantitatif mikroorganisme di dalam kompos dengan uji SEM dan TPC menunjukkan bahwa kompos yang diinkubasi memiliki jumlah mikroorganisme terbanyak, disusul oleh kompos kering yang digunakan untuk biofiltrasi pada variasi kedalaman dan kompos awal.

b. Biofiltrasi Terhadap NO₂ dan VOCs

Michel Ondarts, Cécile Hort, Vincent Platel, and Sabine Sochard (2010) mengevaluasi kemampuan biofiltrasi terhadap IAP (*Indoor Air Pollution*). Biofilter diisi dengan kompos, sebagai media alami yang memiliki

berbagai macam mikroorganisme, baik secara fisika (retensi air, pH) dan kandungan nutrisi di dalamnya. Sampel yang dialirkan mengandung senyawa-senyawa seperti; VOCs (butanol, butyl asetat, *limonene*, trikloroetil (TEC), toluene, *undecane*), nitrogen dioksida (NO₂) dan aldehida (formaldehida) dipilih untuk senyawa di udara dalam ruangan, sifat heterogen fisik dan kimia senyawa tersebut (kelarutan, tekanan uap, biodegradabilitas), dan potensinya terhadap risiko kesehatan akibat paparan kronis.

Tabel 2.2 Efisiensi Penghilangan Minimum, Maximum dan Rata-Rata Biofiltrasi

Compounds	Min. (% RE)	Max.(% RE)	Average (% RE)
Butanol	55.5	99.5	98.0
Butil asetat	98.7	99.7	99.7
Formaladehid	77.8	99.5	95.5
Limonen	70.7	99.7	99.3
NO ₂	86.3	99.6	93.8
Toluen	13.9	99.7	97.9
TCE	-	33.0	-
Undecan	98.1	99.7	99.6

Sumber: Ondarts et al., 2010

Hasil biofilter yang dievaluasi selama 75 hari dalam kondisi *steady state*. Efisiensi biodegradasi rata-rata keseluruhan sampel mencapai 99,5-99,7%. Kecuali untuk trikloroetilen karena TEC tidak dapat mengalami degradasi, tetapi adsorpsi. Meskipun dengan kehadiran banyak senyawa dan menggunakan kondisi operasi tertentu (EBRT rendah) untuk mencapai *loading mass* yang relatif tinggi sebagaimana yang direkomendasikan oleh Darlington et al. (2001), menurut teori dan hasil percobaan menunjukkan hasil bahwa mikroorganisme tidak dapat dipelihara dalam kondisi kekurangan nutrisi. Ketidakstabilan selama proses biofiltrasi disebabkan oleh penurunan kelembaban atau pengeringan yang mempengaruhi penurunan efisiensi pada reduksi senyawa hidrofilik.

2.7.2 Biofiltrasi dengan Medium Filter Karbon Aktif

a. Biofiltrasi Terhadap H₂S

Huiqi Duan, Lawrence C.C. Koe, Rong Yan, Xiaoge Chen (2006) mengevaluasi penggunaan karbon aktif sebagai bahan yang baru untuk proses kinerja biofiltrasi melalui optimasi keseimbangan dan kombinasi dari kapasitas

adsorpsi dalam mendegradasi H₂S oleh bakteri amobil di dalamnya. Biofilm sebagian besar dikembangkan melalui kultur bakteri dari pellet karbon dalam media mineral (*activated sludge*). *Scanning Electron Microscop* (SEM) digunakan untuk mengidentifikasi pengembangan biofilm pada permukaan karbon. Digunakan dua biofilter skala laboratorium yang sama, satu dioperasikan dengan *biological activated carbon* (BAC) dan yang lainnya dengan menggunakan karbon tanpa bakteri (non-BAC). Mikroorganisme dalam karbon aktif dapat meningkatkan kapasitas dan waktu rentang karbon aktif. Berbagai konsentrasi H₂S (sampai dengan 125 ppmv) dialirkan untuk menentukan kinerja optimal kolom. Hasil dari proses yang cepat (dilakukan dalam beberapa hari) diamati untuk menghilangkan H₂S dalam biofilter tersebut. Pada non-BAC dengan konsentrasi 20-100 ppmv H₂S, untuk mencapai kapasitas eliminasi sebesar 110g H₂S m⁻³h⁻¹ membutuhkan waktu selama 10-30 detik. Sedangkan pada BAC dengan pada konsentrasi inlet 87 ppmv H₂S, kapasitas eliminasinya 181 g H₂S m³h⁻¹, dan efisiensi *removal* H₂S mencapai 94%. Jika konsentrasi inlet dibawah 30ppmv, efisiensi *removal* H₂S yang dihasilkan tinggi (lebih dari 99%) dicapai pada waktu retensi gas (*gas retention time / GRT*) selama 2 detik, lebih pendek dari banyak penelitian operasi biofilter yang pernah dilakukan sebelumnya. Populasi bakteri pada biofilter asam menunjukkan kapasitas untuk menghilangkan H₂S pada rentang pH yang cukup jauh (pH 1-7).

Dari hasil yang didapat, kapasitas adsorpsi H₂S dan tingkat adsorpsi dari karbon aktif, BAC kaya akan nutrisi untuk pertumbuhan bakteri, luas permukaan yang besar dan kapasitas adsorpsi H₂S. BAC menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan karbon tanpa menggunakan bakteri.

b. Biofiltrasi Terhadap Metanol

Callie W. Babbitt, Adriana Pacheco, Angela S. Lindner. (2009) mengevaluasi kinerja sistem biofiltrasi dengan mediakarbon aktif dalam menghilangkan metanol dari aliran udara buatan yang terkontaminasi dan karakteristik keanekaragaman bakteri, dengan bentuk filter yang berbeda. Sistem biofilter terdiri dari dua isian kolom campuran, *biologically inoculated biofilter* (BB) dan *non-inoculated biofilter* (NB). Kedua sistem biofilter menghasilkan

sekitar 100% efisiensi dalam menghilangkan metanol dengan tingkat laju sekitar 1-17g/m³ isian kolom/jam, saat dioperasikan baik dengan atau tanpa bakteri pendegradasi metanol. Dengan keragaman bakteri dan banyaknya variasi tinggi dari biofilter, populasi yang akan membentuk kumpulan yang stabil dengan mempertahankan operasi selama 138 hari seluruh sistem dengan variable kondisi operasi, seperti yang diamati dengan metode PCR-DGGE yang ditargetkan pada semua bakteri sebaik mikroorganisme oksidasi-metanol yang spesifik. Untuk setiap jenis media (BB dan NB), memiliki perbedaan yang signifikan dalam distribusi bakteri berdasarkan tinggi/panjang kolom biofilter. Analisis filogenetik dari potongan dan urutan gel DGGE menunjukkan bahwa sistem biofilter mendukung untuk pertumbuhan bakteri pendegradasi methanol dengan spesies yang sama.

2.7.3 Biofiltrasi dengan Medium Filter Karbon Aktif dan Kompos

Wahyuni A. Purwoko, Yani . M (2004) meneliti mengenai karakterisasi penghilangan hidrogen sulfida menggunakan media filter berupa kompos dan karbon aktif. Media campuran kompos dan karbon aktif menunjukkan hasil terbaik untuk menghilangkan H₂S dari udara yang terkontaminasi. Sistem biofilter untuk mereduksi gas hidrogen sulfida mengalami penyerapan sulfur lebih tinggi pada media filter yang merupakan campuran kompos dan arang aktif. Bahan pengisi campuran memiliki daya adsorpsi gas yang besar karena didalamnya terkandung arang aktif dan kompos. Arang aktif merupakan bahan yang memiliki daya adsorpsi yang tinggi. Namun pada pengujian fisik arang aktif sendiri memberikan hasil yang rendah bila dibandingkan dengan campuran. Hal ini dapat dipengaruhi oleh penambahan air pada arang aktif yang menyebabkan arang aktif telah jenuh oleh air sehingga tidak dapat melakukan penyerapan gas secara baik. Kompos memiliki kemampuan penyerapan yang paling rendah diantara ketiga bahan pengisi yang digunakan. Hal ini diduga karena kompos memiliki porositas serta kepadatan dalam kolom yang rendah bila dibandingkan dengan kedua bahan lainnya, sehingga hanya sedikit gas yang dapat tertahan dengan waktu yang singkat (Wahyuni et al., 2004). Hal ini berarti semakin tinggi tingkat penyerapan gas menunjukkan semakin besar efisiensi biofiltrasi yang dihasilkan.

2.7.4 Biofiltrasi dengan Medium Filter Lumpur Aktif

R. Jiang, S. Huang, dan J. Yang (2007) mengevaluasi efisiensi reduksi gas NO_x dengan medium lumpur aktif dan ditambahkan bakteri nitrifikasi yang telah diinokulasi. Pada saat penambahan oksigen dengan konsentrasi 2% di dalam inlet aliran gas, biofilter mampu mereduksi NO hingga tingkat efisiensi mencapai 20%, sedangkan pada kondisi bebas oksigen efisiensinya mencapai 50%. Penelitian ini dilakukan dengan kondisi laju alir gas NO 1 L/menit, konsentrasi inlet NO 50-600 ppmv dengan penambahan konsentrasi NO kelipatan 50 ppmv/5 hari, kandungan oksigen mencapai 20% dengan penambahan tiap 0,2%. Dari penelitian ini didapatkan hasil setelah 10 hari terus beroperasi, konsentrasi NO pada gas efluen secara bertahap meningkat menjadi sekitar 300 ppmv, sedangkan konsentrasi O_2 tetap 0,8%. Kondisi tersebut menggambarkan efisiensi reduksinya mencapai 84,6%, namun turun menjadi sekitar 50% pada konsentrasi O_2 meningkat menjadi 8%. Pada percobaan yang sama, dengan konsentrasi NO 300-500 ppmv, membutuhkan waktu 72 jam untuk kembali meningkatkan efisiensi reduksi NO_x menjadi 80% kembali, dan membutuhkan waktu 4 hari untuk konsentrasi 400 ppmv NO_x dan kurang lebih 108 jam untuk 500 ppmv NO_x agar tingkat efisiensi kembali di atas 80%. Dapat disimpulkan, efisiensi reduksi NO_x tertinggi mencapai 89,2%; 88,5%; 89,6% dimana kondisi percobaannya adalah sebagai berikut : 600 ppmv NO dan O_2 3,6%, 500 ppmv NO dan O_2 4,8%, 400 ppmv NO dan O_2 12%.

2.7.5 Biofiltrasi dengan Medium Filter Sintetik

Ó. J. Prado, J. A. Mendoza, M. C. Veiga, C. Kennes, (2002) melakukan penelitian dengan medium filter sintetik perlite. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem biofilter dalam mereduksi VOC (toluena) dengan mengkombinasikan pengaruh suplai nutrisi dan pengaruh temperatur. Medium filter ini diinokulasikan dengan bakteri yang ditambahkan larutan nutrient mengandung (g/l) KH_2PO_4 , 4.5; K_2HPO_2 , 0.5; NH_4Cl , 2.0; dan $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.1 secara periodik. Hasil 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. Penambahan nutrisi akan meningkatkan kinerja biofilter dengan cara menyediakan nutrisi

yang diperlukan untuk pertumbuhan mikroba yang mampu mendegradasi polutan. 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. 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*.



Berikut ini merupakan *mapping state of the art* dari berbagai penelitian biofiltrasi dari beberapa jenis kontaminan yang pernah dilakukan, baik oleh instansi dalam negeri maupun luar negeri. Pemetaan klasifikasi berdasarkan media alam yang dipakai, yaitu kompos dan karbon aktif. Pada penelitian ini digunakan karbon aktif sebagai media filter untuk mereduksi gas N_2O .

		Medium Filter			
		Free Cell	Immobilisasi		
		Kompos	Karbon Aktif	Lumpur Aktif	Sintetik
Kontaminan	H ₂ S		Huiqi Duan, Lawrence C.C. Koe, Rong Yan, Xiaoge Chen, 2006		
			Wahyuni A. Purwoko, Yani . M , 2004		
	NO			R. Jiang, S. Huang, dan J. Yang, 2008	
	N ₂ O	Irwan Warta Arisantoro, Mei Linda, 2010	Penelitian ini , 2012		
	NO ₂	Michel Ondarts, C'ecile Hort, Vincent Platel, and Sabine Sochard, 2010			
	VOCs				Ó. J. Prado ,J. A. Mendoza, M. C. Veiga, C. Kennes, 2002
	Metanol		Callie W. Babbitt, Adriana Pacheco, Angela S. Lindner. 2009		

Gambar 2.6 *Mapping State of The Art* Bofiltrasi Gas Polutan dengan Media Filter Kompos dan Karbon Aktif

BAB 3

METODE PENELITIAN

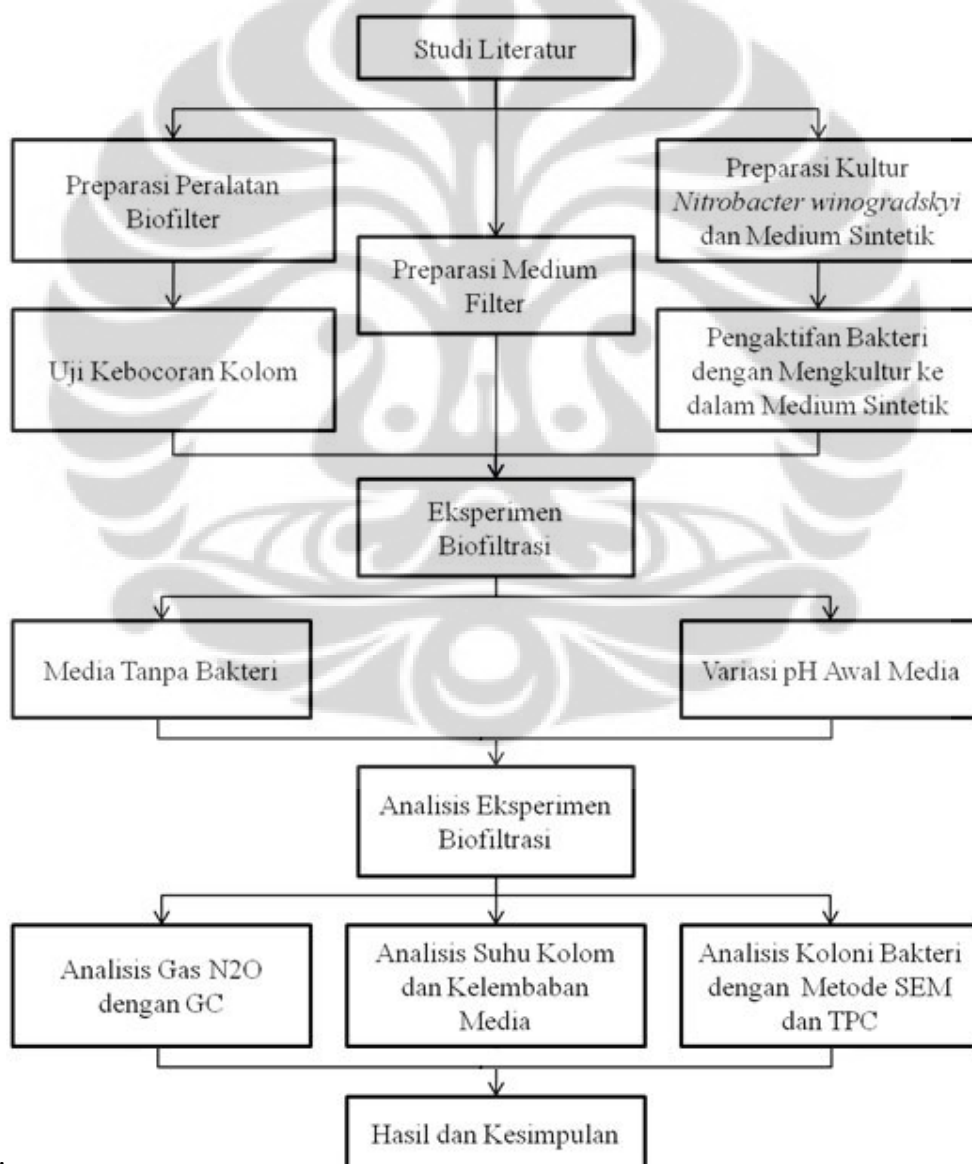
Pada bab ini diuraikan metode penelitian yang bertujuan untuk menentukan kadar N_2O yang mampu didegradasi dengan menggunakan karbon aktif yang diinokulasi oleh mikroorganisme *Nitrobacter winogradskyi* Winslow *et al.* dalam kolom biofilter. Preparasi mikroba diawali dengan mengkultur serta menambahkan nutrisi dari larutan sintetik, yang kemudian ditanam ke dalam medium filter. Selanjutnya dilakukan eksperimen biofiltrasi dalam mereduksi gas N_2O dan mengevaluasi pengaruh variasi kandungan pH pada penambahan larutan sintetik terhadap performansi biofilter dan pertumbuhan mikroorganisme.

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Rekayasa Bioproses, Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, Depok. Penelitian ini menggunakan peralatan berskala laboratorium yang telah digunakan pada penelitian sebelumnya. Penelitian mengenai biofiltrasi gas N_2O ini diawali dengan studi literatur beberapa jurnal yang mempublikasi mengenai penelitian biofiltrasi, baik nasional ataupun internasional. Preparasi penelitian dilakukan dengan mempersiapkan medium sintetik dan mengkultur mikroba ke dalamnya. Kemudian dilakukan preparasi medium filter berupa karbon yang sudah diaktifasi atau disebut karbon aktif. Peralatan biofilter yang digunakan berbentuk silinder berbahan *acrylic* dengan tinggi dan jari-jari kolom masing-masing 120 dan 8 cm. Selanjutnya persiapan peralatan biofiltrasi dengan mengecek kebocoran kolom biofilter untuk memastikan reduksi konsentrasi gas N_2O terjadi karena proses adsorpsi dan degradasi, bukan karena adanya kebocoran, dan mengkalibrasi gas N_2O untuk mengetahui konsentrasi aktual dan waktu retensinya.

Proses biofiltrasi untuk mereduksi gas N_2O pada penelitian ini dilakukan melalui pengkajian mengenai performansi biofiltrasi dengan menggunakan medium filter berupa karbon aktif dan mikroorganisme berupa *N. winogradskyi* dengan melakukan variasi pH awal media serta peformansi biofiltrasi dengan hanya menggunakan medium filter tanpa mikroba yang dialiri gas sampel yang

mengandung N_2O ke dalam kolom biofilter. Tahap analisis dilakukan dengan menghitung perkembangan populasi mikroorganisme menggunakan metode TPC (*Total Plate Count*) dan SEM (*Scanning Electron Microscope*) yang diukur pada medium filter sebelum dan sesudah biofiltrasi. Kemudian mengukur konsentrasi gas keluaran N_2O menggunakan GC (*Gas Chromatography*) untuk mengetahui efisiensi reduksi gas N_2O . Pengukuran juga dilakukan terhadap suhu kolom dan kelembaban medium filter. Setelah itu, dilakukan analisis hasil dengan pembahasan untuk mendapatkan hasil dan menarik kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan. Secara umum diagram alir penelitian dapat dilihat pada gambar berikut:



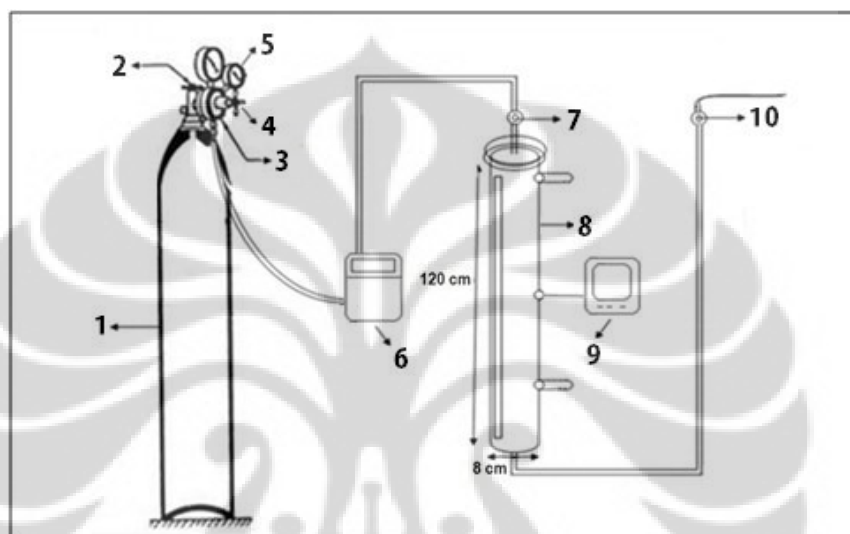
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian adalah sebagai berikut:

3.2.1 Alat

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 N_2O
2. Katup silinder
3. *Main valve* untuk membuka aliran gas.
4. *Safety valve (Flow Control)* untuk mengatur aliran gas.
5. Pengukur tekanan gas
6. *Mass flow controller* untuk mengukur aliran gas agar tetap stabil
7. *Sampling port inlet* tempat pengambilan sampel (sebelum biofiltrasi)
8. Kolom Biofilter tempat medium filter dan terjadinya biofiltrasi.
9. *Thermo-hygrometer* mengukur kelembaban medium dan suhu kolom biofilter.
10. *Sampling port outlet* tempat pengambilan sampel (setelah biofiltrasi)

Rincian peralatan yang digunakan pada penelitian, ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 3.1 Rincian Peralatan yang Digunakan dalam Penelitian

No	Alat	Fungsi
1	Sistem biofilter	Tempat dilakukanya uji biofiltrasi gas N ₂ O
2	Corong	Alat bantu memasukan media filter kedalam biofilter
3	Erlenmeyer	Wadah untuk percampuran nutrien agar dan air
4	Gelas ukur	Alat untuk mengambil larutan dalam jumlah tertentu
5	Spatula	Sebagai pengaduk larutan
6	GC (<i>Gas Chromatography</i>)	Alat untuk mengalisa konsentrasi N ₂ O dalam sampel
7	Syring	Untuk mengambil gas sampel
8	pH meter digital	Alat untuk mengukur pH sampel
9	Cawan Petri	Untuk tempat pembiakan bakteri, nutrien agar
10	Transfer box	Tempat melakukan kultur bakteri dan metode TPC
11	Hot plate	Untuk memanaskan dan menghomogenkan medium agar untuk penanaman bakteri dan TPC
12	Inkubator	Tempat untuk menyimpan bakteri
13	Tabung reaksi	Untuk tempat pembiakan bakteri dalam nutrient broth
14	Autoklaf	Tempat untuk sterilisasi sampel
15	Bunsen	Untuk memanaskan peralatan agar tetap steril
16	Ember	Tempat untuk penanaman bakteri dalam medium sintetik dan medium filter
17	Kaca arloji	Sebagai wadah untuk menimbang bahan larutan sintetik, nutrient agar dan nutrient broth
18	Batang ose	Alat untuk menanam dan mengambil bakteri dari medium agar dan broth
19	Pipet tetes	Alat untuk mengam bil sampel medium sintetik
20	Kulkas	Tempat untuk menyimpan bakteri dalam nutrient broth

3.2.2 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian meliputi karbon aktif sebagai medium filter dan bahan pengisian biofilter, nutrisi *broth*, nutrisi agar, aquadest, larutan nutrisi sintetik dan bahan lainnya. Berikut rincian bahan yang digunakan pada penelitian :

1. Gas sample N₂O dengan konsentrasi 15000 ppm dalam udara.
2. Karbon aktif sebagai medium filter dan bahan pengisian kolom biofilter.
3. Media perkembangbiakan bakteri; nutrisi *broth* dan nutrisi agar
4. Aquadest sebagai pelarut karbon aktif dalam pengukuran pH, serta sebagai pelarut pada media perkembangbiakan bakteri.
5. Larutan nutrisi sebagai pemberi nutrisi tambahan untuk bakteri, sebagai berikut:
 - Nutrisi Sintetik, yang terdiri dari komponen NaNO₂, NaCl, K₂HPO₄, MgSO₄.7H₂O, MnSO₄.nH₂O, Fe(SO₄)₃ dan aquadest.

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Preparasi Media Filter

Media filter yang digunakan pada penelitian ini berupa karbon berbentuk granul yang sudah di aktivasi. Sebelum karbon aktif digunakan, perlu menghilangkan kadar airnya dengan cara sebagai berikut :

1. Memanaskan karbon aktif dalam oven dengan suhu sekitar 100⁰C selama ± 1 jam.
2. Mendinginkan karbon aktif dan menghilangkan uap airnya di dalam desikator.
3. Karbon aktif siap digunakan.

3.3.2 Preparasi Kultur Bakteri

Pada tahap ini dilakukan untuk mendapatkan kultur bakteri terbaru setiap melakukan uji degradasi agar didapat kondisi yang optimal untuk mereduksi kandungan nitrogen dalam gas N₂O. Tahap ini berupa penanaman bakteri pada nutrient *broth* dan nutrient agar, serta persiapan medium sintetik.

- a. Penanaman pada Nutrien *Broth* (NB) (Maulidiyasti, 2008)

1. Membuat nutrien *broth* cair dengan langkah sebagai berikut :
 - Menyiapkan bubuk nutrien *broth* sebanyak 0,8 gram dan *aquadest* sebanyak 100 ml.
 - Mencampurkan bubuk nutrien *broth* dengan *quadest* ddi dalam erlenmeyer sambil dipanaskan dan diaduk.
 - Mensterilkan larutan dengan presto selama 20 menit.
 2. Mengambil bakteri dengan menggunakan batang ose, kemudian dicelupkan kedalam medium nutrien *broth* cair dalam tabung reaksi.
 3. Mengaduk campuran larutan tadi dengan menggunakan batang ose dan dimasukkan kedalam inkubator pada suhu ruang selama 24 jam.
- b. Penanaman pada Nutrien Agar (Maulidiyasti, 2008)
1. Menyiapkan cairan nutrien agar bubuk sebanyak 2,3 gram yang diencerkan dengan 100 ml *aquadest* di dalam erlenmeyer.
 2. Memanaskan larutan tadi diatas *hot plate*, sambil diaduk menggunakan *stirrers* sampai terlihat bening.
 3. Menyumbat mulut erlenmeyer dengan kapas dan ditutup dengan *aluminium foil* yang dilapisi plastik.
 4. Mensterilkan larutan nutrien agar di dalam presto selama 20 menit.
 5. Memindahkan larutan ke cawan petri di transfer box dengan cara yang steril dan mendinginkan larutan beberapa saat hingga agar mengeras.
 6. Menyiapkan sampel bakteri yang telah ditanam dalam *nutrien borth*.
 7. Mensterilisasi batang ose diatas api bunsen untuk mengambil sampel bakteri dan dioleskan secara zig-zag pada media nutrient agar.
 8. Menyimpan media nutrien agar padat yang telah dioles sampel bakteri ke dalam inkubator pada suhu ruang selama 24 jam.
- c. Penanaman pada Medium Sintetik
1. Membuat larutan medium sintetik dengan komposisi sebagai berikut (IFO, 2000) :
 - NaNO_2 : 4 gram
 - NaCl : 1,2gram
 - K_2HPO_4 : 2 gram
 - $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 2 gram

- $\text{MnSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$: 0,02 gram
 - $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$: 0,08 gram
 - Aquadest : 3 liter
2. Mencampurkan larutan medium sintetis sebanyak 3 liter dengan sampel bakteri, lalu mengaerasikannya pada suhu ruang selama 48 jam.
 3. Merendam karbon aktif ke dalam 3 liter larutan campuran medium sintetis dan bakteri selama ± 3 hari.
 4. Memisahkan medium sintetis dengan karbon aktif yang sudah direndam menggunakan saringan yang steril hingga tidak terlalu banyak mengandung larutan sintetis.

3.3.3 Kalibrasi Gas N_2O

Sebelum dilakukan eksperimen, gas N_2O dikalibrasi terlebih dahulu untuk mengetahui konsentrasi aktual, waktu retensi gas dan luas peak dari N_2O . prosedur uji kalibrasi adalah sebagai berikut :

1. Mengalirkan sampel gas N_2O ke dalam *gas trap* pada kolom biofilter.
2. Sampel diambil dengan menggunakan *syringe* dengan volume yang divariasikan 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; dan 1,0 ml.
3. Sampel pada *syring* diinjeksikan ke dalam *Gas Chromatography* (GC) yang akan mendeteksi keberadaan dan konsentrasi gas.
4. Menganalisa hasil pada *Gas Chromatography* (GC) dengan membuat plot grafik antara volume gas N_2O terhadap luas peak N_2O sampai didapat garis linear.
5. Mengkalibrasi gas N_2O sebanyak dua kali (metode duplikasi) agar mendapatkan hasil kalibrasi gas N_2O yang akurat.

3.3.4 Uji Kebocoran Alat Biofiltrasi

Uji kebocoran ini dilakukan untuk menghindari ketidakakuratan data hasil eksperimen sehingga dapat dipastikan konsentrasi gas N_2O berkurang disebabkan proses degradasi dan adsorpsi, bukan terjadi akibat adanya kebocoran pada alat biofiltrasi. Uji kebocoran dilakukan dengan meneteskan busa sabun pada daerah persambungan. Berikut tahapan pengujian kebocoran :

1. Mengalirkan gas N_2O ke dalam kolom tanpa medium filter.
2. Meneteskan busa sabun pada daerah persambungan pipa.
3. Melakukan pengecekan ada tidaknya buih sabun yang terbentuk, jika ada maka telah terjadi kebocoran.
4. Jika terjadi kebocoran, selanjutnya mengencangkan kembali sambungan antara pipa dengan sampling port.
5. Jika sudah dikencangkan, selanjutnya melakukan pengecekan ulang dengan busa sabun
6. Jika busa sabun sudah tidak terbentuk, maka alat telah siap untuk digunakan.

3.4 Eksperimen Biofiltrasi

Eksperimen kinerja biofilter pada penelitian ini dilakukan variasi terhadap pH awal media untuk mengetahui performansi biofiltrasi terhadap gas N_2O dalam medium filter berupa karbon aktif.

3.4.1 Variasi pH Awal Media

Berikut tahapan dilakukannya pengujian variasi pH awal media :

1. Menyiapkan medium filter yang sudah di preparasi yaitu karbon aktif.
2. Menambahkan 1N HCl atau 1N NaOH untuk memvariasi pH awal pada medium filter, yaitu sebesar 8, 7, 6, 5, dan 4.
3. Memasukan medium filter ke dalam kolom biofilter sampai ketinggian 100 cm kolom.
4. Mengalirkan gas sampel dengan kandungan N_2O sebesar 15000 ppm dalam udara dengan laju alir 88 cc/menit.
5. Mengambil gas sampel keluaran dari kolom biofilter dengan *syringe* untuk dianalisa pada kromatografi selama 24 jam.

3.4.2 Variasi Tanpa Medium Sintetik

Sebagai kontrol proses dan untuk mengetahui performansi biofiltrasi terhadap gas N_2O , dilakukan tahapan metode menggunakan medium filter berupa karbon aktif yang tidak diinokulasi oleh mikroba.

3.5 Data Penelitian

Untuk mengetahui kapasitas dan peningkatan kemampuan degradasi gas dinitrogen oksida oleh *N. winogradskyi* dalam media karbon aktif, diperlukan data pengamatan dan analisis. Berikut data pengamatan dari penelitian yang akan dianalisis :

1. Konsentrasi gas N₂O sesudah dilakukan biofiltrasi.
2. Suhu dan kelembaban medium filter selama proses biofiltrasi.
3. Jumlah koloni mikroba pada medium filter sebelum dan sesudah dilakukan biofiltrasi untuk mengetahui perkembangan mikroba di dalamnya dengan pengukuran menggunakan TPC dan SEM.

Data hasil penelitian ini akan dikaji dan dibandingkan dengan penelitian yang pernah dilakukan, dimana penelitian sebelumnya melakukan proses biofiltrasi dengan mendegradasi gas N₂O oleh *N. winogradskyi* dalam media zeolit alam lampung.

3.6 Analisa Eksperimen Biofiltrasi

3.6.1 Analisa Gas N₂O

Gas sampel yang mengandung N₂O akan diukur menggunakan GC (*Gas Chromatography*). Gas masukan dan keluaran kolom biofilter akan di injeksikan ke dalam GC untuk dianalisis. Data yang diambil dari GC adalah luas peak dari gas N₂O yang kemudian hasilnya akan diplot terhadap waktu prosesnya. Berikut ini spesifikasi GC yang digunakan pada penelitian :

Tabel 3.2 Spesifikasi GC (*Gas Chromatography*)

Merk dan Tipe	Shimadzu
Kolom	Propak Q
Suhu Kolom :	
- Injektor	130 ⁰ C
- Kolom	100 ⁰ C
Gas Carrier	He
Jenis Detektor	TDC

Tahapan atau prosedur pengoperasian GC (*Gas Chromatography*) yang digunakan pada penelitian adalah sebagai berikut :

1. Purgings GC
2. Mengalirkan He dan menyalakan GC
3. Memanaskan GC pada suhu injektor dan kolom masing-masing sebesar 160°C dan 130°C
4. Mengatur suhu operasi injektor sebesar 130°C dan kolom sebesar 100°C.
5. Mengatur arus GC 160 mA, dan menyalakan printer kromatografi.
6. Mengatur parameter operasi, GC siap digunakan.

3.6.2 Analisa Perkembangan Bakteri

Perkembangan bakteri dalam medium filter sebelum dan sesudah biofilter dapat dianalisis dengan menggunakan metode TPC (*Total Plate Count*) dan diperkuat dengan uji SEM (*Scanning Electron Microscope*).

a. Metode TPC (*Total Plate Count*)

Metode *Total Plate Count* (TPC) digunakan untuk menganalisis perkembangan bakteri sebelum dan sesudah proses biofiltrasi. Metode ini dilakukan untuk menguji seberapa besar aktivitas degradasi dengan mengetahui jumlah koloni bakteri awal (sebelum biofiltrasi) dan akhir (setelah biofiltrasi). Teknik TPC mempunyai keterbatasan menghasilkan koloni bakteri, yaitu tidak lebih dari 30 hingga 300 koloni, dengan asumsi awal satu bakteri akan menghasilkan satu koloni. Analisis mikrobiologis perkembangan bakteri dengan TPC ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

b. Uji SEM (*Scanning Electron Microscope*)

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 Teknik Metalurgi, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

3.7 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini, variabel terikat yang terlibat berupa efisiensi reduksi gas N_2O , suhu dan kelembaban medium filter saat proses biofiltrasi, dan jumlah populasi mikroba yang terdapat pada medium filter, yang didapat setelah melewati proses biofiltrasi. Untuk variabel control pada penelitian ini adalah laju alir masukan sampel (*inlet*) dan waktu pengambilan data. Sedangkan variabel bebasnya adalah variasi pH awal pada media filter berupa karbon aktif. Efisiensi reduksi gas dinitrogen oksida yang paling optimal akan dihasilkan dengan meneliti variabel terikat terhadap variasi variabel bebas.



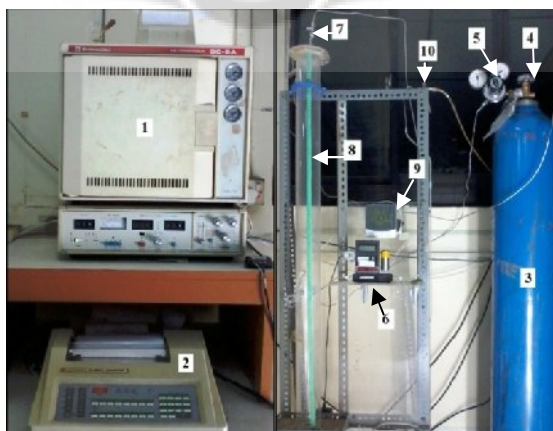
BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai analisa kinerja biofilter dari hasil data yang didapat dari variasi yang dilakukan, yang ditunjukkan oleh berkurangnya luas area *peak* N₂O pada GC (*Gas Chromatography*), serta jumlah koloni mikroba sebelum dan sesudah biofiltrasi dengan metode TPC (*Total Plate Count*) dan SEM (*Scanning Electron Microscope*). Dalam penelitian ini, pengamatan dilakukan selama 24 jam untuk setiap variasi proses biofiltrasi.

4.1 Sistem Biofilter

Sistem peralatan biofilter yang digunakan pada penelitian ini merupakan peralatan yang digunakan penelitian sebelumnya di Laboratorium Bioproses, Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia. Sistem perpipaan dan *sampling port* menggunakan bahan *stainless steel* yang bertujuan untuk menghindari terjadinya korosi (Yang, et al, 2007), sedangkan selang yang digunakan berbahan silikon yang tahan terhadap tekanan. Gas dari tabung gas N₂O akan dialirkan melalui bagian atas kolom biofilter (*down-flow mode*) untuk meningkatkan kontrol terhadap kelembaban (la Pagans, 2005). Sistem perpipaan dirangkai dengan menempatkan posisi *sampling port outlets* sama tingginya dengan *sampling port inlet*, untuk menghindari liquid yang mungkin terbawa oleh gas N₂O dari medium filter. Untuk lebih jelasnya berikut ini gambar 4.1 merupakan sistem peralatan biofilter yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 4.1 Sistem instalasi peralatan biofilter

Keterangan:

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------|
| 1. GC (<i>Gas Chromatography</i>) | 6. <i>Mass flow controller</i> |
| 2. Printer | 7. <i>Sampling portinlet</i> |
| 3. <i>Supply gas N₂O</i> | 8. Kolom Biofilter |
| 4. <i>Main valve</i> | 9. <i>Thermo-hygrometer</i> |
| 5. <i>Safety valve(Flow Control)</i> | 10. <i>Sampling portoutlet</i> |

Selain sistem peralatan biofilter untuk proses biofiltrasi, terdapat perangkat GC (*Gas Chromatography*) yang digunakan untuk menganalisa gas selama eksperimen. GC yang digunakan adalah jenis GC-TCD Merk Shimadzu Seri 8A, yang dihubungkan dengan printer GC Merk Shimadzu seri 6 yang akan menampilkan hasil analisis konsentrasi dan luas area *peak* gas N₂O dari GC.

4.2 Preparasi Medium Karbon Aktif

Medium filter yang digunakan adalah karbon aktif yang berasal dari batok kelapa dengan spesifikasi diameter rata-rata 4 mm. Karbon aktif digunakan sebagai medium filter karena memiliki daya serap air dan luas permukaan yang tinggi, serta porositas yang cukup tinggi sebagai tempat dimana mikroorganisme tumbuh (Elias et al., 2002). Karbon aktif dipilih karena memiliki ciri-ciri sebagai medium filter yang baik, dimana proses inokulasi pada medium filter dengan kultur spesifik dapat mendegradasi kontaminan tertentu termasuk dalam mereduksi N₂O. Keuntungan memilih karbon aktif sebagai medium filter adalah karena memiliki luas permukaan atau volume pori yang besar, semakin besar volume pori maka akan semakin baik kapasitas adsorpsinya (Sontheimer et al., 1988). Dengan tingkat adsorpsi yang baik, maka tempat mikroorganisme tumbuh akan semakin baik, dimana mikroorganisme akan terimmobilisasi secara alami ataupun buatan di dalam medium filter untuk selanjutnya membentuk lapisan tipis *biofilm* atau *biolayer*. Gambar 4.3 berikut adalah karbon aktif yang siap pakai.



Gambar 4.2 Karbon aktif yang sudah dikeringkan

4.3 Preparasi Kultur Mikroba

Tumbuhnya mikroba dapat dilihat setelah masa inkubasi ditandai dengan terbentuknya lendir berwarna putih susu dan bentuknya jelas terlihat sesuai dengan goresan pada saat penanaman. Gambar 4.3 dan 4.4 berikut berturut-turut adalah gambar media nutrient agar dalam cawan petri dan mikroba dalam media yang sudah diinkubasi selama 24 jam.



Gambar 4.3 Media *nutrient* agar



Gambar 4.4 *N. winogradskyi* pada media *nutrient* agar setelah inkubasi 24 jam

Ada beberapa jenis mikroorganismes yang istimewa karena dapat hidup di lingkungan tertentu dimana organisme lain belum tentu dapat hidup, tetapi beberapa mikroba memerlukan tambahan nutrisi sebagai sumber energi untuk mendukung fungsi metabolismenya (pertumbuhan dan reproduksi) (Singh *et al.*, 2004). Kandungan nutrisi yang baik harus tersedia, agar diperoleh performa yang baik dari biofiter (Auria *et al.* 1996).

4.4 Persiapan Eksperimen

Sebelum melakukan eksperimen, terlebih dahulu melakukan uji untuk persiapan agar eksperimen nantinya akan berjalan dengan baik dan tanpa kesalahan. Uji yang perlu dilakukan yaitu uji kebocoran kolom biofilter dan kalibrasi luas peak gas N_2O agar konsentrasi yang didapat akurat.

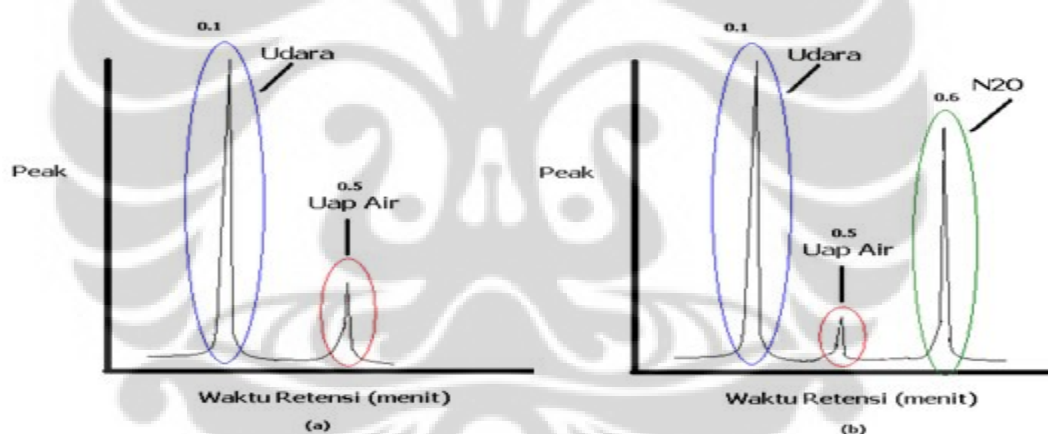
4.1.1 Uji kebocoran Alat

Uji ini dilakukan secara mekanis dengan pengecekan terhadap tiap sambungan, seperti pada *sampling port inlet* dan *outlet*, serta antara skrup dan baut lainnya. Pengujian kebocoran alat ini dilakukan dengan cara meneteskan busa sabun di daerah persambungan dan pada saat alat dialiri gas N_2O , jika

terbentuk buih atau gelembung busa sabun, maka terindikasi telah terjadi kebocoran. Semakin banyak buih yang terbentuk dalam waktu yang cepat, maka tingkat kebocoran semakin tinggi, jika tidak sama sekali terbentuk buih, maka tidak terjadi kebocoran. Kebocoran alat dapat dihindari dengan cara mengencangkan baut di tiap persambungan dan memastikan bahwa tidak adanya bocor. Tujuan dilakukan uji kebocoran ini agar dapat dipastikan bahwa kinerja biofilter disebabkan oleh terjadinya proses adsorpsi dan degradasi, bukan karena kebocoran yang terjadi, serta untuk menghindari ketidakakuratan alat yang digunakan.

4.1.2 Kalibrasi Luas *Peak* Gas N_2O

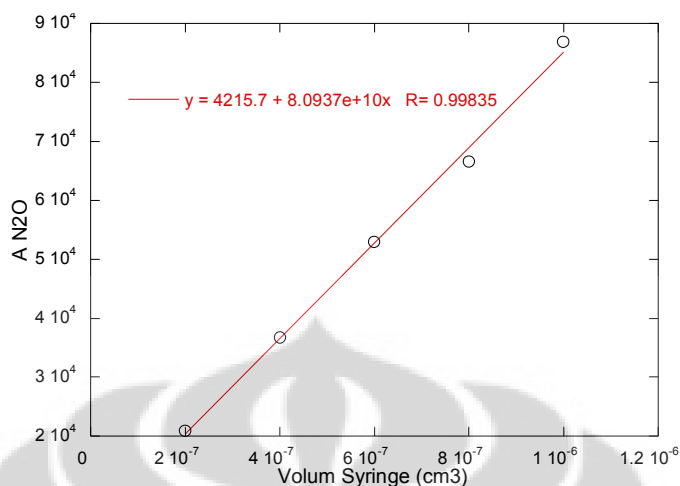
Kalibrasi gas N_2O dilakukan untuk mengetahui waktu retensi, luas peak dan konsentrasi dari gas N_2O . Gambar 4.9 berikut ini adalah contoh pembacaan hasil kromatograf pada sampel gas N_2O dengan volume 1 ml.



Gambar 4.5 Grafik Terdeteksi GC pada: (a) Udara bebas dan (b) Gas N_2O

Untuk mengetahui waktu retensi dari gas N_2O , maka kurva yang terdeteksi pada gas N_2O harus dibandingkan dengan udara bebas karena gas N_2O yang digunakan disini memiliki konsentrasi 15000 ppm dalam udara. Oleh sebab itu digunakan udara bebas sebagai pembandingnya. Dari gambar (a) dapat dilihat terdapat dua peak dari sampel udara bebas, yaitu udara dan uap air dengan waktu retensi masing-masing 0,1 dan 0,5, sedangkan gambar (b) terdapat tiga peak dari sampel gas N_2O dalam udara, yaitu luas peak udara, uap air dan dapat dikatakan bahwa untuk luas peak ketiga yang berada pada waktu retensi 0,6 adalah gas N_2O .

Setelah mengetahui luas peak, dilakukan variasi terhadap volume gas N₂O yang diambil dari sampling gas yaitu sebesar 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 dan 1,0 ml dalam *syringe*.



Gambar 4.6 Hasil kalibrasi volume gas N₂O dalam syringe terhadap luas *peak*

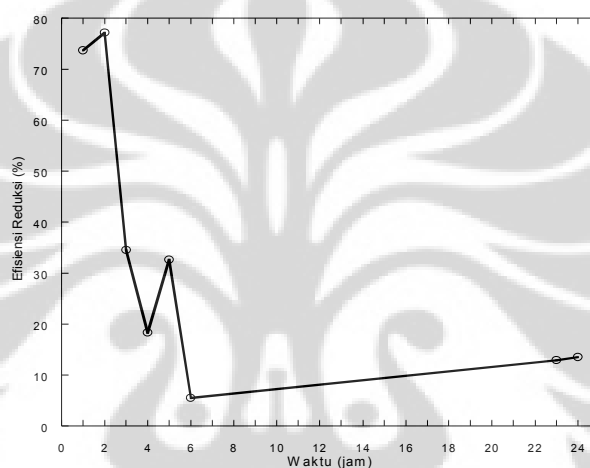
Hasil grafik pada gambar 4.6 menunjukkan kurva yang linear, dan didapat persamaan linearnya $y = 8.10^{10}x + 4215$ dan nilai koefisien korelasinya (R^2) adalah 0,99, dimana jika R^2 mendekati 1 menunjukkan bahwa korelasi antara volume gas N₂O dalam *syringe* linear terhadap luas peak N₂O, maka dengan demikian data ini memiliki tingkat keakuratan yang baik, sehingga data kalibrasi ini dapat digunakan untuk menunjukkan mengetahui volume dan konsentrasi gas N₂O yang actual serta hubungan dengan data-data eksperimen.

4.5 Uji Kinerja Biofilter

Pengujian kinerja biofilter dilakukan dengan menganalisis parameter yang diamati, yaitu variasi pH awal media dengan larutan sintetik terhadap efisiensi reduksi gas N₂O dan pertumbuhan mikroba, serta uji kinerja biofilter dilakukan terhadap media filter yang tidak ditanami mikroba. Untuk melengkapi pengolahan data, dilakukan pemodelan terhadap uji fenomena adsorpsi. Pengujian kinerja dilakukan dengan pengisian medium filter ke dalam kolom biofilter setinggi 100 cm, dengan aliran inlet gas N₂O sebesar 88 cc/menit dan dilakukan dengan menggunakan sistem aliran *batch* selama 24 jam. Pengambilan data dilakukan setiap satu jam sekali selama 6 jam pertama dan kemudian pada jam ke 23 dan 24. Prinsip dasar pengambilan data dari eksperimen ini menggunakan prinsip replikasi.

4.5.1 Uji Kinerja Biofilter dengan Media Filter Tanpa Mikroba

Uji ini dilakukan untuk menganalisis kinerja biofilter dalam mereduksi gas N_2O . Pada uji ini menggunakan aliran gas N_2O sebesar 88 cc/menit yang dialirkan ke dalam kolom biofilter berisi media karbon aktif yang tidak ditanami mikroba. Hal ini dilakukan untuk mengetahui performansi biofilter dengan media karbon aktif dalam mengadsorpsi gas N_2O tanpa keberadaan mikroba di dalamnya. Uji ini dilakukan selama 24 jam dengan menggunakan sistem aliran *batch* dengan berat media karbon aktif 2 kg, yang diisikan ke dalam kolom biofilter setinggi 100 cm. gambar 4.7 berikut menunjukkan grafik perbandingan efisiensi reduksi terhadap waktu dengan media tanpa mikroba.



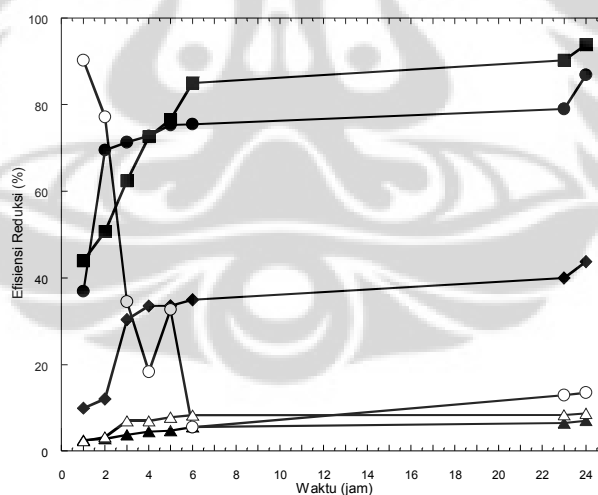
Gambar 4.7 Efisiensi reduksi biofiltrasi dengan medium filter tanpa mikroba

Dari hasil grafik hubungan antara efisiensi reduksi terhadap waktu, didapat profil grafik yang menurun di tiap jamnya, yang artinya kemampuan media filter tanpa mikroba dalam mereduksi gas N_2O pada uji kinerja biofiltrasi terus menerus berkurang. Hal ini dapat terlihat dari mulai jam ke-1 menuju jam ke-2 terdapat penurunan efisiensi reduksi yang cukup signifikan, yang kemudian saat jam ke-3 sampai jam ke-6 efisiensi reduksi semakin menurun, hal ini bisa disebabkan aliran gas N_2O belum homogen, sehingga gas N_2O yang mengalir kedalam medium filter belum stabil. Pada saat jam ke-23 dan 24 terlihat bahwa efisiensi reduksi sudah mulai stabil pada sekitar 5%. Penurunan efisiensi reduksi pada uji ini dapat terjadi karena tidak tersedianya mikroba yang berfungsi mendegradasi dan mereduksi gas polutan yang melewati medium filter. Karbon aktif sebagai media filter tidak mampu mereduksi gas N_2O tanpa adanya mikroba pendegradasi polutan, fenomena adsorpsi yang terjadi pada karbon

aktif tidak mampu mengurangi konsentrasi gas N_2O yang keluar dari kolom biofilter.

4.5.2 Pengaruh pH Awal Media Terhadap Efisiensi Reduksi gas N_2O

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh pH awal media biofiltrasi terhadap efisiensi reduksi gas N_2O . Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan pH pada larutan sintetik yang ditanami mikroba yang kemudian diinokulasi ke dalam media filter karbon aktif. Penentuan kadar pH dilakukan dengan menambahkan larutan HCl dan NaOH sedikit demi sedikit ke dalam larutan sintetik sehingga didapat kadar pH yang diinginkan sebanyak 5 variasi yaitu, pH 8, 7, 6, 5, dan 4. Proses penentuan kadar pH dilakukan dalam keadaan yang steril di dalam transfer box yang sudah disterilisasi agar terhindar dari kontaminasi. Penentuan kadar pH dilakukan sebelum menanamkan mikroba ke dalam larutan sintetik, agar mikroba yang akan ditanam ke dalam larutan mendapatkan lingkungan yang sudah pasti kondisi pH-nya. Gambar 4.8 berikut ini adalah grafik hasil efisiensi reduksi variasi pH awal media dan media tanpa mikroba terhadap kinerja biofilter.

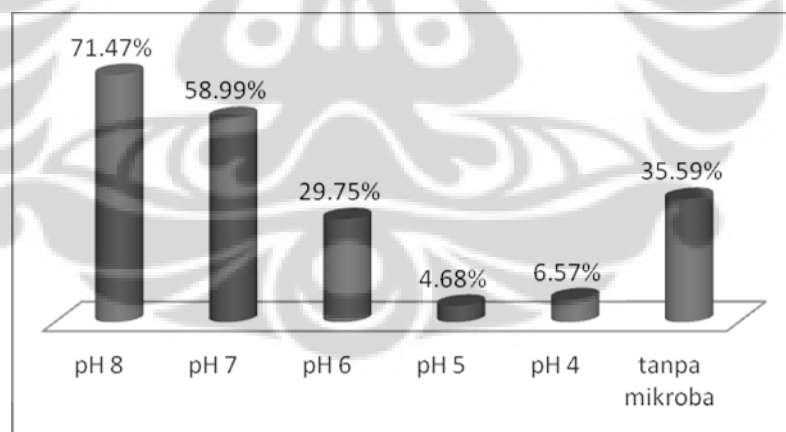


Gambar 4.8 Profil efisiensi reduksi gas N_2O dengan variasi media: (●) pH awal 8; (○) pH awal 7; (▲) pH awal 6; (◆) pH awal 5; (△) pH awal 4; dan (○) tanpa mikroba

Pengamat dilakukan selama 24 jam menggunakan sistem aliran *batch*, dengan tinggi medium filter karbon aktif dalam kolom biofilter 100 cm dengan berat medium filter 2 kg, dan dialirkan 88 cc/menit gas N_2O dalam udara. Dari grafik hasil penelitian dengan pengaruh variasi pH awal media dalam mereduksi gas N_2O , menunjukkan bahwa semakin rendahnya kadar pH maka

semakin berkurangnya efisiensi reduksi pada proses biofiltrasi yang terjadi. Nilai efisiensi tertinggi dicapai pada pH 7. Penurunan pH sebanding dengan efisiensi reduksinya, ditunjukkan pada pH 6, 5 dan 4 yang memiliki efisiensi di bawah pH 7 dan 8. Secara umum mikroorganisme memiliki rentang pH optimum tertentu untuk dapat melakukan aktivitasnya (Shareefdeen dan Singh, 2005). Banyak mikroba memiliki pH optimum berkisar antara 6.5 – 7.5 sedangkan pada pH > 8.5 dan pH < 5, kecepatan aktivitas mikroorganisme akan menjadi turun, sehingga efisiensi kurang optimal (Ottograft et al., 1992). Grandizt dan Dalhammar (2001) mendapatkan aktifitas relative optimum *Nitrobacter* pada rentang pH 7 sampai 8 dalam inhibisi nitrifikasi. Grafik juga menunjukkan profil efisiensi reduksi yang meningkat pada tiap variasi, ini menunjukkan semakin lama waktu kontak gas N₂O dengan medium filter maka konsentrasi gas N₂O yang tereduksi semakin berkurang.

Untuk membandingkan hasil efisiensi reduksi terhadap gas N₂O antara variasi pH awal media dengan media yang tidak ditanam mikroba, dilakukan perbandingan rata-rata nilai efisiensi reduksi selama 24 jam untuk setiap eksperimen. Gambar 4.9 berikut ini merupakan grafik hasil perbandingannya.



Gambar 4.9 Nilai rata-rata efisiensi reduksi gas N₂O

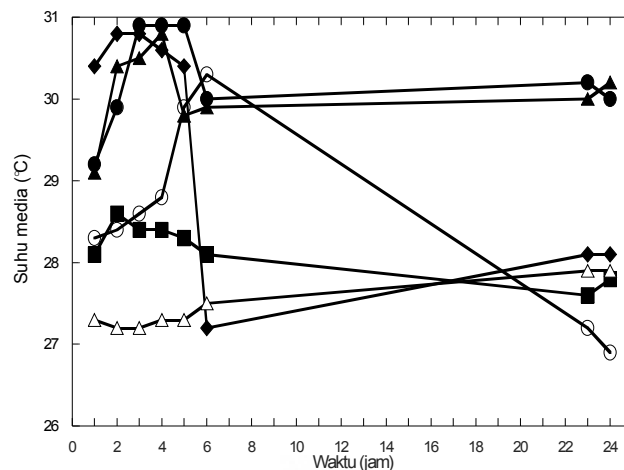
Berdasarkan hasil grafik yang didapat, untuk nilai rata-rata efisiensi reduksi gas N₂O dari setiap variasi berbeda-beda. Rata-rata efisiensi reduksi tertinggi dicapai pada pH 7 dan terendah pada pH 5, sedangkan untuk variasi tanpa mikroba rata-rata efisiensinya tidak memiliki nilai terendah. Hal ini dapat dikarenakan oleh proses yang terjadi pada biofilter, untuk variasi pH media, proses reduksi gas N₂O terjadi karena degradasi yang dilakukan oleh mikroba dalam media,

sehingga performa biofilter dipengaruhi oleh pH awal media terhadap aktivitas mikroba, sedangkan untuk variasi dengan media tanpa mikroba, proses yang terjadi adalah fenomena adsorpsi gas polutan pada karbon aktif saja.

Pada proses biofiltrasi dengan variasi pH awal media dengan $\text{pH} < 7$, efisiensi reduksi menjadi lebih kecil jika dibandingkan dengan media filter tanpa mikroba. Pada pH awal media < 7 merupakan kondisi pH yang dapat mengakibatkan kinerja mikroba berkurang (Ottograft et al., 1992), dan karena area permukaan spesifik berguna dalam perkembangan *biofilm* mikroba (Kumar et al., 2011), tetapi *biofilm* yang dibentuk oleh mikroba menutupi permukaan media filter sedangkan mikroba pendegradasinya tidak bekerja dengan baik dan jumlahnya berkurang (lihat subbab 4.6.1), mengakibatkan *biofilm* tidak berfungsi dengan baik, sehingga daya adsorpsi pada media filter menjadi semakin kecil.

4.5.3 Perubahan Suhu Media Selama Proses Biofiltrasi

Pada eksperimen ini dilakukan pengukuran terhadap suhu dalam kolom biofilter, untuk mengetahui suhu media selama proses degradasi gas polutan N_2O berlangsung. Suhu operasi merupakan salah satu variabel yang paling penting dalam menentukan laju pertumbuhan mikrobial dan jenis spesies dalam komunitas mikrobial (Wani et al., 1997). Pengukuran suhu media merupakan hal yang penting dalam menentukan laju pertumbuhan mikroba pada proses biofilter, mengingat bahwa seiring meningkatnya suhu maka laju pertumbuhan sel mikroba juga meningkat. Namun di atas suhu kritis tertentu, inaktivasi beberapa protein penting dan dapat menghentikan pertumbuhan sel mikroba secara mendadak, sehingga dapat menurunkan performansi biofiltrasi (Swanson & Loehr et al., 1997). Gambar 4.10 berikut ini merupakan grafik perubahan suhu media pada kolom biofilter.

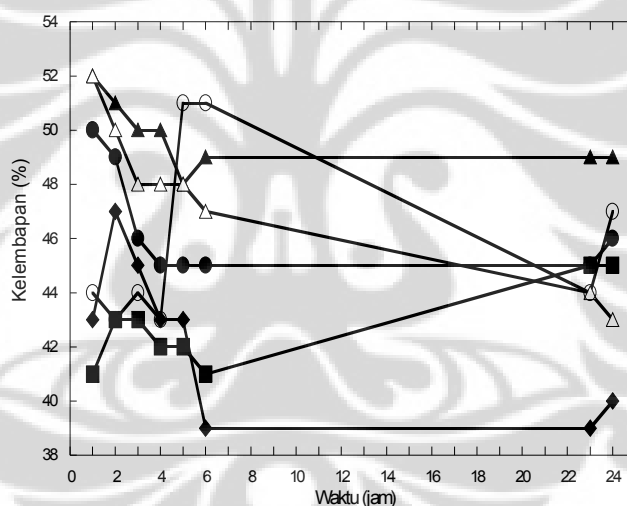


Gambar 4.10 perubahan suhu media dalam kolom biofilter dengan variasi media: (●) pH awal 8; (○) pH awal 7; (▲) pH awal 6; (◆) pH awal 5; (△) pH awal 4; dan (○) tanpa mikroba

Dari hasil plot grafik perbandingan perubahan suhu pada kolom biofilter terhadap waktu, terdapat perbedaan suhu media untuk setiap variasi yang dilakukan. Suhu maksimum yang dicapai sekitar 31°C . Suhu optimum untuk berbagai spesies memiliki jangkauan yang luas, tetapi sebagian besar aplikasi biofilter telah dilakukan pada suhu dalam rentang *mesophilic* ($20 - 45^{\circ}\text{C}$), dengan temperatur $35-37^{\circ}\text{C}$ dianggap sebagai suhu optimum (Swanson & Loehr et al., 1997). Berdasarkan grafik diatas, suhu pada jam-jam awal bernilai rendah dan semakin lama meningkat dan cenderung stabil hingga jam ke 24. Rendahnya suhu di jam-jam awal menunjukkan bahwa oksidasi biologis yang masih rendah karena mikroba masih membutuhkan masa adaptasi pada lingkungan baru (Duan *et al.*, 2004) sebelum mikroba mampu mereduksi polutan dengan optimum. Suhu yang paling stabil terjadi pada media dengan pH 7, perubahan suhu hanya sekitar 28°C , sedangkan untuk variasi pH lainnya mengalami perubahan suhu yang fluktuatif. Hal ini menandakan aktivitas mikroba pada media dalam mereduksi gas N_2O terjadi dengan stabil pada pH 7, sehingga menghasilkan efisiensi reduksi yang paling baik dibandingkan dengan variasi lainnya. Perubahan suhu operasi ini biasanya oleh peristiwa kimia, fisika dan biologi. Proses reaksi eksotermis juga disebabkan 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).

4.5.4 Tingkat Kelembapan pada Medium Filter

Kandungan kelembapan (*moisture*) merupakan salah satu parameter yang sangat penting terhadap performa kinerja biofilter. Oleh sebab ini pada eksperimen ini dilakukan pengukuran tingkat kelembapan pada medium filter selama proses biofiltrasi berlangsung. Kandungan kelembapan merupakan salah satu parameter yang penting dalam proses biofiltrasi, karena mikroba yang terdapat di dalam medium filter sangat membutuhkan keberadaan air sebagai penunjang metabolismenya. Rendahnya tingkat kelembapan dalam proses biofiltrasi dapat menyebabkan penurunan laju biodegradasi polutan, sedangkan kelembapan yang terlalu tinggi akan menghalangi transfer oksigen kedalam lapisan *biofilm* sehingga membatasi laju degradasi (D. Grant Allen, 2005). Gambar 4.11 berikut ini grafik perbandingan tingkat kelembapan medium filter terhadap waktu selama proses biofilter.



Gambar 4.11 Profil tingkat kelembapan medium filter dengan variasi media: (●) pH awal 8; (■) pH awal 7; (▲) pH awal 6; (◆) pH awal 5; (Δ) pH awal 4; dan (○) tanpa mikroba

Kelembapan untuk operasi optimal untuk filter secara biologi harus pada rentang 30-60% berat, tergantung dengan media filter yang digunakan (Kumar et al., 2011). Dari gambar diatas, dapat dilihat perbedaan tingkat kelembapan pada setiap variasi yang dilakukan. Tingkat kelembapan yang fluktuatif dipengaruhi oleh suhu yang fluktuatif di dalam kolom biofilter (Vedova, 2008). Sakuma *et al.* menyatakan bahwa biofilter cenderung mengalami pengeringan pada bagian masukan gas, yang menyebabkan berkurangnya reduksi polutan dari waktu ke waktu. Pengeringan media filter menyebabkan terbentuknya area kering, distribusi

gas yang tidak merata, serta berkurangnya aktivitas mikroorganisme (Shareefdeen and Singh, 2005). Kelembapan merupakan salah satu hal penting yang mempengaruhi performa biofilter sebagai aktivitas biologis yang meningkat seiring dengan aktivitas air. Panas yang dibentuk pada reaksi biologis dan kelembapan pada polutan yang masuk dapat menentukan laju air yang hilang, dan dari sinilah dapat diketahui kebutuhan air akibat kelembapan yang berkurang (Morales et al. 2003).

4.6 Hasil Uji Perkembangan Mikroba

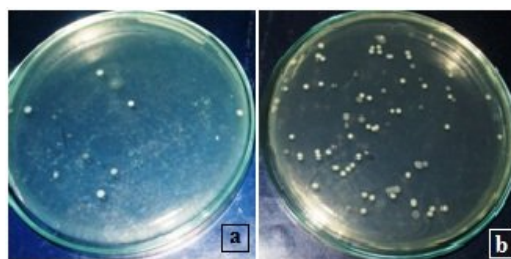
Mikroba pada medium filter akan diuji dengan menggunakan dua metode analisis, yaitu TPC (*Total Plate Count*) dan SEM (*Scanning Electron Microscope*). Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui perkembangan mikroba sebelum dan sesudah proses biofilter.

4.6.1 Metode TPC (*Total Plate Count*)

Uji *Total Plate Count* ini dilakukan di Laboratorium Teknik Lingkungan, Departemen Teknik Sipil, Universitas Indonesia. Uji TPC dilakukan untuk mengetahui jumlah koloni mikroba dalam satu sampel, dengan perhitungan mikroba dilakukan dengan asumsi bahwa satu koloni bakteri dihasilkan oleh satu sel mikroba. Pada metode ini digunakan nutrient agar sebagai media untuk pengembangbiakan mikroba yang akan dihitung. Hasil perhitungan TPC direpresentasikan dalam satuan *Colony Forming Units* (CFU) per gram sampel karbon aktif yang diuji.

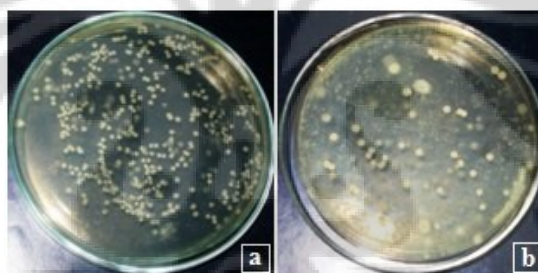
Metode TPC juga meliputi dilusi/pengenceran sampel, pembuatan nutrient agar sebagai media perkembangan mikroba, dan inkubasi sampel TPC selama 1 sampai 2 hari dengan rentang suhu 30-35⁰C untuk menunggu pertumbuhan mikroba yang akan dihitung. Masa inkubasi diperlukan untuk menumbuhkan mikroba yang ditandai dengan munculnya bulatan seperti gel berwarna putih susu yang menyebar pada media agar. Rentang suhu yang digunakan selama masa inkubasi tidak lebih dari 35⁰C karena diatas suhu tersebut bakteri patogen yang tidak diharapkan akan tumbuh yang akan membunuh bakteri nitrifikasi. Berikut ini merupakan contoh gambar hasil TPC didalam cawan petri. Gambar

4.12 berikut merupakan gambar hasil uji TPC mikroba sesaat dan sesudah diberi nutrisi tambahan dalam larutan sintetik.



Gambar 4.12 Hasil uji TPC pada medium sintetik: (a) 0 jam dan (b) 48 jam

Berdasarkan gambar 4.12 pada uji TPC jam ke-0 yaitu saat mikroba baru ditanam pada medium sintetik, berbeda dengan gambar uji TPC mikroba yang sudah ditanam pada medium sintetik selama 48 jam. Terlihat bahwa lebih banyak keberadaan mikroba saat sudah ditanam pada medium sintetik, hal ini mengindikasikan mikroba telah tumbuh dan berkembang dengan baik dengan kandungan nutrisi tambahan pada medium sintetik.



Gambar 4.13 Hasil uji TPC pada karbon aktif: (a) sebelum biofiltrasi dan (b) setelah biofiltrasi

Jika dibandingkan dengan gambar 4.12, gambar 4.13 uji TPC sebelum biofiltrasi terlihat lebih banyak mikroba, hal ini dikarenakan koloni mikroba yang semakin bertambah saat mikroba dalam larutan sintetik diinokulasi ke dalam media karbon aktif selama 72 jam. Dengan demikian hal ini menunjukkan bahwa mikroba telah tumbuh dan berkembang semakin baik dengan membentuk lapisan *biofilm* pada permukaan karbon aktif. Gambar uji TPC setelah biofiltrasi terlihat berkurang koloni mikroba jika dibandingkan dengan TPC sebelum biofiltrasi. Hal ini dikarenakan koloni bakteri yang berkurang atau mati selama proses biofiltrasi berlangsung. Berikut ini tabel keseluruhan koloni mikroba untuk variasi pH awal media filter pada biofilter yang dilakukan.

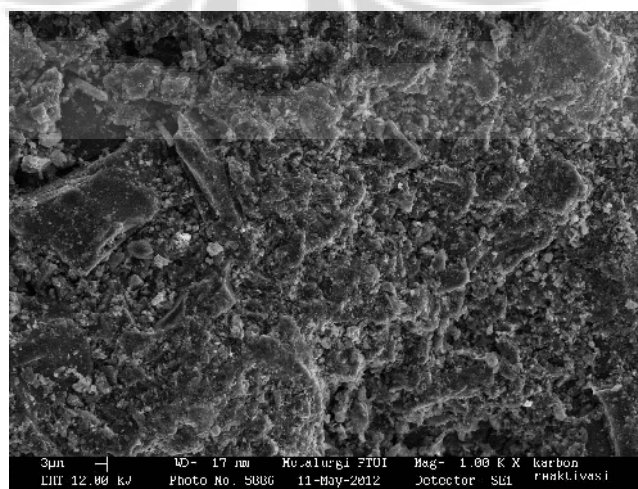
Tabel 4.1 Hasil uji TPC mikroba

Sampel		Jumlah Bakteri (CFU/mL)				
		(pH 8)	(pH 7)	(pH 6)	(pH 5)	(pH 4)
Medium	jam ke-0	24×10^7	26×10^9	36×10^8	40×10^9	59×10^9
Sintetik	jam ke-48	13.4×10^8	49×10^{10}	25×10^{10}	54×10^9	34×10^{10}
Sebelum	Biofilter	10×10^{11}	22×10^{12}	12×10^{11}	9×10^{11}	96×10^{10}
Sesudah		17×10^9	45.5×10^{10}	10.1×10^9	5×10^8	12×10^8

Ketika gas polutan (N_2O) melewati media filter, akan diadsorb oleh lapisan *biofilm* yang kemudian didegradasi oleh kultur bakteri yang hidup didalam lapisan tersebut (Devinny et al., 2007). Berkurangnya jumlah koloni mikroba pada uji TPC dapat disebabkan oleh tidak adanya suplai nutrisi. Mikroba memerlukan makanan dengan nutrisi seimbang untuk dapat bertahan hidup dan berkembang biak (Kumar et al., 2011). Pada eksperimen ini, nutrisi tambahan diberikan hanya pada saat kultur mikroba saja, sedangkan selama proses biofiltrasi berlangsung tidak ada suplai nutrisi terhadap mikroba.

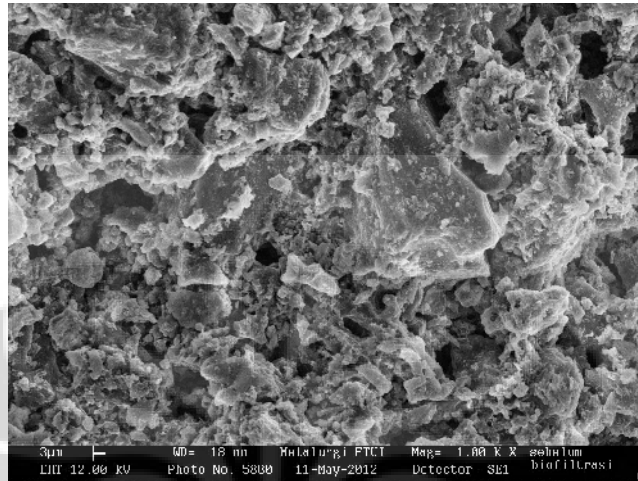
4.6.2 Metode SEM (*Scanning Electron Microscope*)

Untuk melihat morfologi media filter karbon aktif sebelum dan setelah biofilter secara mikroskopik, dilakukan pengamatan secara visual dengan uji SEM (*Scanning Electron Microscope*) dengan perbesaran tertentu. Gambar 4.14 berikut ini adalah gambar hasil uji SEM karbon aktif sebelum diinokulasi oleh mikroba.



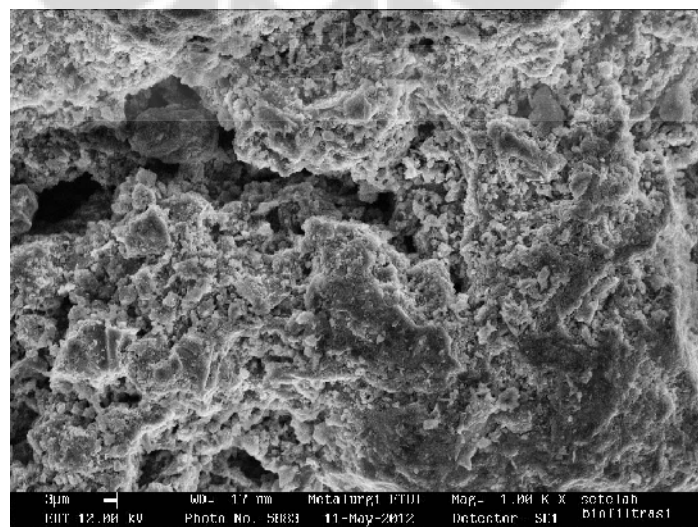
Gambar 4.14 Hasil uji SEM karbon aktif

Gambar 4.14 diatas adalah bentuk permukaan karbon aktif dengan 1000 kali perbesaran. Karbon aktif yang belum diinokulasi mikroba tampak permukaanya masih kasar dan tidak tertutup zat lain. Perubahan gambar permukaan karbon aktif akan terlihat setelah diinokulasi oleh mikroba dan proses adsorpsi.



Gambar 4.15 Hasil SEM karbon aktif sebelum biofiltrasi

Dari hasil SEM yang ditunjukkan pada gambar 4.15 dimana pada saat karbon aktif sudah diinokulasi oleh mikroba, terlihat permukaannya lebih tertutupi dengan warna putih. Hal tersebut merupakan lapisan *biofilm* yang dibentuk oleh mikroba setelah diinokulasi selama 3 hari. Pembentukan *biofilm* membutuhkan waktu beberapa hari atau bulan, tergantung dari konsentrasi mikroorganisme itu sendiri (Kumar et al., 2011). Gambar 4.16 berikut ini adalah hasil uji SEM karbon aktif setelah biofiltrasi.



Gambar 4.16 Hasil SEM karbon aktif setelah biofiltrasi

Pada gambar 4.16 menunjukkan terlihat lebih dipenuhi warna putih, hal tersebut merupakan lapisan *biofilm* yang lebih tebal dibandingkan dengan uji SEM karbon aktif sebelum biofilter. Ketebalan *biofilm* dapat disebabkan oleh keberadaan konsentrasi substrat dan produk hasil metabolisme (Stewart dan Frankli, 2008). Berdasarkan data hasil uji TPC, dimana koloni mikroba setelah biofilter berkurang dibandingkan dengan sebelum biofilter, hal ini mengindikasikan bahwa mikroba pada karbon aktif dapat tumbuh dan mati selama proses biofilter berlangsung, karena akumulasi *biofilm* juga dipengaruhi oleh akumulasi biomassa, seperti sisa sel-sel mati, padatan terdispersi, dan endapan organik (Diks et al., 1994).

4.7 Pemodelan Hasil Eksperimen

Untuk mengetahui fenomena adsorpsi yang terjadi dalam karbon aktif, perlu dilakukan pemodelan adsorpsi. Adsorpsi isotherm dibuat dengan menggunakan data-data dari pengujian reduksi konsentrasi gas N₂O. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menguji fenomena adsorpsi di tanah dengan menggunakan persamaan *Langmuir* (Pierce dan Moore, 1980, Sakata, 1987) dan *Freundlich* (Roy et al., 1986). Dengan demikian dibuat pemodelan linearisasi *Langmuir* dan *Freundlich* dari data hasil uji reduksi konsentrasi gas N₂O pada eksperimen ini. Proses adsorpsi terjadi pada permukaan medium karbon aktif, dan proses terjadi pada suhu ruang yang cenderung konstan dan dengan tekanan atmosferik.

4.7.1 Pemodelan *Langmuir*

Persamaan *Langmuir* merupakan persamaan yang menghubungkan antara konsentrasi zat yang diserap oleh adsorben dengan konsentrasi zat adsorbat di fasa cair atau gas disekelilingnya pada keadaan setimbang dan pada suatu suhu. Dari data eksperimen yang didapat, dilakukan perhitungan terhadap q_e , dan C_e , dengan menggunakan persamaan (2.4) dan (2.5) berikut ini :

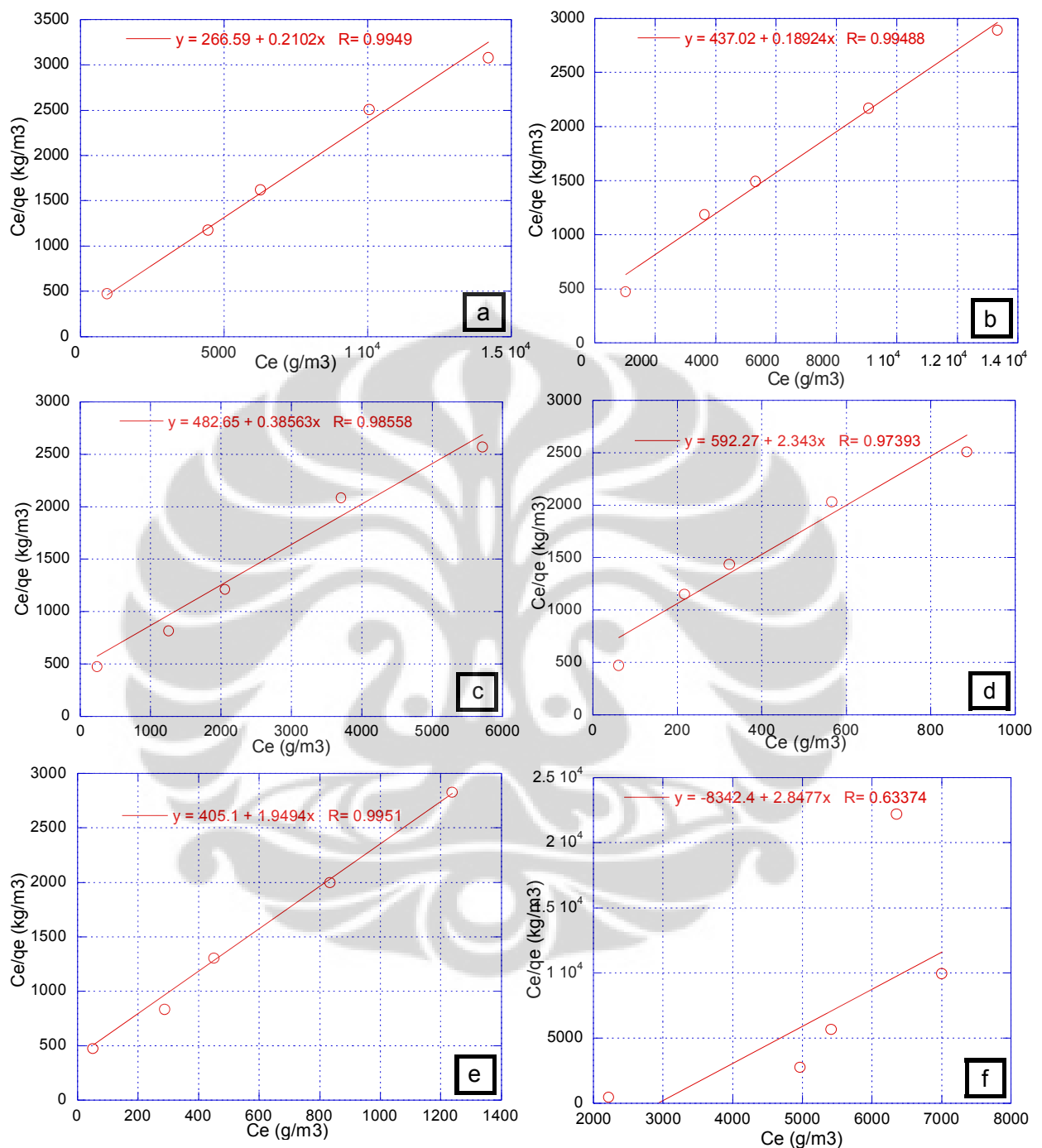
$$q_e = \frac{v}{m} (C_0 - C_e)$$

dan

$$C_e = \frac{n_{N_2O} \times Mr_{N_2O}}{V}$$

Setelah dilakukan perhitungan C_e dan C_e/q_e , kemudian diplot grafiknya dengan C_e sebagai sumbu x dan C_e/q_e sebagai sumbu y. Berikut merupakan grafik

linearisasi adsorpsi isotermis pada eksperimen biofiltrasi dengan medium filter karbon aktif.



Gambar 4.17 Grafik adsorpsi isotermis *Langmuir* karbon aktif dengan: (a) pH awal 8, (b) pH awal 7, (c) pH awal 6, (d) pH awal 5, (e) pH awal 4, dan (f) tanpa mikroba

Dari gambar grafik tersebut dapat dilihat bahwa kurva yang dihasilkan untuk semua variasi pH awal media adalah kurva yang naik dan hampir linear. Hal ini menunjukkan sebandingnya nilai C_e dan C_e/q_e , dimana semakin besar

konsentrasi gas N₂O di *outlet*(C_e), maka akan semakin besar pula konsentrasi gas N₂O setimbang di adsorben (C_e/q_e).

Untuk mencari konstanta *Langmuir* (K_L) dengan menggunakan persamaan linearisasi (2.7) berikut :

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

Nilai konstanta *Langmuir* dapat dicari dari gradient (q_m)⁻¹ dan intersep (q_mK_L)⁻¹.

Berikut hasil perhitungan konstanta *Langmuir* yang didapatkan:

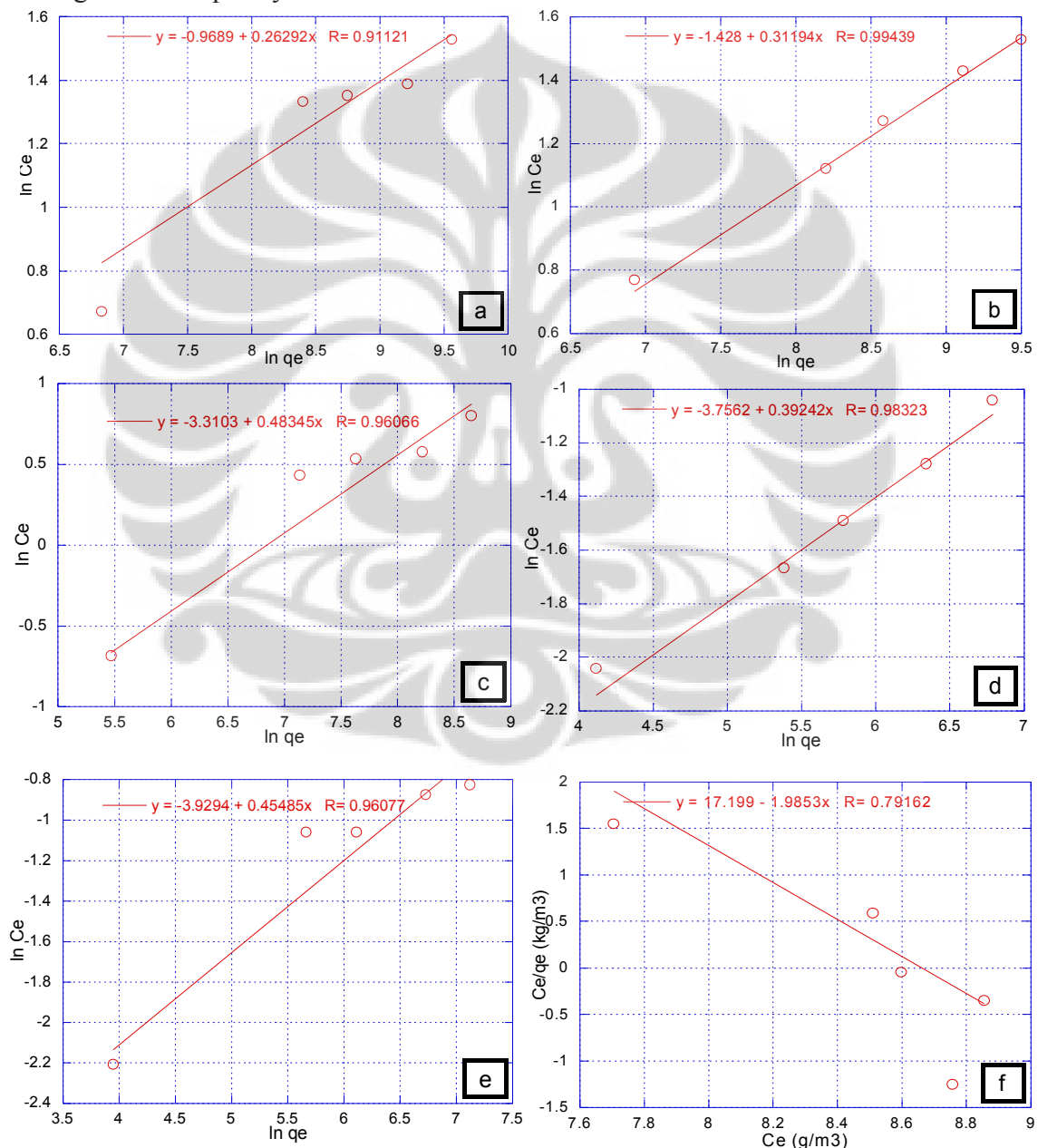
Tabel 4.2 Nilai Konstanta *Langmuir* pada medium karbon aktif

Media Karbon Aktif	Koefisien korelasi (R ²)	Konstanta <i>Langmuir</i>	
		q _m (g N ₂ O/kg karbon aktif)	K _L (m ³ /g)
pH awal 8	0,9949	4,7619	0,0008
pH awal 7	0,9948	5,2910	0,0004
pH awal 6	0,9855	2,5974	0,0008
pH awal 5	0,9739	0,4268	0,0040
pH awal 4	0,9951	0,5131	0,0048
Tanpa mikroba	0,6337	0,3512	-0,0003

Nilai q_m menunjukkan keterbatasan kapasitas adsorpsi bila permukaan tertutup penuh dengan adsorbat dan nilai K_L menunjukkan kemampuan adsorben untuk mengikat adsorbat. Semakin tinggi nilai q_m, maka akan semakin banyak gas N₂O yang diadsorp. Semakin tinggi nilai K_L, maka semakin baik performa adsorben dalam mengikat adsorbat (gas N₂O). Nilai K_L yang negatif menunjukkan bahwa gas N₂O yang dapat diadsorp semakin lama semakin berkurang sampai mencapai kondisi jenuhnya (konsentrasi *inlet* = konsentrasi *outlet*) (Pontificia, 2010). Pada hasil diatas nilai K_L positif, menunjukkan bahwa laju adsorpsi lebih besar daripada laju desorpsi. Data pada tabel menunjukkan bahwa untuk media tanpa mikroba memiliki nilai q_m dan K_L yang paling kecil dibandingkan dengan media filter (adsorben) yang diinokulasi oleh mikroba. Hal ini menunjukkan bahwa pada eksperimen ini, kapasitas dan kemampuan adsorben lebih baik jika mengikut sertakan mikroba di dalamnya.

4.7.2 Pemodelan *Freundlich*

Persamaan *Freundlich* biasanya digunakan sebagai pendekatan saja karena persamaan ini tidak dapat digunakan untuk gas bertekanan tinggi karena kurva yang dihasilkan akan jauh dari linear dan akan cenderung terbentuk *monolayer* (Meshko, 2001). Setelah dilakukan perhitungan $\log C_e$ dan $\log q_e$ dari data-data eksperimen yang dilakukan, kemudian diplot grafiknya dengan $\log C_e$ sebagai sumbu x dan $\log q_e$ sebagai sumbu y. Gambar (4.23) berikut ini merupakan grafik hasil plotnya.



Gambar 4.18 Grafik adsorpsi *Freundlich* karbon aktif dengan: (a) pH awal 8, (b) pH awal 7, (c) pH awal 6, (d) pH awal 5, (e) pH awal 4, dan (f) Tanpa mikroba

Dari gambar grafik tersebut dapat dilihat bahwa kurva yang dihasilkan untuk semua variasi pH awal media adalah kurva yang naik, hal ini menunjukkan sebandingnya nilai C_e dan q_e , dimana semakin besar konsentrasi gas N₂O di *outlet*, maka akan semakin besar pula konsentrasi gas N₂O setimbang di adsorben. Dengan demikian persamaan *Freundlich* cocok digunakan untuk merepresentasikan proses adsorpsi gas N₂O untuk medium karbon aktif yang diinokulasi mikroba, tetapi tidak untuk adsorpsi media karbon aktif tanpa mikroba.

Untuk mencari nilai n dan K_f dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan (2.11) berikut ini:

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e$$

dengan melalui $m = \text{gradien} = 1/n$ dan $\text{intersep} = \ln K_f$

Tabel 4.3 Nilai Konstanta *Freundlich* pada medium karbon aktif

Media Karbon Aktif	Koefisien Kolerasi (R ²)	Konstanta <i>Freundlich</i>	
		n	K_f (m ³ /g)
pH awal 8	0,9112	3,8168	0,3798
pH awal 7	0,9943	3,1447	0,2283
pH awal 6	0,9606	2,0704	0,0365
pH awal 5	0,9832	2,5510	0,0234
pH awal 4	0,9607	2,2026	0,0197
Tanpa mikroba	0,7916	-0,5038	2,9E+07

Konstanta K_f dari persamaan *Freundlich* menggambarkan kapasitas adsorpsi dari permukaan medium filter dan nilai n di atas menunjukkan kemampuan intensitas adsorpsi. Semakin tinggi nilai K_f , semakin tinggi pula kemampuan adsorben untuk mengikat adsorbat (N₂O) (Kai Lin, 2008). Tetapi hal ini tidak berlaku untuk media filter tanpa mikroba, dari nilai n yang dihasilkan menunjukkan bahwa persamaan ini tidak dapat digunakan untuk proses adsorpsi media filter tanpa mikroba. Semakin besar nilai n , semakin besar jumlah gas N₂O yang dapat diadsorp, dengan rentang nilai $1 < n < 10$ menunjukkan kemampuan adsorpsi yang baik (Meshko et al., 2001).

4.8 Perbandingan Hasil Biofiltrasi Gas N₂O

Penelitian tentang biofiltrasi gas N₂O di departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, juga dilakukan oleh Widyastuti (2012) dengan menggunakan media filter berupa zeolit alam lampung yang diinokulasi dengan *N. winogradskyi*. Dengan melakukan eksperimen dan penentuan parameter yang sama, maka data hasil eksperimen keduanya akan dibandingkan untuk mengetahui medium mana yang paling baik untuk digunakan pada biofiltrasi gas N₂O.

Tabel 4.4 Hasil perbandingan media filter karbon aktif dan zeolit alam

Perbandingan		Media Filter	
		Karbon Aktif	Zeolit Alam
pH awal media optimum		pH 7	pH 7
Efisiensi reduksi optimum (%)		93,82	94,73
Rata-rata efisiensi reduksi (%)		71,8	47,29
Jumlah koloni mikroba (CFU/mL)	Medium sintetik jam ke-0	$2,6 \times 10^{10}$	3×10^{13}
	Medium sintetik jam ke-48	$4,9 \times 10^{11}$	$2,2 \times 10^{12}$
	Sebelum biofiltrasi	$2,2 \times 10^{13}$	$2,5 \times 10^{14}$
	Setelah biofiltrasi	$4,5 \times 10^{11}$	$2,0 \times 10^{12}$

Tabel (4.4) merupakan data hasil perbandingan eksperimen dengan media filter yang berbeda. Data hasil eksperimen yang dibandingkan yaitu nilai optimum pH awal media, efisiensi reduksi dan rata-rata efisiensi reduksi pada pH awal yang optimum, serta jumlah koloni mikroba sebelum dan setelah biofiltrasi.

Untuk pH awal media didapat hasil optimum untuk kedua media yang sama yaitu pada pH 7, hal ini terjadi karena pada kedua eksperimen sama-sama menggunakan *N. winogradskyi* sebagai mikroba pendegradasi. Efisiensi reduksi gas N₂O optimum perbedaanya tidak signifikan, keduanya memiliki nilai yang tinggi, tetapi untuk nilai rata-ratanya lebih tinggi yang menggunakan media karbon aktif dibandingkan dengan zeolit alam, hal ini dikarenakan adsorpsi gas N₂O pada awal proses biofiltrasi menggunakan karbon aktif lebih baik dari zeolit alam karena luas permukaannya yang lebih besar (Othmer, 1992).

Dari hasil uji TPC, pertumbuhan mikroba sejak setiap media filter direndam dalam larutan sintetik untuk inokulasi hingga sebelum biofiltrasi dilakukan, tingkat pertumbuhannya relatif sama, yaitu masing-masing 10^2 CFU/mL. Begitu

pula setelah proses biofiltrasi, terjadi penurunan koloni mikroba karena tidak ada asupan nutrisi pada kedua media filter selama proses biofiltrasi berlangsung, tetapi jumlah koloni mikroba dari uji TPC tidak dapat merepresentasikan kinerja mikroba dalam *biofilm* selama proses biofiltrasi.



BAB 5

KESIMPULAN

Berikut ini beberapa kesimpulan dari uji hasil eksperimen dan pembahasan yang telah diuraikan sebelumnya, yaitu :

1. Efisiensi reduksi dalam biofiltrasi gas N₂O dengan pH awal media filter karbon aktif optimum pada pH 7 yaitu 93,8 % dengan rata-rata selama 24 jam sebesar 71,89 %.
2. Perkembangan koloni bakteri paling baik pada media karbon aktif terjadi pada pH awal media 7, sebanding dengan efisiensi reduksi yang optimum, dengan penurunan jumlah koloni bakteri hampir tidak signifikan, yaitu sebelum biofiltrasi sebanyak 22×10^{12} CFU/mL dan setelah biofiltrasi sebanyak $45,5 \times 10^{10}$ CFU/mL.
3. Pemodelan adsorpsi isoteremis *Langmuir* dan *Freundlich* dapat digunakan untuk fenomena adsorpsi pada media filter yang diinokulasi dengan mikroba, dimana kemampuan biosorpsi (dengan mikroba pendegradasi) pada media filter lebih baik dibandingkan dengan kemampuan adsorpsi (tanpa bakteri pendegradasi) dalam proses biofiltrasi gas N₂O
4. Performa biofiltrasi dalam mereduksi gas N₂O secara keseluruhan hasilnya baik dilakukan dengan menggunakan media filter karbon aktif maupun dengan zeolit alam.

DAFTAR PUSTAKA

- Adipraworo, D. 2005. Adsorpsi Surfaktan Linear Alkulbenzene Sulfonate dengan Karbon Aktif. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok.
- Adriaty, Lila. (2009). “Pemanfaatan Kompos sebagai Biofilter untuk Mereduksi Emisi Gas N₂O”. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok.
- Ahlers, B., W. Konig, and E. Bock. 1990. *Nitrite reductase activity in Nitrobacter vulgaris*. FEMS Microbiol.Lett. 67:121-126.
- Alamenda, 2009. Tingkat Pencemaran Udara di Indonesia. Tanggal kunjungan : 5 Oktober 2011. <http://alamendah.wordpress.com/2009/09/23/tingkat-pencemaran-udara-di-indonesia/>
- Aleem, M. I. H., and D. L. Sewell. 1984. *Oxidoreductase systems in Nitrobacter agilis*, p. 185-210. In W. R. Strohl and O. H. Tuovinen (ed.), Microbial chemoautotrophy. Ohio State University Press, Columbus, Ohio.
- Babbitt, Callie W., Pacheco, A. & Lindner, A. S. 2009. Methanol removal efficiency and bacterial diversity of an activated carbon biofilter. Bioresource Technology Journal : 6207-6216. USA.
- Barnes J.M., Apel W.A., dan Barrett K.B. 2005. *Removal of nitrogen oxides from gas streams using biofiltration*. *J. Hazard. Materials*, Vol. 41, pp 315–326.
- Bock E., H. P. Koops, and H. Harm. 1986. *Cell biology of nitrifiers*, p. 17-38. In J. I. Prosser (ed.), Nitrification, vol. 20. IRL, Washington, D.C.
- Bock, E., H.-P.Koops, H. Harms, and B. Ahlers. 1991. *The biochemistry of nitrifying organisms*, p. 171-200. In J. M. Shively and L. L. Barton (ed.), Variations in autotrophic life. Academic Press, San Diego, Calif.
- Cahyani, Gede H. “Bioproses Pencemar Udara.” <http://Gedeonwww>. Tanggal kunjungan : 02 Nopember 2011).
- Corsi, R.L., & Seed, L. 1995. *Bioltration of BTEX: media, substrate, and loadings effects*. Environmental Progress, 14, 151–158.
- Datta, Indrani dan D. Grant Allen. 2005. *Biotechnology for Odor and Air Pollution Control*. Verlag Berlin Heidelberg : Springer

- 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
- Duan, H., Koe, Lawrence C.C., Yan, Rong.& Chen, X. 2006. *Biological treatment of H₂S using pellet activated carbon as a carrier of microorganisms in a biofilter*. Water Research Journal : 2629-2636. Singapore.
- Elias, A., Barona. A., Areguy, A., Rios. J., Aranguiz, I., Penas, J. 2002. *Evaluation of packing material for the biodegradation of H₂S and product analysis*. Procces Biochem. 37, 813-820.
- Figuerido, J.L, Moulijn J.A. 1986. *Carbon and coal Gasification Science and Technology*. Martinus Nijhoff Publisher. Boston
- Freitag, A., M. Rudert, and E. Bock. 1987. *Growth of Nitrobacter by dissimilatoric nitrate reduction*. FEMS Microbiol.Lett. 48:105-109.
- Govind, Rakesh. 2010. *Biofiltration: An Innovative Technology for The Future*. University of Cincinnati, Cincinnati.
- Hodge, D.S., Medina V.F., Islander R.L., Devinny J.S. 1991. *Treatment of hydrocarbon fuel vapors in biofilters*. Environ Technol 12:655–662.
- Irwan, W.A.. 2010. *Biofiltrasi Gas Dinitrogen Monoksida Menggunakan Pelet Kompos Berbasis Kotoran Kambing Sebagai Medium Filter*. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok.
- Institute for Fermentation Osaka (IFO). 2000. *List of Cultures Microorganism*. 11th edition. Japan.
- Janni, K. A., Maier, W. J., Kuehn, T. H., Yang, C.-H., Bridges, B. B., Velsey, D., & Nellis, M. A. 2001. *Evaluation of bioltration of air—an innovative air pollution control technology*. ASHRAE Transactions, 107, 198–214.
- Kaili Lin, et al. 2009. *Study the adsorption of phenol from aqueous solution on hydroxyapatite nanopowders*. J. Hazard. Materials, Vol. 161, pp 231–240.
- Kennes, C., & Thalasso F. 1998. *Waste gas biotreatment technology*. J. Chem. Technol. Biotechnol , 72, 303-319.

- Kinney KA, Chang DPY, Schroeder Ed, Scow KM. 1996. *Performance of a directionally-switching biofilter treating toluene contaminated air*. In: Proc 89th Annu Meet Exhibition Air and Waste Management Association, Nashville.
- Kumar, TP., Rahul, Kumar, MA., & Chandrajit B. 2011. *Biofiltration of Volatile Organic Compounds (VOCs) – An Overview*. Research Journal of Chemical Sciences. 8: 83-92.
- 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.
- Linda, Mei. 2010. Pengaruh Kedalaman dan Waktu Inkubasi Medium Kompos Berbasis Kotoran Kambing Dalam Biofiltrasi Gas N₂O. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok.
- Maulidiyasti, E. 2008. *Peningkatan Proses Degradasi Hidrogen Sulfida Dalam Biofilter Menggunakan Zeolit Alam Lampung Yang Diinokulasi oleh Thiobacillu thioparus*. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok. Juli 2008.
- Madigan, M.T. 2009. *Brock Biology of Microorganism*. Twelefh Edition: 403-404.
- Meshko, V., Markovska, L., Mincheva, M., and Rodgrigues, A.E. 2001. *Adsorption of Basic Dyes n Granular Activated Carbon and Natural Zeolite*. Pergamon. Watres. Vol. 25, No. 14, 3357-3366.
- 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.
- Noviani, C. 2009. Reduksi gas dinitrogen monoksida melalui biofiltrasi dengan menggunakan material kompos termodifikasi. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok.

- Ondarts, Michel., Hort, C'ecile., Platel, Vincent. & Sochard, Sabine. 2010. *Indoor Air Purification by Compost Packed Biofilter*. International Journal Of Chemical Reactor Engineering. 8:1-14.
- Ottengraf, S.P.P. 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 Bifilters*. Bioprocess Engineering, 1, 61–69.
- Reza, E. 2002. Studi Literatur Perancangan Alat Adsorpsi Regenerasi Karbon Aktif. Departemen Gas dan Petrokimia FTUI.Depok.
- Rosen, Milton J. 1989. *Surfactant and Interfacial Phenomena*.Edisi ke-2. New York : John Wiley & Sons.
- Sanjaya, E. 2010.Studi Fenomena Adsorpsi Pada Kompos Kambing Sebagai Medium Biofilter. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok.
- Shareefdeen/Singh (Eds.). 2005. *Biotechnology for odor and air pollution control*. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Singh, A dan Ward, O.P. 2004.*Biodegradation and Bioremediation*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Sontheimer, H. *et al.*,. 1988. *Activated Carbon for Water Treatment*. EnglerBunteInstitut, Karlsruhe: DVGW-Forschungsstelle German.
- Starkenbug, S. R, et al.,. 2006. Genom Sequence of The chemolithotrophic NitriteOxidizing Bacterium Nitrobacter Winogradsky Nb-255. American Society For Microbiology. Vol.72. No.3
- Swanson WJ, Loehr RC. 1997. *Biofiltration: fundamentals, design and operations principles and applications of biological APC technology*. J Environ Eng ASCE 123:538–54
- 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.
- Wani, A.H., Branion, R.M.r., Lau, A.K. 1997. *Biofiltration: a promising and cost effective control technology for odors, VOCs and air toxics*. J. Environ. Sci. Health A32, 2027-2055.

- Watson, S. W., E. Bock, H. Harms, H. P. Koops, and A. B. Hooper. 1989. *Genera of nitrite-oxidizing bacteria*, p. 1813-1822. In J. T. Staley (ed.), *Bergey's manual of systematic bacteriology*, vol. 3. Williams and Wilkins, Baltimore, Md.
- Yang, W-F., Haoj-Jan, H., Yu-Chiung, Y. and Jieh-Yu, S. 2007. *The Effect of Selected Parameters on The Nitric Oxide Removal by Biofilter*. National Taiwan University, Taiwan.
- Yang, Chunping., Chen, Hong., Zeng, Guangming., Yu-Guanlong., & Luo, Shengliang. 2010. *Biomass accumulation and control strategies in gas biofiltration*. *Biotechnology Advances*. 28:531-540
- Anonim. *What is laughing gas*. Tanggal kunjungan : 22 Nopember 2011. <http://antoine.frostburg.edu/chem/senese/101/inorganic/faq/laughing-gas.shtml>.
- Anonim. Struktur molekul gas dinitrogen monoksida. Tanggal kunjungan: 10 Oktober 2011. <http://antoine.frostburg.edu/chem/senese/101/inorganic/faq/laughing-gas.shtml>

LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Hasil Kalibrasi Luas Peak Gas N₂O vs Volume Gas Dalam Syringe

Volume Syringe (mL)	Waktu Retensi (menit)	Luas Peak N ₂ O
0.2	2.550	20850
0.4	2.547	36683
0.6	2.525	52928
0.8	2.538	66598
1	2.527	86829



Lampiran 2. Data Hasil Uji Eksperimen Biofilter dengan pH Awal Media 8

Perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O:

- Volume N₂O hasil biofiltrasi, dari persamaan kalibrasi $y = 8e + 10x + 4215$
- Massa N₂O, dengan massa jenis N₂O = 1812 g/m³
- Konsentrasi N₂O, dari massa N₂O

Waktu (jam)	Suhu (°C)	Waktu Retensi	Kelembaban (%)	Konsentrasi	Luas <i>peak</i> Area N ₂ O	Volume (m ³)	Massa (g)	Konsentrasi (g/m ³)
0	29.2	2.553	50	1.559	114844	1.38286E-06	0.002506	2505.7469
1	29.2	2.578	50	1.0731	74031	8.727E-07	0.001581	1581.3324
2	29.9	2.576	49	0.5714	38033	4.22725E-07	0.000766	765.9777
3	30.9	2.522	46	0.5234	35973	3.96975E-07	0.000719	719.3187
4	30.9	2.598	45	0.5144	34346	3.76638E-07	0.000682	682.4672
5	30.9	2.632	45	0.4644	31517	3.41275E-07	0.000618	618.3903
6	30	2.578	45	0.4612	31311	3.387E-07	0.000614	613.7244
23	30.2	2.57	45	0.3951	27534	2.91488E-07	0.000528	528.1754
24	30	2.677	46	0.2715	18774	1.81988E-07	0.00033	329.7614

Lampiran 3. Data Hasil Uji Eksperimen Biofilter dengan pH Awal Media 7

Perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O:

- Volume N₂O hasil biofiltrasi, dari persamaan kalibrasi $y = 8e + 10x + 4215$
- Massa N₂O, dengan massa jenis N₂O = 1812 g/m³
- Konsentrasi N₂O, dari massa N₂O

Waktu (jam)	Suhu (°C)	Wantu Retensi	Kelembaban (%)	Konsentrasi	Luas <i>peak</i> Area N ₂ O	Volume (m ³)	Massa (g)	Konsentrasi (g/m ³)
0	28.1	2.577	41	1.5539	106872	1.2795E-06	0.002318	2318.4540
1	28.1	2.580	41	1.0275	61927	7.17688E-07	0.0013	1300.4498
2	28.6	2.593	43	0.8292	54946	6.30425E-07	0.001142	1142.3301
3	28.4	2.585	43	0.6801	43000	4.811E-07	0.000872	871.7532
4	28.4	2.590	42	0.6268	32578	3.50825E-07	0.000636	635.6949
5	28.3	2.597	42	0.524	28555	3.00538E-07	0.000545	544.5740
6	28.1	2.593	41	0.2889	19870	1.91975E-07	0.000348	347.8587
23	27.6	2.600	45	0.2702	14523	1.25138E-07	0.000227	226.7492
24	27.8	2.562	45	0.2582	10840	7.91E-08	0.000143	143.3292

Lampiran 4. Data Hasil Uji Eksperimen Biofilter dengan pH Awal Media 6

Perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O:

- Volume N₂O hasil biofiltrasi, dari persamaan kalibrasi $y = 8e + 10x + 4215$
- Massa N₂O, dengan massa jenis N₂O = 1812 g/m³
- Konsentrasi N₂O, dari massa N₂O

Waktu (jam)	Suhu (°C)	Waktu Retensi	Kelembaban	Konsentrasi	Luas <i>peak</i> Area N ₂ O	Volume (m ³)	Massa (g)	Konsentrasi (g/m ³)
0	29.1	2.658	52	1.5322	110510	1.32498E-06	0.002401	2400.8547
1	29.1	2.653	52	1.4994	100010	1.19373E-06	0.002163	2163.0297
2	30.4	2.647	51	1.4015	97699	1.16484E-06	0.002111	2110.6856
3	30.5	2.620	50	1.0188	78390	9.23475E-07	0.001673	1673.3367
4	30.8	2.727	50	0.9633	74970	8.80725E-07	0.001596	1595.8737
5	29.8	2.673	48	0.9097	74930	8.80225E-07	0.001595	1594.9677
6	29.9	2.635	49	0.8537	73428	8.6145E-07	0.001561	1560.9474
23	30	2.643	49	0.937	68197	7.96063E-07	0.001442	1442.4653
24	30.2	2.626	49	0.9025	64169	7.45713E-07	0.001351	1351.2311

Lampiran 5. Data Hasil Uji Eksperimen Biofilter dengan pH Awal Media 5

Perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O:

- Volume N₂O hasil biofiltrasi, dari persamaan kalibrasi $y = 8e + 10x + 4215$
- Massa N₂O, dengan massa jenis N₂O = 1812 g/m³
- Konsentrasi N₂O, dari massa N₂O

Waktu (jam)	Suhu (°C)	Waktu Retensi	Kelembaban (%)	Konsentrasi	Luas <i>peak</i> Area N ₂ O	Volume (m ³)	Massa (g)	Konsentrasi (g/m ³)
0	30.4	2.573	43	1.5316	108966	1.30568E-06	0.002366	2365.8831
1	30.4	2.572	43	1.4874	106263	1.27189E-06	0.002305	2304.6602
2	30.8	2.598	47	1.4627	106000	1.2686E-06	0.002299	2298.7032
3	30.8	2.578	45	1.4609	105034	1.25653E-06	0.002277	2276.8233
4	30.6	2.575	43	1.4047	104270	1.24698E-06	0.00226	2259.5187
5	30.4	2.593	43	1.3793	104058	1.24433E-06	0.002255	2254.7169
6	27.2	2.600	39	1.3404	103163	1.23314E-06	0.002234	2234.4452
23	27.5	2.590	39	1.2372	102189	1.22096E-06	0.002212	2212.3841
24	28.1	2.595	40	1.2004	101614	1.21378E-06	0.002199	2199.3603

Lampiran 6. Data Hasil Uji Eksperimen Biofilter dengan pH Awal Media 4

Perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O:

- Volume N₂O hasil biofiltrasi, dari persamaan kalibrasi $y = 8e + 10x + 4215$
- Massa N₂O, dengan massa jenis N₂O = 1812 g/m³
- Konsentrasi N₂O, dari massa N₂O

Waktu (jam)	Suhu (°C)	Waktu Retensi	Kelembaban (%)	Konsentrasi	Luas <i>peak</i> Area N ₂ O	Volume (m ³)	Massa (g)	Konsentrasi (g/m ³)
0	27.3	2.648	52	1.5398	112765	1.35316E-06	0.002452	2451.9305
1	27.3	2.642	52	1.423	110477	1.32456E-06	0.0024	2400.1073
2	27.2	2.642	50	1.4166	109539	1.31284E-06	0.002379	2378.8616
3	27.2	2.643	48	1.4166	105548	1.26295E-06	0.002288	2288.4654
4	27.3	2.622	48	1.4046	105545	1.26291E-06	0.002288	2288.3975
5	27.3	2.628	48	1.3875	104585	1.25091E-06	0.002267	2266.6535
6	27.5	2.643	47	1.3874	104070	1.24448E-06	0.002255	2254.9887
23	27.9	2.633	44	1.3749	104038	1.24408E-06	0.002254	2254.2639
24	27.9	2.595	43	1.3386	103647	1.23919E-06	0.002245	2245.4078

Lampiran 7. Data Hasil Uji Eksperimen Biofilter dengan Media Tanpa Mikroba

Perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O:

- Volume N₂O hasil biofiltrasi, dari persamaan kalibrasi $y = 8e + 10x + 4215$
- Massa N₂O, dengan massa jenis N₂O = 1812 g/m³
- Konsentrasi N₂O, dari massa N₂O

Waktu (jam)	Suhu (°C)	Waktu Retensi	Kelembaban (%)	Konsentrasi	Luas <i>peak</i> Area N ₂ O	Volume (m ³)	Massa (g)	Konsentrasi (g/m ³)
0	28.3	2.658	44	1.524	112848	1.35791E-06	0.002461	2460.5375
1	28.3	2.657	44	0.2039	14824	1.32613E-07	0.00024	240.2939
2	28.4	2.656	43	0.4035	29042	3.10338E-07	0.000562	562.3316
3	28.6	2.675	44	1.0936	75349	8.89175E-07	0.001611	1611.1851
4	28.8	2.68	43	1.2635	92946	1.10914E-06	0.00201	2009.7572
5	29.9	2.655	51	1.0744	77416	9.15013E-07	0.001658	1658.0027
6	30.3	2.687	51	1.4647	106889	1.28343E-06	0.002326	2325.5661
23	27.2	2.717	44	1.4294	98839	1.1828E-06	0.002143	2143.2336
24	26.9	2.617	47	1.4566	98188	1.17466E-06	0.002128	2128.4885

Lampiran 8. Data Pemodelan Isoterm dengan pH Awal Media 8

Perhitungan dilakukan dengan :

- Massa Karbon Aktif = 2000 gram
- Volume Karbon Aktif = 0.004241 m³

Waktu (jam)	Luas Area	Volume (m ³) (diadsorp)	Massa N ₂ O (g) (diadsorp)	Konsentrasi (g/m ³) (diadsorp)	Langmuir			Freundlich	
					q _e (g/kg)	C _{ads} = C _e (g/m ³)	C _e /q _e (kg/m ³)	ln C _e	ln q _e
0	114844	1.38286E-06	0.002506	2505.7469					
1	74031	8.727E-07	0.001581	1581.3324	1.9601	924.4145	471.6129	6.8292	0.6730
2	38033	4.22725E-07	0.000766	765.9777	3.6890	2664.1836	722.2012	7.8877	1.3053
3	35973	3.96975E-07	0.000719	719.3187	3.7879	4450.6118	1174.9512	8.4008	1.3318
4	34346	3.76638E-07	0.000682	682.4672	3.8661	6273.8915	1622.8163	8.7442	1.3522
5	31517	3.41275E-07	0.000618	618.3903	4.0019	8161.2480	2039.3336	9.0072	1.3868
6	31311	3.387E-07	0.000614	613.7244	4.0118	10053.2705	2505.9173	9.2157	1.3892
23	27534	2.91488E-07	0.000528	528.1754	4.1932	12030.8420	2869.1251	9.3952	1.4335
24	18774	1.81988E-07	0.00033	329.7614	4.6139	14206.8275	3079.1211	9.5615	1.5291

Lampiran 9. Data Pemodelan Isoterm dengan pH Awal Media 7

Perhitungan dilakukan dengan :

- Massa Karbon Aktif = 2000 gram
- Volume Karbon Aktif = 0.004241 m³

Waktu (jam)	Luas Area	Volume (m ³) (diadsorp)	Massa (g) (diadsorp)	Konsentrasi (g/m ³) (diadsorp)	Langmuir			Freundlich	
					q _e (g/kg)	C _{ads} = C _e (g/m ³)	C _e /q _e (kg/m ³)	ln C _e	ln q _e
0	106872	1.2795E-06	0.002318	2318.4540					
1	61927	7.17688E-07	0.0013	1300.4498	2.1586	1018.0043	471.6129	6.9256	0.7694
2	54946	6.30425E-07	0.001142	1142.3301	2.4938	2194.1282	879.8215	7.6935	0.9138
3	43000	4.811E-07	0.000872	871.7532	3.0676	3640.8290	1186.8811	8.2000	1.1209
4	32578	3.50825E-07	0.000636	635.6949	3.5681	5323.5881	1491.9977	8.5799	1.2720
5	28555	3.00538E-07	0.000545	544.5740	3.7613	7097.4681	1886.9694	8.8675	1.3248
6	19870	1.91975E-07	0.000348	347.8587	4.1784	9068.0634	2170.2150	9.1125	1.4299
23	14523	1.25138E-07	0.000227	226.7492	4.4352	11159.7683	2516.1726	9.3201	1.4896
24	10840	7.91E-08	0.000143	143.3292	4.6121	13334.8931	2891.2858	9.4981	1.5287

Lampiran 10. Data Pemodelan Isoterm dengan pH Awal Media 6

Perhitungan dilakukan dengan :

- Massa Karbon Aktif = 2000 gram
- Volume Karbon Aktif = 0.004241 m³

Waktu (jam)	Luas Area	Volume (m ³) (diadsorp)	Massa (g) (diadsorp)	Konsentrasi (g/m ³) (diadsorp)	Langmuir			Freundlich	
					q _e (g/kg)	C _{ads} = C _e (g/m ³)	C _e /q _e (kg/m ³)	ln C _e	ln q _e
0	110510	1.32498E-06	0.002401	2400.8547					
1	100010	1.19373E-06	0.002163	2163.0297	0.5043	237.8250	471.6129	5.4715	-0.6846
2	97699	1.16484E-06	0.002111	2110.6856	0.6153	527.9942	858.1506	6.2691	-0.4857
3	78390	9.23475E-07	0.001673	1673.3367	1.5426	1255.5122	813.8846	7.1353	0.4335
4	74970	8.80725E-07	0.001596	1595.8737	1.7069	2060.4932	1207.1777	7.6307	0.5347
5	74930	8.80225E-07	0.001595	1594.9677	1.7088	2866.3802	1677.4334	7.9608	0.5358
6	73428	8.6145E-07	0.001561	1560.9474	1.7809	3706.2875	2081.1022	8.2178	0.5771
23	68197	7.96063E-07	0.001442	1442.4653	2.0322	4664.6769	2295.4361	8.4478	0.7091
24	64169	7.45713E-07	0.001351	1351.2311	2.2256	5714.3006	2567.5277	8.6507	0.8000

Lampiran 11. Data Pemodelan Isoterm dengan pH Awal Media 5

Perhitungan dilakukan dengan :

- Massa Karbon Aktif = 2000 gram
- Volume Karbon Aktif = 0.004241 m³

Waktu (jam)	Luas Area	Volume (m ³) (diadsorp)	Massa (g) (diadsorp)	Konsentrasi (g/m ³) (diadsorp)	Langmuir			Freundlich	
					q _e (g/kg)	C _{ads} = C _e (g/m ³)	C _e /q _e (kg/m ³)	ln C _e	ln q _e
0	108966	1.30568E-06	0.002366	2365.8831					
1	106263	1.27189E-06	0.002305	2304.6602	0.1298	61.2229	471.6129	4.1145	-2.0416
2	106000	1.2686E-06	0.002299	2298.7032	0.1424	128.4028	901.4071	4.8552	-1.9488
3	105034	1.25653E-06	0.002277	2276.8233	0.1888	217.4626	1151.5654	5.3820	-1.6669
4	104270	1.24698E-06	0.00226	2259.5187	0.2255	323.8270	1435.8282	5.7802	-1.4893
5	104058	1.24433E-06	0.002255	2254.7169	0.2357	434.9933	1845.4208	6.0753	-1.4451
6	103163	1.23314E-06	0.002234	2234.4452	0.2787	566.4312	2032.4134	6.3394	-1.2776
23	102189	1.22096E-06	0.002212	2212.3841	0.3255	719.9303	2211.9250	6.5792	-1.1225
24	101614	1.21378E-06	0.002199	2199.3603	0.3531	886.4531	2510.5432	6.7872	-1.0410

Lampiran 12. Data Pemodelan Isoterm dengan pH Awal Media 4

Perhitungan dilakukan dengan :

- Massa Karbon Aktif = 2000 gram
- Volume Karbon Aktif = 0.004241 m³

Waktu (jam)	Luas Area	Volume (m ³) (diadsorp)	Massa (g) (diadsorp)	Konsentrasi (g/m ³) (diadsorp)	Langmuir			Freundlich	
					q _e (g/kg)	C _{ads} = C _e (g/m ³)	C _e /q _e (kg/m ³)	ln C _e	ln q _e
0	112765	1.35316E-06	0.002452	2451.9305					
1	110477	1.32456E-06	0.0024	2400.1073	0.1099	51.8232	471.6129	3.9478	-2.2083
2	109539	1.31284E-06	0.002379	2378.8616	0.1549	124.8921	806.0984	4.8275	-1.8648
3	105548	1.26295E-06	0.002288	2288.4654	0.3466	288.3572	831.9390	5.6642	-1.0596
4	105545	1.26291E-06	0.002288	2288.3975	0.3468	451.8901	1303.2062	6.1134	-1.0591
5	104585	1.25091E-06	0.002267	2266.6535	0.3929	637.1671	1621.8756	6.4570	-0.9343
6	104070	1.24448E-06	0.002255	2254.9887	0.4176	834.1089	1997.4257	6.7264	-0.8733
23	104038	1.24408E-06	0.002254	2254.2639	0.4191	1031.7755	2461.7144	6.9390	-0.8696
24	103647	1.23919E-06	0.002245	2245.4078	0.4379	1238.2982	2827.7635	7.1215	-0.8257

Lampiran 13 Data Pemodelan Isoterm dengan Media Tanpa Mikroba

Perhitungan dilakukan dengan :

- Massa Karbon Aktif = 2000 gram
- Volume Karbon Aktif = 0.004241 m³

Waktu (jam)	Luas Area	Volume (m ³) (diadsorp)	Massa (g)(diadsorp)	Konsentrasi (g/m ³) (diadsorp)	Langmuir			Freundlich	
					qe (g/kg)	Cads = Ce (g/m ³)	Ce/qe (kg/m ³)	ln Ce	ln qe
0	112848	1.35791E-06	0.002461	2460.5375					
1	14824	1.32613E-07	0.00024	240.2939	4.7078	2220.2436	471.6129	7.7054	1.5492
2	29042	3.10338E-07	0.000562	562.3316	4.0249	4118.4495	1023.2366	8.3232	1.3925
3	75349	8.89175E-07	0.001611	1611.1851	1.8010	4967.8019	2758.4304	8.5107	0.5883
4	92946	1.10914E-06	0.00201	2009.7572	0.9558	5418.5822	5668.9992	8.5976	-0.0452
5	77416	9.15013E-07	0.001658	1658.0027	1.7017	6221.1170	3655.8650	8.7357	0.5316
6	106889	1.28343E-06	0.002326	2325.5661	0.2862	6356.0883	22209.2550	8.7572	-1.2511
23	98839	1.1828E-06	0.002143	2143.2336	0.6728	6673.3922	9918.7505	8.8059	-0.3963
24	98188	1.17466E-06	0.002128	2128.4885	0.7041	7005.4412	9949.9059	8.8544	-0.3509