



UNIVERSITAS INDONESIA

**OPTIMASI KONSENTRASI LARUTAN NUTRISI SINTETIK
PADA MEDIA KARBON AKTIF YANG DIINOKULASI
OLEH *Nitrobacter winogradskyi* DALAM PROSES
BIOFILTRASI N₂O**

SKRIPSI

**LAILI PURNAMASARI
0906604571**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

HALAMAN JUDUL

**OPTIMASI KONSENTRASI LARUTAN NUTRISI SINTETIK
PADA MEDIA KARBON AKTIF YANG DIINOKULASI
OLEH *Nitrobacter winogradskyi* DALAM PROSES
BIOFILTRASI N₂O**

SKRIPSI

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

**LAILI PURNAMASARI
0906604571**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Laili Purnamasari

NPM : 0906604571

Tanda Tangan : 

Tanggal : 25 Juni 2012



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Laili Purnamasari
NPM : 0906604571
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Optimasi Konsentrasi Larutan Nutrisi Sintetik Pada Media Karbon Aktif yang Diinokulasi oleh *Nitrobacter winogradskyi* dalam Proses Biofiltrasi N₂O

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Tania Surya Utami, ST., MT



Penguji I : Ir. Rita Arbianti, M. Si



Penguji II : Dr. Dianursanti, ST., MT



Penguji III : Ir. Eva Fathul Karamah, MT



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 25 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Departemen Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, skripsi ini tidak mungkin dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, pada kesempatan ini saya ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ibu Dr. Tania Surya Utami, ST., MT selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran, serta kesabaran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Kang Jajat dan Mang Ijal yang telah membantu saya apabila dalam proses penelitian terdapat masalah teknis;
3. Orang tua dan keluarga yang senantiasa memberikan dukungan dan semangat baik moril maupun materil;
4. Qurota A'yunin, Nindya dan Fiza teman satu penelitian biofilter yang telah membantu dalam penelitian maupun dalam penyusunan skripsi ini;
5. Gefin, Git, Eka, dan Najma terimakasih buat persahabatannya selama 6 tahun ini serta dukungan dan semangatnya dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Mba Fita, Mba Puji dan teman-teman Ekstensi Teknik Kimia 2009 terimakasih buat persahabatannya selama 3 tahun ini.
7. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini baik secara langsung maupun tidak langsung;

Akhir kata, saya mohon maaf apabila ada salah kata dalam penulisan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi berbagai pihak dan bagi perkembangan ilmu pengetahuan yang ada.

Depok, Juni 2012

Penulis

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

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

Nama : Laili Purnamasari
NPM : 0906604571
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demikian 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:

“Optimasi Konsentrasi Larutan Nutrisi Sintetik Pada Media Karbon Aktif yang Diinokulasi oleh *Nitrobacter winogradskyi* dalam Proses Biofiltrasi N₂O”

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 25 Juni 2012

Yang menyatakan



(Laili Purnamasari)

ABSTRAK

Nama : Laili Purnamasari
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Optimasi Konsentrasi Larutan Nutrisi Sintetik Pada Media Karbon Aktif yang Diinokulasi oleh *Nitrobacter winogradskyi* dalam Proses Biofiltrasi N₂O

Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh konsentrasi larutan nutrisi sintetik terhadap efisiensi reduksi N₂O dan pertumbuhan mikroba pada medium filter sebelum dan sesudah proses biofiltrasi. Efisiensi reduksi N₂O dianalisis menggunakan GC dan hasil kualitatif mikroorganisme dianalisis dengan metode TPC. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi reduksi tertinggi untuk variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik adalah pada konsentrasi 0,31% yaitu sebesar 85,58% dan jumlah mikroorganisme sebelum dan setelah biofiltrasi tetap. Estimasi parameter dengan persamaan adsorpsi *Langmuir* menunjukkan bahwa K_L maksimum terjadi pada konsentrasi 0,21% yaitu $7,18 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{g}$ sedangkan q_m maksimum terjadi pada biofiltrasi tanpa mikroba yaitu sebesar $0,3512 \text{ g N}_2\text{O g}^{-1}$. Sementara itu pada estimasi parameter dengan persamaan *Freundlich* menunjukkan nilai n tertinggi terjadi pada konsentrasi 0,21% yaitu 3,6531. Sedangkan nilai K_f tertinggi terjadi pada biofiltrasi tanpa mikroba yaitu sebesar $2,918 \cdot 10^7 \text{ m}^3/\text{g}$.

Kata kunci:

Biofiltrasi, karbon aktif, *Nitrobacter winogradskyi*, N₂O

ABSTRACT

Name : Laili Purnamasari
Study Program : Teknik Kimia
Tittle : Optimization of Concentration for Synthetic Nutrient Solution on Activated Carbon Inoculated by *Nitrobacter winogradskyi* in N₂O Biofiltration Process

This research was conducted for evaluation influence of concentration for synthetic nutrient solution to N₂O reduction efficiency and microorganisms growth at medium filter before and after biofiltration. N₂O reduction efficiency was analyzed using GC and qualitative results of the microorganisms were analyzed by the method of TPC. The result showed that the highest removal efficiency of N₂O at concentration 0,31% which equal 85,58% and the number of microorganisms before and after biofiltration are steady. Estimated parameter with Langmuir adsorption equation shows that the maximum value of K_L occur at concentration 0,21% which equal $7,18 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{g}$ and the maximum value of q_m occur at biofiltration without microorganisms which equal 0,3512 g N₂O/g. Whereas estimated parameter with Freundlich adsorption equation shows that the maximum value of n occur at concentration 0,21% which equal 3,6531 and the maximum value of K_f occur at biofiltration without microorganisms which equal $2,918 \cdot 10^7 \text{ m}^3/\text{g}$.

Key words:

Biofiltration, activated carbon, *Nitrobacter winogradskyi*, N₂O

DAFTAR ISI

| | |
|--|----------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS | ii |
| LEMBAR PENGESAHAN | iii |
| KATA PENGANTAR | iv |
| HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI | v |
| ABSTRAK | vi |
| ABSTRACT | vii |
| DAFTAR ISI | viii |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| DAFTAR TABEL | xii |
| DAFTAR LAMPIRAN | xiii |
| BAB 1 PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah | 4 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 4 |
| 1.4 Batasan Masalah | 4 |
| 1.5 Sistematika Penulisan | 5 |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA | 6 |
| 2.1 Gas Dinitrogen Monoksida (N ₂ O) | 6 |
| 2.1.1 Karakteristik N ₂ O | 6 |
| 2.1.2 Peran N ₂ O dalam Pemanasan Global | 7 |
| 2.2 Teknologi Biofilter | 8 |
| 2.2.1 Parameter-Parameter dalam Sistem Biofilter | 8 |
| 2.2.1.1 Kelembapan (<i>Humidity</i>) | 9 |
| 2.2.1.2 Suhu | 9 |
| 2.2.1.3 Tingkat Keasaman (pH) | 10 |
| 2.2.1.4 Nutrisi | 10 |
| 2.2.1.5 <i>Pressure Drop</i> | 10 |
| 2.2.2 Media Filter | 11 |
| 2.2.2.1 Karbon Aktif | 12 |
| 2.2.3 Adsorpsi | 12 |
| 2.2.3.1 Isoterm <i>Langmuir</i> | 15 |
| 2.2.3.2 Isoterm <i>Freundlich</i> | 17 |
| 2.3 Metabolime Nitrogen | 18 |
| 2.3.1 Bakteri Nitrifikasi | 20 |
| 2.4 <i>State of The Art</i> | 20 |
| 2.4.1 Biofiltrasi Senyawa NO ₂ dan VOC dalam Ruangan dengan Media Kompos | 21 |
| 2.4.2 Biofiltrasi NO _x dengan Media Lumpur Aktif | 22 |
| 2.4.3 Biofiltrasi Amonia (NH ₃) dengan Medium Filter Campuran Kompos, Lumpur dan Potongan Plastik Keras | 24 |
| 2.4.4 Biofiltrasi H ₂ S dengan Medium Filter Pelet Karbon Aktif | 24 |

| | |
|---|-----------|
| 2.4.5 Biofiltrasi <i>Volatile Organic Compound</i> (VOC) dengan Medium Filter Karbon Aktif | 27 |
| 2.4.6 Biofiltrasi N ₂ O dengan Medium Filter Kompos | 29 |
| 2.5 Ringkasan <i>State of The Art</i> | 31 |
| BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN | 32 |
| 3.1 Diagram Alir Penelitian | 32 |
| 3.2 Alat dan Bahan Penelitian | 33 |
| 3.2.1 Alat | 33 |
| 3.2.2 Bahan | 35 |
| 3.3 Prosedur Penelitian | 36 |
| 3.3.1 Preparasi Medium Filter | 36 |
| 3.3.2 Preparasi Kultur Bakteri | 36 |
| 3.3.3 Uji Kebocoran Alat dan Uji Blanko | 38 |
| 3.3.4 Kalibrasi Gas N ₂ O | 40 |
| 3.4 Eksperimen Biofiltrasi | 40 |
| 3.4.1 Eksperimen Biofiltrasi Tanpa Mikroba | 40 |
| 3.4.2 Eksperimen Biofiltrasi dengan Variasi Konsentrasi Larutan Nutrisi Sintetik | 41 |
| 3.5 Data Penelitian | 41 |
| 3.6 Analisis Biofiltrasi | 42 |
| 3.6.1 Analisa Gas N ₂ O Menggunakan <i>Gas Chromatography</i> (GC) | 42 |
| 3.6.2 Analisa Perkembangan Bakteri | 43 |
| 3.6.2.1 Analisa dengan Metode <i>Total Plate Count</i> (TPC) | 43 |
| 3.6.2.2 Analisa Perkembangan Bakteri dengan SEM | 43 |
| 3.7 Variabel Penelitian | 44 |
| BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN | 45 |
| 4.1 Uji Kinerja Biofilter | 45 |
| 4.1.1 Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N ₂ O Tanpa Mikroba | 45 |
| 4.1.2 Pengaruh Konsentrasi Larutan Nutrisi Sintetik Pada Medium Karbon Aktif dengan Inokulasi Bakteri <i>Nitrobacter winogradskyi</i> terhadap Reduksi N ₂ O | 46 |
| 4.1.3 Perubahan Kelembapan dan Suhu Medium Selama Proses Biofiltrasi | 50 |
| 4.1.4 Hasil Uji Perkembangan Mikroba pada Medium Karbon Aktif..... | 53 |
| 4.1.4.1 Metode TPC (<i>Total Plate Count</i>) | 53 |
| 4.1.4.2 Uji SEM (<i>Scanning Electrone Microscope</i>) | 56 |
| 4.2 Pemodelan Hasil Eksperimen | 58 |
| 4.2.1 Persamaan <i>Langmuir</i> | 58 |
| 4.2.2 Persamaan <i>Freundlich</i> | 61 |
| 4.3 Perbandingan Hasil Biofiltrasi N ₂ O dengan Menggunakan Medium Filter Karbon Aktif dan Zeolit | 64 |
| BAB 5 KESIMPULAN | 66 |
| DAFTAR PUSTAKA | 67 |
| LAMPIRAN | 72 |

DAFTAR GAMBAR

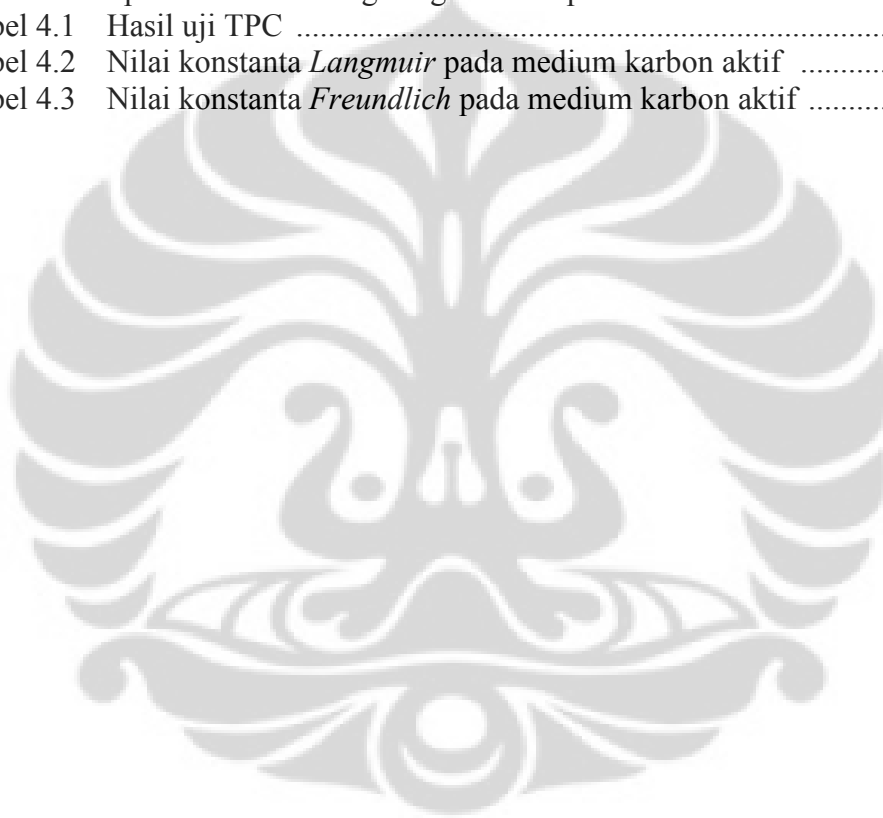
| | | |
|-------------|--|----|
| Gambar 2.1 | Proses adsorpsi pada biofilter (Devinny dkk, 1999) | 13 |
| Gambar 2.2 | Aliran kontaminan udara dalam biofilter (Devinny dkk, 1999) | 13 |
| Gambar 2.3 | Model gas transfer (Devinny dkk, 1999) | 14 |
| Gambar 2.4 | Lima tipe jenis kurva adsorpsi isoterm | 15 |
| Gambar 2.5 | Jalur metabolisme nitrogen (Hudepohl, 1999) | 19 |
| Gambar 2.6 | Efisiensi reduksi NO _x terhadap waktu (Jiang dkk, 2007)..... | 23 |
| Gambar 2.7 | Diagram skematik proses biofilter (Duan dkk, 2005)..... | 25 |
| Gambar 2.8 | Kinerja biofilter bed selama periode permulaan (a) Efisiensi penghilangan dan pH terhadap waktu; (b) Konsentrasi inlet dan outlet terhadap waktu (Duan dkk, 2006) | 26 |
| Gambar 2.9 | Unit biofilter untuk skala laboratorium (Khammar dkk, 2003)..... | 28 |
| Gambar 2.10 | <i>Mapping state of the art</i> biofilter | 31 |
| Gambar 3.1 | Diagram alir penelitian biofiltrasi | 32 |
| Gambar 3.2 | (a) Perlatan biofilter, dan (b) Perangkat GC yang digunakan dalam penelitian | 34 |
| Gambar 3.3 | Prosedur uji kebocoran | 39 |
| Gambar 3.4 | Prosedur uji blanko | 39 |
| Gambar 3.5 | Diagram alir analisis GC | 43 |
| Gambar 4.1 | Grafik biofiltrasi N ₂ O tanpa mikroba..... | 46 |
| Gambar 4.2 | Pengaruh konsentrasi larutan nutrisi terhadap efisiensi reduksi gas N ₂ O, dengan konsentrasi: (■) 0,37%; (□) 0,31%; (●) 0,27%; (○) 0,23%; (▲) 0,21%; dan (△) tanpa mikroba | 47 |
| Gambar 4.3 | Perbandingan efisiensi reduksi rata-rata dari berbagai variasi percobaan | 49 |
| Gambar 4.4 | Profil suhu medium selama proses biofiltrasi dengan konsentrasi: (■) 0,37%; (□) 0,31%; (●) 0,27%; (○) 0,23%; (▲) 0,21%; dan (△) tanpa mikroba | 51 |
| Gambar 4.5 | Profil kelembapan selama proses biofiltrasi dengan konsentrasi: (■) 0,37%; (□) 0,31%; (●) 0,27%; (○) 0,23%; (▲) 0,21%; dan (△) tanpa mikroba | 52 |
| Gambar 4.6 | Hasil Uji TPC: (a) pada t = 0 jam, (b) pada t = 48 jam, (c) sebelum biofiltrasi, dan (d) setelah biofiltrasi | 54 |
| Gambar 4.7 | Hasil Uji SEM: (a) pada karbon aktif yang telah di reaktivasi, (b) karbon aktif sebelum biofiltrasi, dan (c) karbon aktif setelah biofiltrasi | 57 |
| Gambar 4.8 | Grafik Adsorpsi Isoterm <i>Langmuir</i> pada (a) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,37%, (b) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,31%, (c) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,27%, (d) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,23%, (e) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,21%, dan (f) Tanpa mikroba | 59 |
| Gambar 4.9 | Grafik adsorpsi isoterm <i>Freundlich</i> pada (a) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,37%, (b) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,31%, (c) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,27%, (d) | |

| | | |
|-------------|---|----|
| | Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,23%, (e) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,21%, dan (f) Tanpa mikroba | 62 |
| Gambar 4.10 | Perbandingan efisiensi reduksi antara medium filter karbon aktif dan zeolit..... | 64 |
| Gambar 4.11 | Perbandingan efisiensi reduksi rata-rata antara medium filter karbon aktif dan zeolit | 65 |



DAFTAR TABEL

| | | |
|-----------|---|----|
| Tabel 2.1 | Karakteristik gas N ₂ O (HSDB, 1999) | 7 |
| Tabel 2.2 | Karakteristik biofilter, konsentrasi dan properties (Ondarts dkk, 2010)..... | 21 |
| Tabel 2.3 | Efisiensi penghilangan minimum, maksimum dan rata-rata biofiltrasi (Ondarts dkk, 2010) | 22 |
| Tabel 2.4 | Sifat fisika kolom biofilter (Duan dkk, 2006) | 25 |
| Tabel 2.5 | Spesifikasi fisika pada proses biosorpsi H ₂ S (Duan dkk, 2006)..... | 26 |
| Tabel 3.1 | Peralatan yang digunakan dalam penelitian | 35 |
| Tabel 3.2 | Spesifikasi kromatografi gas dalam penelitian..... | 42 |
| Tabel 4.1 | Hasil uji TPC | 55 |
| Tabel 4.2 | Nilai konstanta <i>Langmuir</i> pada medium karbon aktif | 60 |
| Tabel 4.3 | Nilai konstanta <i>Freundlich</i> pada medium karbon aktif | 63 |



DAFTAR LAMPIRAN

| | | |
|------------|--|----|
| Lampiran 1 | Data Hasil Kalibrasi Gas N ₂ O | 72 |
| Lampiran 2 | Data Hasil Biofiltrasi N ₂ O oleh Karbon Aktif Tanpa Mikroba | 73 |
| Lampiran 3 | Data Hasil Uji Variasi Konsentrasi Larutan Nutrisi Sintetik..... | 74 |
| Lampiran 4 | Pengolahan Data Pemodelan Adsorpsi Isotermis | 80 |



BAB 1

PENDAHULUAN

Pada bab ini akan diuraikan mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

1.1 Latar Belakang

Pemanasan global adalah kejadian terperangkapnya radiasi gelombang panjang matahari (infra merah atau gelombang panas) yang dipancarkan oleh bumi, sehingga tidak dapat lepas ke angkasa dan akibatnya suhu di atmosfer bumi meningkat. Gas-gas rumah kaca yang dinyatakan paling berkontribusi terhadap gejala pemanasan global adalah karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dinitrogen monoksida (N_2O), perfluorkarbon (PFC), hidrofluorkarbon (HFC), dan sulfurheksfluorida (SF_6) (Minardi, 2011).

Tiga jenis gas yang paling utama sering disebut gas rumah kaca (GRK) adalah (CO_2), (CH_4), dan (N_2O), karena dianggap sebagai lapisan gas yang berperan sebagai perangkap gelombang panas dan akhir-akhir ini konsentrasinya di atmosfer terus meningkat sampai dua kali lipat (IPCC, 2001). Ketiga jenis GRK tersebut mempunyai masa hidup cukup panjang, seperti gas CO_2 merupakan gas yang paling pesat laju peningkatannya dan masa hidup paling panjang (5-200 tahun), diikuti gas N_2O (114 tahun), dan CH_4 (12-17 tahun). Dari ketiga GRK, gas N_2O mempunyai kemampuan radiasi 300 kali lebih besar dibanding CO_2 (Myrold, 1999). Oleh karena itu, N_2O merupakan GRK utama yang menjadi penyebab pemanasan global (Mayumdar et al., 2000). Gas dinitrogen monoksida merupakan gas rumah kaca yang dihasilkan oleh jasad renik di lahan sawah, yang terdiri atas persenyawaan hara nitrogen dan oksigen. Gas tersebut dapat merugikan bagi lingkungan, karena selain sebagai salah satu penyebab pemanasan global bumi, juga dapat merusak lapisan ozon (Wihardjaka, 2004).

Salah satu metode yang digunakan untuk menghilangkan gas N_2O adalah dengan teknologi biofilter. Biofilter merupakan reaktor dengan material padat sebagai bahan pengisi dimana mikroba terjatoh secara alami di dalamnya dengan

membentuk *biolayer* (lapisan tipis). Gas polutan yang melalui biofilter akan teradsorb ke dalam lapisan *biolayer* dan akan didegradasi oleh mikroba yang tumbuh pada *biolayer* tersebut (Ottengraf, 1986). Kemudian semua pencemar diubah menjadi produk akhir yang tidak berbahaya seperti CO₂, H₂O, dan biomassa baru serta efektif untuk pencemar organik yang konsentrasinya relatif rendah, antara 1-5 g/m³ (Cahyana, 2006).

Biofilter telah digunakan di industri untuk menyisihkan polutan seperti alkohol, senyawa aromatik, alifatik, dan ester (Cahyana, 2006). 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, serta dapat mengkonversi campuran organik dan anorganik menjadi pupuk oksidasi yang tidak berbahaya (Sheridan et al., 2002).

Proses biosorpsi dan biodegradasi pada biofilter dipengaruhi oleh aktivitas mikroba dalam medium filter. Karena itu, medium filter pada biofilter harus didesain untuk menyediakan lingkungan yang baik bagi pertumbuhan mikroba dan aliran gas yang melalui medium filter. Sejumlah faktor perlu dikontrol sehingga mikroba dapat mengadsorb dan mendegradasi gas buangan secara efisien. Suhu, kandungan kelembapan, pH, laju alir, nutrisi, besarnya kandungan polutan, dan mikrobiologi biofilter adalah sejumlah faktor yang mempengaruhi efisiensi biosorpsi (Chang et al., 2006).

Penelitian biofilter telah banyak dilakukan sebelumnya dan masih terus dikembangkan di berbagai negara untuk mereduksi berbagai gas polutan, antara lain N₂O, NO, VOCs, dan H₂S. Penelitian biofilter untuk mereduksi gas N₂O menggunakan medium filter alami pertama kali dilakukan di Departemen Teknik Kimia UI dengan menggunakan pupuk kompos sebagai medium filter untuk aliran sirkulasi 6 jam dengan menyelidiki pengaruh parameter operasional seperti panjang kolom dan laju alir terhadap efisiensi penghilangan N₂O (Simanjuntak, 2008). Penelitian berikutnya adalah biosorpsi N₂O dengan medium filter kompos yang berbasis kotoran kambing dengan sistem *batch* 12 jam (Arisantoro, 2010). Penelitian selanjutnya adalah biosorpsi gas N₂O dengan memvariasikan bahan pengikat pada medium filter pelet kompos (Sinaga, 2011). Penelitian biofilter

2011 berikutnya adalah mengkaji optimalisasi bahan pengikat pada medium pelet kompos dalam biosorpsi gas N_2O (Sagala, 2011).

Penelitian ini tidak lagi menggunakan kompos sebagai medium filter. Pergantian medium filter ini bertujuan agar bakteri yang hidup pada medium dalam sistem biofilter menjadi lebih spesifik. Pada penelitian-penelitian sebelumnya, medium yang digunakan adalah kompos, dimana pada medium tersebut bakteri yang hidup tidak spesifik. Penelitian ini menggunakan karbon aktif sebagai medium filter. Karbon aktif merupakan adsorben berpori yang telah diaktivasi, sehingga terjadi peningkatan daya adsorpsi. Selain itu juga, mengandung elemen-elemen seperti hidrogen, oksigen, sulfur, nitrogen dan beberapa macam material lainnya. Karbon perlu diproses (aktivasi), sehingga terjadi pengembangan struktur pori dan luas permukaan internal yang besar (Rachman, 2009). Karbon aktif yang baik haruslah memiliki luas area permukaan yang besar sehingga daya adsorpsinya juga akan besar. Luas permukaan karbon aktif berkisar antara 300-3500 m^2/gr . Daya serap karbon aktif sangat besar, yaitu 25-100% terhadap berat karbon aktif (Sembiring, M., dan Sinaga, T., 2003). Karbon aktif secara luas dipakai sebagai adsorben dalam pengolahan limbah cair dan gas (Prabowo, 2009).

Mikroorganisme yang digunakan pada sistem biofilter ini adalah bakteri *Nitrobacter winogradskyi*. Bakteri ini tergolong bakteri gram negatif fakultatif *chemolithautotrof* yang mampu mengekstraksi energi dari oksidasi nitrit menjadi nitrat (Starkenbug, 2006). *N. winogradskyi* bersama dengan *Nitrobacter* lainnya dapat menghilangkan sejumlah nitrogen yang berasal dari limbah buangan melalui penggunaan *biofilm*. Ketika gas polutan melewati media filter, akan diadsorb oleh lapisan *biofilm* yang kemudian didegradasi oleh kultur bakteri yang hidup di dalam lapisan tersebut (Devinny et al., 1997).

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, maka pada penelitian ini akan dikaji kemampuan media filter karbon aktif yang dikultur dengan bakteri *N. winogradskyi* dalam proses biofiltrasi gas dinitrogen monoksida (N_2O). Pada studi ini akan dilakukan pengamatan terhadap variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik serta pengaruhnya terhadap suhu medium dan kelembapan

medium filter. Hal ini karena suhu dan kelembapan medium berpengaruh terhadap laju pertumbuhan mikroba pendegradasi polutan dalam proses biofiltrasi.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana konsentrasi larutan nutrisi sintetik yang optimum pada proses degradasi dinitrogen monoksida oleh *N. winogradskyi* dalam media karbon aktif?
2. Bagaimana perubahan jumlah koloni bakteri *N. winogradskyi* pada medium karbon aktif selama proses biofiltrasi N_2O berlangsung?
3. Bagaimana pemodelan adsorpsi isothermis dengan menggunakan persamaan *Langmuir* dan *Freundlich*?
4. Bagaimana perbandingan hasil kemampuan biofilter yang menggunakan karbon aktif dan zeolit sebagai medium filter pada proses biofiltrasi?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan konsentrasi larutan nutrisi sintetik optimum pada proses degradasi dinitrogen monoksida oleh *N. winogradskyi* dalam media karbon aktif.
2. Mengkaji perubahan jumlah koloni bakteri *N. winogradskyi* pada medium karbon aktif selama proses biofiltrasi N_2O berlangsung.
3. Mengkaji hasil pemodelan adsorpsi isothermis dengan menggunakan persamaan *Langmuir* dan *Freundlich*.
4. Mengkaji perbandingan kemampuan karbon aktif dan zeolit sebagai medium filter pada proses biofiltrasi.

1.4 Batasan Masalah

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

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Rekayasa Bioproses, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok.

2. Peralatan biofilter yang digunakan untuk penelitian merupakan peralatan dalam skala laboratorium yang terbuat dari *acrylic* dengan ukuran tinggi 120 cm, diameter 8 cm dan tebal bahan 0,325 cm.
3. Gas yang digunakan adalah gas N_2O berkonsentrasi 15.000 ppm dalam udara dengan laju alir 88 cc/menit untuk dilakukan biosorpsi.
4. Bakteri yang digunakan adalah *N. winogradskyi* dari Laboratorium Mikrobiologi Fakultas Pangan dan Gizi Pasca Sarjana UGM.
5. Nutrisi yang digunakan adalah nutrisi sintetik.
6. Medium filter yang digunakan adalah karbon aktif dari CV. Sari Hikmah Nusantara Depok.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari makalah ini adalah sebagai berikut:

BAB 1. PENDAHULUAN

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

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan tentang studi literatur secara umum mengenai hal-hal yang berkaitan dengan penelitian seperti gas dinitrogen monoksida (N_2O), biofilter, karbon aktif, bakteri nitrifikasi, serta pembahasan jurnal-jurnal internasional dan nasional yang terkait dengan biofilter.

BAB 3. METODE PENELITIAN

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

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisikan hasil dan pembahasan dari kalibrasi laju alir dan N_2O , uji kebocoran, uji biofiltrasi N_2O tanpa mikroba, uji kemampuan alat biofilter dalam mereduksi N_2O dengan variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik.

BAB 5. Kesimpulan

Bab ini berisikan kesimpulan dari hasil penelitian dan pembahasan.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan diuraikan mengenai gas dinitrogen monoksida (N_2O), teknologi biofilter, bakteri nitrifikasi, *state of the art* dan ringkasan dari *state of the art*.

2.1 Gas Dinitrogen Monoksida (N_2O)

Gas yang digunakan pada penelitian ini adalah dinitrogen monoksida (N_2O). Berikut ini adalah karakteristik gas N_2O serta perannya dalam pemanasan global.

2.1.1 Karakteristik N_2O

Gas dinitrogen monoksida adalah senyawa kimia dengan rumus kimia N_2O yang pertama kali dihasilkan pada tahun 1775 oleh Joseph Priestley. Gas N_2O umumnya digunakan sebagai senyawa anestetik dalam bidang pembedahan dan kedokteran gigi. Gas ini sering disebut juga sebagai gas ketawa karena efek euforia yang ditimbulkan ketika menghirupnya. Kandungan gas N_2O yang biasa dipakai pada suntikan anestetik adalah 50-100 ppm yang merupakan batas standar paparan gas. Pada kendaraan balap, gas ini digunakan sebagai pengoksidan untuk meningkatkan tenaga *output* dari mesin (Cameron dan May, 1999).

Tidak banyak diketahui secara rinci tentang asal gas N_2O dalam atmosfer. Diduga bahwa sumber utamanya, yang mungkin mencakup sampai 90%, merupakan kegiatan mikroorganisme dalam tanah. Pemakaian pupuk nitrogen meningkatkan jumlah gas ini di atmosfer. N_2O juga dihasilkan dalam jumlah kecil oleh pembakaran bahan bakar fosil seperti minyak bumi, batu bara, dan gas bumi (Sinaga, 2011). Sifat fisik dan kimia dari gas N_2O dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2.1 Karakteristik gas N₂O

| Deskripsi | Sifat Gas |
|---------------|--|
| Rumus molekul | N ₂ O |
| Karakteristik | Gas yang tak berwarna |
| Berat molekul | 44,01 g/mol |
| Densitas | 1,226 pada suhu -89°C (<i>liquid</i>); 1,967 pada tekanan 760 mmHg dan suhu 25°C |
| Titik leleh | -90,8°C (182.29 K) |
| Titik didih | -88,48°C (184.67 K) |
| Solubilitas | Larut dalam etanol, etil eter |
| Deskripsi bau | Agak manis |

Sumber : (HSDB, 1999)

2.1.2 Peran N₂O terhadap Pemanasan Global

Pemanasan global atau *global warming* adalah adanya proses peningkatan suhu rata-rata atmosfer, laut, dan daratan bumi. Suhu rata-rata global pada permukaan bumi telah meningkat $0,74 \pm 0,18$ ° C ($1,33 \pm 0,32$ ° F) selama seratus tahun terakhir. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) menyimpulkan bahwa, sebagian besar peningkatan suhu rata-rata global sejak pertengahan abad ke-20 kemungkinan besar disebabkan oleh meningkatnya konsentrasi gas-gas rumah kaca akibat aktivitas manusia melalui efek rumah kaca (Chaves, 2008).

Gas N₂O merupakan gas rumah kaca terbanyak keempat di atmosfer setelah CO₂, CH₄, dan uap air. Gas N₂O sangat sulit terurai di atmosfer dan diperkirakan mempunyai waktu tinggal di atmosfer sekitar 170 tahun (Pandey, 2004). Tanah sawah merupakan salah satu sumber antropogenik utama gas dinitrogen oksida (N₂O), yang memberikan kontribusi terhadap pemanasan global (IPCC, 2006). Kegiatan pertanian seperti penanganan limbah binatang dan penyuburan tanah dapat memicu bakteri untuk memproduksi N₂O lebih banyak. Pemberian pupuk anorganik dan organik, pembenaman residu tanaman kaya nitrogen dan menumbuhkan tanaman legum cenderung meningkatkan fluks N₂O dalam tanah. Adanya bahan organik mudah terdegradasi memacu aktivitas jasad renik, sehingga ketersediaan oksigen cenderung berkurang, sedangkan emisi N₂O menjadi tinggi. Peningkatan suhu juga akan meningkatkan emisi gas N₂O (Wihardjaka, 2004).

Selain sebagai gas rumah kaca, gas N_2O dapat memberikan dampak tidak langsung terhadap pemanasan global melalui kontribusi terhadap produksi ozon troposferik pada proses pembentukan *smog*. Dengan meninjau efek negatif yang ditimbulkannya, sangatlah diperlukan adanya penanganan emisi N_2O 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).

2.2 Teknologi Biofilter

Salah satu teknologi yang digunakan untuk mereduksi polutan gas adalah biofilter. Biofilter merupakan reaktor dengan material padat sebagai bahan pengisi dimana mikroba terjerat secara alami di dalamnya dengan membentuk *biofilm* untuk mendegradasi gas polutan (Manik, 2005). Teknologi biofilter adalah salah satu sistem perlakuan biologis dengan medium filter yang mempunyai porositas yang tinggi, ketersediaan nutrisi tinggi, kapasitas retensi kelembapan tinggi dan kapasitas penyangga tinggi untuk menjaga pertumbuhan mikroba pada material pendukung yang sesuai (Devinny et al., 1999).

Kolom biofilter sangat sederhana dalam desain dan pengoperasian, memiliki kemudahan akses terhadap mikroorganisme di dalam medium, serta pembentukan limbah baru dapat dihindari (Devinny et al., 1999). Mekanisme dari proses biofiltrasi adalah kombinasi proses adsorpsi-absorpsi dan degradasi oleh mikroorganisme. Mikroorganisme yang terdapat dalam lapisan biologis secara terus menerus mencerna polutan dan merubahnya menjadi air, karbon dioksida dan biomassa (Jorio et al., 2000).

Beberapa kelebihan dari teknik biofilter antara lain adalah tercapainya efisiensi yang tinggi dalam mereduksi gas polutan, biaya instalasi dan operasi yang rendah, kondisi operasi yang aman dan konsumsi energi yang rendah, tidak menghasilkan produk samping dan dapat mengkonversi banyak campuran organik dan anorganik menjadi produk oksidasi yang tak berbahaya (Govind, 1999).

2.2.1 Parameter-Parameter dalam Sistem Biofilter

Berikut merupakan parameter-parameter penting yang akan menentukan reduksi gas polutan yang dihasilkan pada biosorpsi, antara lain: kelembapan

(*humidity*), suhu, tingkat keasaman (pH), nutrisi, kandungan oksigen, dan *pressure drop*.

2.2.1.1 Kelembapan (*Humidity*)

Kelembapan merupakan salah satu faktor yang sangat penting untuk kelangsungan hidup mikroorganisme agar dapat hidup dengan optimal. Kelembapan yang kurang dapat menyebabkan terjadinya *channeling* dan dapat menyebabkan kekurangan kadar air bagi mikroorganisme serta mengakibatkan terjadinya penurunan laju biodegradasi polutan. Sebaliknya, terlalu banyak air atau kelembapan yang tinggi juga dapat menimbulkan beberapa dampak antara lain akan menghalangi transfer oksigen dan polutan hidrofobik ke dalam *biofilm*, munculnya zona anaerobik dalam material filter, menghambat laju reaksi, adanya tekanan balik karena pengurangan volume ruang kosong, dan gas *channeling* dalam material filter (Datta et al., 2005).

Perbedaan medium filter yang digunakan juga akan menghasilkan variasi kelembapan optimumnya, tergantung pada area permukaan dan porositas mediumnya (Hodge et al., 1991). Kadar kelembapan medium filter optimal yang direkomendasikan berkisar antara 40–60% (Ottengraf, 1986).

2.2.1.2 Suhu

Pengaturan suhu dalam biofiltrasi sangat penting karena laju pertumbuhan mikroorganisme dan jenis spesies dalam komunitas mikrobial sangat dipengaruhi oleh suhu. Suhu biofilter dipengaruhi oleh suhu aliran udara masuk dan juga oleh reaksi biologis secara eksotermik pada medium filter (Corsi dan Seed, 1995). Proses biofiltrasi biasanya terjadi pada temperatur *mesophilic* berkisar antara 25–40°C, meskipun terkadang terjadi juga *psychophilic* (< 20°C) dan *thermophilic* (> 40°C). Suhu yang disarankan dalam proses biofiltrasi yaitu dalam jangkauan 15–40°C (Leson dan Winter, 1991).

Seiring meningkatnya temperatur, metabolisme dan laju pertumbuhan sel juga meningkat, akan tetapi kemampuan biosorpsi menurun (McNevin dan Barford, 2000). Apabila suhu gas polutan > 40°C, maka gas tersebut harus didinginkan terlebih dahulu sebelum memasuki kolom biofilter. Sedangkan apabila suhu gas polutan < 10°C, maka gas tersebut harus dipanaskan terlebih

dahulu karena mikroorganisme menjadi tidak aktif (*inactive*) pada suhu yang rendah.

2.2.1.3 Tingkat Keasaman (pH)

Untuk memperoleh kinerja biofilter yang optimum, maka rentang pH media filter harus diperhatikan, karena mikroorganisme mempunyai rentang pH tertentu untuk mendukung pertumbuhan dan aktivitasnya. Tingkat keasaman (pH) dalam medium filter harus dipertahankan pada kondisi netral (pH 7). Hal ini dapat dicapai dengan menggunakan larutan *buffer* sebelum memulai proses biofiltrasi. Tingkat keasaman (pH) optimum biasanya berkisar antara 6,5–7,5 sedangkan pada pH>8,5 dan pH<5 kecepatan pertumbuhan mikroorganisme akan menurun, sehingga efisiensi kurang optimal (Ottengraf et al., 1986).

2.2.1.4 Nutrisi

Medium filter harus mengandung nutrisi yang dibutuhkan mikroorganisme. Mikroba memerlukan makanan dengan nutrisi seimbang agar dapat bertahan hidup dan memperbanyak diri. 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 hidupnya. Karbon dan energi yang dibutuhkan oleh mikroorganisme dapat berasal dari gas kontaminan, sementara kontaminan lainnya seperti nitrogen, fosfor, mineral, dan *trace element* harus disediakan untuk mikroorganisme dalam biofilter agar didapatkan kinerja yang baik (Auria et al., 1996).

2.2.1.5 Pressure Drop

Pressure drop berhubungan dengan kandungan air dalam medium filter dan ukuran pori-pori dari medium filter. Peningkatan kandungan air dan penurunan ukuran pori-pori dapat meningkatkan *pressure drop*. *Pressure drop* dipengaruhi oleh kondisi, jenis medium filter dan juga kandungan *moisture*. Berdasarkan penelitian, terdapat hubungan yang linear antara *pressure drop* dengan peningkatan laju alir (Yang et al., 1994). Selain itu, pada laju alir tertentu, *pressure drop* akan meningkat secara eksponensial terhadap meningkatnya

biomassa (Morgan-Sagastume et al., 2001) dan ukuran partikel yang semakin kecil khususnya untuk ukuran partikel yang lebih kecil dari 4 mm.

2.2.2 Media Filter

Pemilihan media filter pada biofilter sebagai tempat hidup mikroorganisme, merupakan hal yang sangat penting untuk mendukung kehidupan mikroorganisme. Jenis medium filter juga akan mempengaruhi stabilitas jangka panjang dan kinerja biofilter (Kennes dan Thalasso, 1998). Karakteristik medium biofilter menurut Hirai et al., 2001 yaitu:

- Kemampuan dalam menyerap air untuk menjaga kelembapan lapisan *biofilm*.
- Memiliki porositas dan luas permukaan yang besar, baik untuk adsorpsi kontaminan maupun untuk pertumbuhan mikroba.
- Kemampuan untuk menyerap nutrisi dan menyuplainya ketika dibutuhkan oleh mikroba.
- Memiliki densitas yang rendah.
- Kemampuan menahan aliran udara (penurunan tekanan udara dan kekuatan angin yang dikeluarkan blower).
- Perubahan bentuk yang sedikit setelah digunakan dalam waktu tertentu.
- Material yang digunakan bersifat ekonomis dan relatif murah.
- Karakteristik fisik, seperti kestabilan fisik dan kemudahan dalam penanganan.

Sedangkan ciri – ciri medium filter yang baik (Govind, 1998) :

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

5. Memiliki harga yang murah dan terjangkau. Faktor ini merupakan faktor terpenting dalam memilih medium filter yang akan digunakan.

2.2.2.1 Karbon Aktif

Karbon aktif merupakan salah satu adsorben yang paling sering digunakan pada proses adsorpsi. Hal ini disebabkan karena karbon aktif memiliki kemampuan adsorpsi dan luas permukaan yang besar untuk tiap gram berat karbon aktif. Oleh karena itu, karbon aktif yang baik haruslah memiliki luas area permukaan yang besar sehingga daya adsorpsinya juga akan besar. Karbon aktif adalah senyawa karbon yang telah ditingkatkan daya adsorpsinya dengan suatu proses yang dinamakan aktivasi (Prabowo, 2009).

Aktivasi merupakan suatu proses yang menyebabkan perubahan fisik pada permukaan karbon, melalui proses penghilangan zat hidrogen, gas, air, serta pengotor yang menutupi pori-pori karbon. Aktivasi ini terjadi karena terbentuknya gugus aktif akibat adanya interaksi radikal bebas pada permukaan karbon. Karbon aktif terdiri dari 87% - 97% karbon dan sisanya berupa hidrogen, oksigen, sulfur dan nitrogen serta senyawa-senyawa lain yang terbentuk dari proses pembuatannya. Luas permukaan karbon aktif yang telah diteliti umumnya sekitar 200-1500 m²/gram dengan luas pori sekitar 40 Å^o sampai 5000 Å^o. Daya serap karbon aktif besar, yaitu 25%-100% terhadap berat karbon aktif (Sembiring, M., dan Sinaga, T. 2003).

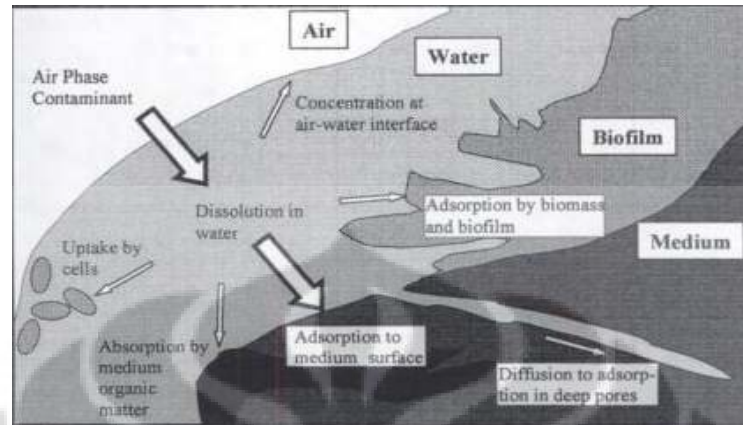
Karbon aktif umumnya dibuat dalam bentuk granular dan serbuk. Aktivasi adalah proses peningkatan mutu atau daya adsorpsi karbon dengan cara membuka pori karbon aktif dari residu dan pengotor sekaligus meningkatkan luas permukaan karbon. Proses ini melepaskan hidrokarbon, abu, tar dan senyawa organik lainnya yang melekat pada permukaan dan pori karbon tersebut (Prabowo, 2009).

2.2.3 Adsorpsi

Peristiwa adsorpsi merupakan suatu fenomena permukaan, yaitu terjadinya penambahan konsentrasi komponen tertentu pada permukaan antara dua fasa (Swantomio et al., 2009). Senyawa-senyawa organik yang diadsorp disebut dengan

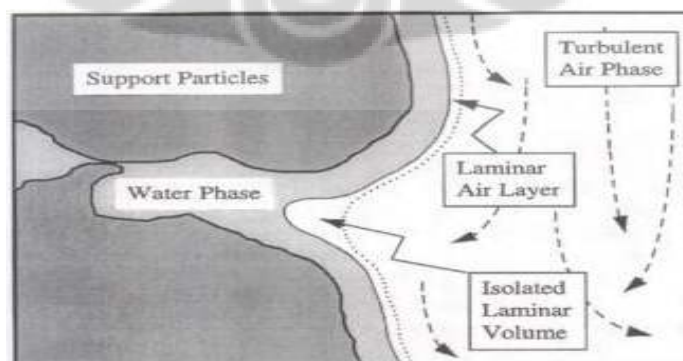
adsorbat dan senyawa yang berfungsi untuk menyerap disebut adsorben. Proses adsorpsi ini mengakumulasi adsorbat ke permukaan adsorben (Suzuki, 1990).

Pada Gambar 2.1 Di bawah ini menggambarkan tentang proses yang terjadi dalam medium filter ketika dialiri dengan kontaminan.

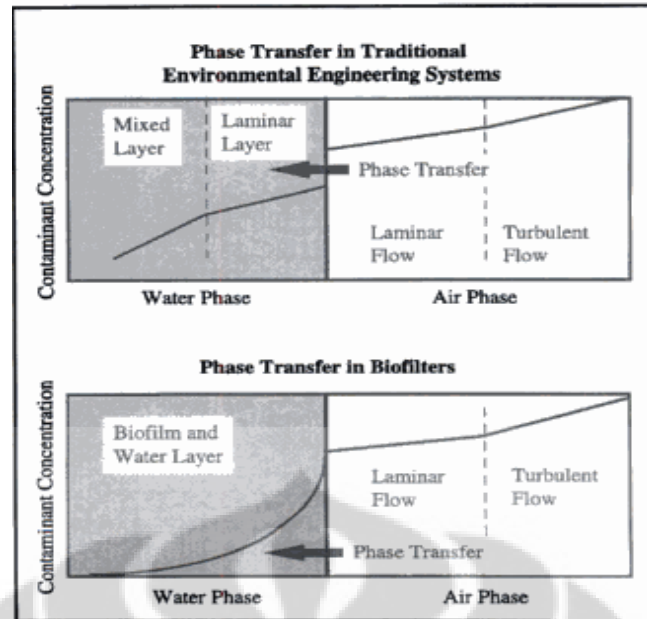


Gambar 2.1 Proses adsorpsi pada biofilter (Deviny et al., 1999)

Pada proses ini terjadi kontak antara fasa gas sebagai kontaminan, fasa cair, dan *biofilm* sebagai permukaan medium filter dan fasa padat tempat partikel padatan medium filter. Transformasi kontaminan dari fasa gas ke cair dan padatan pada partikel kompos adalah langkah dasar dari perlakuan degradasi kontaminan dengan adsorpsi. Bagaimanapun, proses ini merupakan mekanisme yang kompleks. Molekul kontaminan dengan mudah diadsorpsi oleh fasa cair *biofilm* dan didegradasi oleh mikroba seperti pada Gambar 2.2 berikut. Beberapa kontaminan juga ada yang berdifusi masuk ke pori medium filter untuk diadsorpsi.



Gambar 2.2 Aliran kontaminan udara dalam biofilter (Deviny et al., 1999)



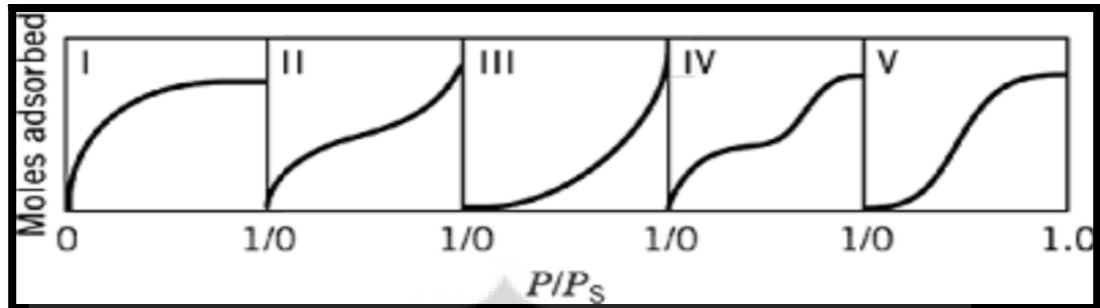
Gambar 2.3 Model gas transfer (Devinny et al., 1999)

Pada Gambar 2.2 dapat dilihat di mana aliran kontaminan akan menjadi laminar ketika mendekati permukaan *biofilm*. Ketika kontaminan telah mencapai daerah *biofilm* pada medium filter yang digunakan, maka akan terjadi proses degradasi secara maksimum dalam mereduksi konsentrasi kontaminan tersebut. Sedangkan Gambar 2.3 menunjukkan hasil perbandingan penggunaan biofilter dan teknologi sistem lingkungan lain terhadap efektivitas penurunan konsentrasi kontaminan. Pada biofilter dihasilkan penurunan konsentrasi kontaminan secara signifikan terjadi pada lapisan *biofilm* (Devinny et al., 1999).

Fenomena adsorpsi pada biofilter merupakan mekanisme yang sulit dipahami tetapi sangat penting untuk aplikasi biofilter. Total jumlah rasio kontaminan pada lapisan air dan padatan medium mempengaruhi waktu tinggal kontaminan dalam biofilter. Jenis kontaminan yang akan direduksi dengan teknologi biofilter juga berpengaruh terhadap efisiensi reduksi. Hal ini dikarenakan daya tarik kontaminan pada air, medium, dan bahan organik pada medium filter sangat beragam sehingga berpengaruh terhadap daya adsorpsi senyawa tersebut dalam medium filter (Linda, 2010).

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 atau konstan.

Isoterm adsorpsi dibuat untuk menjelaskan bentuk interaksi yang terjadi antara gas N₂O dengan sorben. Berikut ini adalah lima jenis kurva yang dikemukakan oleh Brunauer.



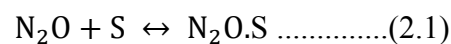
Gambar 2.4 Lima tipe jenis kurva adsorpsi isoterm

Kurva tipe pertama terjadi pada lapisan *monolayer*. Pada umumnya adsorpsi isoterm dengan adsorben mikropori termasuk dalam kurva tipe pertama. Hal ini disebabkan pada waktu tertentu, kurva akan konstan karena sudah memasuki fasa jenuh untuk memenuhi pori-pori adsorben tersebut.

2.2.3.1 Isoterm *Langmuir*

Pada dasarnya, persamaan *Langmuir* adalah persamaan yang menghubungkan antara konsentrasi zat yang diserap oleh adsorben dengan konsentrasi zat adsorbat di fasa cairan atau gas disekelilingnya pada keadaan setimbang dan pada suatu suhu. Jadi persamaan ini adalah model matematis dari peristiwa adsorpsi.

Model adsorpsi *Langmuir* merupakan model paling umum yang digunakan untuk menentukan jumlah adsorbat yang diadsorb sebagai fungsi tekanan parsial atau konsentrasi pada suhu tertentu. Reaksi biosorpsi yang terjadi pada substrat (S) berupa *biofilm* pada permukaan medium filter dituliskan sebagai berikut:



Karena adsorbat yang digunakan adalah N₂O, dapat dituliskan ke dalam bentuk berikut (Lin et.al., 2004):

$$q_e = (C_0 - C_t) \frac{V}{m} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dengan:

$$q_e \sim C_{\text{N}_2\text{O} \cdot \text{S}} = \text{Konsentrasi ekuilibrium pada adsorben (g/kg)}$$

C_0 = Konsentrasi inlet gas N_2O (g/m^3)

C_t = Konsentrasi gas N_2O pada waktu t (g/m^3)

V = Volume *pack bed* pada kolom biofilter (m^3)

m = Massa adsorben yang dipakai (kg)

Dengan menggunakan persamaan gas ideal pada kondisi isothermal dan isovolum, perubahan tekanan menjadi sebanding dengan perubahan mol, dan perubahan mol sebanding dengan perubahan massa per volum sampel. Konsentrasi gas N_2O dalam satuan massa, jadi dilakukan konversi tekanan parsial menjadi massa seperti ditunjukkan pada persamaan di bawah ini.

$PV = nRT = \text{konstan}$

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

$m = n \times Mr$

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

$$C_e = \frac{n_{N_2O} \times Mr_{N_2O}}{V} \dots \dots \dots (2.3)$$

Persamaan 2.3 digunakan apabila N_2O yang teradsorp dalam satuan mol. Dengan mengadaptasikan rumus (2.2) dan (2.3), persamaan laju adsorpsi dan desorpsi untuk persamaan reaksi adsorpsi N_2O ke permukaan biofilm dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$\text{Laju adsorpsi } N_2O = k_1 C_v p_{N_2O} = k_1 C_v C_e \dots \dots \dots (2.4)$$

$$\text{Laju desorpsi } N_2O = k_{-1} C_{N_2O} \cdot S = k_{-1} q_e \dots \dots \dots (2.5)$$

Dengan:

C_v = Total massa lapisan medium yang masih dapat mengadsorp.

Jadi, persamaan laju reaksi pada permukaan medium karbon aktif:

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

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

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

$$r_{AD} = k_1 \left(C_v C_e - \frac{q_e}{K_L} \right) \dots \dots \dots (2.6)$$

Dengan:

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

Pada kondisi kesetimbangan adsorpsi dan desorpsi N_2O , laju kesetimbangannya adalah sama, maka persamaan 2.6 menjadi:

$$r_{AD} = 0$$

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

Dengan asumsi gas N_2O merupakan satu-satunya gas yang teradsorp ke lapisan permukaan *biofilm* karbon aktif, jadi dapat ditulis: $q_m = q_e + C_v$, di mana q_m merupakan kapasitas penyerapan permukaan. Maka persamaan di atas dapat ditulis:

$$k_1 C_v C_e = k_1 \frac{q_e}{K_L}; \quad C_v = q_m - q_e$$

$$(q_m - q_e) C_e = \frac{q_e}{K_L} \dots \dots \dots (2.7)$$

$$q_e = (q_m - q_e) C_e K_L \dots \dots \dots (2.8)$$

$$q_e = q_m C_e K_L - q_e C_e K_L \dots \dots \dots (2.9)$$

$$q_e + q_e C_e K_L = q_m C_e K_L \dots \dots \dots (2.10)$$

$$q_e (1 + C_e K_L) = q_m C_e K_L \dots \dots \dots (2.11)$$

$$\frac{q_e}{C_e} = \frac{q_m K_L}{1 + C_e K_L} \dots \dots \dots (2.12)$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1 + C_e K_L}{q_m K_L} \dots \dots \dots (2.13)$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \dots \dots \dots (2.14)$$

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{1}{q_m} C_e \dots \dots \dots (2.15)$$

Kemudian diplot data dengan C_e sebagai sumbu-x dan C_e/q_e sebagai sumbu-y, maka akan didapat grafik linear dan slope $m = \frac{1}{q_m}$ dan intersep = $\frac{1}{q_m K_L}$. 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.

2.2.3.2 Isoterm *Freundlich*

Isoterm *Freundlich* adalah persamaan empirik yang dikembangkan berdasarkan adsorpsi *monolayer* dan digunakan untuk permukaan yang heterogen. 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:

$$y = K_f P^{\frac{1}{n}} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dengan:

$y \sim q_e$ = Berat/volume (massa) gas yang teradsorpsi tiap satuan luas / massa adsorben(mg/g)

P = Tekanan saat kesetimbangan (atm)

K_f dan n = Konstanta empiris yang bergantung pada keadaan adsorben dan adsorbat pada suhu yang diberikan

Berdasarkan persamaan gas ideal:

$$PV = nRT$$

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

$$P = C_e RT \dots\dots\dots(2.17)$$

Dengan C_e = Konsentrasi gas N_2O pada *outlet* (mg/L).

Dari persamaan di atas terlihat bahwa nilai $P \sim C$, jadi persamaan 2.10 dapat ditulis menjadi persamaan 2.11:

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \dots\dots\dots(2.18)$$

Jika persamaan di atas dikalikan kedua sisinya dengan logaritma, maka didapat :

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \dots\dots\dots(2.19)$$

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

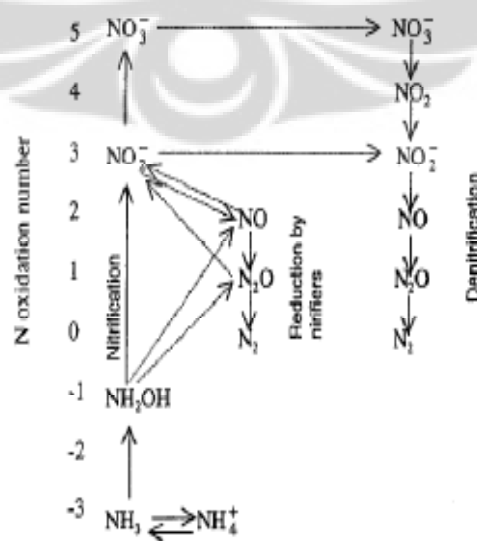
Kemudian diplot data dengan $\ln C_e$ sebagai sumbu-x dan $\ln q_e$ sebagai sumbu-y. Persamaan *Freundlich* paling sesuai untuk gas yang bertekanan rendah, pada tekanan tinggi kurva jauh dari garis lurus. Ini menunjukkan persamaan ini tidak sesuai digunakan untuk gas bertekanan tinggi karena pada tekanan tinggi akan cenderung terbentuk *monolayer*.

2.3 Metabolisme Nitrogen

Transformasi mikroba dari nitrogen ada 5 macam, yaitu:

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

Nitrogen merupakan nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan dalam jumlah besar, dan pada basis kering merupakan elemen ketiga yang paling banyak terdapat dalam jaringan. Sebagian besar spesies bakteri mampu mengasimilasi nitrogen pada berbagai jangkauan bilangan oksidasi, biasanya antara -3 (NH_3 , NH_4^+) dan +5 (NO_3^-). Nitrogen yang tergabung ke dalam senyawa sel seperti protein dan asam nukleat selalu berada dalam bilangan oksidasi -3. Jika nitrogen yang tersedia berada dalam bilangan oksidasi di atas -3, maka biasanya akan tereduksi melalui reaksi katalitik enzim. Sebagian besar nitrogen yang berada di alam ditemukan dalam bilangan oksidasi -3 atau +5, dan kebanyakan literatur mengenai metabolisme nitrogen menggambarkan situasi ini. Gambar metabolisme nitrogen secara keseluruhan yang menunjukkan titik dimana nitrifikasi dan denitrifikasi saling berhubungan dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Jalur metabolisme nitrogen (Hudepohl, 1999)

2.3.1 Bakteri Nitrifikasi

Kumpulan bakteri yang mampu mereduksi senyawa nitrogen (misalnya NH_3 , NO_2^-) sebagai sumber energi, dan CO_2 sebagai sumber karbon, dalam proses dua tahap dikenal sebagai nitrifikasi. Tahap pertama, oksidasi dari amonia menjadi ion nitrit dibawa oleh 4 genus bakteri yang memiliki nama *Nitroso* sebagai bagian dari namanya (misalnya *Nitrosomonas europaea*, *Nitrosococcus mobilis*), sedangkan tahap kedua dibawa oleh 3 genus bakteri yang memiliki nama *Nitro* sebagai bagian dari namanya (misalnya *Nitrobacter*, *Nitrospira*) seperti ditunjukkan pada persamaan berikut:



Nitrifikasi terjadi pada kondisi aerobik, dengan aktivitas optimal pada temperatur mesofilik dan netral terhadap pH alkalin, tanpa pertumbuhan atau aktivitas pada pH asam (Prosser, 1989). Pada kondisi kekurangan oksigen, bakteri nitrifikasi telah diamati dapat melaksanakan reaksi denitrifikasi yang melibatkan NO dan N_2O pada tanah.

Bakteri penitrifikasi yang digunakan pada penelitian ini adalah *Nitrobacter winogradskyi*. Bakteri ini tergolong bakteri gram negatif kemolialototrof fakultatif yang mampu mengekstraksi energi dari oksidasi nitrit menjadi nitrat. *Nitrobacter* ini juga hidup di tanah, air tawar dan limbah (Starkenburg et al., 2005). *N. winogradskyi* dapat menghilangkan sejumlah nitrogen yang berasal dari limbah buangan melalui penggunaan *biofilm*. Ketika gas polutan melewati media filter, akan diadsorb oleh lapisan *biofilm* yang kemudian didegradasi oleh kultur bakteri yang hidup di dalam lapisan tersebut (Deviny et al., 1997).

2.4 State of The Art

Banyak penelitian telah dilakukan untuk mengkaji proses biofiltrasi dengan menggunakan berbagai jenis medium filter dan bertujuan untuk mereduksi gas-gas polutan yang berbeda-beda. Adanya berbagai penelitian ini dapat menunjukkan penggunaan medium filter yang paling sesuai untuk mencapai efisiensi optimum dalam reduksi gas polutan tertentu.

2.4.1 Biofiltrasi Senyawa NO₂ dan VOC dalam Ruangan dengan Media Kompos

Studi terbaru menunjukkan bahwa polusi udara dalam ruangan sangat berpengaruh terhadap kesehatan. Penelitian yang dilakukan oleh Michael Ondarts, Vincent Platel, Cécile Hort dan Sabine Sochard (2010) bertujuan untuk mengevaluasi kinerja biofilter dalam menangani polusi udara yang terjadi di dalam ruangan. Medium filter yang digunakan adalah kompos limbah tanaman dari *Recyclage Organique Mobile Company* di Prancis. Penelitian ini dilakukan terhadap 8 jenis senyawa yang merupakan polutan dalam ruangan, dimana pada konsentrasi yang rendah saja sudah dapat menyebabkan gangguan kesehatan yang kronis. Tabel 2.2 menunjukkan konsentrasi dan sifat (tekanan uap (P_{sat}) dan konstanta Henry (H)) dari campuran yang merupakan limbah yang akan dianalisa.

Tabel 2.2 Karakteristik biofilter, konsentrasi dan properties

| Compounds | C($\mu\text{g m}^{-3}$) | P _{sat} (kPa) | H (adim.) |
|-----------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| Butanol | 112 | 0,89 | $3,6 \times 10^{-4}$ |
| Butyl acetate | 93 | 1,53 | $1,15 \times 10^{-2}$ |
| Formaldehyde | 71 | 5180 | $1,38 \times 10^{-5}$ |
| Limonene | 45 | 0,19 | 15,5 |
| NO ₂ | 140 | 1200 | 1,02 |
| Toluene | 92 | 3,79 | $2,71 \times 10^{-1}$ |
| TCE | 81 | 9,21 | $4,03 \times 10^{-1}$ |
| Undecane | 32 | 0,054 | 78,9 |

Sumber : Ondarts et al., 2010

Penelitian ini menggunakan *gas chromatography/Mass Spectrometry* (GC/MS, *Trace MS Plus, Thermoelectron SA*) yang digunakan untuk pengukuran senyawa VOC (toluene) dan beberapa alat instrument lainnya. Hasil dari penelitian ini ditunjukkan pada tabel 2.4 berikut ini :

Tabel 2.3 Efisiensi penghilangan minimum, maksimum dan rata-rata biofiltrasi

| Campuran | Min. (%) | Max. (%) | Rata-rata(%) | Biodegradasi |
|-----------------|----------|----------|--------------|--------------|
| 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

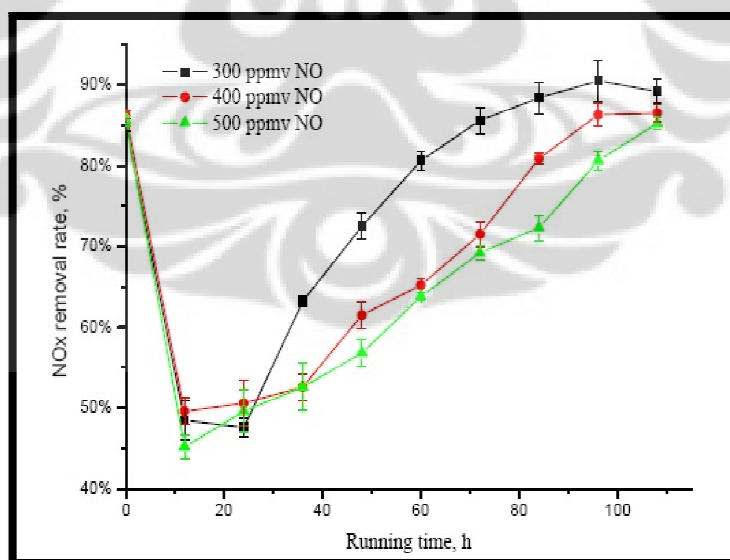
Meskipun dengan kehadiran banyak senyawa dan menggunakan kondisi operasi tertentu (EBRT rendah) untuk mencapai *loading mass* yang relatif tinggi sebagaimana yang direkomendasikan oleh Darlington et al. (2001), menurut teori dan hasil percobaan menunjukkan hasil bahwa mikroorganisme tidak dapat dipelihara dalam kondisi kekurangan nutrisi. Penurunan jumlah mikroorganisme pada medium filter tidak homogen. Pada inlet biofilter, koloni mikroorganisme mengalami penurunan sebanyak 7 kali sedangkan pada bagian bawah biofilter, penurunan koloninya sebesar 18 kali. Pada biosorpsi polutan dengan konsentrasi tinggi fenomena ini kemungkinan dapat disebabkan oleh penyumbatan pada kolom biofilter. Ketidakstabilan selama proses biofiltrasi disebabkan oleh dua hal, yang pertama adalah pengeringan mempengaruhi penurunan efisiensi pada reduksi senyawa hidrofilik dan yang kedua adalah kurangnya nutrisi yang menyebabkan mikroba tidak dapat tumbuh dan menurunkan potensinya dalam mendegradasi polutan.

2.4.2 Biofiltrasi NO_x dengan Medium Lumpur Aktif

Penelitian ini dilakukan oleh R. Jiang, S. Huang, dan J. Yang (2007) yaitu mengenai biosorpsi *bench-scale* dengan medium filter lumpur aktif dengan kandungan oksigen konsentrasi tinggi yang bertujuan untuk mengevaluasi efisiensi reduksi gas NO_x 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%. Untuk mengatasi masalah ini, maka diperlukan bakteri denitrifikasi aerobik untuk

membangun proses denitrifikasi aerobik. Tidak ada alam ekologi yang spesifik untuk bakteri pendinitrifikasi aerobik melainkan dengan penerapan tekanan yang selektif seperti kondisi aerasi sehingga dapat meningkatkan metabolisme nitrat-oksigen.

Penelitian ini dilakukan dengan kondisi laju alir gas NO 1 liter/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 O₂ tetap 0,8%. Kondisi tersebut menggambarkan efisiensi reduksinya mencapai 84,6%, namun turun menjadi sekitar 50% pada konsentrasi O₂ 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%. Berikut ini adalah grafik yang menggambarkan efisiensi reduksi NO_x terhadap waktu :



Gambar 2.6 Efisiensi reduksi NO_x terhadap waktu (Jiang et al., 2007)

Dari grafik 2.6 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%.

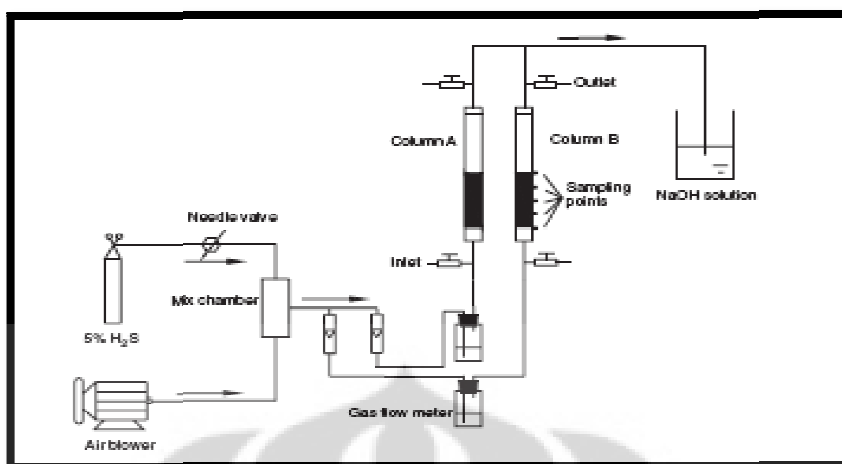
2.4.3 Biofiltrasi Amonia (NH_3) dengan Medium Filter Campuran Kompos, Lumpur dan Potongan Plastik Keras

Penelitian dilakukan oleh H. Taghipour et al., (2006) untuk mengevaluasi penggunaan campuran kompos, lumpur dan potongan plastik keras sebagai medium pada biofilter untuk menghilangkan NH_3 dari gas buangan melalui kolom biofilter dengan *bench-scale*. Penelitian ini mengkaji efek parameter operasional seperti konsentrasi inlet, *loading rate*, waktu retensi, *pressure drop* dan variasi pH serta alkalinitas pada bahan pengisi terhadap kinerja biofilter. Setelah periode permulaan dengan konsentrasi inlet amonia rata-rata 51 ppm, *loading rate* 2,15 g NH_3/m^3 h dan waktu tinggal bed kosong 60 s. Dari penelitian ini diperoleh hasil, efisiensi penghilangan NH_3 pada biofilter mencapai lebih dari 97,9% pada hari ke-10. Kapasitas eliminasi maksimumnya sebesar 9,85 g NH_3/m^3 h tercapai pada saat *loading rate* pada 9,86 g NH_3/m^3 h, sesuai dengan konsentrasi inlet sekitar 236 ppm, dengan konsentrasi keluaran NH_3 meningkat untuk konsentrasi inlet yang lebih tinggi. pH dan alkalinitas dari medium *bed* menurun disebabkan karena pembentukan nitrat tetapi tidak perlu mengendalikannya secara sintetik. Konsentrasi amonium dan nitrat pada medium *bed* menurun dan meningkat berturut-turut. Pada kondisi di bawah *steady-state*, jumlah bakteri nitrifikasi menurun dari awalnya $5,6 \times 10^4$ sel/g pada materi basah pada medium bed menjadi sekitar $2,8 \times 10^8$ sel/g pada materi basah. Penghilangan secara biologi dan nitrifikasi merupakan proses yang dominan pada penghilangan NH_3 . *Pressure drop* maksimum selama percobaan adalah 12 mm H_2O untuk per meter kolom. Waktu retensi minimum sistem yang dapat dicapai pada saat *loading rate* $\leq 9,45$ NH_3/m^3 h adalah 30 s.

2.4.4 Biofiltrasi H_2S dengan Medium Filter Pelet Karbon Aktif

Penelitian ini dilakukan oleh Huiqi Duan, Lawrence C, Rong Yan dan Xiaoge Chen (2006) bertujuan untuk membandingkan penggunaan medium filter karbon aktif biologis dengan medium filter karbon aktif murni tanpa imobilisasi

bakteri. Material yang digunakan terbuat dari lumpur aktif dan tiosulfat. Berikut ini adalah diagram skematik proses biofilter yang digunakan pada penelitian ini :



Gambar 2.7 Diagram skematik proses biofilter (Duan et al., 2005)

Penelitian ini menggunakan dua buah biofilter skala laboratorium yang identik, dimana biofilter kolom A dioperasikan dengan karbon aktif biologis dengan imobilisasi bakteri (BAC) dan biofilter kolom B dengan karbon murni tanpa imobilisasi bakteri. Peralatan instrument yang digunakan untuk menganalisa parameter operasi ini adalah *scanning electron microscope* (SEM) yang digunakan untuk mengidentifikasi perkembangan *biofilm* pada permukaan medium filter. Tabel 2.5 menggambarkan sifat fisika kolom biofilter.

Tabel 2.4 Sifat fisika kolom biofilter

| Kondisi | Kolom | |
|---|--------------------|-------------------|
| | A | B |
| Bakteri imobilisasi | Ya | Tidak |
| Berat karbon basah, W_1 (g) | 183,4 | 181,6 |
| Berat karbon kering, W_2 (g) | 105,6 | 106,9 |
| Kandungan air, $m=(W_1-W_2)/W_1$ (%) | 42,4 | 41,1 |
| Kapasitas adsorpsi H_2S (Basis berat kering, %) | 20,08 ^a | 0,44 ^b |
| Diameter kolom (cm) | 3,6 | 3,6 |
| Luas area permukaan karbon, m^2/g | 807 | 807 |
| Diameter pelet karbon (mm) | 4 | 4 |
| Tinggi media dalam kolom (cm) | 20 | 20 |
| Volume packing, V (l) | 0,2 | 0,2 |
| Densitas, $d=W1/V$ (kg/m^3) | 917 | 908 |
| Densitas karbon aktif, ρ (kg/m^3) | 490 | 490 |

Sumber: Duan et al., 2006

Tabel 2.5 menggambarkan spesifikasi fisika pada proses biosorpsi yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 2.5 Spesifikasi fisika pada proses biosorpsi H₂S

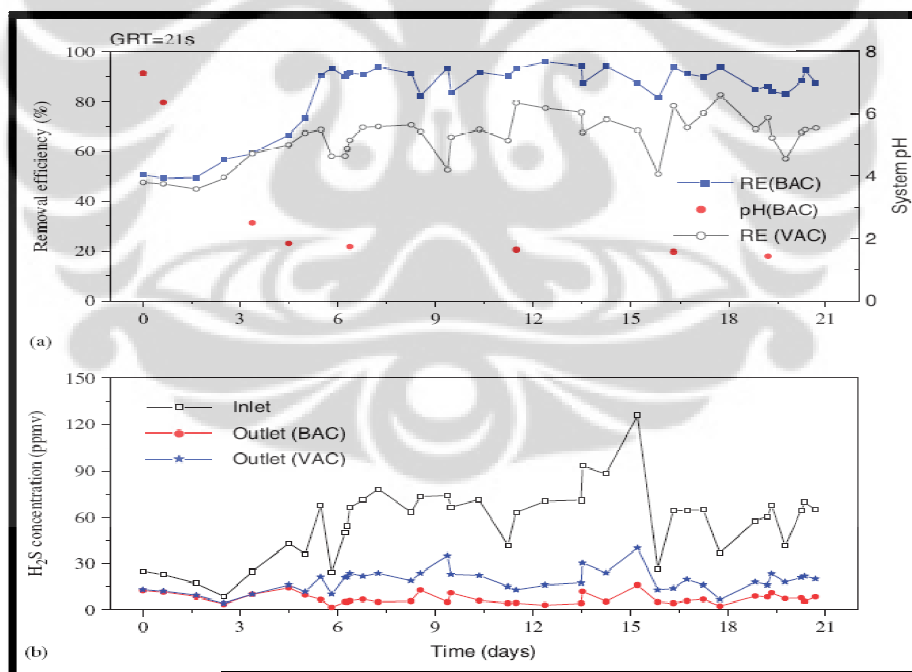
| Parameter operasi | Range |
|------------------------------------|--------------|
| Gas retention time (GRT) | 2-21 s |
| Konsentrasi Inlet H ₂ S | 5-100 ppmv |
| Laju Alir Gas | 0,57-4 L/min |
| Perbandingan Gas Liquid | 32-160 |
| Kecepatan Alir Gas | 0,95-10 cm/s |
| pH Larutan | 1,0-2,0 |

Sumber: Duan et al., 2006

Dari penelitian ini diperoleh hasil analisa:

1. Periode permulaan

Periode permulaan ini adalah selama 21 hari awal operasi. Kinerja biofilter periode awal dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 2.8 Kinerja biofilter *bed* selama periode permulaan. (a) Efisiensi penghilangan dan pH vs waktu; (b) Konsentrasi inlet dan outlet vs waktu (Duan et al., 2006)

Untuk operasi selama 21 hari, efisiensi penghilangan (RE) dapat mencapai 90% setelah 1 hari operasi untuk biofilter kolom A (medium filter BAC) sedangkan untuk biofilter kolom B diperoleh efisiensi penghilangannya 70%,

sementara pH untuk biofilter kolom A menurun setelah 4 hari beroperasi. Berdasarkan data yang diperoleh, biofilter kolom A setelah 6 hari dan dapat menghasilkan efisiensi degradasi 94%.

2. Periode jangka panjang

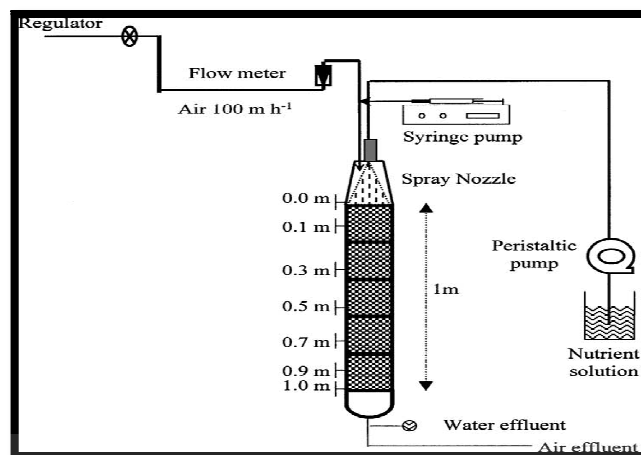
Pengukuran periode jangka panjang dilakukan pada hari ke-79, pada konsentrasi inlet $100 \text{ g H}_2\text{S/m}^3\text{h}$ diperoleh efisiensi biofilter sebesar 97% dan untuk inlet volumetrik $1600 \text{ m}^3/\text{m}^3\text{h}$ (87 ppmv konsentrasi inlet H_2S) diperoleh RE 94% ($181 \text{ g H}_2\text{S/m}^3\text{h}$) pada medium filter BAC.

3. BAC vs virgin *activated carbon*

Analisa dilakukan pada hari ke-34, dimana RE untuk biofilter kolom A yang menggunakan medium filter BAC sebesar 99% sedangkan biofilter kolom B yang menggunakan karbon murni mendegradasi H_2S 0,49wt% (berat basah) dan biofilter kolom A 20,08% berat basah. Maka dapat disimpulkan bahwa medium filter BAC baik digunakan untuk mendegradasi gas polutan dan dapat memperpanjang masa hidup karbon aktif.

2.4.5 Biofiltrasi *Volatile Organic Compound* (VOC) dengan Medium Filter Karbon Aktif

Penelitian ini dilakukan oleh Nadia Khammar, Luc Malhautier, Valérie Degrange, Robert Lensi dan Jean-Louis Fanlo (2003). Biofilter dapat digunakan untuk mengontrol berbagai macam produksi limbah *volatile organic compound* (VOC) dari industri seperti *print shop* (Ottengraf dan van der Oever, 1983; Ottengraf et al., 1986). Secara umum biofilter merupakan kolom yang terdiri dari bahan pengisi berpori (*peat*, karbon aktif, kompos, dll), yang diinokulasi dengan mikroorganisme yang mampu mendegradasi polutan. Untuk menjamin kelangsungan hidup mikroflora, kandungan kelembapan dari bahan pengisi dipertahankan pada kondisi yang cocok. Sehingga gas polutan dimasukkan pada kolom transfer ke dalam air dan berdifusi pada biofilter.



Gambar 2.9 Unit biofilter untuk skala laboratorium (Khammar et al., 2003)

Penghancuran, pengocokan dan sonikasi diujikan untuk penghilangan mikroflora dari bahan pengisi biofilter (*peat* dan karbon aktif). Penghancuran menggunakan ultra-turrax, yaitu blender yang dapat bekerja pada volume 20 mL. Pengocokan dilakukan dengan menggunakan vortex, penghilangan mikroorganisme tercapai dengan mengocok larutan yang mengandung 1,2 gram manik-manik kaca dan tidak menggunakan manik-manik kaca dengan menggunakan Vortex pada prosedur kontinyu dan diskontinyu (berhenti 1 detik tiap menit) selama 5 menit dengan kecepatan maksimum 2400 rpm. Sonikasi yaitu perlakuan ultrasonik yang dilakukan dengan kandungan suspensi 1 g dan tidak menggunakan manik-manik kaca dengan energi keluaran 70 W. Beberapa durasi (0,5; 5; 30; 60 menit) diujikan pada energi yang sama. Tiga agen dispersi kimia dibandingkan untuk mendispersi mikroorganisme pada permukaan *peat* dan karbon aktif. Agen tersebut adalah 200 mM buffer fosfat (7 mM Na_2HPO_4 , 3 mM NaH_2PO_4 , 0,13 M NaCl); 1% sodium pirofosfat; and 1% sodium hexametaphosfat dengan pH of 6,2; 10,9; dan 6,4.

Dari penelitian ini diperoleh hasil, prosedur kontinyu atau diskontinyu, serta penambahan manik-manik kaca tidak berpengaruh terhadap jumlah mikroorganisme yang dihilangkan dari partikel *peat*. Durasi perlakuan juga tidak berpengaruh terhadap pengocokan dan penghancuran, tetapi jumlah mikroorganisme setelah 60 menit dari perlakuan dengan ultrasonikasi secara signifikan lebih tinggi daripada yang diperoleh setelah 0,5 menit. Perbandingan metode ini menunjukkan bahwa metode penghancuran merupakan metode yang

paling efisien untuk penghilangan mikroorganisme dari *peat* dan karbon aktif. Perbandingan antara tiga agen dispersi kimia menunjukkan bahwa 1% Napirofosfat kurang efisien, dibandingkan dengan 200 mM bufer fosfat atau 1% Nheksametafosfat. Untuk mengoptimalkan pemeliharaan mikroorganisme, tiga media agar dibandingkan. *Trytic soy agar* 10 kali pengenceran (TSA 1/10) merupakan medium yang paling cocok untuk kultur mikroflora dari biofilter *peat*. Untuk biofilter karbon aktif, tidak ada perbedaan yang signifikan antara Luria Bertoni, TSA 1/10, dan *plate count agar*.

2.4.6 Biofiltrasi N₂O dengan Medium Filter Kompos

Penelitian mengenai biofilter dengan gas emisi N₂O telah banyak dilakukan di Departemen Teknik Kimia UI. Tiga penelitian terakhir tersebut dilakukan oleh Arisantoro (2010), Sinaga, dan Sagala (2011). Penelitian yang dilakukan Arisantoro (2010) ini dilaksanakan untuk mengevaluasi pengaruh ukuran pelet kompos dan penambahan kandungan nutrisi terhadap efisiensi reduksi N₂O dan pertumbuhan mikroorganisme pada medium filter. Selain itu juga diteliti perubahan sifat medium filter yang terjadi sebelum dan setelah biofiltrasi serta karakteristik medium filter. Penelitian dilakukan pada laju alir konstan sebesar 88 cc/menit dengan sistem aliran *batch* selama 12 jam. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi reduksi 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. Estimasi parameter dengan persamaan adsorpsi Langmuir menunjukkan bahwa kapasitas biosorpsi maksimum pada pelet ukuran 5x5 mm dengan penambahan kandungan nutrisi 40% mencapai 1,996 g/kg. Parameter yang diestimasi menggunakan persamaan Michaelis Menten menunjukkan bahwa *maximum removal rate* (Vm) dan Ks (konstanta saturasi) pada pelet 5x5 mm dengan kandungan nutrisi 40% berturut-turut mencapai 1.215,89 gm⁻³h⁻¹ dan 8,51126 g m⁻³. Nilai ini lebih tinggi dari pelet ukuran 5x8 mm di mana Vm-nya mencapai 688,29 g m⁻³ h⁻¹ dengan Ks yang lebih rendah yaitu 4,2654 g m⁻³.

Sinaga (2011) mengkaji tentang pengaruh zat pengikat pada pelet kompos sebagai medium biofilter dalam proses reduksi gas dinitrogen monoksida.

Penelitian biofilter skala laboratorium ini dilaksanakan dengan tujuan untuk mengevaluasi pengaruh jenis bahan pengikat dan pengaruh rasio bahan pengikat pada pelet kompos berbasis kotoran kambing sebagai medium filter terhadap efisiensi reduksi N_2O dan pertumbuhan mikroorganisme di dalam kompos. Selain itu juga mengamati perubahan suhu dan kelembapan medium filter selama proses biofiltrasi. Efisiensi reduksi N_2O dianalisa dengan menggunakan *Gas Chromatography* (GC) dan hasil kualitatif mikroorganisme di dalam kompos diamati dengan menggunakan metode TPC. Dari penelitian ini diperoleh hasil bahwa efisiensi reduksi tertinggi pada variasi jenis pengikat adalah menggunakan bahan pengikat dari tepung beras yaitu sebesar 82,53%. Sedangkan kelembapan medium filter semakin lama akan meningkat, sedangkan suhu medium filter akan semakin menurun sejalan dengan lamanya proses biofiltrasi di dalam kolom.

Penelitian biofilter dengan gas emisi N_2O berikutnya dilakukan oleh Sagala (2011) yang mengkaji optimalisasi bahan pengikat pada medium pelet dan kompos dalam biosorpsi gas dinitrogen monoksida. Penelitian ini dilakukan dengan sistem aliran *semibatch* selama 12 jam, bertujuan untuk mengevaluasi rasio perbandingan bahan pengikat dengan kompos, dan juga mengkaji perubahan sifat fisik-kimia medium filter selama proses biosorpsi dan perkembangan mikroba sebelum dan setelah proses biosorpsi serta membuat model matematis proses biosorpsi. Efisiensi reduksi N_2O dianalisa menggunakan GC dan hasil kualitatif mikroorganisme dianalisa dengan metode TPC. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi reduksi N_2O sebesar 79% pada pelet kompos dengan bahan pengikat tepung beras pada rasio 5 : 95% dan jumlah mikroorganisme meningkat 20% setelah proses biosorpsi. Sifat fisik dan kimia pelet kompos selama proses biofiltrasi mengalami perubahan yang tidak signifikan dan masih berada dalam kondisi optimum. Estimasi parameter dengan persamaan adsorpsi Langmuir menunjukkan bahwa $K_L = -0,0021 \text{ m}^3/\text{g}$ dan $q_m = 169,1 \text{ g } N_2O/\text{kg}$ dan estimasi dengan Michaelis Menten menunjukkan bahwa $V_m = 1037,94 \text{ g}/\text{m}^3\text{jam}$ dan $K_s = 217,39 \text{ g}/\text{m}^3$ kompos pada bahan pengikat tepung beras dengan rasio 5 : 95%.

2.5 Ringkasan *State of The Art*

Penelitian biofilter telah banyak dilakukan di berbagai negara. Berikut ini adalah *mapping* beberapa penelitian biofilter yang telah dilakukan selama ini.

| | | | | | |
|----------------------|------------------|--|--|---|---|
| EMISI GAS | N ₂ O | | Irwan W. Arisantoro (2010), Yusmalia R. Sinaga (2011), dan Jannati Sagala (2011) | | Penelitian ini |
| | H ₂ S | | | | Huiqi Duan, Lawrence C, Rong Yan dan Xiaoge Chen (2006) |
| | NH ₃ | H. Taghipour, M.R. Shahmansoury, B. Bina, H. Movahdian (2006) | | | |
| | VOC | | Michel Ondarts, Cecile Hort, Vincent Platel, Sabine Sochard (2010) | Nadia Khammar, Luc Malhautier, Valérie Degrange, Robert Lensi dan Jean-Louis Fanlo (2003) | |
| | NO ₂ | | | | |
| | NO _x | | | R. Jiang, S. Huang, dan J. Yang (2008) | |
| | | Sintetik | Kompos | Lumpur Aktif | Karbon Aktif |
| MEDIUM FILTER | | | | | |

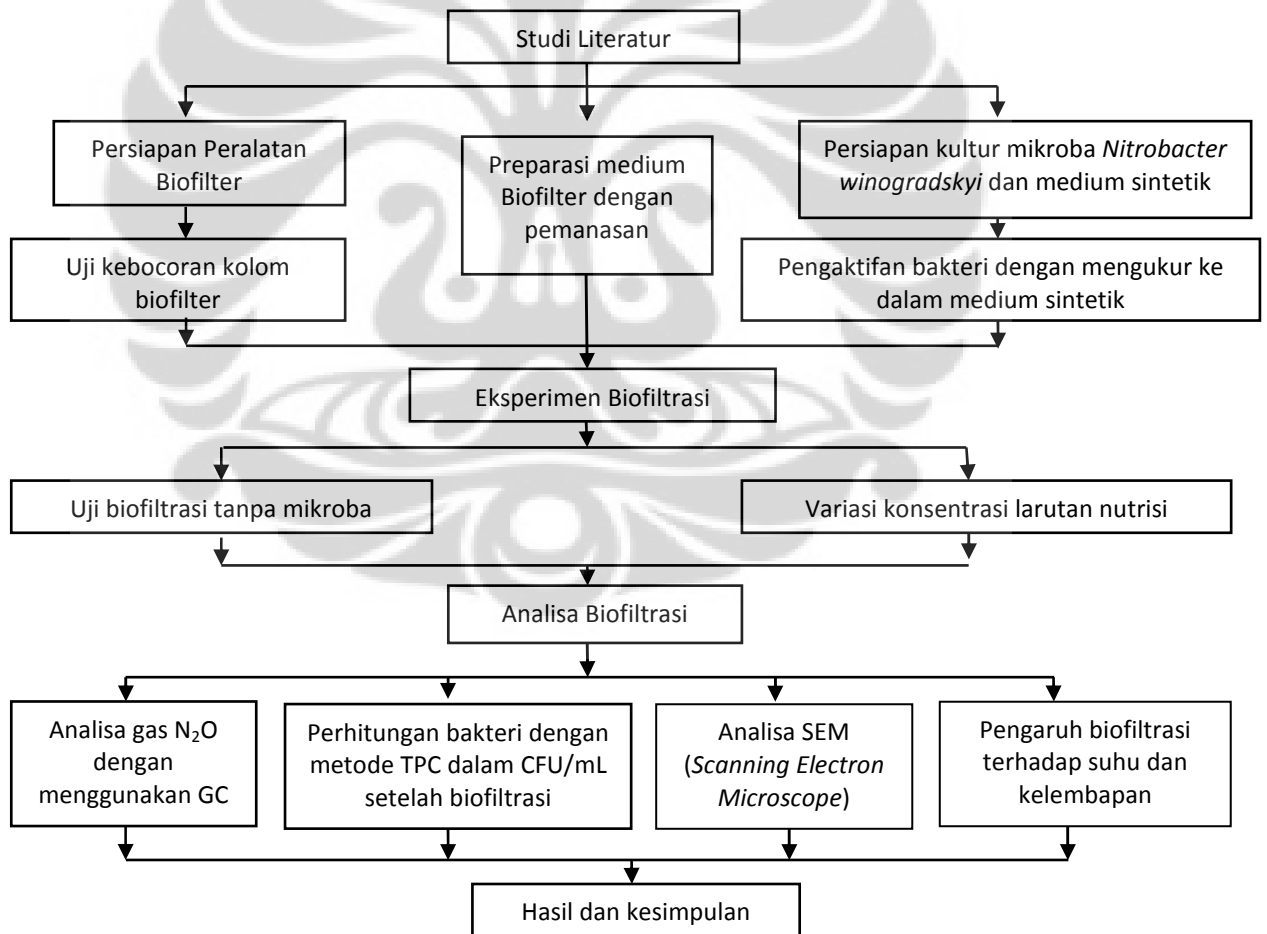
Gambar 2.10 *Mapping state of the art* biofilter

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan diuraikan mengenai diagram alir penelitian, alat dan bahan yang digunakan pada penelitian, prosedur penelitian, eksperimen biofiltrasi pada penelitian, data penelitian, analisa biofiltrasi pada penelitian dan variabel penelitian.

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium Rekayasa Bioproses Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, Depok. Diagram alir penelitian secara umum dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian biofiltrasi

Tahap awal dari penelitian ini dimulai dengan studi literatur yang dilakukan dengan mempelajari jurnal publikasi nasional maupun internasional mengenai proses biofiltrasi. Tahap selanjutnya adalah melakukan persiapan peralatan biofilter, persiapan medium filter dan persiapan kultur mikroba. Sistem peralatan biofilter yang digunakan merupakan alat skala laboratorium yang telah digunakan pada penelitian sebelumnya. Peralatan biofilter yang digunakan terbuat dari bahan *acrylic* dengan dimensi tinggi kolom 120 cm dan diameter 8 cm.

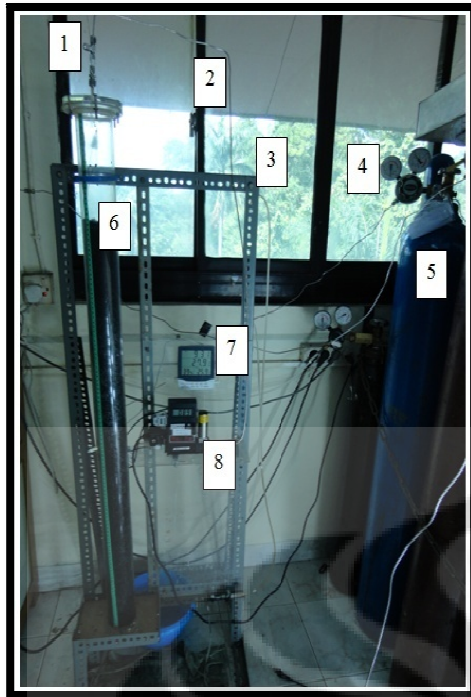
Sebelum memulai eksperimen, dilakukan uji kebocoran pada alat biofilter yang berguna untuk memastikan bahwa konsentrasi gas N_2O berkurang karena proses adsorpsi dan degradasi bukan karena kebocoran. Dilakukan juga kalibrasi terhadap gas N_2O untuk mengetahui luas *peak* N_2O pada volume sampel standar. Pada eksperimen ini dilakukan variasi terhadap konsentrasi larutan nutrisi sintetik. Namun sebelumnya dilakukan pengujian biofiltrasi tanpa menggunakan mikroba. Setelah itu dilakukan analisa, dimana pada tahap ini dilakukan analisa gas N_2O keluaran biofiltrasi dengan menggunakan *gas chromatography* (GC), pengamatan terhadap suhu dan kelembapan medium, perhitungan bakteri dengan menggunakan metode TPC dalam CFU/mL serta uji SEM (*Scanning Electron Microscope*). Medium karbon aktif sebelum dan setelah biofiltrasi diteliti perkembangan populasinya dengan menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC) dan uji SEM (*Scanning Electron Microscope*). Setelah itu dilakukan analisa terhadap hasil eksperimen melalui pembahasan untuk mencapai suatu kesimpulan.

3.2 Alat dan Bahan

Pada penelitian biofiltrasi N_2O menggunakan *Nitrobacter winogradskyi* dan media karbon aktif ini digunakan sejumlah alat dan bahan sebagai berikut:

3.2.1 Alat

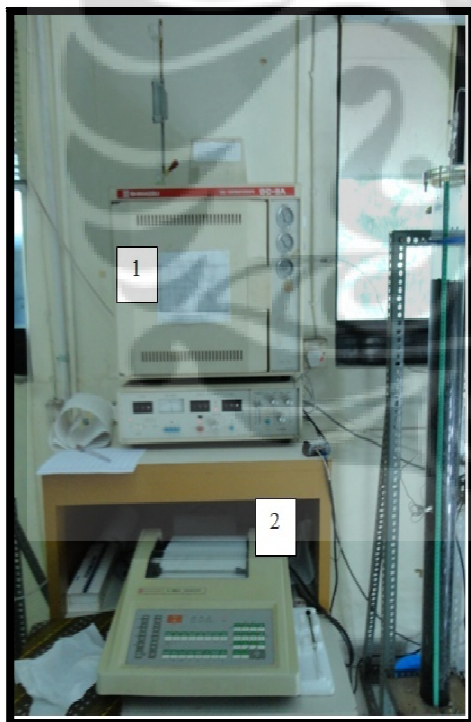
Alat biofilter yang digunakan disesuaikan dengan kebutuhan dan skala penelitian yaitu skala laboratorium. Gambar peralatan biofilter yang digunakan pada eksperimen ini ditunjukkan pada Gambar 3.2 berikut.



(a)

Keterangan Gambar (a) :

1. Tempat pengambilan sampel *inlet*
2. Pipa
3. Tempat pengambilan sampel *outlet*
4. Regulator Gas N_2O
5. Tabung gas N_2O
6. Kolom biofilter
7. *Thermo-hygrometer*
8. *Mass Flow Meter*



(b)

Keterangan Gambar (b):

1. *Gas Chromatography (GC)*
2. *Printer GC*

Gambar 3.2 (a) Perlatan biofilter dan (b) Perangkat GC yang digunakan dalam penelitian

Rincian peralatan yang digunakan dalam penelitian biofilter ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 3.1 Peralatan yang digunakan dalam penelitian

| No. | Alat | Fungsi |
|-----|--------------------------------|--|
| 1 | Sistem Biofilter | Tempat dilakukan pengujian biosorpsi gas N ₂ O |
| 2 | <i>Beaker Glass</i> | Wadah untuk pembuatan larutan gelatin, larutan agar dan pengujian sampel |
| 3 | Erlenmeyer | Wadah untuk pencampuran nutrient agar dan air |
| 4 | Spatula | Alat untuk mengaduk <i>nutrient agar</i> dan aquades |
| 5 | Kaca Arloji | Tempat untuk menimbang <i>nutrient agar</i> |
| 6 | <i>Bubble soap</i> | Alat untuk mengkalibrasi laju alir |
| 7 | <i>Gas Chromatography (GC)</i> | Alat untuk menganalisa konsentrasi N ₂ O dalam sampel |
| 8 | <i>Syringe</i> | Alat untuk mengambil gas sampel untuk analisa GC |
| 9 | Cawan Petri | Tempat untuk pembiakan bakteri dalam <i>nutrient agar</i> |
| 10 | Tabung Reaksi | Tempat untuk pembiakan bakteri dalam <i>nutrient broth</i> |
| 11 | Timbangan digital | Alat untuk mengukur berat bahan dan sampel |
| 12 | Presto | Tempat untuk sterilisasi sampel |
| 13 | Bunsen | Alat untuk memanaskan peralatan yang akan digunakan agar tetap steril |
| 14 | <i>Transfer box</i> | Tempat untuk melakukan metode TPC |
| 15 | Inkubator | Tempat menginkubasi bakteri |
| 16 | Oven | Alat untuk mensterilisasi alat-alat yang akan digunakan pada metode TPC |
| 17 | <i>Hot Plate stirrer</i> | Alat untuk memanaskan dan menghomogenkan medium agar untuk TPC |
| 18 | Batang ose | Alat untuk pengambilan sampel bakteri |

3.2.2 Bahan

Berikut ini merupakan rincian bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini :

1. **Gas sampel N₂O** merupakan gas yang digunakan pada pengujian biofiltrasi dengan konsentrasi sebesar 15.000 ppm dalam udara.
2. **Karbon aktif** sebagai medium filter berbentuk *granule* dengan ukuran diameter ± 4 mm.

3. *Nutrient broth* sebagai media untuk peremajaan dan perkembangbiakkan kultur bakteri.
4. *Nutrient agar* sebagai media untuk perkembangbiakkan dan perhitungan jumlah koloni bakteri dalam sampel.
5. **Aquades** sebagai pelarut dalam pembuatan *nutrient agar* dan *nutrient broth*.
6. **Larutan nutrisi** sebagai pemberi nutrisi tambahan untuk bakteri di dalam karbon aktif. Adapun nutrisi yang akan ditambahkan berupa nutrisi sintetik, komposisi larutan nutrisi terdiri dari (dalam 1 liter aquades) (IFO, 2000).
 - NaNO_2 : 1 gram
 - NaCl : 0,3 gram
 - K_2HPO_4 : 0,5 gram
 - $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 0,5 gram
 - $(\text{Mn SO}_4)_n \cdot \text{H}_2\text{O}$: 0,02 gram
 - $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$: 0,005 gram
 - Aquades : 1 liter

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini terdiri dari preparasi medium biofilter, preparasi kultur bakteri, kalibrasi gas N_2O , uji kebocoran alat dan uji blanko.

3.3.1 Preparasi Medium Biofilter

Medium filter yang digunakan untuk biofiltrasi ini berupa karbon aktif. Tahap awal persiapan medium biofilter ini yaitu persiapan karbon aktif. Adapun prosedur persiapan karbon aktif adalah memanaskan karbon aktif dengan suhu sekitar 100°C selama lebih kurang 2 jam.

3.3.2 Preparasi Kultur Bakteri

Tahap ini bertujuan untuk memperoleh kultur bakteri terbaru setiap melakukan uji degradasi, sehingga diperoleh kondisi bakteri yang optimal untuk mereduksi kandungan N_2O dalam gas.

a. Penanaman pada *Nutrient Broth* (Maulidiyasti, 2008)

1. Membuat larutan *nutrient broth* cair, yaitu sebagai berikut:

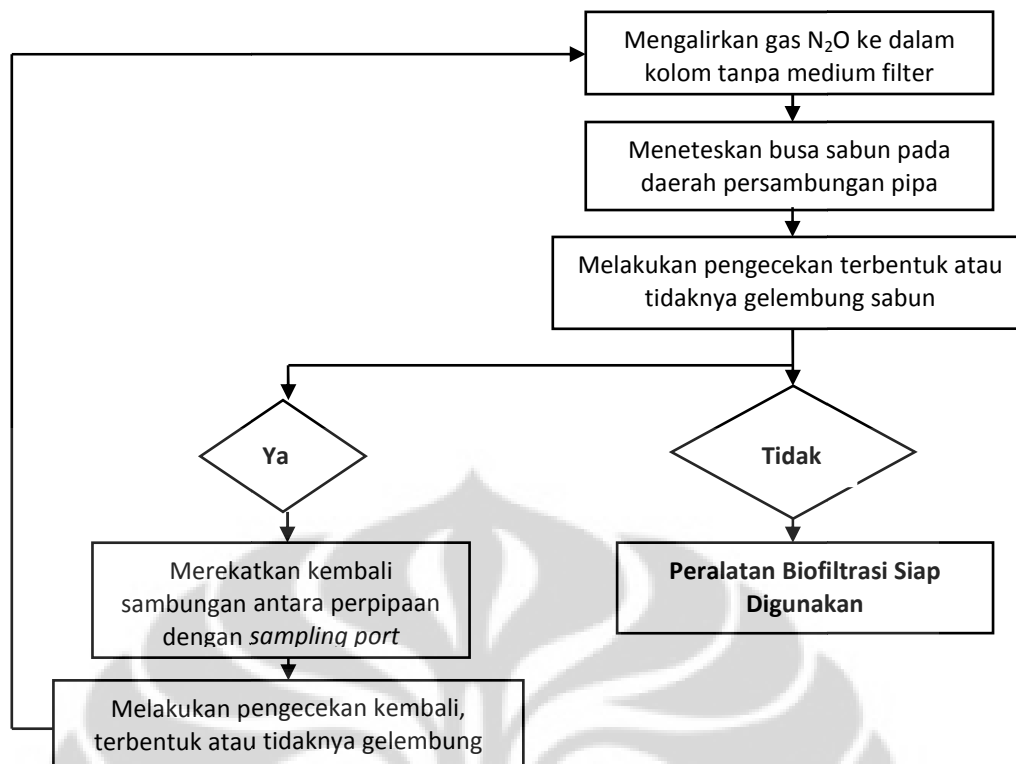
- Menyiapkan bubuk *nutrient broth* sebanyak 0,4 gram

- Menyiapkan aquades sebanyak 50 mL
 - Mencampurkan bubuk *nutrient broth* dengan aquades sambil dipanaskan
 - Mensterilkan larutan dengan menggunakan panci presto selama 20 menit
2. Menyiapkan bakteri yang telah ditanam pada media cawan petri, kemudian dengan menggunakan batang ose bakteri diambil dan dicelupkan ke dalam *nutrient broth* cair.
 3. Mengaduk campuran larutan tersebut dengan menggunakan batang ose, lalu menutup rapat dan menyimpan dalam inkubator pada suhu ruang selama \pm 24 jam.
- b. Penyiapan Media Agar (Maulidiyasti, 2008)
1. Menyiapkan bubuk *nutrient agar* 2,3 gram yang diencerkan dengan volume 100 mL dalam *beaker glass*.
 2. Memanaskan larutan tersebut di atas *hot plate* sambil diaduk dengan menggunakan *magnetic stirrer* sampai larutan homogen yang ditandai dengan mendidihnya larutan dan warna menjadi kuning bening.
 3. Memindahkan larutan yang telah dipanaskan tadi ke dalam Erlenmeyer kemudian menyumbat mulut Erlenmeyer dengan kapas.
 4. Mensterilkan larutan *nutrient agar* yang telah dibuat dengan menggunakan autoklaf/mempresto selama lebih kurang 15 menit.
 5. Mendinginkan larutan nutrisi yang telah disterilkan tadi hingga larutan agak dingin.
 6. Memindahkan larutan nutrisi ke dalam cawan petri steril dengan perlakuan yang aseptis.
 7. Menyiapkan sampel bakteri murni yang telah ditanam di *Nutrien Broth*.
 8. Menyiapkan batang ose dengan cara mensterilisasikannya di atas api bunsen
 9. Mengambil sampel bakteri dengan menggunakan batang ose kemudian mengoleskannya secara *zig-zag* pada media *nutrient agar*.
 10. Menyimpannya di dalam inkubator selama \pm 24 jam.
- c. Penanaman pada Medium Sintetik
1. Membuat larutan sintetik dengan komposisi sebagai berikut :
 - NaNO_2 : 1 gram

- NaCl : 0,3 gram
 - K₂HPO₄ : 0,5 gram
 - MgSO₄.7H₂O : 0,5 gram
 - (Mn SO₄)_n.H₂O : 0,02 gram
 - Fe₂(SO₄)₃ : 0,005 gram
 - Aquades : 1 liter
2. Mencampurkan larutan sintetik sebanyak 4 liter dengan sampel bakteri, lalu mengaerasikannya pada suhu ruang selama ±48 jam.
 3. Merendam karbon aktif ke dalam 4 liter larutan campuran medium sintetik dan bakteri selama ± 72 jam.
 4. Memisahkan medium sintetik dengan karbon aktif yang sudah direndam menggunakan saringan yang steril, karbon aktif siap digunakan dalam kolom biofilter.

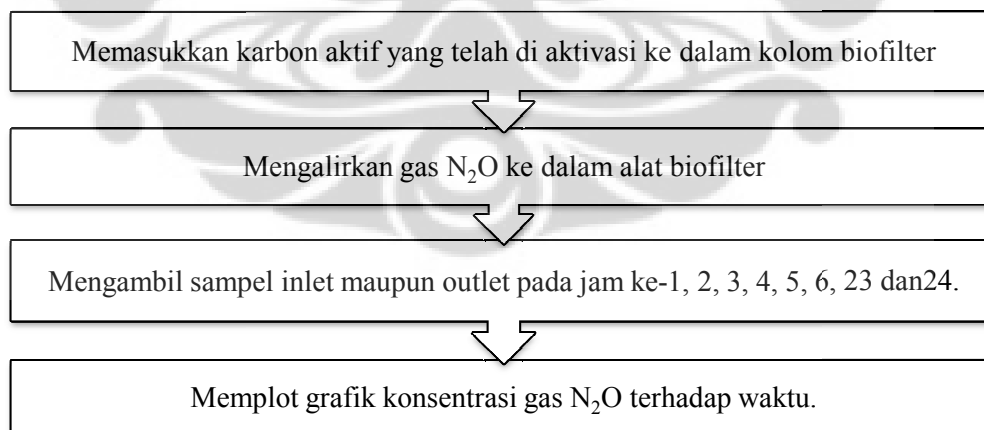
3.3.3 Uji Kebocoran Alat dan Uji Blanko

Uji kebocoran pada biofilter dilakukan untuk menghindari ketidakakuratan data percobaan sehingga diperoleh hasil yang baik. Dengan adanya uji kebocoran, maka dapat dipastikan bahwa konsentrasi gas N₂O berkurang karena proses adsorpsi dan degradasi, bukan karena kebocoran. Uji kebocoran dapat dilakukan dengan menggunakan sabun, dengan prosedur sebagai berikut :



Gambar 3.3 Prosedur uji kebocoran

Selain uji kebocoran dengan menggunakan sabun, kebocoran dalam sistem biofilter juga dapat diketahui dengan menggunakan uji blanko. Prosedur uji blanko adalah sebagai berikut:



Gambar 3.4 Prosedur uji blanko

Pada prinsipnya, uji blanko dilakukan dengan menggunakan kromatografi gas. Uji blanko dilakukan juga untuk memastikan bahwa terjadinya penurunan luas peak N_2O (setelah melewati kolom) hasil analisa GC dikarenakan adanya biofiltrasi oleh medium filter karbon aktif. Jika selama selang waktu tertentu

(setelah melewati *empty bed residence time*) tidak terjadi penurunan konsentrasi gas N_2O setelah melewati kolom biofilter, maka penurunan konsentrasi saat memakai medium filter karbon aktif merupakan hasil dari proses biofiltrasi.

3.3.4 Kalibrasi Gas N_2O

Kalibrasi gas N_2O juga dilakukan dengan tujuan mengetahui konsentrasi aktual dan waktu retensi gas N_2O dimana harus diketahui berapa luas *peak* dari gas N_2O . Prosedur pengukuran uji kalibrasi gas yaitu sebagai berikut :

1. Mengalirkan gas N_2O ke dalam *gas trap* yang kemudian menutupnya dengan rapat.
2. Sampel diambil dari *gas trap* dengan menggunakan *syringe* kaca, dimana volume gas yang diambil divariasikan dari 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1 mL.
3. *Syringe* kaca kemudian diinjeksikan ke dalam *Gas Chromatography* (GC) yang akan mendeteksi keberadaan gas beserta konsentrasinya.
4. Membuat plot antara volum gas N_2O terhadap luas *peak* N_2O sehingga didapat garis linear.

3.4 Eksperimen Biofiltrasi

Pengujian kinerja biofilter pada penelitian ini dilakukan dengan sistem aliran *batch* (sekali jalan) terhadap eksperimen yang akan dilakukan. Adapun eksperimen yang dilakukan antara lain adalah eksperimen biofiltrasi tanpa mikroba dan eksperimen biofiltrasi dengan variasi larutan nutrisi sintetik. Prosedur yang dilakukan pada eksperimen dengan biofiltrasi gas N_2O dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

3.4.1 Eksperimen Biofiltrasi Tanpa Mikroba

Eksperimen biofiltrasi tanpa mikroba ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan karbon aktif dalam menyaring gas polutan N_2O .

1. Memasukkan karbon aktif yang telah diaktivasi sampai ketinggian 100 cm.
2. Mengalirkan gas sampel N_2O dengan kandungan sebesar 15.000 ppm dalam udara.
3. Mengambil gas sampel yang telah dibiofiltrasi dengan menggunakan *syringe* untuk dianalisa pada kromatografi gas.

3.4.2 Eksperimen Biofiltrasi dengan Variasi Konsentrasi Larutan Larutan Nutrisi Sintetik

Pengujian kinerja sistem biofilter dalam penelitian ini dilakukan terhadap variasi yang dilakukan. Pada tahap eksperimen ini dilakukan variasi terhadap konsentrasi larutan nutrisi sintetik. Variasi dilakukan untuk mengetahui kemampuan optimum medium dalam proses biofiltrasi. Berikut ini rincian tahapan variasi yang dilakukan.

1. Membuat larutan nutrisi sintetik dengan variasi volume larutan nutrisi 2,5 liter; 3 liter; 3,5 liter; 4 liter; dan 4,5 liter dengan komposisi bahan medium sintetik 4 gram NaNO_2 ; 1,2 gram NaCl ; 2 gram K_2HPO_4 ; 2 gram $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 0,08 gram $\text{MnSO}_4 \cdot n \text{H}_2\text{O}$; dan 0,02 gram $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$.
2. Menambahkan sejumlah *N. winogradskyi* yang telah ditanam pada media agar ke dalam larutan sintetik yang telah disiapkan.
3. Mendinginkan selama ± 48 jam campuran tersebut untuk inkubasi *N. winogradskyi* dalam keadaan tertutup dan steril.
4. Menambahkan karbon aktif yang telah dikativasi ke dalam larutan nutrisi sintetik dengan variasi volume larutan nutrisi 3,5 liter; 4 liter; 4,5 liter; 5 liter; 5,5 liter yang telah dibuat sebelumnya, kemudian mendinginkannya selama ± 72 jam dalam keadaan tertutup dan steril.
5. Menyaring medium filter yang telah direndam dengan bakteri dan larutan sintetik kemudian memasukkan medium karbon aktif tersebut ke dalam kolom biofilter dengan ketinggian hingga 100 cm.
6. Mengalirkan gas sampel N_2O dengan kandungan sebesar 15.000 ppm dalam udara.
7. Mengambil gas sampel yang telah dibiofiltrasi dengan menggunakan *syringe* untuk dianalisa pada GC.
8. Mengambil sampel medium campuran yang telah digunakan pada biofiltrasi untuk dianalisa dengan metode TPC dan SEM.

3.5 Data Penelitian

Analisa data pengamatan bertujuan untuk mengetahui kapasitas dan peningkatan kemampuan degradasi N_2O oleh *N. winogradskyi* dalam media karbon aktif. Berikut adalah data pengamatan yang akan dianalisa:

1. Konsentrasi gas N_2O sesudah dilakukan biofiltrasi.
2. Suhu dan kelembapan medium selama proses biofiltrasi.
3. Jumlah koloni mikroorganisme pada medium filter sebelum dan setelah dilakukan biofiltrasi untuk melihat pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme di dalam medium filter dengan menggunakan metode TPC dan uji *Scanning Electron Microscope* (SEM).
4. Membandingkan hasil penelitian biofiltrasi N_2O yang menggunakan medium filter karbon aktif dengan yang menggunakan medium filter zeolit.

3.6 Analisa Biofiltrasi

Pada penelitian ini terdapat dua macam analisa, yaitu analisa gas N_2O menggunakan *Gas Chromatography* (GC) dan analisa perhitungan bakteri dengan menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC) dan uji *Scanning Electron Microscope* (SEM).

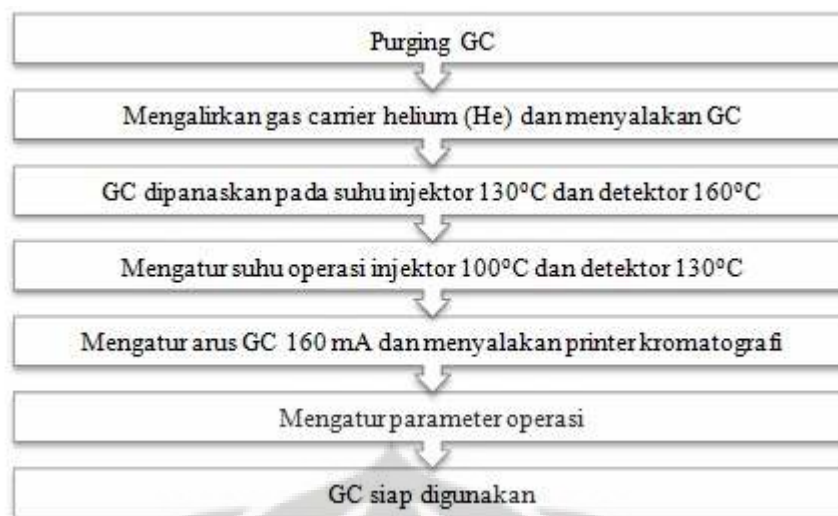
3.6.1 Analisa Gas N_2O Menggunakan *Gas Chromatography* (GC)

Konsentrasi gas N_2O masukan dan keluaran biofilter diukur dengan menggunakan *Gas Chromatography* (GC) jenis TCD, merk Shimadzu, tipe 8A no c spesifikasi 10493112184 SA, AC 220 V, 1500VA dan 50-60Hz. Gas sampel yang telah melalui proses biofiltrasi diambil dengan menggunakan *syringe* dan kemudian diinjeksikan ke dalam GC untuk dianalisa.

Tabel 3.2 Spesifikasi kromatografi gas dalam penelitian

| | |
|-----------------------|-----------|
| Merk dan tipe | Shimadzu |
| Kolom | Porapak Q |
| Suhu Kolom : | |
| Injektor | 60°C |
| Detektor | 100°C |
| Gas carrier | He |
| Jenis Detektor | TCD |

Data yang diambil merupakan luas peak dari gas N_2O yang datanya akan diplot terhadap waktu. Berikut ini adalah prosedur cara pengoperasian *Gas Chromatography* yang digunakan dalam penelitian ini :



Gambar 3.5 Diagram Alir Analisa GC

3.6.2 Analisa Perkembangan Bakteri

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

3.6.2.1 Analisa dengan Metode *Total Plate Count* (TPC)

Metode *total plate count* dilakukan sebelum dan setelah proses biofiltrasi untuk menguji seberapa besar aktivitas degradasi dengan mengetahui jumlah koloni bakteri awal dan akhirnya. Analisa TPC dilakukan di Laboratorium Teknik Penyehatan Lingkungan Departemen Teknik Sipil, Universitas Indonesia. Sampel medium sintetik yang dilakukan pengujian ini antara lain medium sintetik inkubasi 0 jam, medium sintetik inkubasi 48 jam, medium karbon aktif sebelum biofiltrasi dengan masa inkubasi 72 jam, dan medium karbon aktif setelah biofiltrasi. Metode *total plate count* (TPC) mempunyai keterbatasan, yaitu koloni yang dihasilkan tidak lebih dari 30-300 koloni, dengan asumsi awal satu bakteri akan menghasilkan satu koloni.

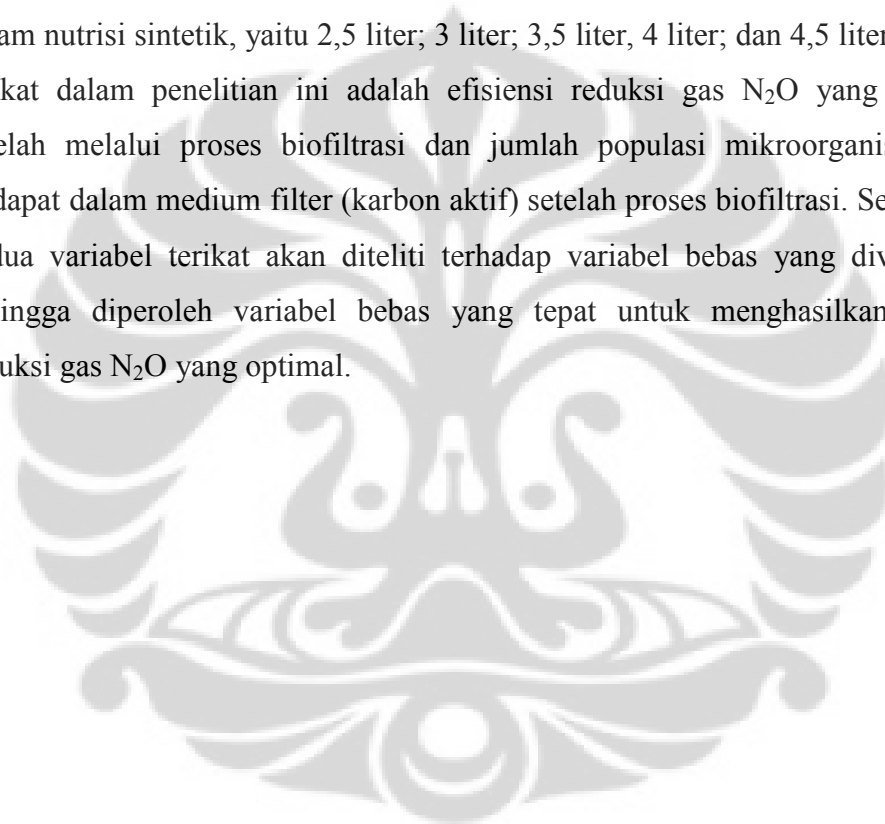
3.6.2.2 Analisa Perkembangan Bakteri dengan SEM

Jumlah mikroorganisme sebelum dan setelah proses biofiltrasi juga dapat diamati secara visual melalui uji SEM (*Scanning Electron Microscope*) untuk melihat morfologi karbon aktif secara mikroskopik. Sampel akan di-*scan* dengan tumbukan energi yang tinggi dari elektron-elektron yang bergerak secara acak.

Kemudian elektron-elektron tersebut akan berinteraksi dengan atom dan membuat sampel mengeluarkan sinyal yang mengandung informasi mengenai topografi permukaan sampel. Jumlah koloni bakteri sebelum dan setelah biofiltrasi dapat diketahui dari uji TPC dan diperkuat dengan adanya uji SEM ini. Uji SEM dilakukan di Laboratorium Uji, Departemen Metalurgi dan Material FT UI.

3.7 Variabel Penelitian

Pada penelitian ini terdapat tiga jenis variabel, yaitu variabel bebas, terikat, dan kontrol. Variabel bebasnya adalah volume penambahan aquades ke dalam nutrisi sintetik, yaitu 2,5 liter; 3 liter; 3,5 liter, 4 liter; dan 4,5 liter. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah efisiensi reduksi gas N_2O yang diperoleh setelah melalui proses biofiltrasi dan jumlah populasi mikroorganisme yang terdapat dalam medium filter (karbon aktif) setelah proses biofiltrasi. Selanjutnya, kedua variabel terikat akan diteliti terhadap variabel bebas yang divariasikan, sehingga diperoleh variabel bebas yang tepat untuk menghasilkan efisiensi reduksi gas N_2O yang optimal.



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil yang diperoleh dari penelitian dengan analisa terhadap kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O dengan variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik, serta jumlah koloni bakteri sebelum dan sesudah proses biofiltrasi dengan metode *total plate count* (TPC) dan *scanning electron microscope* (SEM). Dalam penelitian ini, untuk mengetahui kemampuan reduksi N_2O dilakukan pengamatan dengan menggunakan *Gas Chromatography* (GC) jenis TCD (*Thermal Conductivity Detector*). Pengamatan ini dilakukan pada $t = 1$ sampai $t = 6$ kemudian dilanjutkan $t = 23$ dan $t = 24$ selama 24 jam. Penelitian ini juga mengkaji pemodelan adsorpsi isothermis dengan menggunakan pemodelan *Langmuir* dan *Freundlich*.

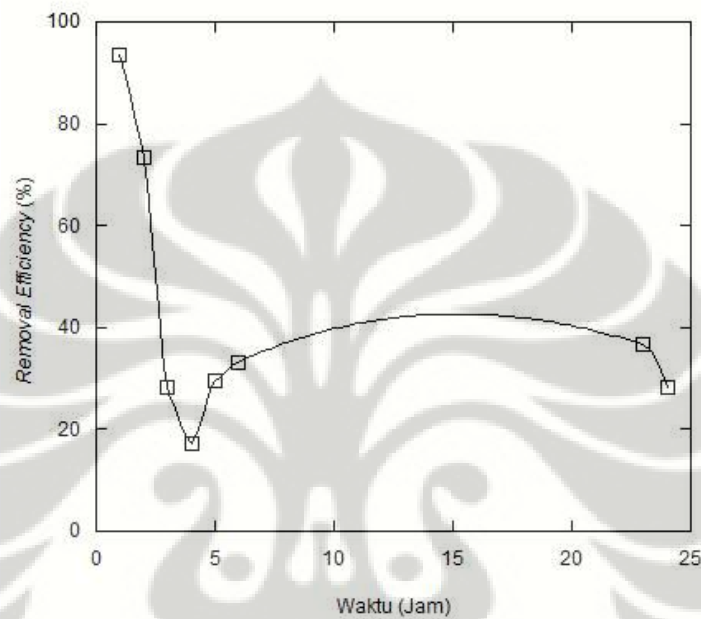
4.1 Uji Kinerja Biofilter

Uji kinerja biofilter ini bertujuan untuk mengetahui kinerja biofilter dengan menganalisa parameter yang akan dikaji. Parameter yang dikaji dalam eksperimen biofiltrasi ini adalah pengaruh variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik dalam mereduksi gas N_2O serta terhadap pertumbuhan bakteri. Pengujian kinerja ini dilakukan melalui eksperimen dengan menggunakan sistem aliran *batch* 24 jam. Selain itu, juga akan diamati perubahan suhu dan kelembapan selama 24 jam proses biofiltrasi. Pada penelitian ini, kinerja biofilter menggunakan laju alir optimum biofiltrasi 88 cc/menit (Utami et al., 2009) dan tinggi medium filter 100 cm (Linda, 2010).

4.1.1 Uji Kinerja Biofilter dalam Mereduksi N_2O dengan Medium Filter Karbon Aktif Tanpa Penambahan Mikroba

Pada sub bab ini akan dianalisa mengenai kinerja biofilter dalam mereduksi gas N_2O dengan menggunakan karbon aktif sebagai medium filter tanpa penambahan bakteri, jadi hanya gas N_2O saja yang difiltrasi melalui

medium filter karbon aktif. Volume karbon aktif yang digunakan dalam penelitian ini sebanyak 2000 gram. Peristiwa yang terjadi pada proses biofiltrasi ini adalah adanya daya adsorpsi oleh karbon aktif untuk mereduksi gas N_2O . Adapun tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengontrol kemampuan karbon aktif sebagai media filter yang akan digunakan dalam proses biofiltrasi. Hasil dari uji kemampuan biofilter dalam mereduksi N_2O tanpa penambahan mikroba dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut:



Gambar 4.1 Grafik biofiltrasi N_2O tanpa mikroba

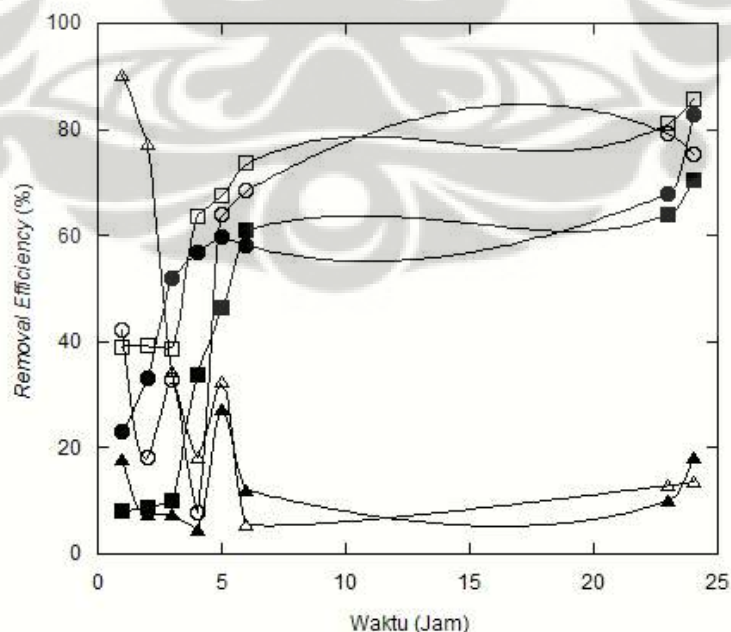
4.1.2 Pengaruh Konsentrasi Larutan Nutrisi Sintetik Pada Medium Karbon Aktif dengan Inokulasi Bakteri *Nitrobacter winogradskyi* terhadap Reduksi N_2O

Percobaan variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik terhadap reduksi N_2O bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh konsentrasi larutan nutrisi sintetik terhadap kinerja biofilter dalam mereduksi N_2O . Adapun komposisi bahan-bahan yang digunakan dalam pembuatan larutan nutrisi sintetik ini antara lain adalah $NaNO_2$ sebanyak 4 gram; $NaCl$ sebanyak 1,2 gram; K_2HPO_4 sebanyak 2 gram; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ sebanyak 2 gram; $MnSO_4 \cdot n H_2O$ sebanyak 0,08 gram; dan $Fe_2(SO_4)_3$ sebanyak 0,02 gram (IFO, 2000). Konsentrasi yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan % b/b. Medium filter karbon aktif ditambahkan larutan nutrisi sintetik bertujuan untuk memberikan asupan nutrisi bagi bakteri

selama proses biofiltrasi berlangsung. Selain itu juga diharapkan penambahan nutrisi dapat meningkatkan kinerja mikroba menjadi lebih baik dalam mereduksi gas N_2O .

Keberadaan larutan nutrisi sintetis dalam proses biofiltrasi ini memungkinkan adanya perkembangan jumlah mikroba di dalam kolom biofilter (Simanjuntak, 2008), dimana mikroba memerlukan nutrisi yang seimbang untuk bertahan hidup dan memperbanyak diri. Kandungan nutrisi yang cukup harus tersedia, agar diperoleh performansi yang baik pada proses biofiltrasi. Oleh karena itu, selain karbon dan energi dari degradasi kontaminan, mikroba juga memerlukan nutrisi untuk memperpanjang hidupnya (Pandey, 2004). Populasi mikroba tersebut akan tumbuh dari energi (ATP) yang berasal dari transformasi polutan udara yang mengalir pada biofilter dengan didukung oleh ketersediaan nutrisi yang cukup (Shuler dan Kragi, 1992). Ketersediaan nutrisi anorganik merupakan faktor lain yang mempengaruhi pembentukan dan pemeliharaan komunitas mikroba yang sehat di dalam medium biofilter (Clark et al., 2004).

Hasil dari uji kemampuan biofilter dalam mereduksi gas N_2O terhadap variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetis di dalam medium filter karbon aktif dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut:



Gambar 4.2 Pengaruh konsentrasi larutan nutrisi terhadap efisiensi reduksi gas N_2O , dengan konsentrasi: (■) 0,37%; (□) 0,31%; (●) 0,27%; (○) 0,23%; (▲) 0,21% (b/b); dan (△) tanpa mikroba

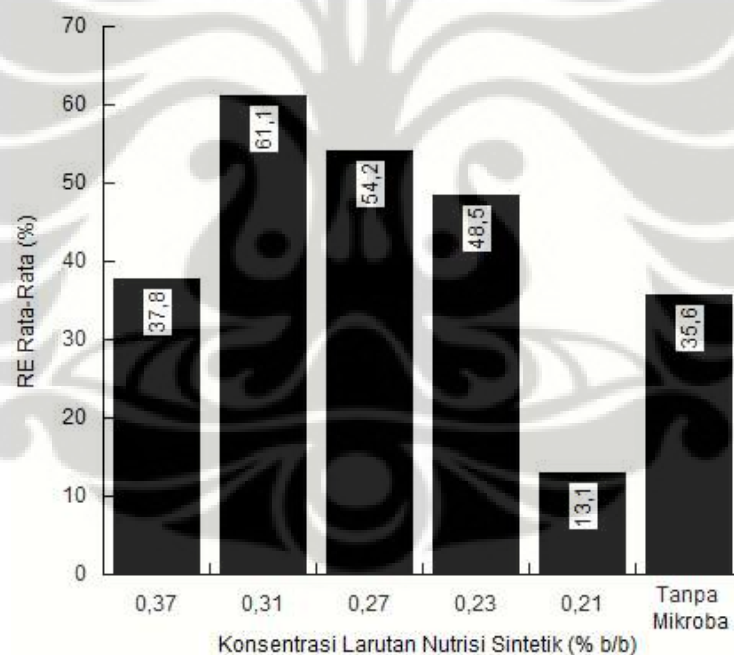
Pada Gambar 4.2 terlihat jelas pengaruh konsentrasi larutan nutrisi sintetik ditandai oleh kenaikan efisiensi reduksi selama proses biofiltrasi berlangsung. Untuk konsentrasi 0,37%; 0,31%; dan 0,27% (b/b) dapat disimpulkan seiring dengan bertambahnya waktu biofiltrasi, maka kemampuan reduksi biofilter semakin meningkat, hal ini ditandai dengan kenaikan efisiensi reduksi pada variasi tersebut. Peningkatan efisiensi reduksi ini terjadi pada saat $t = 1$ hingga $t = 24$. Pada penelitian ini, efisiensi reduksi tertinggi terjadi pada konsentrasi 0,31% (b/b) saat $t = 24$, dimana efisiensi reduksi mencapai 85,68%. Fenomena yang terjadi pada proses ini adalah reduksi N_2O karena peristiwa adsorpsi dan degradasi oleh karbon aktif yang diinokulasi *Nitrobacter Winogradskyi* dengan penambahan larutan nutrisi sintetik.

Hal yang berbeda dialami konsentrasi 0,23% dan 0,21% (b/b) dimana pada kondisi *start up*, efisiensi reduksi mengalami penurunan. Laju konsentrasi gas N_2O pada kondisi *start up* yaitu pada $t = 1 - 3$ merupakan konsentrasi *outlet* yang masih berfluktuatif. Hal ini disebabkan karena pada interval waktu tersebut gas N_2O yang dialirkan ke dalam kolom biofilter belum stabil dan belum homogen sehingga dihasilkan kondisi aliran gas ke dalam medium filter yang tidak stabil. Pada $t = 1-3$ juga merupakan waktu *start up* atau fasa aklimatisasi mikroorganisme, fasa aklimatisasi merupakan proses organisme individu menyesuaikan diri dengan perubahan bertahap dalam lingkungannya (Duan et al., 2004). Pada konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,23% (b/b), efisiensi reduksi berfluktuatif pada saat *start up*, namun mengalami kondisi stabil pada jam berikutnya hingga saat $t = 24$ jam. Efisiensi reduksi maksimum saat $t = 24$ pada konsentrasi 0,23% (b/b) sebesar 75,45%. Sementara itu, pada konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,21% (b/b), grafik yang dihasilkan cenderung tidak stabil hingga akhir proses biofiltrasi dan efisiensi reduksi pada saat $t = 24$ adalah sebesar 18,07%. Hal ini berarti ketersediaan nutrisi yang kurang pada *biofilm* sehingga pertumbuhan mikroba menjadi tidak optimal ataupun kelembapan juga berkurang sehingga laju biodegradasi oleh mikroba juga menurun.

Biofilm haruslah menyediakan nutrisi penting untuk aktivitas biologis serta menjaga kelembapan untuk pertumbuhan bakteri. Pada daerah *biofilm*, mikroba akan mendegradasi gas N_2O sehingga gas N_2O yang berdifusi ke dalam pori-pori

partikel karbon aktif akan terlarut ke dalam lapisan *biofilm* dan terdegradasi oleh mikroba yang terkandung di dalamnya. Dari hasil penelitian variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik ini dapat disimpulkan bahwa penambahan nutrisi merupakan metode yang efektif dan dapat digunakan untuk meningkatkan kinerja biofilter yaitu dengan cara menyediakan nutrisi yang diperlukan untuk pertumbuhan mikroba yang mampu mendegradasi polutan (Mallakin dan Ward, 1996). Namun, kelebihan suplai nutrisi juga tidak baik karena dapat menyebabkan pertumbuhan biomassa yang tidak terkendali dan menyebabkan *clogging* pada biofilter yang menyebabkan efisiensi reduksi polutan mengalami penurunan (Gribbins dan Loehr, 1998).

Berikut ini adalah gambar perbandingan efisiensi reduksi N_2O rata-rata (% RE rata-rata) selama $t = 24$ jam. Dari Gambar 4.3 di bawah ini dapat dilihat dengan profil efisiensi reduksi dengan variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik.



Gambar 4.3 Perbandingan efisiensi reduksi rata-rata dari berbagai variasi percobaan

Gambar 4.3 di atas menunjukkan efisiensi reduksi rata-rata terbesar adalah pada konsentrasi 0,31% (b/b) dimana efisiensi reduksi yang dihasilkan sebesar 61,1%. Peningkatan efisiensi reduksi N_2O disebabkan karena adanya penambahan nutrisi yang memiliki mineral-mineral yang dibutuhkan oleh mikroba khususnya mikroba yang berkaitan langsung dengan degradasi N_2O . Dalam hal ini terlihat bahwa melalui penambahan nutrisi terhadap medium filter karbon aktif cenderung

meningkatkan efisiensi reduksi N_2O , namun jika penambahan nutrisi terlalu banyak maka akan mengurangi efisiensi reduksi biofiltrasi N_2O .

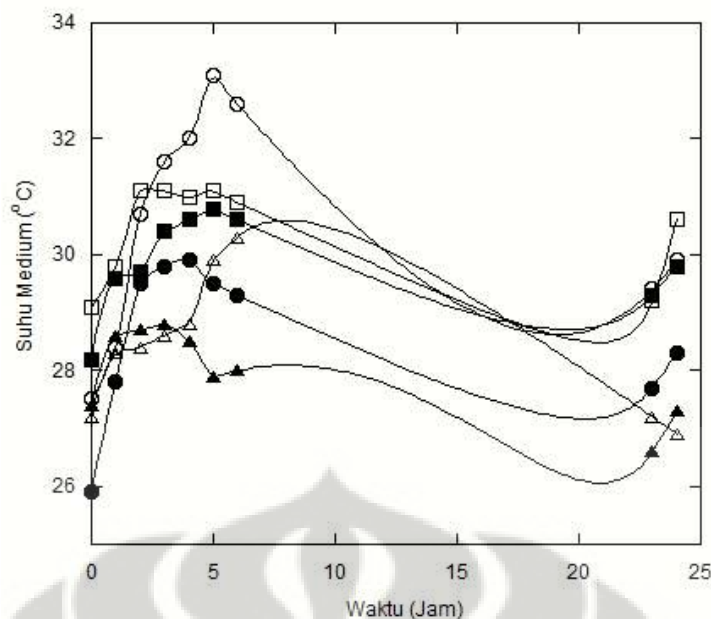
Pada gambar diatas terlihat konsentrasi larutan nutrisi sintetis yang terlalu pekat menyebabkan efisiensi reduksinya rendah, hal ini dapat dilihat pada konsentrasi 0,37% (b/b) dimana efisiensi reduksinya hanya mencapai 37,8%. Sementara itu, konsentrasi larutan nutrisi sintetis yang terlalu encer yaitu konsentrasi 0,21% (b/b) juga mempengaruhi efisiensi reduksi yang hanya mencapai 13,1%. Pada proses biofiltrasi N_2O tanpa menggunakan mikroba, tingkat efisiensi reduksi rata-ratanya sebesar 35,6%. Hasil biofiltrasi tanpa mikroba ini menunjukkan kemampuan karbon aktif dalam menyaring polutan gas N_2O .

Kondisi optimal pada efisiensi reduksi rata-rata ini sejalan dengan efisiensi reduksi setiap variasi konsentrasi, dimana pada perhitungan ini variasi yang memiliki konsentrasi optimal adalah konsentrasi 0,31% (b/b) sebesar 61,1%. Dari hasil penelitian ini terlihat bahwa keberadaan larutan nutrisi sintetis mempengaruhi perkembangan jumlah mikroba dalam kolom biofilter (Simanjuntak, 2008) dimana efisiensi reduksi yang dihasilkan pada setiap konsentrasi larutan nutrisi sintetis berbeda-beda, dan konsentrasi optimum terjadi pada konsentrasi 0,31% (b/b).

Efisiensi reduksi pada konsentrasi 0,21% (b/b) memiliki efisiensi reduksi yang lebih rendah dibandingkan dengan efisiensi reduksi biofilter tanpa penambahan mikroba. Hal ini disebabkan karena daya adsorpsi karbon aktif tanpa penambahan mikroba lebih baik dibandingkan dengan daya adsorpsi karbon aktif dengan penambahan larutan sintetis konsentrasi 0,21% (b/b). Sehingga pada proses biofiltrasi ini jumlah gas N_2O yang terdegradasi lebih banyak terjadi pada biofiltrasi tanpa penambahan mikroba.

4.1.3 Perubahan Kelembapan dan Suhu Medium Selama Proses Biofiltrasi

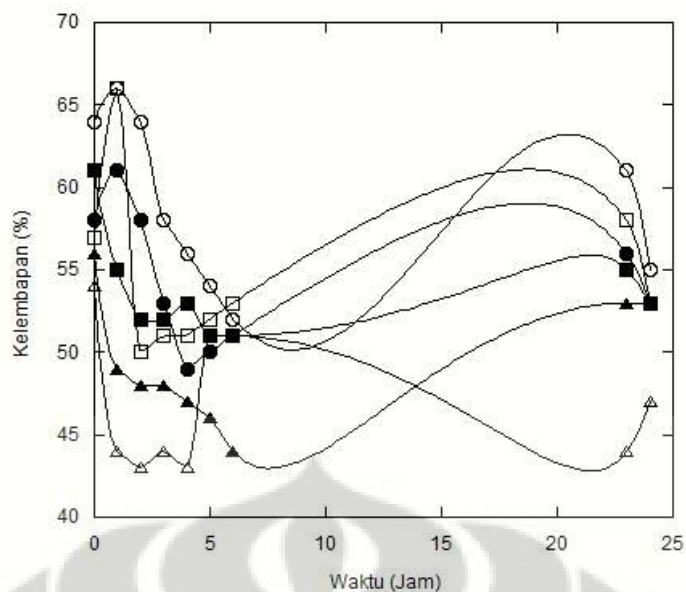
Pada sub bab ini akan dibahas mengenai pengaruh reduksi N_2O terhadap suhu dan kelembapan medium biofilter. Pengamatan ini dilakukan selama proses biofiltrasi berlangsung, yaitu setiap $t = 1$ sampai $t = 6$ kemudian $t = 23$ dan $t = 24$. Profil perubahan suhu medium biofilter selama proses biofiltrasi ditunjukkan pada Gambar 4.4 berikut :



Gambar 4.4 Profil suhu medium selama proses biofiltrasi dengan konsentrasi: (■) 0,37%; (□) 0,31%; (●) 0,27%; (○) 0,23%; (▲) 0,21% (b/b); dan (△) tanpa mikroba

Pada proses biofiltrasi, suhu medium biofilter harus dijaga pada kondisi konstan, karena laju pertumbuhan mikroba sangat dipengaruhi oleh suhu. Sebagian besar aplikasi biofilter terjadi pada suhu *mesophilic*, yaitu berkisar 25-40°C dengan suhu 35-37°C dianggap sebagai suhu optimum (Strauss et al., 2003). Dari profil grafik pada Gambar 4.4 terlihat, pada kondisi *start up*, suhu mengalami kenaikan kemudian suhu menurun hingga $t = 23$ kemudian pada akhir proses biofiltrasi pada $t = 24$ suhu mengalami kenaikan kembali. Suhu medium cenderung tidak stabil selama proses biofiltrasi berlangsung. Tidak stabilnya suhu medium biofilter ini dipengaruhi oleh peristiwa kimia, fisika, dan biologi selama proses biofiltrasi berlangsung. Reaksi eksotermis turut mempengaruhi suhu medium karena akan menghasilkan panas, disamping itu juga dipengaruhi oleh kondisi cuaca (suhu lingkungan) dan suhu dari gas masuk (Corsi dan Seed, 1995). Adapun kisaran suhu medium pada penelitian ini yaitu antara 26-33°C, perubahan suhu yang terjadi tidak terlalu signifikan, karena kondisi tersebut masih berada pada kisaran suhu optimum.

Gambar 4.5 di bawah ini menunjukkan hubungan kelembapan pada medium filter selama proses biofiltrasi berlangsung selama 24 jam.



Gambar 4.5 Profil kelembapan selama proses biofiltrasi dengan konsentrasi: (■) 0,37%; (□) 0,31%; (●) 0,27%; (○) 0,23%; (▲) 0,21% (b/b); dan (△) tanpa mikroba

Pada proses biofiltrasi, kelembapan merupakan salah satu faktor yang turut mempengaruhi pertumbuhan dan metabolisme mikroorganisme (Ravichandara et al., 2009). Kekeringan pada medium filter dapat menimbulkan celah pada medium filter yang dapat mengakibatkan terjadinya *channeling*. Selain itu, rendahnya tingkat kelembapan juga dapat menyebabkan penurunan laju biodegradasi polutan. Kandungan kelembapan yang efisien pada biofiltrasi berkisar antara 50%-70% dengan suhu berkisar antara 15-35°C (Janni et al., 2001). Kelembapan yang terlalu tinggi akan menghambat perpindahan massa dari fasa gas ke *biofilm* atau adsorpsi permukaan, sebaliknya apabila medium filter terlalu kering akan membahayakan pertumbuhan mikroorganisme (Ravichandra et al., 2009).

Suplai nutrisi yang berlebih dapat menyebabkan pertumbuhan biomassa yang berlebih (*over growth*), dimana *over growth* menyebabkan *clogging* pada biofilter sehingga efisiensi reduksi polutan menurun, kelebihan biomassa akan menghambat perpindahan massa dari fasa gas pada *biofilm* (Duan et al., 2006). Gambar 4.5 di atas menunjukkan profil kelembapan selama proses biofiltrasi. Dari gambar tersebut terlihat profil kelembapan yang terjadi di semua variasi konsentrasi berbeda-beda. Pada penelitian ini kelembapan medium berkisar antara 44%-66%. Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa kelembapan yang efisien

pada biofiltrasi berkisar antara 50%-70% dengan suhu berkisar antara 15-35°C (Janni et al., 2001).

Kelembapan medium pada semua variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik mengalami penurunan saat kondisi *start up*. Pada variasi konsentrasi 0,37%; 0,31%; 0,27%; 0,23% 0,21% (b/b) kelembapan medium cenderung naik turun hingga akhir proses biofiltrasi, namun kelembapan medium yang terjadi pada variasi ini masih berada pada kisaran kelembapan yang efisien, yaitu 50-70%. Sementara itu, kelembapan yang terjadi pada biofiltrasi tanpa menggunakan mikroba yang berarti juga tanpa penambahan larutan nutrisi sintetik juga tidak stabil hingga akhir proses biofiltrasi. Namun, kisaran kelembapan yang terjadi pada biofiltrasi tanpa mikroba ini berada dibawah kisaran kelembapan yang efisien. Hal ini disebabkan karena pada biofiltrasi ini tidak ditambahkan larutan sintetik kedalamnya sehingga kelembapan yang dihasilkan pun hanya berasal dari gas yang dialirkan ke dalam kolom biofilter.

Pada Gambar 4.5 terlihat hubungan antara kelembapan dengan waktu selama proses biofiltrasi berlangsung, dimana kelembapan medium filter semakin bertambah selama proses biofiltrasi. Hal ini sejalan dengan menurunnya suhu medium selama 24 jam proses biofiltrasi, yang disebabkan oleh bertambahnya kandungan H₂O (air) medium akibat metabolisme mikroorganisme yang terdapat di dalam medium karbon aktif.

4.1.4 Hasil Uji Perkembangan Mikroba pada Medium Karbon Aktif

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

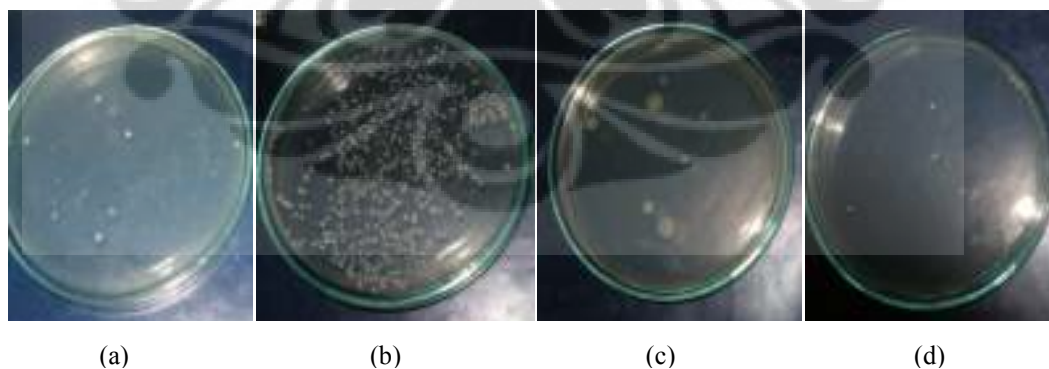
4.1.4.1 Metode TPC (*Total Plate Count*)

TPC (*Total Plate Count*) merupakan salah satu metode analisa yang bertujuan untuk mengetahui jumlah koloni mikroba pada suatu sampel. Pengujian perkembangan mikroba dilakukan di Laboratorium Teknik Penyehatan Lingkungan, Departemen Teknik Sipil. Pada metode TPC, perhitungan bakteri dilakukan dengan menggunakan asumsi bahwa satu koloni bakteri dihasilkan oleh satu sel bakteri. Metode TPC ini menggunakan nutrisi agar sebagai medium perkembangbiakkan mikroba yang akan dihitung. Hasil perhitungan TPC

kemudian direpresentasikan dalam satuan *Colony Forming Units* (CFU) per gram. Adapun sampel yang diuji dengan metode TPC antara lain medium sintetik masa inkubasi 0 jam, medium sintetik masa inkubasi 48 jam, karbon aktif yang direndam dalam larutan nutrisi sintetik sebelum biofiltrasi dan karbon aktif setelah biofiltrasi.

Dalam metode TPC, setiap alat dan bahan yang digunakan harus dalam keadaan steril dan aseptis agar peralatan serta bahan yang akan digunakan tidak terkontaminasi oleh mikroba lain yang tidak bersumber dari sampel yang akan diuji. Oleh karena itu, sebelum melakukan metode ini perlu dilakukan sterilisasi alat dan bahan terlebih dahulu.

Metode TPC juga meliputi dilusi/pengenceran sampel, pembuatan nutrisi agar sebagai medium perkembangbiakan bakteri, serta inkubasi sampel TPC dengan suhu 34-35° C selama 24-48 jam. Proses inkubasi bertujuan untuk menunggu pertumbuhan koloni mikroba penitrifikasi agar dapat dilakukan perhitungan tanpa menggunakan alat bantu, dimana koloni bakteri berwarna putih susu. Rentang suhu yang digunakan adalah 34-35° C karena di atas suhu 35°C bakteri patogen akan tumbuh. Hal ini tidak diharapkan karena bakteri patogen tersebut dapat membunuh bakteri penitrifikasi tersebut. Berikut ini adalah Gambar 4.6 hasil uji TPC sebelum dan setelah proses biofiltrasi:



Gambar 4.6 Hasil Uji TPC: (a) pada $t = 0$ jam, (b) pada $t = 48$ jam, (c) sebelum biofiltrasi, dan (d) setelah biofiltrasi

Gambar 4.6 (a) merupakan uji TPC pada saat $t = 0$ jam dimana mikroba yang tumbuh masih sedikit, hal ini disebabkan karena nutrisi yang dikonsumsi bakteri belum maksimum sehingga pertumbuhan bakterinya cenderung masih sedikit. Selain itu juga karena bakteri masih berada dalam kondisi penyesuaian

dengan lingkungan tempat hidupnya, dimana tempat biakkan sebelumnya adalah *nutrient agar*. Berbeda dengan Gambar 4.6 (b) setelah dilakukan inkubasi selama 48 jam, pada gambar tersebut terlihat jumlah bakteri yang tumbuh meningkat pesat. Sedangkan hasil uji TPC yang dilakukan pada saat sebelum dan setelah biofiltrasi terlihat jumlah bakteri yang tumbuh sebelum tidak terlalu berbeda jauh jumlahnya.

Hasil pengujian terhadap mikroba di dalam medium filter dengan metode TPC dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut:

Tabel 4.1 Hasil uji TPC

| Sampel Uji TPC | Σ Mikroorganisme (CFU/g) | | | | |
|------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | Konsentrasi 0,37% (b/b) | Konsentrasi 0,31% (b/b) | Konsentrasi 0,27% (b/b) | Konsentrasi 0,23% (b/b) | Konsentrasi 0,21% (b/b) |
| Medium sintetik t = 0 | 17×10^8 | 12×10^8 | 22×10^9 | 4×10^8 | 101×10^8 |
| Medium sintetik t = 48 | 24×10^{12} | 5×10^{11} | 41×10^{10} | 102×10^8 | 214×10^{10} |
| Sebelum biofiltrasi | 15×10^{13} | 121×10^{12} | 6×10^{13} | 29×10^{10} | 4×10^{14} |
| Setelah biofiltrasi | 3×10^9 | 24×10^{11} | 4×10^9 | 12×10^9 | 21×10^{11} |

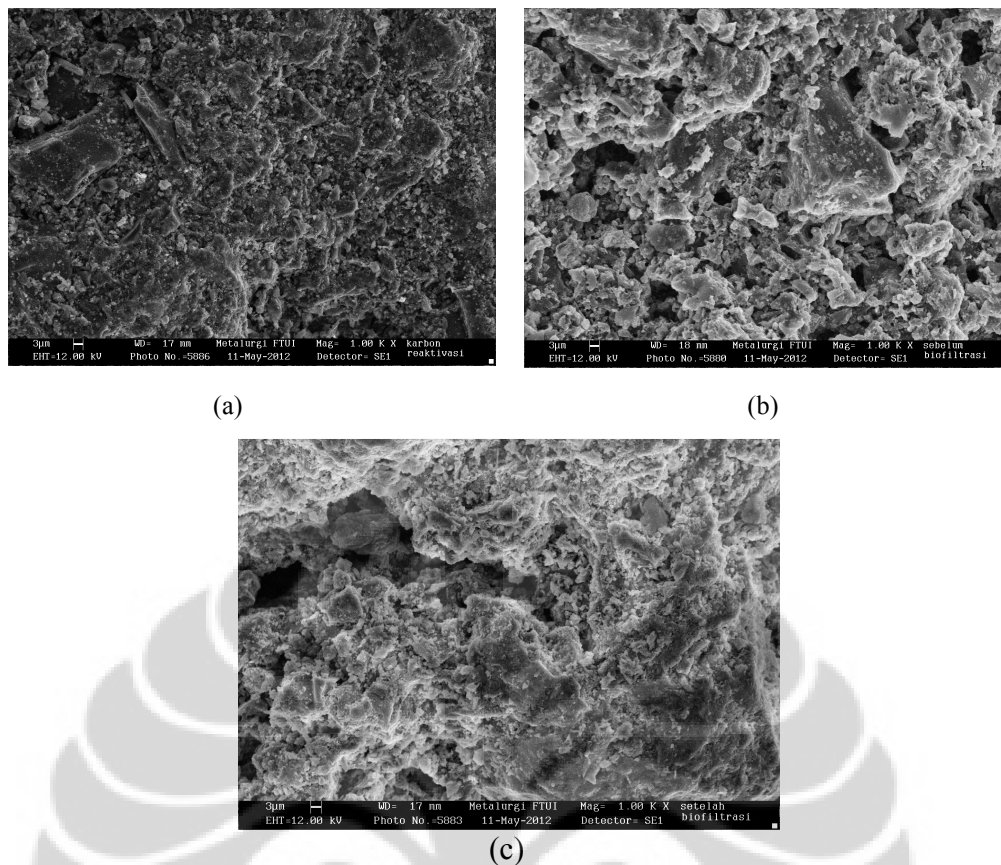
Pengujian TPC dilakukan pada sampel medium sintetik dengan masa inkubasi 0 jam, 48 jam, dan sampel medium sebelum biofiltrasi serta sampel medium setelah biofiltrasi. Berdasarkan hasil analisa TPC pada Tabel 4.1 di atas menunjukkan bahwa populasi bakteri dari masa pengkulturan hingga sebelum proses biofiltrasi mengalami peningkatan yang cukup signifikan pada beberapa variasi konsentrasi. Untuk konsentrasi 0,37% (b/b) jumlah bakteri pada medium sintetik t = 0 berjumlah 17×10^8 CFU/gram, jumlah ini meningkat setelah di inkubasi selama 48 jam menjadi 24×10^{12} CFU/gram. Sementara itu setelah inkubasi 72 jam (sebelum dibiofiltrasi) jumlah bakteri meningkat kembali menjadi 15×10^{13} CFU/gram, namun setelah dilakukan proses biofiltrasi selama 24 jam jumlah bakteri mengalami penurunan menjadi 3×10^9 . Hal yang sama terjadi juga pada konsentrasi 0,27% dan 0,21% (b/b) dimana jumlah bakteri sebelum dan setelah proses biofiltrasi mengalami penurunan yang cukup drastis. Fenomena penurunan jumlah bakteri yang sangat drastis setelah proses biofiltrasi ini dapat disebabkan karena jumlah larutan nutrisi sintetik yang terlalu pekat ataupun terlalu encer sehingga menyebabkan banyak bakteri yang mati. Suplai nutrisi yang berlebih dapat menyebabkan pertumbuhan bakteri yang lebih juga sehingga

menyebabkan *clogging* dan efisiensi reduksinya mengalami penurunan (Gribbins dan Loehr, 1998). Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, jumlah larutan nutrisi harus sesuai dengan keperluan bakteri yang digunakan dalam proses biofiltrasi ini.

Berdasarkan hasil pengujian TPC, pada konsentrasi 0,31% (b/b) tidak terlihat hasil yang signifikan pada jumlah bakteri sebelum dan sesudah biofiltrasi. Dimana jumlah bakteri sebelum dan setelah proses biofiltrasi jumlahnya diasumsikan tetap. Hal ini berdasarkan jumlah pangkat hasil perhitungan TPC yang tidak terlalu berbeda jauh antara sebelum dan setelah proses biofiltrasi. Misalnya pada konsentrasi 0,31% (b/b) dimana jumlah bakteri sebelum biofiltrasi 121×10^{12} CFU/gram sedangkan setelah proses biofiltrasi jumlahnya 24×10^{11} CFU/gram. Jumlah mikroorganisme yang tetap tersebut menunjukkan bahwa mikroba dapat bertahan hidup dan memperbanyak diri selama proses biofiltrasi berlangsung. Peningkatan jumlah mikroorganisme pendegradasi akan meningkatkan efisiensi reduksi biofilter karena biodegradasi dilakukan oleh mikroorganisme pendegradasi pada lapisan *biofilm*. Berdasarkan analisa yang telah dilakukan, perhitungan dengan menggunakan *Gas Chromatography* memberikan hasil bahwa efisiensi reduksi yang optimal terjadi pada konsentrasi 0,31% (b/b) dan pada uji TPC hasil optimal juga terjadi pada konsentrasi 0,31% (b/b), kedua pengujian ini memberikan hasil yang sejalan.

4.1.4.2 Uji SEM (*Scanning Electron Microscope*)

Selain dengan metode TPC, jumlah mikroba sebelum dan setelah proses biofiltrasi juga dapat diamati secara visual melalui uji SEM (*Scanning Electron Microscope*) untuk melihat morfologi medium filter karbon aktif secara mikroskopik. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Uji, Departemen Metalurgi dan Material, Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Berikut ini adalah Gambar 4.7 yang menggambarkan morfologi karbon aktif yang telah direaktivasi, sebelum biofiltrasi dan setelah biofiltrasi:



Gambar 4.7 Hasil Uji SEM: (a) pada karbon aktif yang telah di reaktivasi, (b) karbon aktif sebelum biofiltrasi, dan (c) karbon aktif setelah biofiltrasi

Gambar 4.7 menunjukkan hasil uji SEM pada karbon aktif yang direaktivasi, karbon aktif sebelum dibiofiltrasi, dan karbon aktif setelah dibiofiltrasi. Perbesaran yang digunakan pada uji SEM ini adalah 1000 x sehingga dapat terlihat jelas lapisan *biofilm* yang terdapat di dalam medium filter. Berdasarkan hasil uji SEM terlihat jelas perbedaan karbon aktif baik yang hanya direaktivasi saja, sebelum biofiltrasi maupun setelah biofiltrasi. Karbon aktif yang hanya di reaktivasi saja tidak terdapat lapisan *biofilm* yang terbentuk sedikitpun. Hal ini ditunjukkan oleh permukaan karbon aktif yang masih kasar dan tidak tertutup oleh lapisan *biofilm* maupun zat-zat lain. Sementara itu, pada karbon aktif sebelum biofiltrasi dan karbon aktif setelah biofiltrasi terlihat adanya pembentukan lapisan berwarna putih yang menutupi permukaan karbon aktif. Pada Gambar 4.7 (b) terlihat pembentukan lapisan berwarna putih pada karbon aktif. Hal ini menandakan lapisan *biofilm* yang terbentuk oleh mikroba setelah beberapa hari diinokulasi. Pembentukan *biofilm* membutuhkan waktu beberapa

hari atau bulan, tergantung dari konsentrasi mikroorganisme itu sendiri (Kumar et al., 2011).

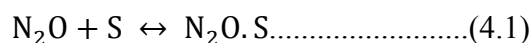
Sedangkan pada Gambar 4.7 (c) yaitu karbon aktif yang telah dibiofiltrasi terlihat permukaan karbon aktif yang dipenuhi oleh lapisan berwarna putih. Lapisan berwarna putih yang terbentuk pada Gambar 4.7 (c) lebih tebal jika dibandingkan dengan Gambar 4.7 (b). Hal ini disebabkan karena semakin lama waktu operasi biofiltrasi, membuat lapisan biofilm yang terbentuk makin tebal. Berdasarkan hasil pengujian dengan metode TPC, perbedaan jumlah mikroba sebelum dan setelah biofiltrasi pada variasi konsentrasi 0,37%, 0,27%, dan 0,21% (b/b) cukup signifikan dimana jumlah bakteri setelah biofiltrasi mengalami penurunan yang cukup tajam. Hal ini sangat bertentangan dengan hasil uji SEM pada Gambar 4.7 (c) yang memperlihatkan jumlah lapisan *biofilm* setelah proses biofiltrasi yang makin menebal. Akumulasi *biofilm* juga dipengaruhi oleh akumulasi biomassa, seperti sisa sel-sel mati, padatan tersuspensi, dan endapan inorganik (Diks et al., 1994).

4.2 Pemodelan Hasil Eksperimen

Untuk menunjukkan fenomena adsorpsi yang terjadi pada medium filter karbon aktif maka digunakan pemodelan adsorpsi. Isoterm adsorpsi digunakan untuk menjelaskan interaksi antara gas N₂O dengan adsorben karbon aktif. Berikut ini adalah pembahasan mengenai persamaan linearisasi dari kedua proses tersebut.

4.2.1 Persamaan *Langmuir*

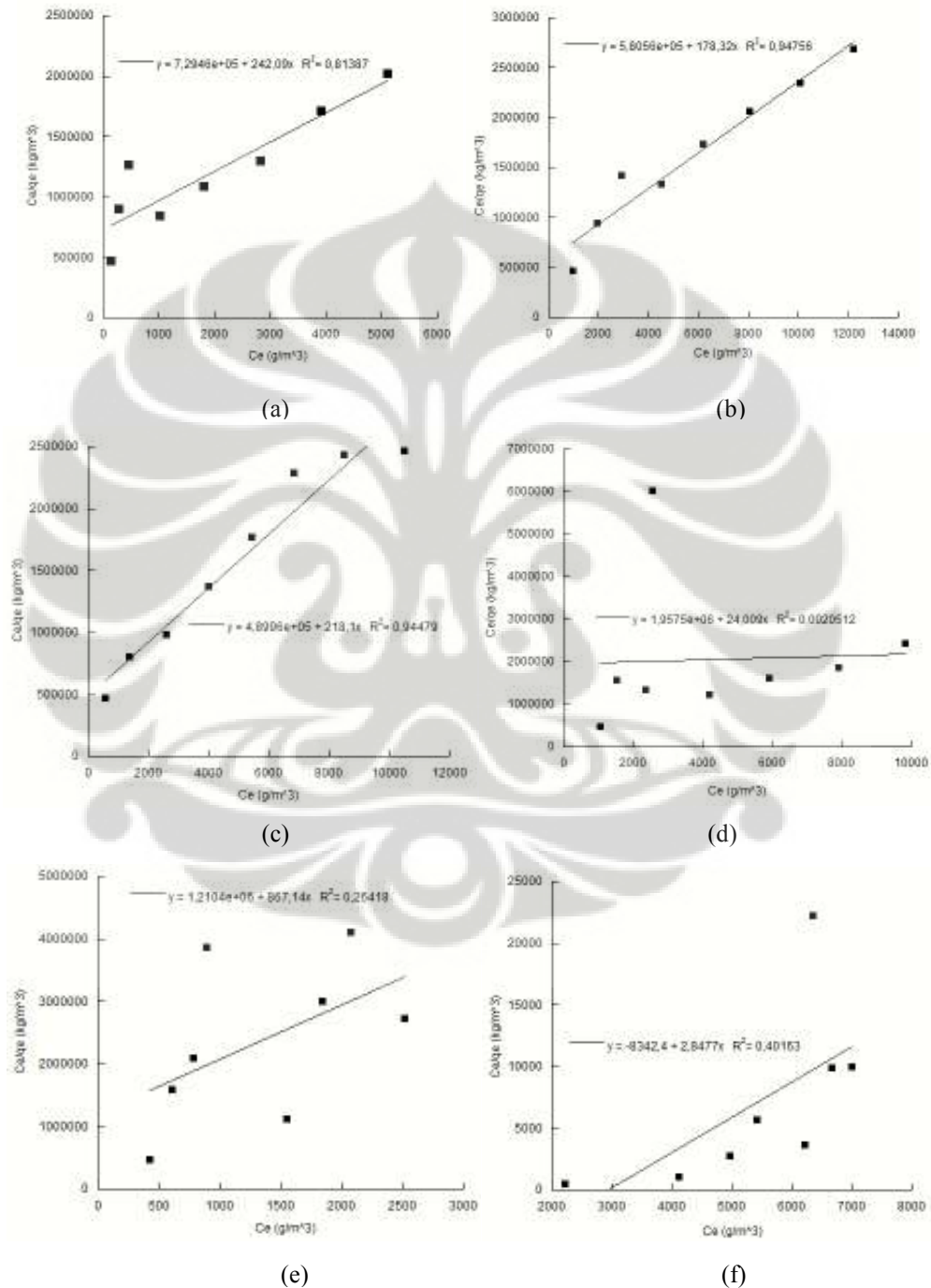
Model adsorpsi *Langmuir* merupakan model paling umum yang digunakan untuk menentukan jumlah adsorbat yang diadsorb sebagai fungsi tekanan parsial atau konsentrasi pada suhu tertentu. Reaksi biosorpsi yang terjadi pada substrat (S) berupa *biofilm* pada permukaan medium filter dituliskan sebagai berikut:



Dari penurunan rumus yang telah dijelaskan pada BAB 2, maka persamaan untuk pemodelan *Langmuir* adalah sebagai berikut:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \dots \dots \dots (4.2)$$

Pengolahan data dilakukan terhadap data yang diperoleh selama 24 jam pengoperasian biofilter. Data hasil perhitungan kemudian diplot dengan C_e sebagai sumbu-x dan C_e/q_e sebagai sumbu-y (Soeprijanto dan Fabella, 2010). Data yang diplot pada $t = 1$ sampai $t = 24$, untuk pengolahan data pemodelan ini dapat dilihat pada Lampiran 4 sehingga didapatkan grafik seperti Gambar 4.8 berikut ini:



Gambar 4.8 Grafik Adsorpsi Isoterm *Langmuir* pada (a) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,37% (b/b), (b) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,31% (b/b), (c) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,27% (b/b), (d) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,23% (b/b), (e) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,21% (b/b), dan (f) Tanpa mikroba

Dari gambar grafik di atas dapat dilihat bahwa kurva yang dihasilkan adalah kurva yang naik. Dari persamaan 4.2, konstanta *Langmuir* dan kapasitas adsorpsi (q_m) dapat dicari dari nilai intersep (titik perpotongan garis pada sumbu y) persamaan linearisasi yang diperoleh. Konstanta *Langmuir* dapat dicari dari intersep = $\frac{1}{q_m K_L}$ dan kapasitas adsorpsi (q_m) = $\frac{1}{m}$.

Dari persamaan 4.6 untuk persamaan garis pada konsentrasi 0,37% (b/b) $y = 7,2946.10^5 + 242,09x$ diperoleh nilai $q_m = 4,13.10^{-3}$ g N_2O/g . Dengan cara yang sama, nilai parameter K_L dan q_m untuk seluruh grafik adsorpsi isoteremis *Langmuir* lainnya dapat diperoleh. Nilai parameter K_L dan q_m untuk seluruh grafik adsorpsi isoteremis *Langmuir* tercantum pada Tabel 4.2. Data perhitungan pada permodelan adsorpsi isoteremis *Langmuir* dan persamaan garis yang diperoleh, dapat dilihat pada Lampiran 4 untuk seluruh variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik pada laju alir 88 cc/menit dan ketinggian 100 cm medium filter.

Tabel 4.2 Nilai konstanta *Langmuir* pada medium karbon aktif

| Variasi Konsentrasi Larutan Nutrisi Sintetik | Persamaan <i>Langmuir</i> | q_m (g N_2O/g) | K_L (m^3/g) |
|--|-----------------------------|------------------------|----------------------|
| Konsentrasi 0,37% | $y = 7,2946.10^5 + 242,09x$ | $4,13.10^{-3}$ | $3,32.10^{-4}$ |
| Konsentrasi 0,31% | $y = 5,8056.10^5 + 178,32x$ | $5,61.10^{-3}$ | $3,07.10^{-4}$ |
| Konsentrasi 0,27% | $y = 4,8896.10^5 + 218,1x$ | $4,59.10^{-3}$ | $4,45.10^{-4}$ |
| Konsentrasi 0,23% | $y = 1,9575.10^6 + 24,009x$ | 0,0417 | $1,23.10^{-5}$ |
| Konsentrasi 0,21% | $y = 1,2104.10^6 + 867,14x$ | $1,15.10^{-3}$ | $7,18.10^{-4}$ |
| Tanpa Mikroba | $y = -8342,4 + 2,8477x$ | 0,3512 | $-3,41.10^{-4}$ |

Dari Tabel 4.2 terlihat jelas perbandingan nilai q_m dan K_L dari berbagai macam variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik dan biofiltrasi tanpa penambahan mikroba. Konstanta *Langmuir* (K_L) menunjukkan kemampuan karbon aktif dalam mengadsorb gas N_2O . Semakin tinggi nilai konstanta *Langmuir* (K_L), maka semakin tinggi juga kemampuan adsorben untuk mengikat adsorbat (N_2O). Nilai K_L yang lebih baik ditunjukkan pada variasi konsentrasi. Hal ini menunjukkan kemampuan karbon aktif dalam mengadsorb gas N_2O pada variasi ini adalah yang paling baik. Nilai K_L pada biofiltrasi tanpa penambahan mikroba menunjukkan hasil yang negatif. Nilai K_L yang negatif menunjukkan bahwa gas N_2O yang dapat diadsorb semakin lama semakin berkurang sampai

mencapai kondisi jenuhnya (konsentrasi *outlet* = konsentrasi *inlet*). Jadi, dapat dikatakan bahwa laju desorpsi lebih besar daripada adsorpsi.

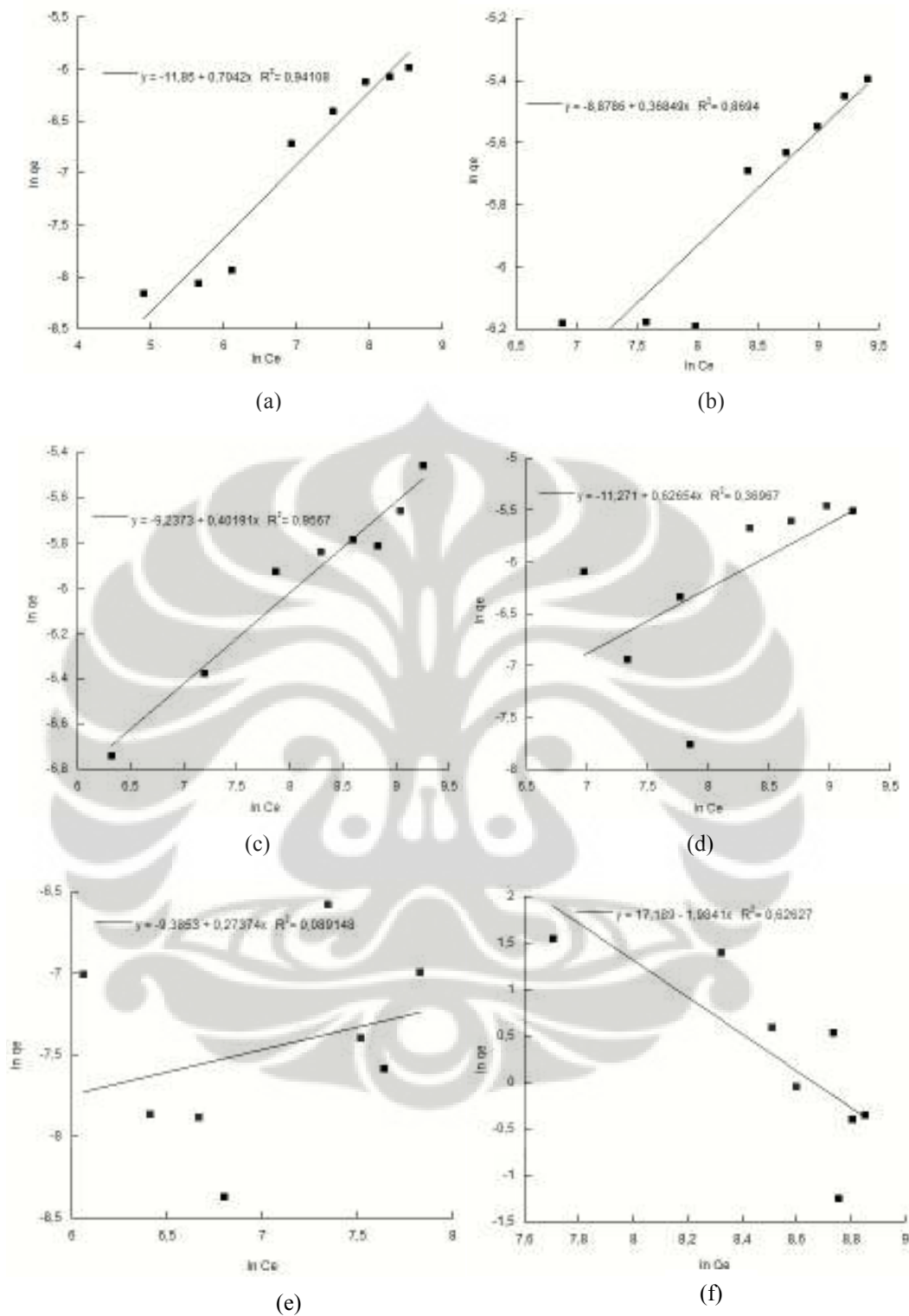
Sementara itu, konstanta q_m menunjukkan keterbatasan kapasitas adsorpsi bila permukaan tertutup penuh dengan adsorbat. Semakin tinggi nilai q_m , maka semakin banyak gas N_2O yang dapat diadsorpsi. Dari Tabel 4.2 juga dapat dilihat bahwa variasi biofiltrasi tanpa penambahan mikroba memiliki nilai q_m yang paling besar bila dibandingkan dengan kapasitas adsorpsi dengan berbagai macam variasi konsentrasi. Hal ini menunjukkan bahwa pada biofiltrasi tanpa penambahan mikroba, gas N_2O yang teradsorpsi lebih banyak. Sehingga dapat disimpulkan, pada biofiltrasi tanpa penambahan mikroba menunjukkan kapasitas adsorpsi yang lebih baik.

4.2.2 Persamaan *Freundlich*

Isoterm *Freundlich* adalah persamaan empirik yang dikembangkan berdasarkan adsorpsi *monolayer* dan digunakan untuk permukaan yang heterogen. Diasumsikan bahwa proses adsorpsi terjadi pada permukaan yang heterogen dan kemampuan adsorpsi berhubungan dengan konsentrasi adsorbat pada saat setimbang (Kaili Lin, 2009). Dari penurunan rumus yang telah dijelaskan pada BAB 2, maka persamaan untuk pemodelan *Freundlich* adalah sebagai berikut:

$$\ln q_e = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \dots \dots (4.3)$$

Untuk pengolahan data persamaan *Freundlich* dapat dilihat pada Lampiran 4. Pada pemodelan *Freundlich* data diplot dengan $\ln C_e$ sebagai sumbu-x dan $\ln q_e$ sebagai sumbu-y sehingga didapatkan Gambar 4.9 berikut:



Gambar 4.9 Grafik adsorpsi isoterm *Freundlich* pada (a) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,37% (b/b), (b) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,31% (b/b), (c) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,27% (b/b), (d) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,23% (b/b), (e) Konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,21% (b/b), dan (f) Tanpa mikroba

Dari Gambar 4.9, grafik yang dihasilkan adalah grafik yang naik. Selanjutnya dilakukan perhitungan nilai n dan K_f dari persamaan *Freundlich* yang didapat. Dengan $m = \frac{1}{n}$ dan intersep = $\ln K_f$. Dengan menggunakan perhitungan matematis, maka didapat nilai n dan K_f seperti pada Tabel 4.3 berikut:

Tabel 4.3 Nilai konstanta *Freundlich* pada medium karbon aktif

| Variasi Konsentrasi Larutan Nutrisi Sintetik | Persamaan <i>Freundlich</i> | Konstanta <i>Freundlich</i> | |
|--|-----------------------------|-----------------------------|------------------------|
| | | n | K_f (m^3/g) |
| Konsentrasi 0,37% | $y = -11,85 + 0,7042x$ | 1,4201 | $7,1386 \cdot 10^{-6}$ |
| Konsentrasi 0,31% | $y = -8,8786 + 0,36849x$ | 2,7138 | $1,3934 \cdot 10^{-4}$ |
| Konsentrasi 0,27% | $y = -9,2373 + 0,40191x$ | 2,4881 | $9,7340 \cdot 10^{-5}$ |
| Konsentrasi 0,23% | $y = -11,271 + 0,62654x$ | 1,5961 | $1,2737 \cdot 10^{-5}$ |
| Konsentrasi 0,21% | $y = -9,3853 + 0,27374x$ | 3,6531 | $8,3949 \cdot 10^{-5}$ |
| Tanpa Mikroba | $y = 17,189 - 1,9841x$ | -0,5040 | $2,9180 \cdot 10^7$ |

Nilai n di atas menunjukkan kemampuan intensitas adsorpsi dan K_f menunjukkan kapasitas adsorpsi. Nilai K_f pada persamaan *Freundlich* setara dengan nilai K_L pada persamaan *Langmuir* dan nilai n pada persamaan *Freundlich* setara dengan nilai q_m pada persamaan *Langmuir* (Pontificia, 2010).

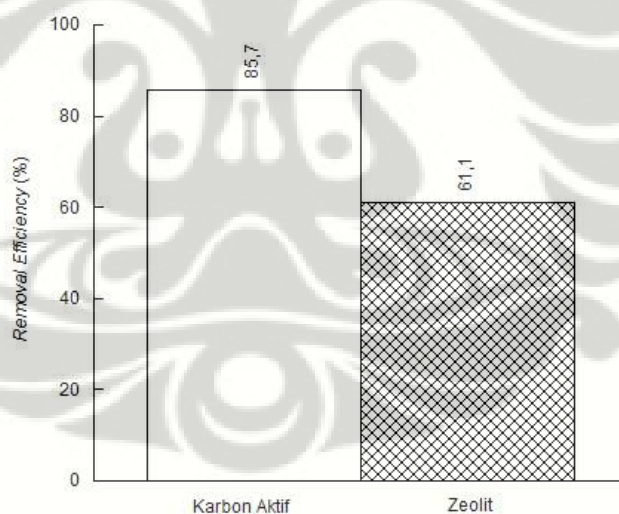
Tabel 4.3 memperlihatkan perbandingan nilai n dan K_f dari berbagai macam variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik dengan biofiltrasi tanpa penambahan mikroba. Semakin tinggi nilai K_f maka semakin tinggi pula kemampuan adsorben dalam mengikat adsorbat (N_2O) (Kai Lin, 2008). Semakin besar nilai n , semakin besar jumlah gas N_2O yang dapat diadsorp. Jika nilai n kurang dari satu, maka proses adsorpsi yang terjadi adalah adsorpsi kimia, sedangkan bila nilai n lebih besar dari satu, maka adsorpsi yang terjadi adalah adsorpsi fisika (J. Q. Jiang, 2002). Semakin besar nilai n , semakin banyak gas N_2O yang teradsorp pada adsorben.

Dari Tabel 4.3 terlihat nilai kapasitas adsorpsi (K_f) untuk biofiltrasi tanpa penambahan mikroba adalah yang paling besar dibandingkan dengan kapasitas adsorpsi biofiltrasi dengan variasi konsentrasi. Hal ini menunjukkan bahwa proses biofiltrasi tanpa penambahan mikroba memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih baik dibandingkan dengan proses biofiltrasi dengan variasi konsentrasi larutan nutrisi sintetik. Kemampuan intensitas adsorpsi (n) yang lebih baik dialami saat

biofiltrasi dengan variasi konsentrasi dibandingkan dengan biofiltrasi tanpa penambahan mikroba. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah gas yang dapat diadsorb lebih banyak ketika dilakukan variasi konsentrasi dibandingkan dengan tanpa penambahan bakteri.

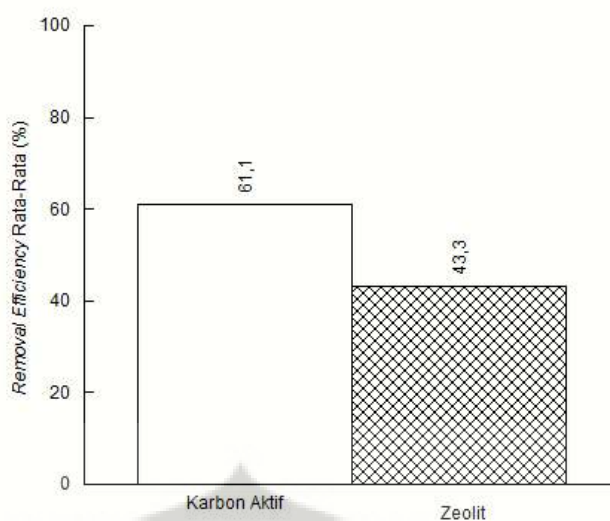
4.3 Perbandingan Hasil Biofiltrasi N₂O dengan Menggunakan Medium Filter Karbon Aktif dan Zeolit

Berdasarkan hasil penelitian biofiltrasi N₂O yang dilakukan selama 24 jam dengan menggunakan medium filter karbon aktif, efisiensi reduksi tertinggi terjadi pada konsentrasi 0,31% dimana efisiensi reduksi yang dihasilkan mencapai 85,68%. Sementara itu, pada penelitian biofiltrasi menggunakan medium filter zeolit yang dilakukan oleh Putri (2012) efisiensi reduksi tertinggi terjadi pada konsentrasi yang sama yaitu 0,31%, namun efisiensi reduksinya lebih rendah yaitu 61,1%. Gambar 4.10 berikut ini menggambarkan perbandingan efisiensi reduksi antara karbon aktif dan zeolit.



Gambar 4.10 Perbandingan efisiensi reduksi antara medium karbon aktif dan zeolit

Sementara itu, untuk efisiensi reduksi rata-rata yang dilakukan selama 24 jam pada medium karbon aktif dan zeolit sama-sama terjadi pada konsentrasi 0,31%. Efisiensi reduksi rata-rata pada medium karbon aktif sebesar 61,1%. Sedangkan efisiensi reduksi rata-rata zeolit sebesar 43,26%. Berikut ini Gambar 4.11 yang mendeskripsikan perbandingan efisiensi reduksi rata-rata karbon aktif dan zeolit.



Gambar 4.11 Perbandingan efisiensi reduksi rata-rata antara medium filter karbon aktif dan zeolit

Dari kedua hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa konsentrasi larutan nutrisi sintetik yang optimum adalah pada konsentrasi 0,31%. Selain itu juga, konsentrasi 0,31% merupakan kondisi yang cocok bagi bakteri untuk bereproduksi dan memperoleh nutrisi. Dari efisiensi reduksi antara karbon aktif dan zeolit terlihat karbon aktif memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih baik. Hal ini sesuai dengan perbedaan luas permukaan keduanya. Dimana luas permukaan karbon aktif adalah $500 \text{ m}^2/\text{gram}$ (Othmer, 1992) sedangkan zeolit hanya sekitar $49,18 \text{ m}^2/\text{gram}$. Hal ini menandakan bahwa karbon aktif memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih baik dibandingkan dengan zeolit.

BAB 5

KESIMPULAN

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

- Efisiensi reduksi optimum pada proses degradasi dinitrogen monoksida oleh *Nitrobacter winogradskyi* dicapai pada konsentrasi larutan nutrisi sintetik 0,31% (b/b), yaitu sebesar 85,58%.
- Hasil perhitungan mikroba dengan metode TPC pada konsentrasi optimum, yaitu 0,31% (b/b) menunjukkan jumlah mikroba yang tetap, yaitu sebelum biofiltrasi sebesar 121×10^{12} sedangkan setelah biofiltrasi sebesar 24×10^{11} .
- Estimasi parameter dengan persamaan adsorpsi *Langmuir* menunjukkan nilai q_m maksimum terjadi pada biofiltrasi tanpa mikroba yaitu 0,3512 g N₂O/g. Sedangkan nilai K_L maksimum terjadi pada variasi konsentrasi 0,21% (b/b) yaitu $7,18 \times 10^{-4}$ m³/g. Sementara itu, untuk estimasi parameter dengan persamaan adsorpsi *Freundlich* menunjukkan nilai n tertinggi terjadi pada variasi konsentrasi 0,21% (b/b) yaitu 3,6531 sedangkan nilai K_f tertinggi terjadi pada biofiltrasi tanpa mikroba sebesar $2,9180 \times 10^7$ m³/g.
- Hasil perbandingan biofiltrasi N₂O dengan medium karbon aktif dan zeolit menunjukkan hasil yang berbeda, namun konsentrasi optimum sama-sama terjadi pada konsentrasi 0,31% (b/b). Efisiensi reduksi karbon aktif mencapai 85,68% sedangkan zeolit mencapai 61,1%. Sedangkan untuk efisiensi reduksi rata-rata selama 24 jam juga sama-sama terjadi pada konsentrasi 0,31% (b/b), namun efisiensi reduksi rata-rata untuk karbon aktif mencapai 61,1% sedangkan zeolit hanya mencapai 43,26%.

DAFTAR PUSTAKA

- Adriaty, Lila. (2009). *Pemanfaatan Kompos sebagai Biofilter untuk Mereduksi Emisi Gas N₂O*. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok.
- Arisantoro. (2010). *Biofiltrasi Gas Dinitrogen Monoksida Menggunakan Pelet Kompos Berbasis Kotoran Kambing sebagai Medium Filter*. Depok: Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Auria R, Morales M, Acuna ME, Perez F, Revah S. (1996). *Biofiltration of Toluene Vapors: Start Up and Gaseous Ammonia Addition*. In: Proc Conf Biofiltration: an Air Pollution Control Technology, pp 134–141.
- Bäumgartner, Manfred and Conrad, Ralf. (1992). *Role of Nitrate and Nitrite for Production and Consumption of Nitric Oxide during Denitrification in Soil*. Federation of European Microbiological Societies. Published by Elsevier.
- Becton dan Dickinson. (2011). *BBL™ Nutrient Broth Quality Control Procedures*. USA: Becton, Dickinson and Company.
- Cahyana, Gede H. *Bioproses Pencemar Udara*. Gede on WWW. (20 November 2011). 10.00 WIB.
- Cameron, Ewan and May, Paul. *A Boost For Fast Cars*. Internet. June 1999
<http://www.chm.bris.ac.uk/motm/n2o/n2oc.htm>
- Chang, P.Y., Edward, D., Schroeder, dan Jianmeng, Chen. (2006). *Carbon Foam-Based NO_x Biofilter. Feasibility Assessment and Final EISG Report for California Energy Commission*. California: Department of Civil dan Environmental Engineering.
- Clark, O. G., Edeogu, J. Feddes, R. N. Coleman, dan A. Abolghasemi. (2004). *Effects of operating temperature and supplemental nutrients in a pilot-scale agricultural biofilter*. Department of Agricultural, Food and Nutritional Science, University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.
- Corsi, R.L., dan Seed, L. (1995). *Biofiltration of BTEX: Media, Substrate and Loadings Effects*. Environmental Progress, 14, 151–158.
- Datta, Indrani dan D. Grant Allen. (2005). *Biotechnology for Odour and Air Pollution Control*. Verlag Berlin Heidelberg : Springer.
- De Chavez and Tauli-Corpus (eds.) (2008). *Guide to climate change*. Retrieved on 26th June, 2009 from www.tebtebba.org
- Deviny, J.S., Deshusses, M.A., dan Webster, T.S. (1999). *Biofiltration for Air Pollution Control*. Lewis Publisher, Boca Raton.
- Deviny, J. S., Webster, T. S. dan Torres, E. M. (1997). *Microbial Ecosystems in Compost and Granular Activated Carbon Biofilters*. Biotechnology and Bioengineering, 53, 296-303.
- Govind, R. (1998). *Biofiltration: An Innovative Technology For The Future*. Cincinnati: University of Cincinnati.
- Govind, R. (1999). *Biotrickling filter*. In: *Resources*. ASAE, 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659, USA.
- Gribbins, M. J., dan Loehr, R. C. (1998). *Effect of media nitrogen concentration on biofilter performance*. The Journal of the Air & Waste Management Association, 48, 216–226.

- Hirai, M., Kamamoto, M., et al. (2001). *Comparison of the Biological H₂S Removal Characteristics Among Four Inorganic Packing Materials*. Journal of Bioscience and Bioengineering, 91(4), 396–402.
- Hodge DS, Medina VF, Islander RL, Devinny JS. (1991). *Treatment of Hydrocarbon Fuel Vapors in Biofilters*. Environ Technol 12:655–662
- HSDB. (1999). *Hazardous Substances Data Bank*. In: MEDICINE, United States National Library of Medicine. (ed.). Bethesda.
- Huiqi Duan, Lawrence C.C. Koe, Rong Yan, Xiaoge Chen. (2006). *Biological Treatment of H₂S Using Pellet Activated Carbon As a Carrier of Microorganism In a Biofilter*. Water Research 40. Singapore.
- Institut for Fermentation Osaka (IFO). (2000). *List of Cultures Microorganism 11th Edition*.
- IPCC, (2001). *Climate change 2001 : Impacts, adaption and vulnerability*. Report of the working group I. Cambridge University Press. UK, p,967.
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory*. IGES, Japan.
- Janni, K. A., Maier, W. J., Kuehn, T. H., Yang, C.-H., Bridges, B. B., Velsey, D., dan Nellis, M. A. (2001). *Evaluation of biotration of air—an innovative air pollution control technology*. ASHRAE Transactions, 107, 198–214.
- Jiang, R., S. Huang, J. Yang. (2007). *Biological Removal of NO_x from Simulated Flue Gas in Aerobic Biofilter*, 241-248.
- Jorio H., Bibeau L., Viel G., Heitz M. (2000). *Effects of Gas Flow Rate and Inlet Concentration on Xylene Vapors Biofiltration Performance*. Chemical Enginnering Journal (76) 209-221.
- 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., dan Thalasso F. (1998). *Waste Gas Biotreatment Technology*. J. Chem. Technol. Biotechnol, 72, 303-319.
- Khammar, N., Luc Malhautier, Valerie Degrange, Robert Lensi, Jean-Louis Fanlo. (2003). *Evaluation of Dispersion Methods for Enumeration of Microorganisms from Peat and Activated Carbon Biofilters Treating Volatile Organic Compounds*, pp 243-254.
- Kumar, Prabhat., Rahul, Mathur Anil Kumar, dan Balomajumder Chandrajit. (2011). *Biofiltration of Volatile Organic Compound (VOCs)-An Overview*. Research Journal of Chemical Sciences Vol. 1(8), 83-92, Nov. (2011)
- La Pagans, Estel, Xavier Font, Antoni Sánchez. (2005). *Biofiltration for Ammonia Removal from Composting Exhaust Gases*. Chemical Engineering Journal 113 (2005)105 – 110. 1 Maret 2005.
- Leson, G., dan 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*. Depok: Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Manik, S. (2005). *Penghilangan Gas SO₂ dengan Teknik Biofiltrasi Menggunakan Thiobacillus sp. Dengan Media Kompos, Tanah dan Serbuk Gergaji*. Bogor: Fakultas Teknik Teknologi Pertanian Institut Pertanian Bogor.

- Madigan M.T, Martinko, J.M., dan Parker, J. (2000). *Biology of Microorganisms*. Ninth edition. Prentice Hall Internasional, Inc, Hal. 601-603.
- Mallakin, A., dan OP Ward. (1996). *Degradation of BTEX compounds in Liquid Media and in Peat Biofilters*. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology. Volume 16, Number 5 (1996), 309-318.
- Maulidyasti, E. (2008). *Peningkatan Proses Degradasi Hidrogen Sulfida dalam Biofilter Menggunakan Zeolit Alam Lampung yang Diinokulasi oleh Thiobacillus Thioparus*. Depok: Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Mayumdar, D., Kumar, S., Kumar, U. (2000). *Reducing nitrous oxide emission from an irrigated rice field of North India with nitrification inhibitors*. Agriculture, Ecosystems and Environment. 81(3). 163-169.
- McNevin, D dan John Barford. (2000). *Biofiltration as an Odour Abatement Strategy*. Elsevier Science.
- Minardi. (2011). *Pengelolaan Lahan Pertanian dan Emisi Gas Rumah Kaca*. Jurusan Ilmu Tanah/Agroteknologi Fakultas Pertanian. Solo: UNS.
- Morgan Sagastume, F., Sleep, B. E., dan Allen, D. G. (2001). *Effects of Biomass Growth on Gas Pressure Drop in Bioreactors*. Journal of Environmental Engineering-ASCE, 127, 388–396.
- Myrold, D. D. (1999). *Transformation of Nitrogen*. In: *Principles and Application of Soil Microbiology*. Sylvia, DM; Jeffry, JF; Peter, GH and David AZ (eds.) Prentice hall, New Jersey. 259-294.
- Noviani, Cynthia. (2009). *Reduksi Gas Dinitrogen Monoksida melalui Biofiltrasi dengan Menggunakan Material Kompos Termodifikasi*. Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI, Depok.
- Ondarts, M., Cecile Hort, Vincent Platel, Sabine Sochard. (2010). *Indoor Air Purification by Compost Packed Biofilter*. Berkeley Electronic Press. All rights reserved.
- Othmer, Kirk. (1992). *Encyclopedia of Chemical Technology*, 4th edition. New York: John Wiley & Sons
- Ottengraf, S. P. P., Meesters, J. J. P., Van den Oever, A. H. C., dan Rezema, H. R. (1986). *Biological Elimination of Volatile Xenobiotic Compounds in Biofilters*. Bioprocess Engineering, 1, 61–69.
- Pandey, A. (2004). *Concise Encyclopedia of Bioresource Technology*. The Haworth Press Inc., New York.
- Pontificia. (2010). *Effects of biosorption parameter: kinetics, isotherm and thermodynamics for Ni(II) biosorption from aqueous solution by Circinella sp.* Electronic Journal of Biotechnology, Vol.13, No.5.
- Prabowo, Aditya. L. (2009). *Pembuatan Karbon Aktif dari Tongkol Jagung serta Aplikasinya untuk Adsorpsi Cu, Pb dan Amonia*. Depok: Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Prosser, JI. (1989). *Autotrophic Nitrification in Bacteria*. Adv. Microb. Physiol. 30:125–181.
- Rachman, Arief. (2009). *Karbon Aktif dari Tongkol Jagung dan Aplikasinya dalam Pemisahan Campuran Etanol dan Air*. Depok: Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI.

- Ravichandra, Potumarthi, dan Gangangi, A. (2009). *Degradation in the biofilter Hydrogen Sulfide: Evaluation of New Materials by immobilizing filter Thiobacillus sp.* International Journal of Chemical Reactor Engineering Research ISSN 1542-6580 Volume 7, Article A17.
- Sagala, Jannati. (2011). *Optimalisasi Bahan Pengikat pada Medium Pelet Kompos dalam Biosopsi Gas Dinitrogen Monoksida.* Depok: Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Sanjaya, Erica. (2010). *Studi Fenomena Adsorpsi pada Kompos Kambing sebagai Medium Biofilter.* Depok: Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Sembiring, M., dan Sinaga, T. (2003). *Arang Aktif.* Sumatera Utara. Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara.
- Sheridan, B.A., T.P. Curran, dan V.A. Dodd. (2002). *Assessment of The Influence of Media Particle Size on the Biofiltration of Odorous Exhaust Ventilation Air from a Piggery Facility.* Bioresour. Technol, Vol.84, pp 129–143.
- Shuler ML, Kargi F. (1992). *Bioprocess engineering–basic concepts.* Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- Simanjuntak, Josia. (2008). *Reduksi Gas Dinitrogen Monoksida dengan Menggunakan Pupuk Kompos sebagai Biofilter.* Depok: Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Sinaga, Yusmalia. R. (2011). *Pengaruh Zat Pengikat pada Pelet Kompos sebagai Medium Biofilter dalam Proses Reduksi Gas Dinitrogen Monoksida.* Depok: Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Soeprijanto, Bambang Aryanto dan Ryan Fabella. (2010). *Biosorpsi Ion Logam Berat Cu(II) dalam Larutan Menggunakan Biomassa Phanerochaete chrysosporium.* Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya.
- Starkenbug, Shawn R., Patrick S. G. Chain, Luis A, Larimer, Stephanie A. Malfatti, Martin G. Klotz, Peter J. Sayavedra-Soto, Loren Hauser, Miriam L. Land, Frank W. Bottomley, Daniel J. Arp dan William J. Hickey. (2006). *Genome Sequence of the Chemolithoautotrophic Nitrite-Oxidizing Bacterium Nitrobacter winogradskyi Nb-255.* American Society for Microbiology. Vol. 72, No. 3.
- Strauss, J. M., Riedel, K. J., dan du Plessis ,C. (2003). *Mesophilic and Thermophilic BTEX Substrate Interactions for a Toluene-acclimatized Biofilter.* Springer-Verlag Appl Microbiol Biotechnol 64: 855–861.
- Sudirjo, Emilius. (2006). *Penentuan Distribusi Benzena-Toluena pada Kolom Adsorpsi Fixed-Bed Karbon Aktif.* Depok: Laporan Skripsi Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Suzuki, M. (1990). *Adsorption Engineering,* Amsterdam: Elsevier.
- Swantomo, D., Noor Anis Kundari, dan Satriawan Luhur Pambudi. (2009). *Adsorpsi Fenol dalam Limbah dengan Zeolit Alam Terkalsinasi.* Yogyakarta: Seminar Nasional V SDM Teknologi Nuklir.
- Taghipour, H., M. R. Shahmansour, B. Bina dan H. Movahdian. (2006). *Comparison of The Biological NH₃ Removal Characteristics of a Three Stage Biofilter with a One Stage Biofilter.* Int. J. Environ. Sci. Tech., 3 (4): 417-424.

- Utami et al. (2009). *Pengaruh parameter operasi dalam proses biofiltrasi N₂O dengan medium filter berbasis kompos*. Makalah dipresentasikan pada Proceeding Seminar Tjipto Utomo 2009, Kampus ITENAS Bandung.
- Utami, Tania S., Cynthia Noviani, Heri Hermansyah, dan M. Nasikin. (2010). *Pengaruh Laju Alir dan Kedalaman Medium pada Proses Biofiltrasi Dinitrogen Monoksida dengan Medium Kompos Berbasis Kotoran Sapi*. Seminar Rekayasa Kimia dan Proses, Jurusan Teknik Kimia Universitas Diponegoro.
- Watson, S. W., F. W. Valos, and Waterbury, J.B. (1981). *The Family Nitrobacteraceae. In The Prokaryotes*. M.P. Starr dkk. Berlin: Springer-Verlag.
- Wihardjaka, A. (2004). *Mewaspadaai Emisi Gas Nitro-Oksida dari Lahan Persawahan*. Artikel dikirimkan pada Loka Penelitian Pencemaran Lingkungan Pertanian.
- Yang, Y, Allen ER. (1994). *Biofiltration Control of Hydrogen Sulphide. 1. Design and Operational Parameters*. J Air Waste Manage Assoc, Vol. 44, pp 863–868.
- Yang, Wan Fa, Hsing Hao Jan, Yang Yu Chiung, and Shyng Jhieh Yu. (2007). *The Effects of Selected Parameters on The Nitric Oxide Removal by Biofilter*. Taiwan: Journal of Hazardous Materials.

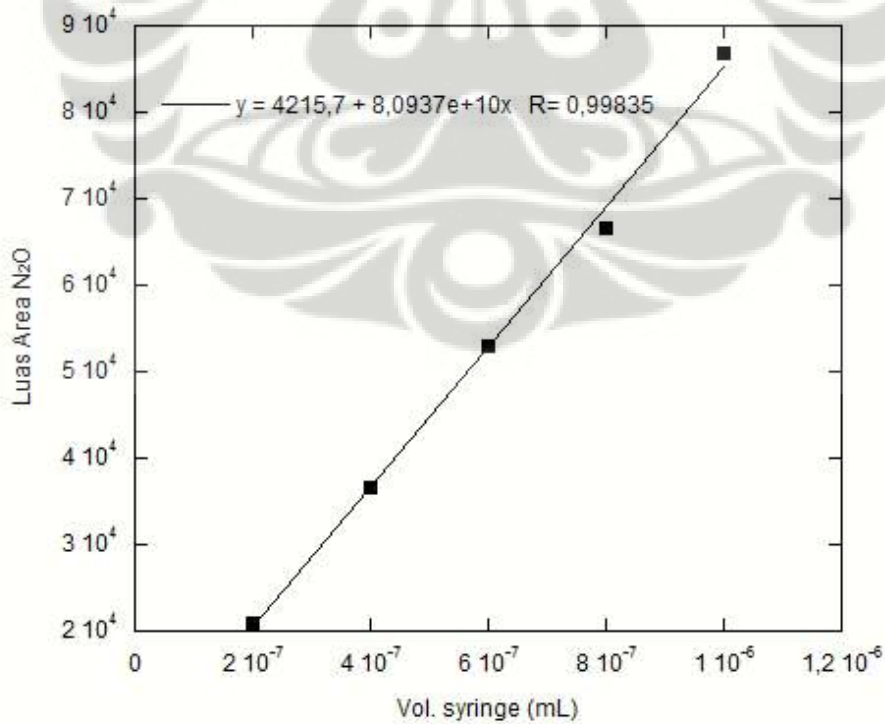


LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Hasil Kalibrasi Gas N₂O

| Volume (mL) | Volume dalam Syringe (mL) | Waktu Retensi | Luas Peak N ₂ O | Konsentrasi Gas N ₂ O (g/m ³) |
|-------------|---------------------------|---------------|----------------------------|--|
| 0,2 | $2 \cdot 10^{-7}$ | 2,55 | 20850 | 1,4582 |
| 0,4 | $4 \cdot 10^{-7}$ | 2,547 | 36683 | 1,329 |
| 0,6 | $6 \cdot 10^{-7}$ | 2,525 | 52928 | 1,266 |
| 0,8 | $8 \cdot 10^{-7}$ | 2,538 | 66598 | 1,2351 |
| 1 | 0,000001 | 2,527 | 86829 | 1,2851 |

Plot grafik volume gas syringe (sebagai-x) dan luas area N₂O (sebagai-y) dari data di atas menghasilkan persamaan kalibrasi $y = 4215,7 + 8,0937 \cdot 10^{10}x$. Hasil kalibrasi volume gas N₂O dapat digunakan dalam penelitian biofiltrasi selanjutnya untuk mengetahui volume dan konsentrasi gas N₂O aktual. Berikut ini kurva kalibrasi yang dihasilkan:



Lampiran 2. Data Hasil Biofiltrasi N₂O oleh Karbon Aktif Tanpa Mikroba

Langkah perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O:

- Menghitung volume N₂O hasil biofiltrasi dari persamaan kalibrasi.
- Menghitung massa N₂O dengan massa jenis N₂O = 1812 g/mL.
- Menghitung konsentrasi N₂O.
- Menghitung RE (*Removal Efficiency*) dengan persamaan:

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

| Waktu (Jam) | T _{Medium} (°C) | H (%) | T _{Retensi} | Konsentrasi | Luas Area | Volume N ₂ O (m ³) | Massa N ₂ O (g) | Konsentrasi N ₂ O (g/m ³) | RE (%) |
|-------------|--------------------------|-------|----------------------|-------------|-----------|---|----------------------------|--|--------|
| 0 | 27,2 | 54 | 2,658 | 1,524 | 112848 | 1,36E-06 | 0,0024605 | 2460,537 | 0,00 |
| 1 | 28,3 | 44 | 2,657 | 0,101 | 7209 | 3,74E-08 | 6,78E-05 | 67,81 | 93,37 |
| 2 | 28,4 | 43 | 2,665 | 0,4035 | 29042 | 3,10E-07 | 0,0005623 | 562,33 | 73,52 |
| 3 | 28,6 | 44 | 2,675 | 1,0936 | 75349 | 8,89E-07 | 0,0016112 | 1611,19 | 28,24 |
| 4 | 28,8 | 43 | 2,68 | 1,2635 | 92946 | 1,11E-06 | 0,0020098 | 2009,76 | 17,09 |
| 5 | 29,9 | 51 | 2,655 | 1,0744 | 77416 | 9,15E-07 | 0,001658 | 1658 | 29,5 |
| 6 | 30,3 | 51 | 2,687 | 1,0167 | 73995 | 8,72E-07 | 0,0015805 | 1580,52 | 33,29 |
| 23 | 27,2 | 44 | 2,717 | 0,9654 | 72256 | 8,51E-07 | 0,0015411 | 1541,13 | 36,65 |
| 24 | 26,9 | 47 | 2,617 | 1,0939 | 75135 | 8,87E-07 | 0,0016063 | 1606,34 | 28,22 |

Lampiran 3. Data Hasil Uji Variasi Konsentrasi Larutan Nutrisi Sintetik

Langkah perhitungan kinerja biofilter dalam mereduksi N₂O:

- Menghitung volume N₂O hasil biofiltrasi dari persamaan kalibrasi.
- Menghitung massa N₂O dengan massa jenis N₂O = 1812 g/mL.
- Menghitung konsentrasi N₂O.
- Menghitung RE (*Removal Efficiency*) dengan persamaan:

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

a. Hasil Uji Variasi Konsentrasi 0,37%

| Waktu (Jam) | T _{Medium} (°C) | H (%) | T _{Retensi} | Konsentrasi | Luas Area | Volume N ₂ O (m ³) | Massa N ₂ O (g) | Konsentrasi N ₂ O (g/m ³) | RE (%) |
|----------------------|--------------------------|-------|----------------------|-------------|-----------|---|----------------------------|--|--------------|
| 0 | 28,2 | 61 | 2,612 | 1,0978 | 78666 | 9,30638E-07 | 0,001686315 | 1686,3152 | 0,00 |
| 1 | 29,6 | 55 | 2,778 | 0,9007 | 72726 | 8,56388E-07 | 0,001551774 | 1551,774 | 7,98 |
| 2 | 29,7 | 52 | 2,768 | 0,8827 | 72095 | 8,485E-07 | 0,001537482 | 1537,482 | 8,83 |
| 3 | 30,4 | 52 | 2,775 | 0,8811 | 71237 | 8,37775E-07 | 0,001518048 | 1518,048 | 9,98 |
| 4 | 30,6 | 53 | 2,553 | 0,6798 | 53480 | 6,15813E-07 | 0,001115852 | 1115,852 | 33,83 |
| 5 | 30,8 | 51 | 2,667 | 0,6616 | 44169 | 4,99425E-07 | 0,000904958 | 904,958 | 46,34 |
| 6 | 30,6 | 51 | 2,670 | 0,4653 | 33164 | 3,61863E-07 | 0,000655695 | 655,695 | 61,12 |
| 23 | 29,3 | 55 | 2,660 | 0,3921 | 30994 | 3,34738E-07 | 0,000606544 | 606,544 | 64,03 |
| 24 | 29,8 | 53 | 2,700 | 0,3363 | 26169 | 2,74425E-07 | 0,000497258 | 497,258 | 70,51 |
| %RE Rata-Rata | | | | | | | | | 37,83 |

b. Hasil Uji Variasi Konsentrasi 0,31%

| Waktu (Jam) | T _{Medium} (°C) | H (%) | T _{Retensi} | Konsentrasi | Luas Area | Volume N ₂ O (m ³) | Massa N ₂ O (g) | Konsentrasi N ₂ O (g/m ³) | RE (%) |
|----------------------|--------------------------|-------|----------------------|-------------|-----------|---|----------------------------|--|--------------|
| 0 | 29,1 | 57 | 2,572 | 1,5716 | 114523 | 1,37885E-06 | 0,002498476 | 2498,476 | 0,00 |
| 1 | 29,8 | 66 | 2,410 | 0,9977 | 71410 | 8,39938E-07 | 0,001521967 | 1521,967 | 39,08 |
| 2 | 31,1 | 50 | 2,785 | 0,8807 | 71339 | 8,3905E-07 | 0,001520359 | 1520,359 | 39,15 |
| 3 | 31,1 | 51 | 2,755 | 0,8816 | 71860 | 8,45563E-07 | 0,001532159 | 1532,159 | 38,68 |
| 4 | 31 | 51 | 2,688 | 0,6254 | 44224 | 5,00113E-07 | 0,000906204 | 906,204 | 63,73 |
| 5 | 31,1 | 52 | 2,650 | 0,5147 | 39956 | 4,46763E-07 | 0,000809534 | 809,534 | 67,60 |
| 6 | 30,9 | 53 | 2,663 | 0,4697 | 33366 | 3,64388E-07 | 0,00066027 | 660,270 | 73,57 |
| 23 | 29,2 | 58 | 2,503 | 0,3562 | 25102 | 2,61088E-07 | 0,000473091 | 473,091 | 81,06 |
| 24 | 30,6 | 53 | 2,728 | 0,2818 | 20016 | 1,97513E-07 | 0,000357893 | 357,893 | 85,68 |
| %RE Rata-Rata | | | | | | | | | 61,07 |

c. Hasil Uji Variasi Konsentrasi 0,27%

| Waktu (Jam) | T _{Medium} (°C) | H (%) | T _{Retensi} | Konsentrasi | Luas Area | Volume N ₂ O (m ³) | Massa N ₂ O (g) | Konsentrasi N ₂ O (g/m ³) | RE (%) |
|-----------------------|--------------------------|-------|----------------------|-------------|-----------|---|----------------------------|--|--------------|
| 0 | 25,9 | 58 | 2,587 | 1,586 | 111035 | 1,34E-06 | 0,002419473 | 2419,473 | 0,00 |
| 1 | 27,8 | 61 | 2,745 | 1,0767 | 86385 | 1,02713E-06 | 0,001861151 | 1861,151 | 23,08 |
| 2 | 29,5 | 58 | 2,820 | 0,9134 | 75625 | 8,92625E-07 | 0,001617437 | 1617,437 | 33,15 |
| 3 | 29,8 | 53 | 2,682 | 0,7642 | 55516 | 6,41263E-07 | 0,001161968 | 1161,968 | 51,97 |
| 4 | 29,9 | 49 | 2,620 | 0,7336 | 50464 | 5,78113E-07 | 0,00104754 | 1047,540 | 56,70 |
| 5 | 29,5 | 50 | 2,597 | 0,6654 | 47200 | 5,37313E-07 | 0,00097361 | 973,610 | 59,76 |
| 6 | 29,3 | 51 | 2,832 | 0,5763 | 48894 | 5,58488E-07 | 0,001011979 | 1011,979 | 58,17 |
| 23 | 27,7 | 56 | 2,723 | 0,4753 | 38549 | 4,29175E-07 | 0,000777665 | 777,665 | 67,86 |
| 24 | 28,3 | 53 | 2,653 | 0,3183 | 22519 | 2,288E-07 | 0,000414586 | 414,586 | 82,86 |
| % RE Rata-Rata | | | | | | | | | 54,19 |

d. Hasil Uji Variasi Konsentrasi 0,23%

| Waktu (Jam) | T _{Medium} (°C) | H (%) | T _{Retensi} | Konsentrasi | Luas Area | Volume N ₂ O (m ³) | Massa N ₂ O (g) | Konsentrasi N ₂ O (g/m ³) | RE (%) |
|-----------------------|--------------------------|-------|----------------------|-------------|-----------|---|----------------------------|--|--------------|
| 0 | 27,5 | 64 | 2,633 | 1,5822 | 116118 | 1,39879E-06 | 0,002534603 | 2534,603 | 0,00 |
| 1 | 28,4 | 66 | 2,588 | 0,6845 | 68851 | 8,0795E-07 | 0,001464005 | 1464,005 | 42,24 |
| 2 | 30,7 | 64 | 2,522 | 1,0762 | 95855 | 1,1455E-06 | 0,002075646 | 2075,646 | 18,11 |
| 3 | 31,6 | 58 | 2,803 | 0,9977 | 79236 | 9,37763E-07 | 0,001699226 | 1699,226 | 32,96 |
| 4 | 32 | 56 | 2,593 | 0,7438 | 107232 | 1,28771E-06 | 0,002333335 | 2333,335 | 7,94 |
| 5 | 33,1 | 54 | 2,652 | 0,5934 | 44673 | 5,05725E-07 | 0,000916374 | 916,374 | 63,85 |
| 6 | 32,6 | 52 | 2,673 | 0,4344 | 39546 | 4,41638E-07 | 0,000800247 | 800,247 | 68,43 |
| 23 | 29,4 | 61 | 2,667 | 0,3976 | 27576 | 2,92013E-07 | 0,000529127 | 529,127 | 79,12 |
| 24 | 29,9 | 55 | 2,660 | 0,3477 | 31687 | 3,434E-07 | 0,000622241 | 622,241 | 75,45 |
| % RE Rata-Rata | | | | | | | | | 48,51 |

e. Hasil Uji Variasi Konsentrasi 0,21%

| Waktu (Jam) | T _{Medium} (°C) | H (%) | T _{Retensi} | Konsentrasi | Luas Area | Volume N ₂ O (m ³) | Massa N ₂ O (g) | Konsentrasi N ₂ O (g/m ³) | RE (%) |
|----------------------|--------------------------|-------|----------------------|-------------|-----------|---|----------------------------|--|--------------|
| 0 | 27,4 | 56 | 2,565 | 1,5808 | 110308 | 1,32616E-06 | 0,002403006 | 2403,006 | 0,00 |
| 1 | 28,6 | 49 | 2,572 | 1,3425 | 91402 | 1,08984E-06 | 0,001974786 | 1974,786 | 17,82 |
| 2 | 28,7 | 48 | 2,568 | 1,4795 | 102324 | 1,22636E-06 | 0,002222169 | 2222,169 | 7,53 |
| 3 | 28,8 | 48 | 2,567 | 1,4502 | 102471 | 1,2282E-06 | 0,002225498 | 2225,498 | 7,39 |
| 4 | 28,5 | 47 | 2,637 | 1,3829 | 105486 | 1,26589E-06 | 0,002293788 | 2293,788 | 4,55 |
| 5 | 27,9 | 46 | 2,577 | 1,1719 | 81418 | 9,65038E-07 | 0,001748648 | 1748,648 | 27,23 |
| 6 | 28 | 44 | 2,627 | 1,291 | 97530 | 1,16644E-06 | 0,002113585 | 2113,585 | 12,04 |
| 23 | 26,6 | 53 | 2,567 | 1,4238 | 99753 | 1,19423E-06 | 0,002163936 | 2163,936 | 9,95 |
| 24 | 27,3 | 53 | 2,573 | 1,3123 | 91136 | 1,08651E-06 | 0,001968761 | 1968,761 | 18,07 |
| %RE Rata-Rata | | | | | | | | | 13,07 |

f. Hasil Uji Tanpa Mikroba

| Waktu (Jam) | T _{Medium} (°C) | H (%) | T _{Retensi} | Konsentrasi | Luas Area | Volume N ₂ O (m ³) | Massa N ₂ O (g) | Konsentrasi N ₂ O (g/m ³) | RE (%) |
|----------------------|--------------------------|-------|----------------------|-------------|-----------|---|----------------------------|--|--------------|
| 0 | 28,3 | 44 | 2,658 | 1,524 | 112848 | 1,35791E-06 | 0,002460537 | 2460,537 | 0,00 |
| 1 | 28,3 | 44 | 2,670 | 0,2039 | 14824 | 1,32613E-07 | 0,000240294 | 240,294 | 90,23 |
| 2 | 28,4 | 43 | 2,655 | 0,4035 | 29042 | 3,10338E-07 | 0,000562332 | 562,332 | 77,15 |
| 3 | 28,6 | 44 | 2,675 | 1,0936 | 75349 | 8,89175E-07 | 0,001611185 | 1611,185 | 34,52 |
| 4 | 28,8 | 43 | 2,680 | 1,2635 | 92946 | 1,10914E-06 | 0,002009757 | 2009,757 | 18,32 |
| 5 | 29,9 | 51 | 2,655 | 1,0744 | 77416 | 9,15013E-07 | 0,001658003 | 1658,003 | 32,62 |
| 6 | 30,3 | 51 | 2,690 | 1,4647 | 106889 | 1,28343E-06 | 0,002325566 | 2325,566 | 5,49 |
| 23 | 27,2 | 44 | 2,612 | 1,4294 | 98839 | 1,1828E-06 | 0,002143234 | 2143,234 | 12,90 |
| 24 | 26,9 | 47 | 2,613 | 1,4566 | 98188 | 1,17466E-06 | 0,002128488 | 2128,488 | 13,49 |
| %RE Rata-Rata | | | | | | | | | 35,59 |

Lampiran 4. Pengolahan Data Pemodelan Adsorpsi Isotermis

Volume Karbon Aktif = 0,00424 m³

Massa Karbon Aktif = 2000 gram

a. Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi Konsentrasi 0,37%

| Waktu (jam) | Luas Area | Volume (m ³) | Massa (gram) | Konsentrasi (g/m ³) | RE (%) | Pemodelan Langmuir | | | Pemodelan Freundlich | |
|-------------|-----------|--------------------------|--------------|---------------------------------|--------|--------------------|------------------------|----------------------------|----------------------|--------|
| | | | | | | qe (g/kg) | Ce (g/m ³) | Ce/qe (kg/m ³) | ln Ce | ln qe |
| 0 | 78666 | 9,306E-07 | 0,0016900 | 1686,315 | 0 | | | | | |
| 1 | 72726 | 8,564E-07 | 0,0015500 | 1551,774 | 7,98 | 0,000285 | 134,541 | 471612,884 | 4,902 | -8,162 |
| 2 | 72095 | 8,485E-07 | 0,0015400 | 1537,482 | 8,83 | 0,000316 | 283,374 | 897937,724 | 5,647 | -8,061 |
| 3 | 71237 | 8,378E-07 | 0,0015200 | 1518,048 | 9,98 | 0,000357 | 451,641 | 1265844,784 | 6,113 | -7,938 |
| 4 | 53480 | 6,158E-07 | 0,0011200 | 1115,852 | 33,83 | 0,001210 | 1022,104 | 844993,369 | 6,930 | -6,717 |
| 5 | 44169 | 4,994E-07 | 0,0009000 | 904,958 | 46,34 | 0,001657 | 1803,461 | 1088536,181 | 7,497 | -6,403 |
| 6 | 33164 | 3,619E-07 | 0,0006600 | 655,695 | 61,12 | 0,002185 | 2834,081 | 1296878,424 | 7,949 | -6,126 |
| 23 | 30994 | 3,347E-07 | 0,0006100 | 606,544 | 64,03 | 0,002290 | 3913,852 | 1709458,203 | 8,272 | -6,079 |
| 24 | 26169 | 2,744E-07 | 0,0005000 | 497,258 | 70,51 | 0,002521 | 5102,909 | 2023954,759 | 8,538 | -5,983 |

b. Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi Konsentrasi 0,31%

| Waktu (jam) | Luas Area | Volume (m ³) | Masa (gram) | Konsentrasi (g/m ³) | RE (%) | Pemodelan Langmuir | | | Pemodelan Freundlich | |
|-------------|-----------|--------------------------|-------------|---------------------------------|--------|--------------------|------------------------|----------------------------|----------------------|--------|
| | | | | | | qe (g/kg) | Ce (g/m ³) | Ce/qe (kg/m ³) | ln Ce | ln qe |
| 0 | 114523 | 1,379E-06 | 0,0024985 | 2498,476 | | | | | | |
| 1 | 71410 | 8,399E-07 | 0,0015220 | 1521,967 | 39,08 | 0,002071 | 976,509 | 471612,884 | 6,884 | -6,180 |
| 2 | 71339 | 8,391E-07 | 0,0015204 | 1520,359 | 39,15 | 0,002074 | 1954,627 | 942450,376 | 7,578 | -6,178 |
| 3 | 71860 | 8,456E-07 | 0,0015322 | 1532,159 | 38,68 | 0,002049 | 2920,944 | 1425572,451 | 7,980 | -6,190 |
| 4 | 44224 | 5,001E-07 | 0,0009062 | 906,204 | 63,73 | 0,003376 | 4513,216 | 1336763,134 | 8,415 | -5,691 |
| 5 | 39956 | 4,468E-07 | 0,0008095 | 809,534 | 67,60 | 0,003581 | 6202,159 | 1731863,552 | 8,733 | -5,632 |
| 6 | 33366 | 3,644E-07 | 0,0006603 | 660,270 | 73,57 | 0,003898 | 8040,365 | 2062848,014 | 8,992 | -5,547 |
| 23 | 25102 | 2,611E-07 | 0,0004731 | 473,091 | 81,06 | 0,004295 | 10065,751 | 2343819,147 | 9,217 | -5,450 |
| 24 | 20016 | 1,975E-07 | 0,0003579 | 357,893 | 85,68 | 0,004539 | 12206,334 | 2689296,779 | 9,410 | -5,395 |

c. Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi Konsentrasi 0,27%

| Waktu (jam) | Luas Area | Volume (m ³) | Masa (gram) | Konsentrasi (g/m ³) | RE (%) | Pemodelan Langmuir | | | Pemodelan Freundlich | |
|-------------|-----------|--------------------------|-------------|---------------------------------|--------|--------------------|------------------------|----------------------------|----------------------|--------|
| | | | | | | qe (g/kg) | Ce (g/m ³) | Ce/qe (kg/m ³) | ln Ce | ln qe |
| 0 | 111035 | 1,335E-06 | 0,0024195 | 2419,473 | | | | | | |
| 1 | 86385 | 1,027E-06 | 0,0018612 | 1861,151 | 23,08 | 0,001184 | 558,323 | 471612,884 | 6,325 | -6,739 |
| 2 | 75625 | 8,926E-07 | 0,0016174 | 1617,437 | 33,15 | 0,001701 | 1360,359 | 799917,249 | 7,216 | -6,377 |
| 3 | 55516 | 6,413E-07 | 0,0011620 | 1161,968 | 51,97 | 0,002666 | 2617,864 | 981799,843 | 7,870 | -5,927 |
| 4 | 50464 | 5,781E-07 | 0,0010475 | 1047,540 | 56,70 | 0,002909 | 3989,798 | 1371524,483 | 8,291 | -5,840 |
| 5 | 47200 | 5,373E-07 | 0,0009736 | 973,610 | 59,76 | 0,003066 | 5435,660 | 1773008,818 | 8,601 | -5,787 |
| 6 | 48894 | 5,585E-07 | 0,0010120 | 1011,979 | 58,17 | 0,002984 | 6843,154 | 2292954,959 | 8,831 | -5,814 |
| 23 | 38549 | 4,292E-07 | 0,0007777 | 777,665 | 67,86 | 0,003481 | 8484,962 | 2437323,698 | 9,046 | -5,660 |
| 24 | 22519 | 2,288E-07 | 0,0004146 | 414,586 | 82,86 | 0,004251 | 10489,849 | 2467544,078 | 9,258 | -5,461 |

d. Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi Konsentrasi 0,23%

| Waktu (jam) | Luas Area | Volume (m ³) | Masa (gram) | Konsentrasi (g/m ³) | RE (%) | Pemodelan Langmuir | | | Pemodelan Freundlich | |
|-------------|-----------|--------------------------|-------------|---------------------------------|--------|--------------------|------------------------|----------------------------|----------------------|--------|
| | | | | | | qe (g/kg) | Ce (g/m ³) | Ce/qe (kg/m ³) | ln Ce | ln qe |
| 0 | 116118 | 1,399E-06 | 0,0025346 | 2534,603 | | | | | | |
| 1 | 68851 | 8,080E-07 | 0,0014640 | 1464,005 | 42,24 | 0,002270 | 1070,598 | 471612,884 | 6,976 | -6,088 |
| 2 | 95855 | 1,146E-06 | 0,0020756 | 2075,646 | 18,11 | 0,000973 | 1529,555 | 1571732,618 | 7,333 | -6,935 |
| 3 | 79236 | 9,378E-07 | 0,0016992 | 1699,226 | 32,96 | 0,001771 | 2364,932 | 1335124,028 | 7,769 | -6,336 |
| 4 | 107232 | 1,288E-06 | 0,0023333 | 2333,335 | 7,94 | 0,000427 | 2566,200 | 6013143,877 | 7,850 | -7,759 |
| 5 | 44673 | 5,057E-07 | 0,0009164 | 916,374 | 63,85 | 0,003431 | 4184,429 | 1219500,020 | 8,339 | -5,675 |
| 6 | 39546 | 4,416E-07 | 0,0008002 | 800,247 | 68,43 | 0,003677 | 5918,785 | 1609459,341 | 8,686 | -5,606 |
| 23 | 27576 | 2,920E-07 | 0,0005291 | 529,127 | 79,12 | 0,004252 | 7924,261 | 1863489,289 | 8,978 | -5,460 |
| 24 | 31687 | 3,434E-07 | 0,0006222 | 622,241 | 75,45 | 0,004055 | 9836,623 | 2425836,671 | 9,194 | -5,508 |

e. Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi Konsentrasi 0,21%

| Waktu (jam) | Luas Area | Volume (m ³) | Masa (gram) | Konsentrasi (g/m ³) | RE (%) | Pemodelan Langmuir | | | Pemodelan Freundlich | |
|-------------|-----------|--------------------------|-------------|---------------------------------|--------|--------------------|------------------------|----------------------------|----------------------|--------|
| | | | | | | qe (g/kg) | Ce (g/m ³) | Ce/qe (kg/m ³) | ln Ce | ln qe |
| 0 | 110308 | 1,326E-06 | 0,0024030 | 2403,006 | | | | | | |
| 1 | 91402 | 1,090E-06 | 0,0019748 | 1974,786 | 17,82 | 0,000908 | 428,221 | 471612,884 | 6,060 | -7,004 |
| 2 | 102324 | 1,226E-06 | 0,0022222 | 2222,169 | 7,53 | 0,000383 | 609,059 | 1588385,576 | 6,412 | -7,866 |
| 3 | 102471 | 1,228E-06 | 0,0022255 | 2225,498 | 7,39 | 0,000376 | 786,567 | 2089792,090 | 6,668 | -7,885 |
| 4 | 105486 | 1,266E-06 | 0,0022938 | 2293,788 | 4,55 | 0,000232 | 895,785 | 3868066,764 | 6,798 | -8,371 |
| 5 | 81418 | 9,650E-07 | 0,0017486 | 1748,648 | 27,23 | 0,001387 | 1550,143 | 1117227,904 | 7,346 | -6,580 |
| 6 | 97530 | 1,166E-06 | 0,0021136 | 2113,585 | 12,04 | 0,000614 | 1839,565 | 2997572,669 | 7,517 | -7,396 |
| 23 | 99753 | 1,194E-06 | 0,0021639 | 2163,936 | 9,95 | 0,000507 | 2078,636 | 4100507,585 | 7,639 | -7,587 |
| 24 | 91136 | 1,087E-06 | 0,0019688 | 1968,761 | 18,07 | 0,000921 | 2512,882 | 2729116,407 | 7,829 | -6,990 |

f. Pemodelan Adsorpsi Isotermis Variasi Konsentrasi Tanpa Mikroba

| Waktu (jam) | Luas Area | Volume (m ³) | Masa (gram) | Konsentrasi (g/m ³) | RE (%) | Pemodelan Langmuir | | | Pemodelan Freundlich | |
|-------------|-----------|--------------------------|-------------|---------------------------------|--------|--------------------|------------------------|----------------------------|----------------------|--------|
| | | | | | | qe (g/kg) | Ce (g/m ³) | Ce/qe (kg/m ³) | ln Ce | ln qe |
| 0 | 112848 | 1,358E-06 | 0,0024605 | 2460,537 | | | | | | |
| 1 | 14824 | 1,326E-07 | 0,0002403 | 240,294 | 90,23 | 4,707767 | 2220,244 | 471,613 | 7,705 | 1,549 |
| 2 | 29042 | 3,103E-07 | 0,0005623 | 562,332 | 77,15 | 4,024924 | 4118,450 | 1023,237 | 8,323 | 1,393 |
| 3 | 75349 | 8,892E-07 | 0,0016112 | 1611,185 | 34,52 | 1,800952 | 4967,802 | 2758,430 | 8,511 | 0,588 |
| 4 | 92946 | 1,109E-06 | 0,0020098 | 2009,757 | 18,32 | 0,955827 | 5418,582 | 5668,999 | 8,598 | -0,045 |
| 5 | 77416 | 9,150E-07 | 0,0016580 | 1658,003 | 32,62 | 1,701681 | 6221,117 | 3655,865 | 8,736 | 0,532 |
| 6 | 106889 | 1,283E-06 | 0,0023256 | 2325,566 | 5,49 | 0,286191 | 6356,088 | 22209,255 | 8,757 | -1,251 |
| 23 | 98839 | 1,183E-06 | 0,0021432 | 2143,234 | 12,90 | 0,672806 | 6673,392 | 9918,750 | 8,806 | -0,396 |
| 24 | 98188 | 1,175E-06 | 0,0021285 | 2128,488 | 13,49 | 0,704071 | 7005,441 | 9949,906 | 8,854 | -0,351 |