

**RANCANG BANGUN DAN UJI HIDRODINAMIKA
KOLOM BIOFILTER UNTUK PENYISIHAN
SENYAWA SULFUR**

SKRIPSI

Oleh

RENDRA JAYANTARA PUTRA
0404060519



**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
GENAP 2007/2008**

**RANCANG BANGUN DAN UJI HIDRODINAMIKA
KOLOM BIOFILTER UNTUK PENYISIHAN
SENYAWA SULFUR**

SKRIPSI

Oleh

RENDRA JAYANTARA PUTRA
0404060519



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA**

GENAP 2007/2008

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul,

RANCANG BANGUN DAN UJI HIDRODINAMIKA KOLOM BIOFILTER UNTUK PENYISIHAN SENYAWA SULFUR

Yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 7 Juli 2008

Rendra Jayantara Putra
0404060519

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul,

RANCANG BANGUN DAN UJI HIDRODINAMIKA KOLOM BIOFILTER UNTUK PENYISIHAN SENYAWA SULFUR

Dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan disetujui untuk diajukan dalam sidang ujian skripsi.

Depok, 7 Juli 2008

Dosen Pembimbing I,

Ir. Eva Fathul Karamah, MT.

NIP 132 161 170

Dosen pembimbing II,

Ir. Praswasti Pembangun Dyah Kencana Wulan, MT.

NIP 132 008 518

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

Ir. Eva Fathul Karamah, MT.

dan

Ir. Praswasti Pembangun Dyah Kencana Wulan, MT.

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.

Rendra Jayantara Putra
NPM 0404060519
Departemen Teknik Kimia

Dosen Pembimbing:
1. Ir.Eva Fathul Karamah, MT.
2. Ir.Praswasti PDK Wulan, MT.

RANCANG BANGUN DAN UJI HIDRODINAMIKA KOLOM BIOFILTER UNTUK PENYISIHAN SENYAWA SULFUR

ABSTRAK

Berkembangnya industri petrokimia dan meningkatnya penggunaan bahan bakar fosil di Indonesia dewasa ini telah menyebabkan emisi gas polutan berbahaya seperti hidrogen sulfida (H_2S) dan senyawa sulfur lainnya ke lingkungan juga semakin besar. Polutan ini bersifat korosif dan racun (toksik) bagi manusia dan lingkungan. Berbagai metode fisis untuk mereduksi senyawa sulfur ini, seperti adsorpsi karbon aktif, belum memberikan hasil memuaskan, sehingga menuntut ditemukannya metode lain yang lebih efisien dan ekonomis. Biofiltrasi, suatu metode yang menggabungkan proses adsorpsi dan biodegradasi secara simultan dalam sebuah alat yang disebut biofilter, sangat potensial untuk menggantikan metode konvensional yang sudah ada.

Dalam aplikasi metode biofiltrasi ini tentunya diperlukan alat proses yang sesuai, untuk itulah pada penelitian ini dilakukan perancangan alat biofilter, serta pengujian kinerja alat yang terdiri dari uji hidrodinamika dan uji adsorpsi. Pengujian adsorpsi dilakukan dalam dua tahap, tahap pertama adalah dengan mengalirkan gas umpan udara dan tahap kedua dengan mengalirkan senyawa tiosulfat ke dalam kolom biofilter. Kedua pengujian ini bertujuan untuk menentukan apakah hasil rancang bangun alat biofilter mampu melakukan proses adsorpsi gas N_2 dan O_2 (dalam udara) serta senyawa sulfur dengan baik.

Berdasarkan hasil penelitian, kolom biofilter yang dirancang adalah kolom unggun tetap (*fixed bed*) berbahan pengisi Zeolit Alam Lampung alami dengan ukuran diameter 5 cm dan tinggi 35 cm. Hasil rancang bangun alat biofilter ini mampu melakukan adsorpsi N_2 dan O_2 dengan persentase reduksi maksimum 12,14 % dan 9,8 %. Selain itu biofilter juga mampu mengadsorpsi senyawa sulfur (dalam bentuk ion tiosulfat) dengan persentase reduksi maksimum sebesar 47,6 %. Lebih baiknya kinerja biofilter dalam mengadsorpsi senyawa tiosulfat dipengaruhi oleh ukuran molekul tiosulfat yang lebih kecil dari molekul N_2 dan O_2 sehingga memungkinkan tiosulfat lebih banyak terserap pada pori zeolit.

Hasil rancang bangun dan pengujian hidrodinamika serta adsorpsi yang dilakukan terhadap alat biofilter ini selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk proses reduksi gas H_2S . Karenanya, keberhasilan penelitian ini akan membuka jalan untuk dapat mereduksi kandungan gas H_2S dalam limbah industri maupun emisi kendaraan bermotor sehingga lebih ramah lingkungan.

Kata kunci: Biofilter, Hidrogen Sulfida (H_2S), Senyawa tiosulfat, Zeolit Alam Lampung, Adsorpsi, Biodegradasi, Kolom unggun tetap, Uji hidrodinamika

Rendra Jayantara Putra
0404060519
Chemical Engineering Department

Project Supervisors:
1. Ir.Eva Fathul Karamah, MT.
2. Ir.Praswasti PDK Wulan, MT.

BUILD UP PLAN AND HYDRODYNAMIC TEST OF BIOFILTER COLUMN TO ELIMINATE SULFURIC COMPOUNDS

ABSTRACT

Nowadays, petrochemical industry development and the use of fossil fuel in Indonesia have been increasing dramatically, resulting in higher emission of dangerous gas pollutants such as hydrogen sulfide and other sulfuric compounds to the environment. These pollutants are very toxic and corrosive for human nature and also environment if accumulated at certain amount. Physical method that have been used in order to reduce sulfuric compound, such as activated carbon adsorption, is not giving satisfaction results yet that forced the invention of new method which giving better efficiency and economical. Biofiltration, a method that combines adsorption and bio-degradation processes simultaneously in an instrument called biofilter, has great potential to replace previous conventional methods.

Application of biofiltration method needs appropriate process equipment. In order to reach that purpose, this research aimed to build up the biofilter system and also conduct performance tests which consist of hydrodynamic and adsorption test. The adsorption tests conducted in two steps, the first step is done by flowing air as the feed gas and second step is done by flowing thiosulfate compound's vapor to the biofilter column. Both tests have an objective to decide whether the result of biofilter's build up plan in doing the adsorption of nitrogen and oxygen along with sulfuric compound appropriately or not.

Based to results of the research, it is known that biofilter column is a fixed bed adsorption column which filled with Lampung natural zeolite as the packing material. The biofilter column has 5 cm of inner diameter and 35 cm of height. The build up plan result of the biofilter system capable of doing nitrogen and oxygen adsorption process, with maximum reduction efficiencies are 12.58 % and 9.80 % respectively. Biofilter also capable to adsorb sulfuric compound, which represented in thiosulfate form, with maximum reduction efficiency is 47.6 %. The performance of biofilter in those adsorption processes is influenced by several factors: molecular size, polarity and phase difference between thiosulfate and nitrogen or oxygen molecules.

The results of this research are used as consideration to optimize sulfuric compound separation by biofilter. Because of that reason, the success of this research will make great possibility to produce industrial waste and vehicle's emission with lower sulfuric compounds.

Keywords : Biofilter, Hydrogen Sulfide (H₂S), Thiosulfate compounds, Lampung Natural Zeolite, Adsorption, Biodegradation, Fixed bed adsorption column, hydrodynamic test

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	i
PENGESAHAN	ii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 ADSORPSI	5
2.1.1 Klasifikasi Adsorpsi.....	5
2.1.2 Breakthrough Curve.....	5
2.1.3 Adsorpsi Isotermis	6
2.1.3.1 Adsorpsi Isotermis Freundlich.....	7
2.1.3.2 Adsorpsi Isotermis Langmuir	8
2.1.4 Konsep Zona perpindahan Massa (Mass Transfer Zone)	9
2.3 BIOFILTER	12
2.4 BAHAN PENGISI BIOFILTER	13
2.4.1 Karbon Aktif.....	13
2.4.2 Kompos	14
2.4.3 Zeolit	15
2.4.3.1 Struktur Zeolit.....	15
2.4.3.2 Sifat-sifat Zeolit	16

2.4.3.3 Katalis.....	19
2.4.3.4 Keasaman Zeolit	20
2.4.3.5 Karakterisasi Zeolit Alam.....	24
2.5 Hidrodinamika Kolom Adsorpsi <i>Packed Bed</i>	27
2.5.1 Faktor Friksi Media Porous (Bahan Pengisi) Kolom.....	28
2.5.2 Pressure Drop Pada Kolom Packed Bed	30
BAB III METODE PENELITIAN.....	33
3.1 Diagram Alir Penelitian	33
3.2 Pelaksanaan Penelitian.....	34
3.2.1 Tahap Perancangan Alat Biofilter	34
3.2.1.1 Kolom Adsorpsi.....	35
3.2.1.2 Kompresor	35
3.2.1.3 Manometer.....	35
3.2.1.4 Bubbler.....	36
3.2.2 Tahap Pengujian Kebocoran dan Hidrodinamika Biofilter.....	36
3.2.2.1 Kalibrasi Flowmeter Gas.....	37
3.2.2.2 Kalibrasi Kompresor	38
3.2.2.4 Uji Kebocoran.....	40
3.2.2.5 Uji Hidrodinamika	40
3.2.3 Pengujian Adsorpsi Secara Fisik oleh Biofilter.....	41
3.2.3.1 Uji Adsorpsi Udara	41
3.2.3.2 Pengukuran Konsentrasi N ₂ dan O ₂ dalam Sampel.....	42
3.2.3.3 Kalibrasi Senyawa Tiosulfat.....	43
3.2.3.4 Uji Adsorpsi Senyawa Tiosulfat	43
3.2.3.5 Analisa Konsentrasi Senyawa Tiosulfat dalam Sampel.....	45
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	47
4.1 Pemilihan Jenis Kolom Adsorpsi	47
4.2 Perancangan Alat Biofilter.....	48
4.2.1. Sifat-sifat bahan yang digunakan.....	48
4.2.2 Perhitungan Perancangan Alat Biofilter.....	49
4.3 Uji Kebocoran Sistem Biofilter	55
4.4 Pengujian Hidrodinamika	56

4.4.1 Pengukuran Jatuh Tekanan (Pressure Drop) Kolom.....	56
4.4.2 Perhitungan Hidrodinamika	57
4.4.3 Pembahasan Hasil Pengolahan Data.....	59
4.5 Uji Adsorpsi Udara.....	62
4.6 Uji Adsorpsi Senyawa Tiosulfat.....	65
BAB V KESIMPULAN	688
5.1 Hasil Perancangan Alat.....	688
5.2 Pengujian Hidrodinamika	688
5.3 Kinerja Adsorpsi Biofilter.....	699
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	70

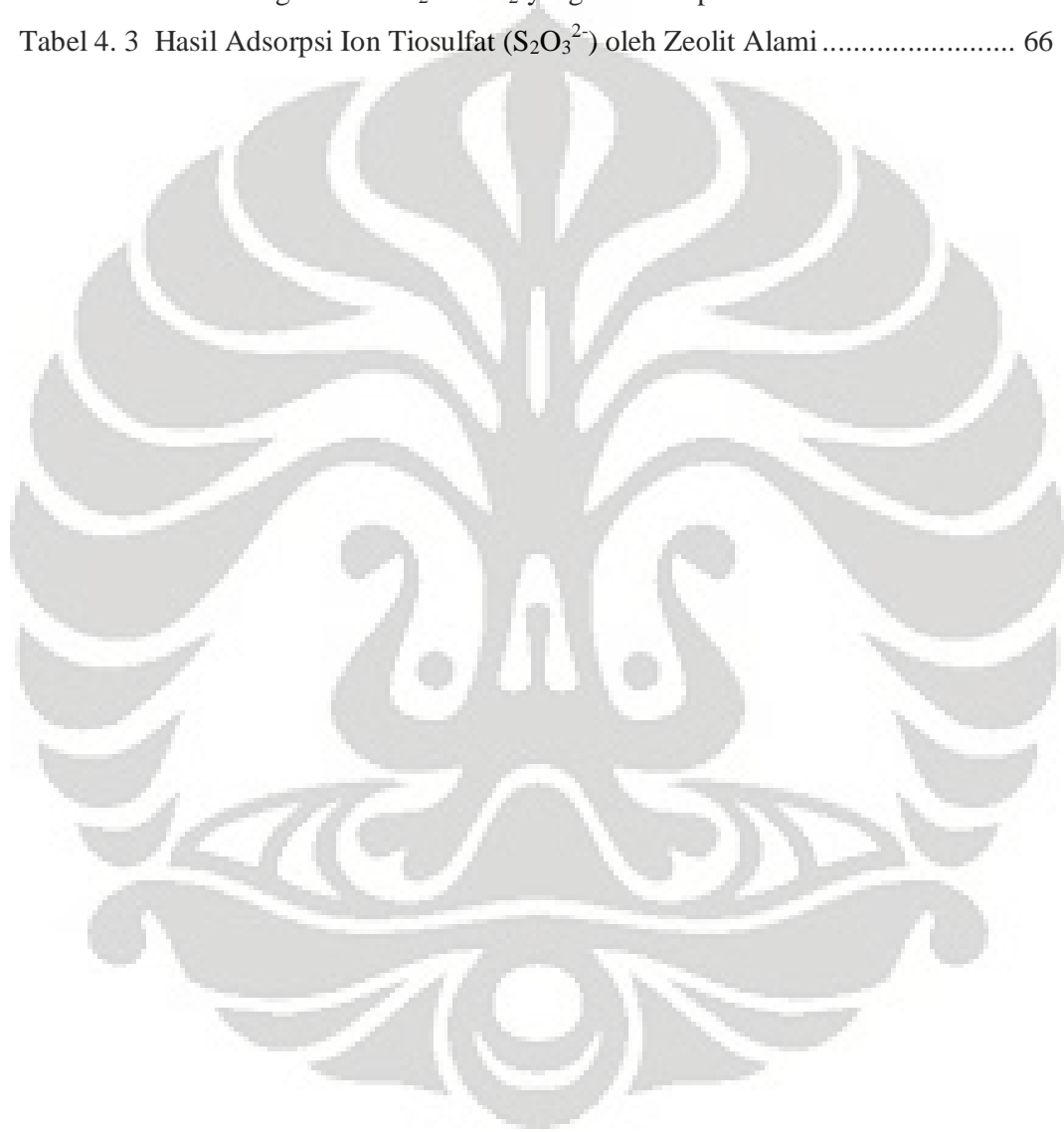


DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Breaktrough Curve</i> (Kurva Terobosan).....	6
Gambar 2. 2 Kurva Adsorpsi Isotermis Freundlich	7
Gambar 2. 3 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir	8
Gambar 2. 4 Konsep Zona Perpindahan Massa, pendekatan makro untuk adsorpsi .	10
Gambar 2. 5 Kerangka dasar tetrahedral pada struktur zeolit.....	16
Gambar 2. 6 Grafik Pengaruh Temperatur terhadap Jumlah Zat Teradsorp	18
Gambar 2. 7 Skema Zeolit sebagai Penyeleksi Bentuk.....	19
Gambar 2. 8 Skema Zeolit Sebagai Penyeleksi Produk	20
Gambar 2. 9 Pembentukan Kerangka Aluminosilikat.....	21
Gambar 2. 10 Asam Brownsted	22
Gambar 2. 11 Dekomposisi Termal Ion Ammonium.....	22
Gambar 2. 12 Perubahan Keasaman Zeolit	23
Gambar 2. 13 Permukaan Zeolit yang Tertutup Adsorbat.....	24
Gambar 2. 14 Pola difraksi sinar-X oleh kristal.....	25
Gambar 2. 15 Skema Umum Kolom <i>Packed Bed</i>	27
Gambar 2. 16 Skema Aliran Fluida Dalam Kolom <i>packed bed</i>	29
Gambar 2. 17 Grafik Hubungan Faktor Friksi Terhadap Persamaan yang Digunakan	30
Gambar 2. 18 Kontrol Volum Kolom <i>Packed Bed</i>	31
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	33
Gambar 3. 2 Skema Alat Biofilter Skala Laboratorium	36
Gambar 3. 3 Skema Alat Uji Hidrodinamika Kolom Adsorpsi Biofilter	40
Gambar 3. 4 Rangkaian Alat Uji Adsorpsi Udara.....	42
Gambar 3. 5 Skema Alat Biofilter untuk Uji Adsorpsi Tiosulfat.	44
Gambar 3. 6 Rangkaian Alat Uji Adsorpsi Senyawa Tiosulfat	44
Gambar 4. 1 Grafik Hubungan Kecepatan Superfisial Fluida dengan Jenis Kolom...	47
Gambar 4. 2 Profil Aliran Fluida selama Uji Hidrodinamika.....	59
Gambar 4. 3 Grafik Kecepatan Superfisial Fluida terhadap Faktor Friksi	60
Gambar 4. 4 Perbandingan Hasil Eksperimental dengan Persamaan Ergun	61
Gambar 4. 5 Profil Konsentrasi N ₂ dalam Effluen pada Uji Adsorpsi Udara	63
Gambar 4. 6 Profil Konsentrasi O ₂ dalam Effluen pada Uji Adsorpsi Udara	64
Gambar 4. 7 Profil Konsentrasi S ₂ O ₃ ²⁻ pada Uji Adsorpsi Tiosulfat	65

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Hasil Perhitungan Kecepatan Superfisial dan Laju Alir Volumetrik Rata Rata	53
Tabel 4. 2 Perbandingan Hasil N ₂ dan O ₂ yang Teradsorpsi oleh Zeolit Alami.....	63
Tabel 4. 3 Hasil Adsorpsi Ion Tiosulfat (S ₂ O ₃ ²⁻) oleh Zeolit Alami	66



DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A

A.1 Kalibrasi Kompresor.....	68
A.2 Hasil Pengukuran Eksperimental Beda Tekanan (<i>Pressure Drop</i>) Kolom.....	69
A.3 Perhitungan <i>Void Fraction</i>	69
A.4 Faktor Koreksi Kompresor.....	69

LAMPIRAN B

B.1 Data Hasil Perhitungan Hidrodinamika Kolom Biofilter.....	70
B.2 Perhitungan Kecepatan Fluidisasi Minimum (Metode " <i>Trial and Error</i> ").....	70

LAMPIRAN C

C.1 Kalibrasi Larutan Natrium Tiosulfat (Variasi Konsentrasi).....	71
C.2 Kalibrasi Larutan Natrium Tiosulfat (Variasi Waktu).....	71
C.3 Adsorpsi Senyawa Tiosulfat.....	72

LAMPIRAN D

D.1 Kalibrasi Gas Nitrogen (N_2).....	73
D.2 Kalibrasi Gas Oksigen (O_2).....	74
D.3 Pengolahan Data Luas Area N_2 dan O_2 Pada Uji Adsorpsi Udara	75

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Salah satu polutan berbahaya yang dihasilkan dari berbagai proses industri seperti kilang petrokimia, proses pengolahan air limbah, industri makanan, industri manufaktur pulp dan kertas, serta dari hasil pembakaran bahan bakar fosil adalah gas hidrogen sulfida (H_2S). Gas ini merupakan gas yang memiliki karakteristik berbau menyengat, bersifat racun (toksik) dan korosif serta merupakan polutan yang sangat berbahaya bagi lingkungan. Ambang batas H_2S yang diperbolehkan bagi manusia hanya sebesar 10 ppm untuk jangka waktu 7 – 8 jam, oleh karena itu kandungan H_2S berlebih di udara harus dapat direduksi demi alasan kesehatan dan keamanan. Berbagai proses fisis dan kimiawi telah dikembangkan dan digunakan untuk mereduksi kandungan H_2S dari limbah cair dan gas, diantaranya adalah adsorpsi karbon aktif, oksidasi ozon dan insinerasi (pembakaran). Proses biologis dengan biodegradasi oleh bakteri pereduksi sulfur juga telah dikembangkan. Namun ternyata jika semua proses tersebut berdiri sendiri masih memiliki berbagai kelemahan. Proses adsorpsi oleh karbon aktif akan terhenti apabila karbon aktif telah jenuh mengadsorpsi kontaminan sehingga perlu regenerasi dengan metode termal dan kimiawi yang relatif mahal. Sedangkan proses oksidasi ozon, insinerasi serta biodegradasi oleh bakteri jika hanya berdiri sendiri memerlukan energi dan biaya operasional yang sangat tinggi sehingga tidak ekonomis.

Dalam usaha mengatasi hambatan tersebut, saat ini pengembangan lebih difokuskan pada proses biofiltrasi. Biofiltrasi merupakan kombinasi dari metode fisis dan biologis. Prinsip utama dari biofiltrasi ini adalah melakukan penyaringan (filtrasi) gas dengan cara memasukkannya ke dalam suatu kolom yang telah terisi dengan bahan pengisi (*packing material*) di dalamnya, serta melibatkan bantuan mikroorganisme. Bahan pengisi ini digunakan sebagai tempat hidup bagi mikroorganisme tersebut. Mikroorganisme yang digunakan lalu akan terimobilisasi pada bahan pengisi dan membentuk lapisan film tipis *biofilm* atau *biolayer*, sehingga gas yang masuk diharapkan akan larut dan terserap ke dalam lapisan *biolayer* ini untuk selanjutnya dioksidasi dan diuraikan oleh mikroorganisme.

Sistem biofiltrasi ini secara luas telah digunakan untuk mereduksi gas polutan pada berbagai industri dan memperoleh sambutan yang baik di Eropa, Amerika, Jepang dan Selandia Baru. Hal ini dikarenakan biofiltrasi memiliki kelebihan utama yaitu biaya perawatan dan operasional yang rendah, serta efisiensi proses yang tinggi dimana dapat mencapai lebih dari 90 %. Dengan melihat potensi tersebut, saat ini biofilter terus diteliti dan dikembangkan dengan menggunakan bahan pengisi serta mikroorganisme yang berbeda untuk meningkatkan efisiensinya.

Berdasarkan tujuan tersebut, dilakukan penelitian mengenai biofilter dengan bahan pengisi yang berbeda. Salah satu alternatif bahan pengisi yang digagaskan dalam penelitian ini adalah zeolit alam. Zeolit alam merupakan struktur kristal *porous* yang terdiri dari banyak *macropore* dan *channel* (saluran). Alasan pemilihan zeolit alam sebagai adsorben dalam penelitian ini adalah ketersediaannya di alam yang sangat tinggi, selain itu porositas yang tinggi dan luas permukaan yang besar menjadikan zeolit alam ini mampu mengadsorpsi dan memberikan suplai nutrisi untuk mikroorganisme. Selain itu, secara fisis zeolit merupakan struktur yang stabil sehingga diharapkan dapat digunakan untuk jangka waktu yang relatif lama. Karakteristik unik yang lain dari zeolit ini adalah memiliki distribusi diameter selektif pori yang tinggi, sehingga memungkinkan zeolit untuk berfungsi sebagai penyaring molekular (*molecular sieve*). Hal ini dapat membuat molekul-molekul adsorbat tertahan di dalam zeolit sehingga interaksi antara molekul adsorbat dan mikroorganisme menjadi lebih efektif.

Secara umum penelitian ini terdiri atas tiga bagian utama yaitu: tahap awal yang meliputi perancangan alat dan uji kinerja alat biofilter yang dilakukan oleh penulis, tahap pengujian kinerja zeolit dan adsorpsi dengan senyawa sulfur yang dilakukan oleh Aryo PH, dan tahap keseluruhan biofiltrasi yang menggabungkan proses adsorpsi dan biodegradasi bakteri yang dilakukan oleh Esty Maulidyasti.

Dalam tahap perancangan suatu alat biofilter, ada beberapa parameter yang harus dipertimbangkan antara lain: pemilihan jenis kolom adsorpsi, penentuan dimensi kolom, serta penentuan komponen-komponen yang harus digunakan dalam mendukung sistem biofilter tersebut. Semua parameter tersebut pada akhirnya harus mampu mengakomodasi kebutuhan zeolit alam, mikroorganisme dan kondisi operasi biofilter. Tahap pengujian kinerja biofilter terdiri dari uji kebocoran dan evaluasi alat, uji hidrodinamika serta uji adsorpsi dengan gas umpan udara dan senyawa tiosulfat. Pengujian hidrodinamika ini mempunyai tujuan untuk menentukan kelayakan hasil

rancangan alat biofilter, dalam artian telah sesuai dengan ketentuan yang ditinjau dari segi mekanika fluida dan operasi proses teknik kimia. Sedangkan tahap uji adsorpsi dilakukan dalam dua tahap, tahap pertama adalah dengan mengalirkan gas umpan udara yang mengandung nitrogen dan oksigen, sedangkan tahap kedua adalah mengalirkan senyawa tiosulfat ke dalam kolom biofilter. Kedua pengujian ini bertujuan untuk menentukan apakah hasil rancang bangun alat biofilter mampu melakukan proses adsorpsi gas N_2 dan O_2 (dalam udara) serta senyawa sulfur dengan baik, sebelum nanti pada penelitian selanjutnya dapat mereduksi kandungan gas H_2S .

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah diuraikan sebelumnya, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Apakah parameter dasar untuk melakukan rancang bangun alat biofilter yang sesuai digunakan untuk proses adsorpsi gas.
- Apakah rancangan alat biofilter telah berfungsi dan memberikan hasil seperti yang diharapkan, ditinjau dari perspektif mekanika fluida dan operasi teknik kimia.
- Apakah alat biofilter yang telah dirancang dapat melakukan adsorpsi gas N_2 dan O_2 dalam udara serta senyawa tiosulfat.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian yang dilakukan ini memiliki tujuan sebagai berikut :

- Menentukan dan menguji parameter dasar yang diperlukan dalam rancang bangun alat biofilter.
- Melakukan pengujian hidrodinamika terhadap rancangan alat biofilter untuk menentukan kelayakan hasil rancangan tersebut.
- Melakukan uji adsorpsi dengan gas umpan udara (*blank-test*) dan senyawa tiosulfat untuk menentukan kemampuan adsorpsi alat biofilter.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang dikaji dalam penelitian ini dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut :

1. Adsorben yang digunakan adalah zeolit alam Lampung granular dengan diameter antara 1,7 – 2 mm.

2. Gas umpan yang digunakan adalah udara yang akan direduksi kandungan N_2 dan O_2 nya, serta uap senyawa tiosulfat yang dihasilkan dari *bubbling* larutan natrium tiosulfat ($Na_2S_2O_3$).
3. Pengamatan terhadap alat biofilter dilakukan secara kontinyu dengan selang waktu tertentu.
4. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah waktu operasi.
5. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah konsentrasi N_2 dan O_2 outlet dan konsentrasi $S_2O_3^{2-}$ outlet.
6. Analisa kandungan N_2 dan O_2 dalam sampel gas dilakukan dengan metode kromatografi gas (GC-TCD).
7. Analisa kandungan senyawa tiosulfat ($S_2O_3^{2-}$) dilakukan dengan metode titrasi iodometri (standard ASTM).

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dari makalah ini adalah sebagai berikut :

- **BAB I PENDAHULUAN**

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

- **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini membahas teori umum mengenai hidrodinamika kolom unggun tetap (*packed bed*), konsep zona perpindahan massa pada proses adsorpsi, serta sistem biofilter yang telah dikembangkan saat ini.

- **BAB III METODE PENELITIAN**

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

- **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini menguraikan hasil penelitian dan pembahasannya sesuai dengan tujuan penelitian dan batasan masalah.

- **BAB V KESIMPULAN**

Bab ini menguraikan kesimpulan yang diperoleh dari hasil dan pembahasan penelitian secara keseluruhan, disertai dengan saran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 ADSORPSI

Fenomena adsorpsi terjadi ketika molekul-molekul yang berada di sekitar permukaan suatu zat padat dapat mengikat molekul senyawa cair atau gas yang dapat larut di dalamnya. Peristiwa terikatnya molekul fluida ini disebabkan oleh beberapa faktor seperti adanya tegangan permukaan, gaya tarik elektrostatis, serta afinitas molekul. Pada peristiwa ini, zat yang mengadsorpsi molekul fluida disebut adsorben, sedangkan molekul yang teradsorpsi disebut adsorbat.

2.1.1 Klasifikasi Adsorpsi

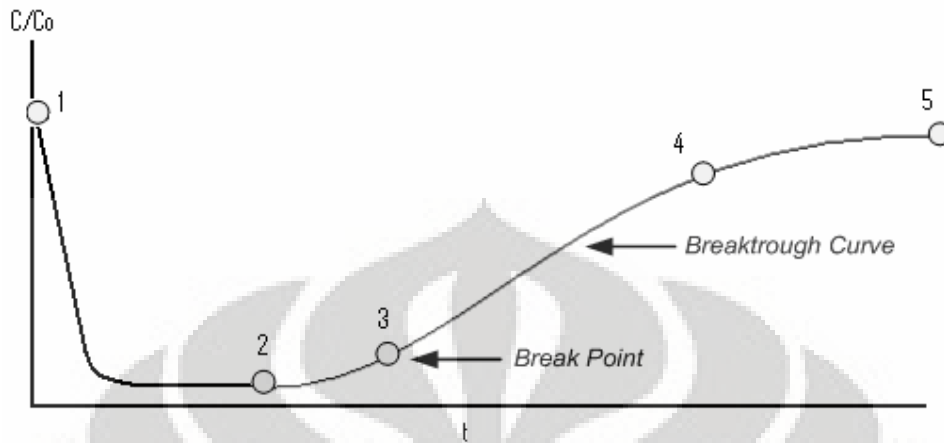
Secara umum adsorpsi dapat dibedakan menjadi dua yaitu adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia atau disebut juga adsorpsi teraktivasi. Pada adsorpsi fisika, gaya intermolekuler yang banyak mempengaruhi adalah gaya van der Waals. Karakteristik dari adsorpsi fisika adalah memiliki panas adsorpsi yang rendah yaitu hanya sekitar 10.000 kal/mol adsorbat, sehingga dapat terjadi pada temperatur ambien. Selain itu kesetimbangan pada adsorpsi fisika lebih cepat tercapai dan bersifat reversibel.

Pada adsorpsi kimia, gaya intermolekuler yang bekerja diakibatkan oleh adanya proses transfer elektron. Transfer elektron pada adsorpsi kimia memiliki kekuatan sebanding dengan pembentukan ikatan kimia antara adsorbat dan permukaan padatannya. Interaksi ini masih lebih lemah dibandingkan dengan adsorpsi fisika serta hanya mampu membentuk lapisan *monolayer* saja. Adsorpsi kimia umumnya memiliki panas adsorpsi yang besar, antara 20.000 – 100.000 kal/mol, sehingga hanya mungkin terjadi pada kondisi temperatur tinggi.

2.1.2 Breakthrough Curve

Kurva terobosan (*breakthrough curve*) merupakan kurva yang menggambarkan suatu rentang kondisi dimana mengenai terjadinya penurunan drastis jumlah adsorbat

yang dapat diserap oleh adsorben. Kondisi penurunan jumlah adsorbat yang teradsorpsi ini terjadi sebelum mengalami kesetimbangan adsorpsi (Sonthaimer, 1988).



Gambar 2. 1 Breakthrough Curve (Kurva Terobosan)

Breakthrough curve di atas menggambarkan fenomena yang terjadi selama proses adsorpsi:

- Proses adsorpsi dimulai pada titik (1) hingga titik 2, pada kondisi ini adsorpsi berjalan dalam laju yang relatif sama (konstan) sampai dengan titik (3).
- Titik (3) pada kurva ini merupakan titik balik (*breakpoint*), dimana terjadi penurunan secara drastis jumlah adsorbat yang dapat diserap oleh adsorben sampai dengan titik (4). Daerah yang berada pada rentang antara titik (3) dan (4) ini disebut dengan kurva terobosan (*breakthrough curve*).
- Penurunan jumlah adsorbat terus terjadi dari titik (4) sampai dengan titik (5), tetapi tidak secara drastis sebagaimana sebelumnya. Titik (5) ini disebut dengan titik kesetimbangan, dimana proses adsorpsi sudah tidak terjadi lagi. Pada kondisi ini adsorben telah melakukan adsorpsi secara optimal dan berada dalam kondisi jenuh karena seluruh permukaannya telah tertutup oleh adsorbat sehingga tidak mungkin melakukan proses adsorpsi lagi.

2.1.3 Adsorpsi Isotermis

Kesetimbangan adsorpsi merupakan suatu kondisi dimana proses adsorpsi berlangsung, laju perindahan massa antara adsorbat yang teradsorpsi ke permukaan adsorben dan adsorbet yang terdesorpsi dari adsorben adalah sama. Pada kondisi ini, adsorben seakan-akan tidak lagi dapat mengadsorpsi adsorbat dan mencapai keadaan jenuh. Jika data kesetimbangan adsorpsi diperoleh pada temperatur konstan, adsorpsi

ini disebut sebagai adsorpsi isotermis. Karena temperatur konstan, adsorpsi isotermis merupakan fungsi dari tekanan. Persamaan yang sering digunakan untuk menggambarkan variasi antara jumlah zat teradsorpsi per unit area/massa dengan tekanan adalah persamaan *Freundlich* dan *Langmuir*.

2.1.3.1 Adsorpsi Isotermis Freundlich

Secara matematis, persamaan adsorpsi isotermis Freundlich dapat dituliskan sebagai berikut :

$$y = k C^{1/n} \quad (2.1)$$

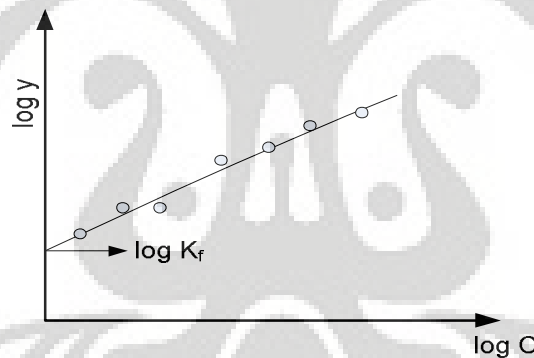
Dimana : y = massa zat teradsorp per unit massa adsorben

C = konsentrasi equilibrium dari larutan yang sedang diadsorpsi

k dan n adalah konstanta empiris.

Jika persamaan (1) diubah dalam bentuk logaritma akan menjadi:

$$\log y = \log k + \frac{1}{n} \log C \quad (2.2)$$



Gambar 2. 2 Kurva Adsorpsi Isotermis Freundlich

Dari persamaan logaritma tersebut dapat dibuat plot kurva antara $\log C$ dan $\log y$ seperti pada Gambar 2.2 di atas. Jika sesuai dengan persamaan Freundlich, maka akan terbentuk kurva linear dengan gradien n dan perpotongan dengan sumbu- y sebesar $\log k$. Pada persamaan isotermis Freundlich, harga n dan K_f adalah konstan. Dengan kata lain, meningkatnya konsentrasi fasa cair akan meningkatkan konsentrasi fasa padat yang sebanding dengan n dan K_f . Pada kasus dimana konsentrasi fasa padat bernilai rendah, konstanta eksponen Freundlich akan meningkat seiring dengan penurunan konsentrasi fasa padat. Hal ini mengakibatkan persamaan isotermis Freundlich tidak berlaku pada konsentrasi fasa padat yang rendah.

2.1.3.2 Adsorpsi Isotermis Langmuir

Selain persamaan Freundlich di atas, persamaan Langmuir juga dapat digunakan pada proses adsorpsi isotermis (Sontheimer, 1988) :

$$q = q_m \frac{K_L C}{1 + K_L C} \quad (2.3)$$

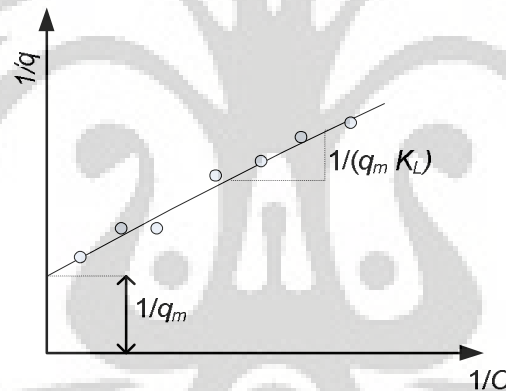
$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m K_L} \frac{1}{C} \quad (2.4)$$

dimana : q = jumlah massa zat teradsorpsi yang teradsorpsi per unit masa adsorben

C = konsentrasi equilibrium dari larutan yang diadsorpsi

K_L = konstanta Langmuir yang berhubungan dengan enthalpi adsorpsi

q_m = jumlah massa adsorbat yang teradsorpsi per gram adsorben untuk membentuk lapisan tunggal (*monolayer*)



Gambar 2. 3 Kurva Adsorpsi Isotermis Langmuir

Persamaan isotermis Langmuir tidak dapat diterapkan untuk semua kondisi adsorpsi, sehingga perlu digunakan beberapa asumsi agar persamaan Langmuir dapat berlaku. Asumsi-asumsi tersebut adalah :

1. Adsorpsi hanya terjadi pada lapisan tunggal molekul yang teradsorpsi pada permukaan adsorben saja.
2. Molekul yang teradsorpsi tidak dapat bergerak bebas atau tidak terjadi migrasi molekul pada lapisan permukaan.
3. Entalpi adsorpsi konstan dan sama untuk setiap molekul.
4. Selain itu, terdapat dua batasan untuk dapat mengaplikasikan persamaan adsorpsi isotermis Langmuir. Batasan tersebut antara lain :

- Untuk fasa cair yang memiliki konsentrasi fasa cair yang rendah, persamaan langmuir menjadi persamaan isothermis linear karena nilai $K_L.C \ll 1$.

$$\lim_{c \rightarrow 0} q = q_m K_L C$$

- Untuk fasa cair dengan konsentrasi yang tinggi, $K_L.C \gg 1$, konsentrasi fasa padatnya tidak tergantung pada konsentrasi larutan.

$$\lim_{c \rightarrow \infty} q = q_m$$

Jika data percobaan sesuai dengan teori Langmuir, plot antara $1/q$ dan $1/C$ akan menghasilkan kurva yang berupa garis lurus. Harga q_m dan konstanta K_L dapat dihitung dari harga perpotongan dengan sumbu-y yaitu $1/q_m$ dan kemiringan $1/(q_m K_L)$.

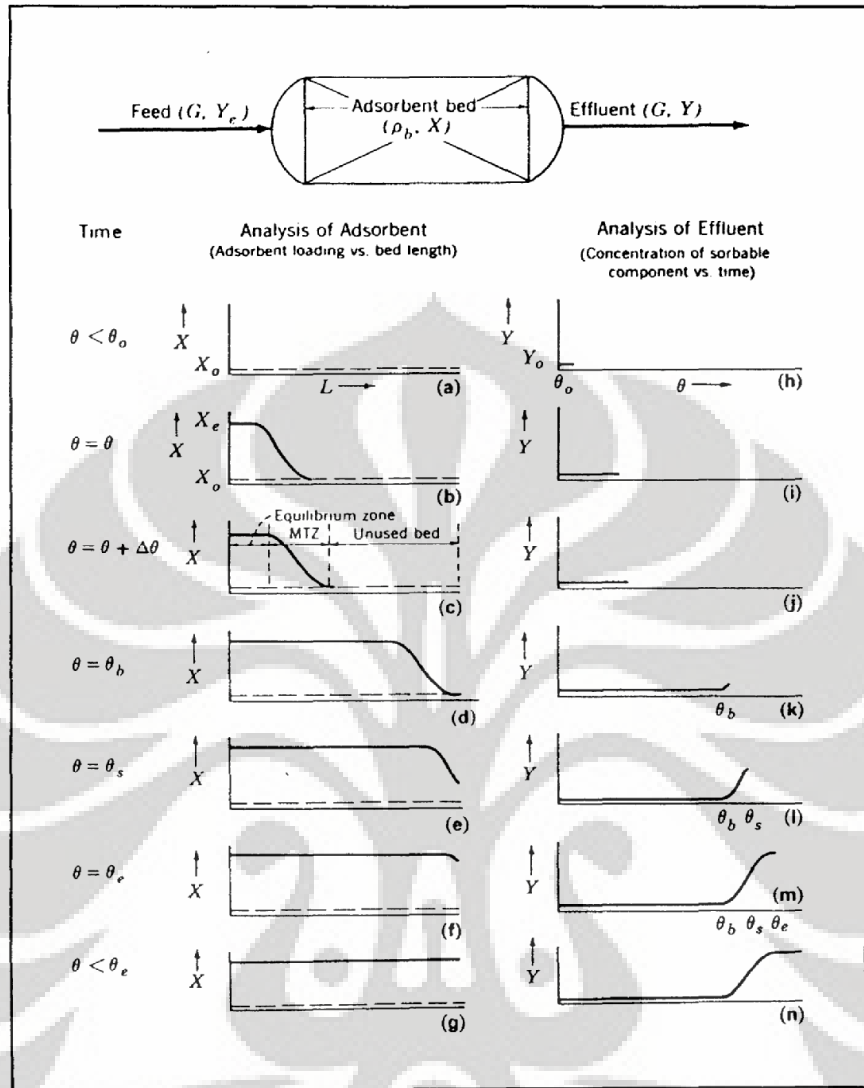
2.1.4 Konsep Zona perpindahan Massa (Mass Transfer Zone)

Dalam sistem adsorpsi dinamis pada kolom adsorpsi unggun tetap (*fixed bed*), umpan fluida yang terdiri atas komponen-komponen yang akan diadsorpsi dialirkan melalui unggun yang berisi partikel adsorben. Laju adsorpsi dapat digambarkan dengan dua cara, yaitu:

- **Pendekatan mikro**, menggunakan koefisien perpindahan massa. Koefisien ini memperhatikan berbagai hambatan yang dialami molekul adsorbat yang berpindah dari aliran fluida ke lapisan film pada permukaan adsorben hingga sampai pada fasa teradsorpsi.
- **Pendekatan makro** dengan konsep zona perpindahan massa (*mass transfer zone*). Pendekatan ini memperhatikan total hambatan sebagai jumlah adsorben yang tidak terpakai. Konsep ini memberikan metode yang sederhana dan efektif untuk fenomena aliran dalam sistem adsorpsi pada unggun tetap.

Dalam penelitian ini lebih dipilih untuk digunakan pendekatan makro melalui konsep zona perpindahan massa untuk mengetahui kapasitas adsorpsi dalam kesetimbangan dan laju adsorpsi, dengan alasan bahwa metode ini lebih sederhana dan efektif digunakan untuk perhitungan data penelitian.

Dalam konsep zona perpindahan massa, dianggap sebuah unggun adsorben dengan kolom tegak dan umpan fluida masuk pada bagian atas dan keluar dari bagian bawah dalam keadaan sudah bersih dari komponen yang dapat teradsorpsi (adsorbat).



Gambar 2.4 Konsep Zona Perpindahan Massa, pendekatan makro untuk adsorpsi pada kolom unggun tetap (*fixed bed*)

Dalam Gambar 2.4 di atas, diberikan gambar kurva-kurva mengenai kondisi unggun dengan analisis pada adsorben dalam fungsi posisi dan fluida keluaran unggun dalam fungsi waktu. Kolom adsorpsi digambarkan mendatar untuk memudahkan pengamatan dan analisis. Awalnya pada saat $\theta < \theta_o$, unggun sangat aktif dan kandungan adsorbat sangat rendah (X_o). Kemudian pada saat $\theta = \theta_o$, proses adsorpsi dimulai dengan aliran massa umpan fluida pada laju tertentu dengan kandungan komponen adsorbat yang merata dalam aliran.

Jumlah adsorbat yang berhasil diadsorpsi dari aliran fluida antara θ dan $\theta+\Delta\theta$ dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$W = G(Y_e - Y_o)A_x\Delta\theta$$

Atau dengan analisis pada media padatan:

$$W = (\Delta L)A_x\rho_b(X_e - X_o)$$

Dari kedua persamaan di atas diperoleh:

$$(\Delta L)A_x\rho_b(X_e - X_o) = G(Y_e - Y_o)A_x\Delta\theta$$

Sehingga:

$$\Delta L = \frac{(G\Delta Y)\Delta\theta}{\rho_b\Delta X} \text{ atau } \Delta L = U\Delta\theta$$

Dalam keadaan tunak, variabel G , ΔY , ρ_b dan ΔX bernilai tetap sehingga bentuk $[G\Delta Y/\Delta X\rho_b]$ menjadi tetapan dengan dimensi satuan panjang per satuan waktu (m/s). Dengan demikian tetapan U akan tampak sebagai laju berkembangnya zona kesetimbangan.

2.3 BIOFILTER

Biofilter telah banyak digunakan di negara-negara Eropa, Amerika dan Jepang, karena memiliki efektivitas yang tinggi untuk mengolah emisi gas buang dari berbagai industri dengan volume gas yang besar namun mempunyai konsentrasi polutan yang rendah. Selain itu jika dibandingkan dengan metode fisika-kimia konvensional, metode biofilter ini mempunyai kelebihan yaitu biaya investasi dan operasional yang rendah, stabil pada waktu yang relatif lama, dan memiliki daya degradasi gas polutan yang tinggi.

Dalam metode biofilter, pemilihan bahan pengisi sebagai media tempat hidup mikroorganisme yang digunakan merupakan hal sangat penting untuk mendukung kehidupan mikroorganisme yang digunakan (Hirai, et.al, 2001). Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam menentukan bahan pengisi biofilter adalah sebagai berikut (Anit dan Artuz, 2004) :

1. Kemampuan menyerap air untuk menjaga kelembaban lapisan *biofilm*.
2. Porositas dan luas permukaan yang besar, baik untuk absorpsi kontaminan maupun untuk pertumbuhan mikroba.
3. Kemampuan untuk menyerap nutrisi dan menyuplainya ketika dibutuhkan oleh mikroba.
4. Kemampuan menahan aliran udara (penurunan tekanan udara dan kekuatan angin yang dikeluarkan blower).
5. Perubahan bentuk yang sedikit setelah digunakan untuk waktu tertentu.
6. Material yang digunakan relatif murah.
7. Karakteristik fisik, seperti kestabilan fisik dan mudah dalam penanganan.

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

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

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

2.4 BAHAN PENGISI BIOFILTER

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

Pada umumnya bahan pengisi alami mengandung sejumlah nutrisi yang mencukupi untuk pertumbuhan mikroorganisme, sehingga penambahan nutrisi dan mineral tidak diperlukan. Tetapi untuk pemakaian biofilter dalam waktu yang relatif lama perlu ditambahkan nutrisi (nitrogen atau fosfor) secara manual untuk mempertahankan kelangsungan hidup mikroorganisme tersebut.

2.4.1 Karbon Aktif

Karbon aktif merupakan suatu bahan padat yang berpori-pori dan merupakan hasil pembakaran pada temperatur 500 – 600 °C dari bahan yang mengandung unsur karbon. Karbon (arang) yang terbuat dari selulosa bersifat lunak dan mudah terbakar, sedangkan arang yang terbuat dari tempurung kelapa dan batubara lebih padat dan keras. Sebagian besar pori-porinya tertutup dengan hidrokarbon, ter, dan senyawa organik lain. Komponennya terdiri dari ikatan karbon, air, nitrogen, abu (*ash*), dan sulfur (Djarmiko, et.al., 1985).

Karbon aktif dapat dibuat dari semua bahan yang mengandung karbon, baik organik maupun anorganik. Karbon aktif mempunyai sifat penyerapan yang selektif, serta lebih menyukai bahan-bahan non-polar daripada bahan polar. Pada bahan-bahan dalam satu deret homolog, biasanya daya serap karbon aktif meningkat dengan meningkatnya titik didih. Kemampuan daya serap juga meningkat seiring dengan meningkatnya tekanan dan menurunnya temperatur.

Dibandingkan dengan bahan-bahan adsorben lainnya, karbon aktif memiliki aktivitas dengan spektrum penyerapan yang luas, stabilitas fisik dan kimia yang sangat baik dan ketersediaan bahan baku yang melimpah (Keteren dan Djatmiko, 1978).

Karbon aktif sendiri telah digunakan sebagai bahan pengisi dalam kolom biofilter untuk menyaring gas *Methyl Mercaptan* (MM) dan *Dimethyl Disulfide* (DMDS). Karbon aktif yang digunakan merupakan karbon aktif yang berbentuk serat (*Activated Carbon Fabric*). Karbon aktif yang berbentuk serat mempunyai efisiensi yang tinggi dengan karakteristik luas permukaan yang besar sehingga memungkinkan lebih banyak mikroorganisme yang dapat hidup. Bahan ini dapat menyerap sulfur sebanyak 0,48 g-S/kg bahan kering (Lee dan Shoda, 1989).

Karbon aktif yang berbentuk granula sebenarnya juga dapat digunakan untuk mengabsorpsi gas dan H₂S. Namun pada keadaan kering, karbon aktif berbentuk granula tidak dapat mengoksidasi H₂S menjadi sulfat. Sedangkan pada keadaan basah, karbon aktif yang berbentuk granula sulit untuk digunakan sebagai adsorben (Choi, et.al., 1991).

2.4.2 Kompos

Pengkomposan didefinisikan sebagai suatu proses biokimia dimana bahan organik didekomposisi menjadi zat-zat seperti humus (kompos) oleh kelompok mikroorganisme yang berbeda pada kondisi yang dikontrol. (Gaur, 1983 dan EPA, 1989).

Biokonversi terhadap bahan organik pada saat pengkomposan dilakukan oleh kelompok mikroorganisme heteofilik berbeda yang meliputi bakteri, kapang, protozoa dan *actinomycetes*. Mikroorganisme selulolitik dan lignolitik sangat berperan mendekomposisi komponen dari bahan organik yang terdegradasi secara lambat (Gaur, 1983). Ciri-ciri umum kompos didasarkan pada sifat-sifat berikut :

1. Berwarna coklat tua hingga hitam
2. Tidak larut dalam air, meskipun sebagian dari kompos dapat membentuk suspensi.
3. Sangat larut dalam pelarut alkali, matrium pirofosfat atau larutan amonium oksalat dengan menghasilkan ekstrak yang berwarna.
4. Memiliki rasio C/N 10-20 (tergantung pada bahan dan derajat humifikasinya).
5. Secara biokimiawi tidak stabil, tetapi komposisinya berubah melalui aktivitas-aktivitas mikroorganisme, sepanjang kondisi lingkungannya sesuai (suhu dan kelembaban), yang dioksidasi menjadi garam-garam anorganik, karbondioksida dan air.
6. Menunjukkan kapasitas pemindahan kation dan absorpsi zat yang tinggi. Jika digunakan pada tanah, kompos dapat memberikan pengaruh positif bagi tanah dan pertumbuhan tanaman. Komposisi pupuk kompos meliputi N, P, K, Ca dan Mg. Selain itu, kompos mengandung *trace element* untuk pertumbuhan tanaman.

Media kompos telah digunakan sebagai bahan pengisi dalam kolom biofilter untuk mereduksi gas H_2S dan senyawa bahan organik volatil (VOC). Hasil yang diperoleh adalah bahwa kompos dapat mempertahankan efisiensi proses lebih dari 95 % pada konsentrasi gas inlet H_2S sebesar 0-10 ppm dengan periode 500 hari dan dilakukan pengontrolan pH (Webster, et.al., 1996).

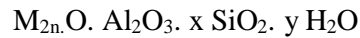
2.4.3 Zeolit

Zeolit merupakan mineral yang terdiri dari kristal aluminosilikat terhidrasi yang mengandung kation alkali dan alkali tanah dalam kerangka tiga dimensinya. Ion-ion logam dan molekul air dalam zeolit dapat bergerak bebas sehingga memungkinkan terjadinya pertukaran ion tanpa merusak struktur zeolit, dan penyerapan air oleh zeolit terjadi secara reversibel.

2.4.3.1 Struktur Zeolit

Struktur zeolit mengandung kerangka tiga dimensi tetrahedral SiO_4 dan AlO_4 , masing-masing mengandung atom silikon atau alumina di pusatnya dan saling berhubungan melalui atom O. Struktur ini kadang-kadang disebut tetrahedral TO_4^- dimana T adalah silikon atau alumina. Atom-atom oksigen merupakan bagian

bersama diantara tetrahedral, yang dapat hadir dalam beberapa variasi rasio dan terbentuk dalam beberapa macam cara. Zeolit dapat direpresentasikan dengan rumus empiris berikut :



dimana :

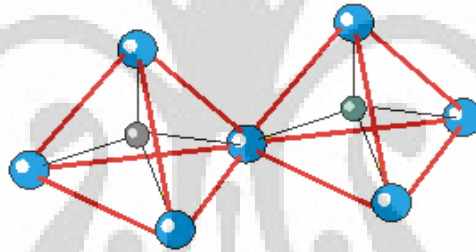
M = kation alkali atau alkali tanah

n = valensi logam alkali

x = bilangan tertentu (dari 2 sampai 10)

y = bilangan tertentu (dari 2 sampai 7)

Jika dilihat dari rumus empirisnya, secara garis besar zeolit tersusun dari tiga komponen utama yaitu kation-kation yang dipertukarkan, kerangka aluminosilikat, dan beberapa molekul air. Ikatan ion Al – Si – O membentuk struktur kristal, sedangkan logam alkali merupakan sumber kation yang mudah dipertukarkan.



Gambar 2. 5 Kerangka dasar tetrahedral pada struktur zeolit

2.4.3.2 Sifat-sifat Zeolit

Zeolit memiliki struktur berongga dan biasanya rongga ini berisi air dan kation-kation yang dapat dipertukarkan dan memiliki ukuran pori tertentu. Oleh karena itu zeolit dapat dimanfaatkan sebagai penyaring molekuler, penukar ion, dan katalisator. Sifat-sifat zeolit meliputi:

2.4.3.2.1 Dehidrasi dan Adsorpsi

Sifat dehidrasi zeolit akan berpengaruh terhadap sifat adsorpsinya. Zeolit dapat melepaskan molekul air dari dalam rongga permukaan yang menyebabkan medan listrik meluas ke dalam rongga utama dan akan efektif terinteraksi dengan molekul yang diadsorp. Jumlah molekul air sesuai dengan jumlah pori-pori atau volume hampa yang akan terbentuk bila unit sel kristal zeolit tersebut dipanaskan.

Ruang hampa dalam struktur kristal zeolit dalam keadaan normal akan terisi oleh molekul air bebas yang berada di sekitar kation. Jika kristal zeolit ini dipanaskan pada temperatur 300 – 400 °C, maka molekul-molekul air tersebut akan keluar sehingga zeolit dapat berfungsi sebagai penyerap gas sebanyak 30 % dari berat keringnya. Adsorpsi yang terjadi pada permukaan zeolit ada dua :

a. Adsorpsi Fisika

Adsorpsi fisika terjadi bila molekul-molekul adsorbat terikat tanpa disertai terjadinya reaksi pada permukaan zeolit (adsorben). Molekul adsorbat ini dapat terikat akibat adanya gaya *Van der Waals*, yaitu gaya tarik menarik yang relatif lemah dengan permukaan adsorben. Gaya ini memungkinkan adsorbat bergerak dari suatu bagian ke bagian lain pada permukaan adsorben. Adsorpsi jenis ini berlangsung dengan cepat, reversibel dan memiliki panas adsorpsi rendah.

b. Adsorpsi Kimia

Adsorpsi ini terjadi akibat adanya reaksi antara molekul-molekul adsorbat dengan molekul zeolit (adsorben). Adsorpsi kimia memiliki sifat tidak reversibel dan hanya membentuk lapisan tunggal (monolayer), umumnya terjadi pada temperatur tinggi sehingga panas adsorpsinya juga tinggi.

Faktor-faktor yang mempengaruhi daya adsorpsi zeolit :

1. Sifat Adsorbat

a. Ukuran molekul

Rongga tempat terjadinya proses adsorpsi dapat dicapai melewati ukuran yang sesuai, sehingga molekul-molekul yang dapat diadsorpsi adalah molekul yang memiliki diameter sama atau lebih kecil dari diameter pori zeolit.

b. Kepolaran

Adsorbat dengan molekul-molekul yang polar cenderung lebih mudah untuk teradsorpsi daripada molekul yang kurang polar, apabila diameter molekulnya sebanding.

2. Luas Permukaan Zeolit

Jumlah molekul adsorbat yang dapat teradsorpsi meningkat seiring dengan bertambahnya luas permukaan zeolit (adsorben). Karena dengan bertambahnya

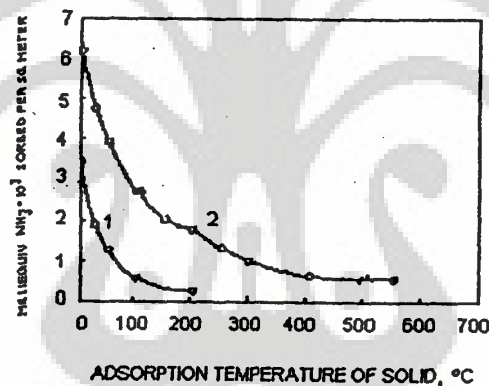
luas permukaan, kemungkinan terjadinya kontak antara molekul adsorben dengan adsorbat semakin besar.

3. Temperatur

Proses adsorpsi merupakan proses eksotermis, yang berarti bahwa jumlah senyawa yang akan diadsorpsi akan berkurang seiring dengan kenaikan temperatur berdasarkan prinsip *Le Chatelier*. Kurva hubungan antara jumlah senyawa yang teradsorpsi dengan temperatur dapat dilihat pada gambar 2.2.

4. Tekanan

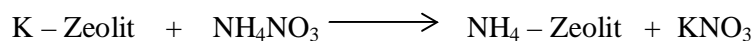
Selain temperatur, jumlah adsorbat yang mampu diserap oleh adsorben juga tergantung pada tekanan adsorbat. Semakin besar tekanan adsorbat, maka semakin banyak pula adsorbat yang dapat diserap oleh adsorben.



Gambar 2. 6 Grafik Pengaruh Temperatur terhadap Jumlah Zat Teradsorpsi

2.4.3.2.2 Sifat Penukar Ion

Kemampuan zeolit sebagai penukar ion bergantung pada banyaknya pertukaran kation pada zeolit. Pada zeolit yang mengandung air, kationnya dapat bergerak dan digantikan oleh kation lain. Sifat ini yang mendukung fungsi zeolit sebagai penukar kation. Sifat penukar ion dari zeolit sangat bermanfaat dalam proses modifikasi zeolit yang akan digunakan sebagai adsorben atau katalis. Contoh reaksi pertukaran kation pada zeolit :



dimana K adalah logam alkali.

2.4.3.3 Katalis

Zeolit jika digunakan dalam proses katalisis maka akan mengakibatkan terjadinya difusi molekul ke dalam ruang bebas antar kristal serta terjadi reaksi kimia pada permukaan saluran kosong zeolit. Dalam fungsinya sebagai katalis, zeolit dapat berperan dalam dua hal, yaitu sebagai katalis penyeleksi bentuk dan sebagai katalis asam.

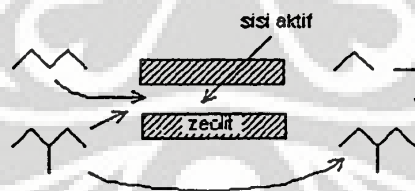
2.4.3.3.1 Zeolit sebagai Katalis Penyeleksi Bentuk

Dasar yang digunakan untuk pemanfaatan zeolit sebagai katalis penyeleksi bentuk adalah tersedianya pusat aktif dalam sistem pori katalis. Sistem pori ini berhubungan dengan sifat kristalin dari zeolit. Ukuran pori sesungguhnya yang terbentuk dari struktur cincin pada kenyataannya menjadi lebih kecil dengan adanya kation-kation pada permukaan zeolit.

Katalis penyeleksi bentuk dapat dikelompokkan menjadi dua :

a. Penyeleksi Reaktan

Katalis jenis ini sangat bermanfaat pada kondisi umpan yang terdiri dari beberapa ukuran molekul, tetapi hanya sebagian saja yang efektif digunakan sebagai reaktan sehingga perlu diseleksi lebih dulu. Contoh sederhana dalam hal ini adalah pada reaksi dari umpan yang berisi campuran karbon rantailurus dan rantau cabang. Dengan kemampuan selektifitas yang dimiliki zeolit, maka hanya rantai lurus saja yang mampu dilewatkan.

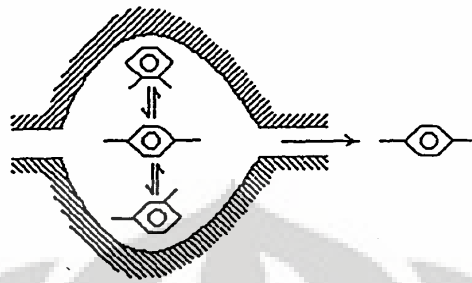


Gambar 2. 7 Skema Zeolit sebagai Penyeleksi Bentuk

b. Penyeleksi Produk

Zeolit juga dapat berfungsi sebagai penyeleksi produk, manakala produk yang dihasilkan dari suatu reaksi di dalam sistem pori memiliki ukuran molekul yang beragam, sementara hanya sebagian saja dari produk tersebut yang dikehendaki. Jika molekulnya lebih besar dari mulut pori, maka molekul

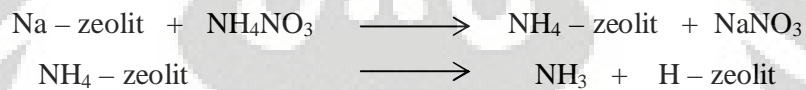
yang tidak dikehendaki akan tersaring. Selanjutnya molekul yang tersaring umumnya hanya terdiri dari molekul yang lebih kecil.



Gambar 2. 8 Skema Zeolit Sebagai Penyeleksi Produk

2.4.3.3.2 Zeolit sebagai Katalis Asam

Zeolit dapat berfungsi sebagai katalis asam, karena kationnya dapat dipertukarkan. Contohnya pada zeolit alam yang umumnya memiliki jenis kation alkali (misalnya Na^+ atau K^+), jika kation ini dipertukarkan dengan ion NH_4^+ yang diikuti dengan pemanasan, maka pada permukaan zeolit akan terbentuk ion H^+ . Ion ini akan berfungsi sebagai pusat aktif atau sering disebut sebagai inti asam. Contoh reaksinya adalah sebagai berikut :

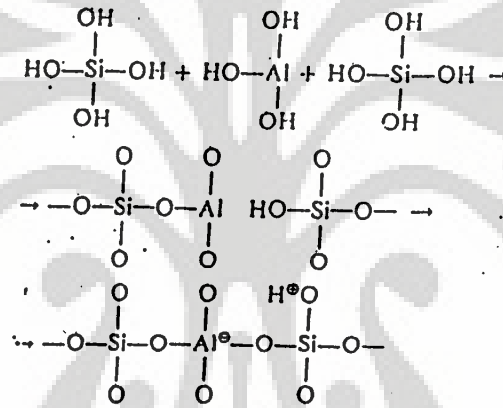


2.4.3.4 Keasaman Zeolit

Persenyawaan silikon-oksigen ($\text{Si} - \text{O}$) di dalam lapisan kerak bumi sangatlah melimpah. Umumnya batuan dan mineral pada lapisan tersebut adalah silikat dengan kisi $-\text{O} - \text{Si} - \text{O} -$. Dalam kisi silikat ini terkadang atom-atom lain berikatan dengan atom silikon dan oksigen, atau bahkan dapat menggantikannya. Kisi silikat ini dapat dianggap sebagai turunan dari SiO_2 . Kristal SiO_2 memiliki dua ciri utama : (1) setiap atom silikon berada pada suatu pusat tetrahedron yang terdiri dari empat atom oksigen dan (2) setiap atom oksigen berada di tengah-tengah antara dua atom silikon.

Dalam struktur zeolit, sebagian ion Al^{3+} dapat menggantikan ion Si^{4+} . Ion Al^{3+} ini mengambil tempat Si^{4+} di pusat tetrahedron (bidang empat) SiO_4 dan kation-kation alkali dan alkali tanah menempati rongga-rongga di dekatnya dalam struktur kristal.

Substitusi [-SiO₄-] oleh ion [-AlO₄]⁻ pada tetrahedral merupakan faktor dasar dari sifat aluminosilikat karena menimbulkan pusat aktif berupa muatan aktif pada atom Al. Penjelasan dari fenomena ini adalah sebagai berikut :suatu atom Al memiliki 3 elektron valensi dibandingkan, sedangkan atom silikon memiliki 4 elektron valensi. Substitusi atom Si dengan atom Al akan menyebabkan muatan Al menjadi negatif karena harus berinteraksi dengan satu elektron tambahan dari atom oksigen sebagai ion [AlO₄]⁻. Skema pembentukan kerangka aluminosilikat dapat dijelaskan melalui gambar berikut ini :



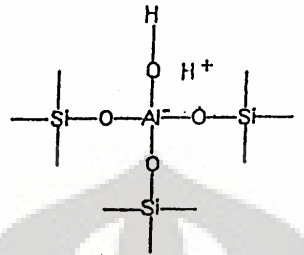
Gambar 2. 9 Pembentukan Kerangka Aluminosilikat

Agar terjadi keseimbangan muatan listrik, muatan negatif dari [AlO₄]⁻ tersebut membutuhkan adanya penambahan muatan positif logam alkali atau alkali tanah. Kation-kation dalam struktur zeolit tidak terikat pada posisi yang tetap, tetapi bergerak bebas dalam rongga-rongga zeolit dan bertindak sebagai *Courier ion* yang dapat dipertukarkan dengan kation-kation lainnya. Kondisi ini memungkinkan zeolit bertindak sebagai katalis asam. Terdapat dua jenis pusat asam dalam struktur zeolit :

a. Asam Brownsted

Asam Brownsted adalah suatu zat yang dapat bertindak sebagai donor proton (H⁺). Bila [AlO₄]⁻ mengikat proton maka akan timbul suatu inti asam Brownsted. Dalam hal ini proton akan menempel pada atom-atom oksigen

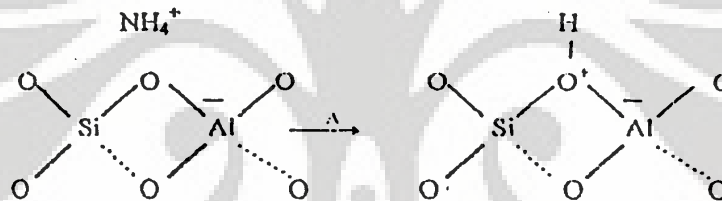
yang berikatan dengan atom-atom silikon dan aluminium (Si – OH – Al). Kekuatan asam tersebut tergantung pada kondisi lingkungannya.



Gambar 2. 10 Asam Brownsted

Inti asam proton (H^+) tersebut dapat timbul melalui beberapa cara :

1. Dekomposisi termal dari zeolit hasil pertukaran dengan ion ammonium



Gambar 2. 11 Dekomposisi Termal Ion Ammonium

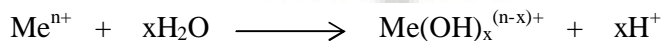
2. Perlakuan dengan larutan asam



3. Keasaman Brownsted menyebabkan ionisasi air pada kation polivalen.



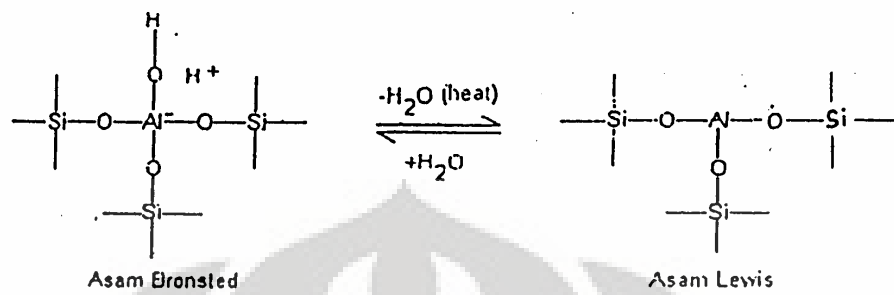
4. Reduksi logam dengan hidrogen oleh kation-kation logam transisi dalam zeolit untuk membentuk H – zeolit.



b. Asam Lewis

Asam Lewis adalah suatu zat yang dapat menerima sepasang elektron bebas yang dikombinasikan dengan zat kedua yang mempunyai sepasang elektron

bebas. Asam Bronsted dapat diubah menjadi asam Lewis yaitu dengan memanaskan zeolit, seperti terlihat pada reaksi berikut :



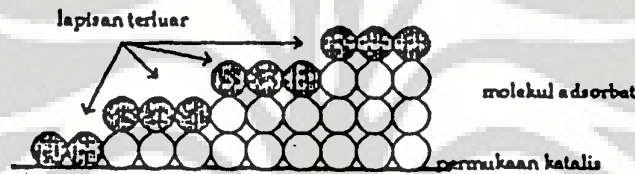
Gambar 2. 12 Perubahan Keasaman Zeolit

2.4.3.5 Karakterisasi Zeolit Alam

2.4.3.5.1 Karakterisasi Luas Permukaan Zeolit dengan Metode BET

Untuk mengetahui luas permukaan zeolit alam klinoptilolit, pada penelitian ini dilakukan karakterisasi dengan menggunakan metode BET. Hal ini sangat bermanfaat untuk mengetahui pengaruh proses perlakuan awal (aktivasi) zeolit terhadap penambahan luas permukaannya.

Metode BET (Brunauer, Emmet dan Teller) didasarkan pada penentuan volume molekul yang teradsorpsi secara fisika, setebal satu lapisan (monolayer) pada permukaan katalis zeolit (V_m). V_m yang dihitung ini merupakan jumlah volume molekul yang teradsorpsi pada lapisan terluar.



Gambar 2. 13 Permukaan Zeolit yang Tertutup Adsorbat

Persamaan BET yang digunakan :

$$\frac{P/P_o}{V(1-P/P_o)} = \frac{1}{cV_m} + \frac{(c-1)P/P_o}{cV_m} \quad (2.5)$$

dengan :

P = tekanan gas saat adsorpsi

P_o = tekanan uap jenuh adsorbat pada temperatur T

V = volume gas teradsorpsi pada tekanan P

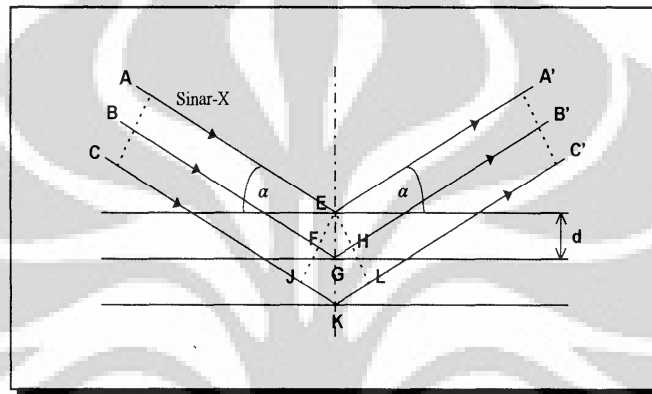
V_m = volume gas teradsorpsi ketika permukaan tertutup lapisan *multilayer*

c = konstanta yang sesuai dengan persamaan $c = e^{(E_1-E_L)/RT}$

2.4.3.5.2 Difraksi Sinar X (XRD)

Difraksi pada dasarnya disebabkan oleh adanya hubungan fasa tertentu antara dua gerak gelombang atau lebih sehingga paduan kedua gelombang tersebut dapat saling menguatkan atau melemahkan.

Atom-atom dalam zat padat dapat menghamburkan sinar X. Ketika sinar X jatuh pada kristal, akan terjadi hamburan ke segala arah. Karena atom-atom dalam kristal tersebut tersusun secara teratur maka sinar X yang terhambur akan bersifat koheren sehingga dapat berinterferensi saling menguatkan atau melemahkan. Atom-atom dalam kristal dapat dipandang sebagai unsur yang dapat membentuk susunan bidang datar, yang masing-masing susunannya memiliki jarak karakteristik antara bidang-bidang komponennya. Bidang ini disebut dengan bidang *Bragg*.



Gambar 2. 14 Pola difraksi sinar-X oleh kristal

Difraksi sinar X untuk bahan serbuk adalah suatu metode yang penting untuk karakterisasi kualitatif dan kuantitatif zeolit. Teknik ini biasa digunakan untuk identifikasi kualitatif karena pola umum difraksi sinar X untuk zeolit sangat mudah dikenal (khas). Teknik XRD ini juga dapat memberikan informasi pada bagian luar, kemurnian fasa dan perubahan kisi kristal. Pola indeks difraksi dapat juga digunakan untuk mengevaluasi latar belakang dan pengaruh pelebaran garis spektra.

Pola difraksi serbuk zeolit adalah plot intensitas sinar difraksi yang menyatakan indeks Miller (hkl) sebagai fungsi 2θ dimana θ adalah sudut difraksi yang sesuai dengan kondisi *Bragg*.

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

dimana d adalah jarak antar bidang kristal dan λ adalah panjang gelombang sinar X. Jarak bidang kristal (hkl) atau indeks Miller menentukan parameter unit sel kristal.

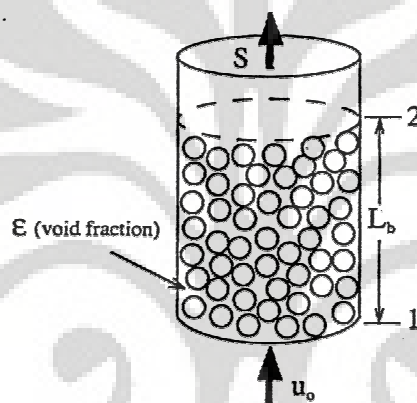
Zeolit bersifat mikrokristalin dan metode XRD hanya dapat digunakan bila serbuk adalah berupa kristalin. Zeolit yang telah diperlakukan dengan proses panas dan kimia sering mengalami degradasi yang menimbulkan partikel yang lebih baik atau dapat menyebabkan sebagian zeolit berbentuk amorf. Selanjutnya, atom silikon dan

aluminium dalam zeolit terdistribusi secara acak sehingga sulit untuk menentukan apakah atom-atom tersebut menempati posisi yang tetap dalam kerangka zeolit. Tetapi dengan metode XRD ini masih dimungkinkan untuk memperkirakan secara kualitatif derajat kristalinitas pada sampel yang telah dimodifikasi atau diaktivasi dengan cara membandingkan luas puncak (*peak*) pola difraksi.



2.5 Hidrodinamika Kolom Adsorpsi *Packed Bed*

Dalam proses adsorpsi, kolom *packed bed* biasa digunakan untuk memperoleh luas permukaan kontak yang besar antara fasa gas dan padat (solid) atau liquid sehingga didapatkan kondisi dimana proses perpindahan massa dan perpindahan panas antara adsorbat dan adsorben berlangsung secara lebih cepat. Tipikal umum dari kolom *packed bed* adalah suatu kolom silindris yang diisi oleh sejumlah bahan pengisi (*packing material*) yang sesuai dengan proses adsorpsi yang dilakukan, seperti yang terlihat pada Gambar 2.5 :



Gambar 2. 15 Skema Umum Kolom *Packed Bed*

Dari tinjauan mekanika fluida serta hidrodinamika, faktor yang sangat penting dalam desain suatu kolom *packed bed* adalah bagaimana menentukan *pressure drop* yang diperlukan untuk mengalirkan sejumlah gas atau cairan sepanjang kolom dengan laju alir tertentu. Untuk menentukan *pressure drop* ini sangat bergantung pada korelasi faktor friksi, yang akan dijelaskan kemudian. Dalam tinjauan yang lain dapat melibatkan distribusi gas atau liquid di sepanjang kolom dan membuat sebuah model untuk profil kecepatan dari fluida yang diadsorpsi pada permukaan sebuah bahan pengisi kolom (*packing material*), kemudian dapat dilakukan perhitungan perpindahan massa/panas sehingga dapat diketahui desain/bentuk bahan pengisi kolom yang tepat untuk proses tersebut. Tetapi karena dalam penelitian ini bahan pengisi yang digunakan telah ditentukan sebelumnya, maka pembahasan disini lebih difokuskan pada faktor friksi dan *pressure drop*.

2.5.1 Faktor Friksi Media Porous (Bahan Pengisi) Kolom

Faktor friksi dari sebuah kolom *packed bed* merupakan fungsi dari bilangan Reynold aliran fluida di sepanjang kolom. Dalam banyak literatur, persamaan untuk menentukan faktor friksi ini bergantung dari jenis aliran yang mengalir pada kolom, apakah tergolong laminar, turbulen atau intermediat.

Untuk Aliran Laminar ($Re < 10$)

Digunakan persamaan **Blake-Kozeny**:

$$f = \frac{W_f D_P \epsilon^3}{V_S^2 (1-\epsilon)L} = 150 \frac{\mu(1-\epsilon)}{\rho V_S D_P} = 150 / Re \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

Persamaan ini digunakan jika aliran fluida di sepanjang kolom *packed bed* tergolong sangat viskos, sehingga memiliki bilangan Reynold yang rendah.

Untuk Aliran Turbulen ($Re > 1000$)

Digunaan persamaan **Burke-Plummer**:

$$f = \frac{W_f D_P \epsilon^3}{V_S^2 (1-\epsilon)L} = \text{constant} = 1.75 \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

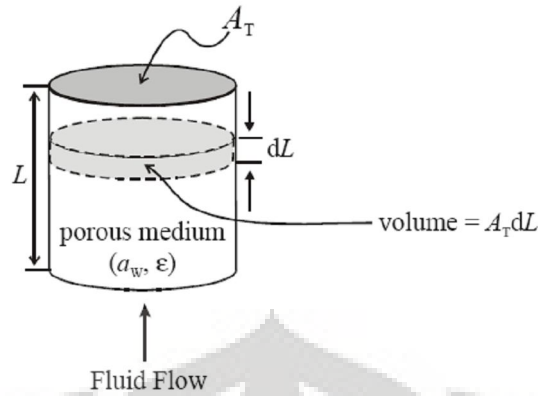
Persamaan ini digunakan jika viskositas aliran fluida di sepanjang kolom *packed bed* rendah dan diasumsikan bahwa efek viskositas ini dapat diabaikan, sehingga mengakibatkan nilai bilangan Reynold menjadi sangat tinggi (> 1000),.

Untuk Aliran Intermediet ($10 < Re < 1000$)

Digunakan persamaan **Ergun** :

$$f = \frac{W_f D_P \epsilon^3}{V_S^2 (1-\epsilon)L} = 150 \frac{\mu(1-\epsilon)}{\rho V_S D_P} + 1.75 = 150 / Re + 1.75 \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

Persamaan ini adalah yang paling sering digunakan dalam melakukan perhitungan faktor friksi pada kolom *packed bed*.



Gambar 2. 16 Skema Aliran Fluida Dalam Kolom *packed bed*

Dimana W_f adalah jumlah energi yang terdisipasi per unit massa fluida yang mengalir pada kolom, dan L adalah tinggi bed di dalam kolom. Sedangkan V_s adalah kecepatan superfisial yang merupakan perbandingan antara laju alir volumetrik fluida (Q) dengan luas permukaan bagian dalam kolom (A_T) :

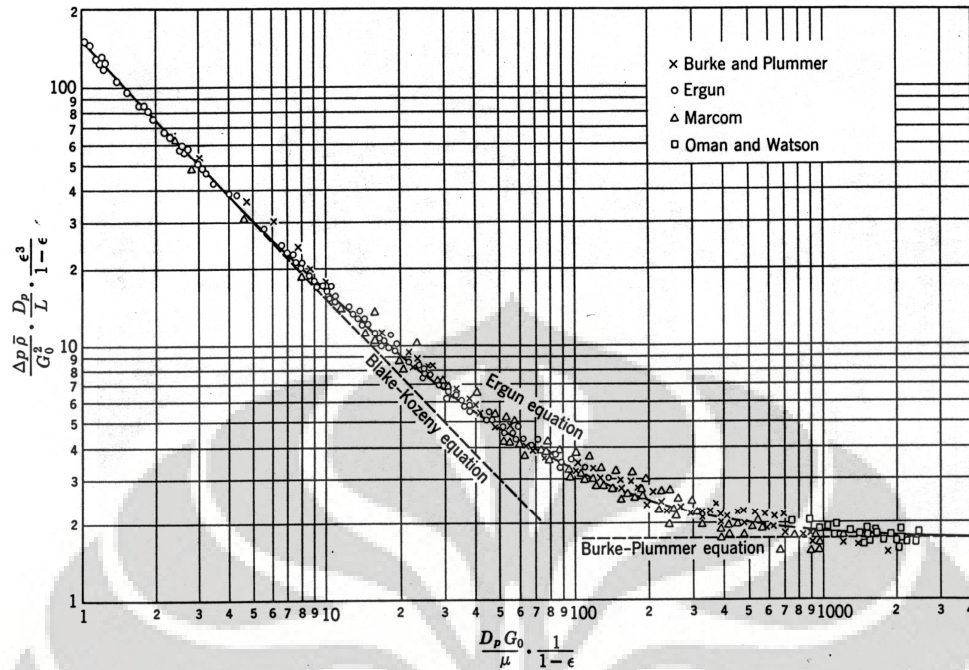
$$V_s = Q / A_T \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

ϵ disebut dengan *void fraction*, yaitu rasio antara volume void (ruang kosong di antara bed) dengan volume total bed yang terisi oleh bahan pengisi. D_p adalah partikel diameter ekuivalen dari bahan pengisi. D_p dapat ditentukan dengan persamaan:

$$a_v = \frac{4\pi \left(\frac{D_p}{2}\right)^2}{\frac{4}{3}\pi \left(\frac{D_p}{2}\right)^3} = 6 / D_p \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana a_v merupakan perbandingan antara luas permukaan partikel bahan pengisi dengan volume bahan pengisi yang memenuhi kolom.

Hubungan antara bilangan Reynolds, faktor friksi, serta jenis persamaan yang harus digunakan dapat dilihat pada Gambar 2.17.



Gambar 2. 17 Grafik Hubungan Faktor Friksi Terhadap Persamaan yang Digunakan

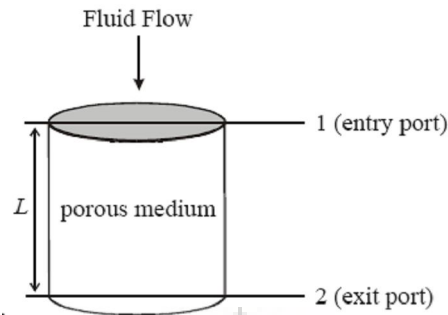
2.5.2 Pressure Drop Pada Kolom Packed Bed

Untuk memperoleh persamaan menghitung *pressure drop* pada kolom *packed bed*, digunakan perluasan Persamaan Bernoulli:

$$m^* \left(\frac{v_2^2}{2} + gz_2 + \frac{p_2}{\rho} - \frac{v_1^2}{2} - gz_1 - \frac{p_1}{\rho} \right) = - \frac{dW_f}{dt} - \frac{dW_s}{dt} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

Dengan membagi kedua ruas dalam persamaan diatas dengan laju alir massa (m^*), dan diasumsikan bahwa tidak ada kerja (*shaft work*) yang diberikan pada kolom, maka diperoleh:

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho} = -W_f \quad \dots\dots\dots (2.12)$$



Gambar 2. 18 Kontrol Volum Kolom *Packed Bed*

Pressure drop ($p_2 - p_1$) di sepanjang medium porous (bahan pengisi) dapat diperhitungkan dari persamaan (2.12) jika W_f dapat diketahui dari data faktor friksi dan variabel lain dalam persamaan tersebut diketahui. Namun biasanya, jika perubahan energi kinetik dan energi potensial nilainya relatif kecil terhadap W_f sehingga dapat diabaikan, maka persamaan (2.12) menjadi:

$$W_f = (p_1 - p_2)/\rho = \Delta p / \rho \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Persamaan ini biasanya merupakan pendekatan yang paling tepat untuk media porous karena besarnya luas area terbasahi akibat kontak antara bahan pengisi (*packing*) dan fluida yang mengalir dalam kolom menghasilkan disipasi friksional yang besar pula. Hal ini berarti bahwa kerja aliran yang dilakukan oleh fluida (kerja fluida disimbolkan oleh $\Delta p / \rho$) dapat diasumsikan seluruhnya didisipasikan untuk mengatasi hambatan akibat friksi, dengan perubahan energi kinetik dan potensial diabaikan. Jika persamaan (2.13) disubstitusikan dengan persamaan dasar untuk faktor friksi maka diperoleh persamaan berikut:

$$f = \frac{\Delta p D_{PE} \epsilon^3}{\rho V_S^2 (1 - \epsilon)L} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

Selanjutnya persamaan (2.14) di atas disubstitusikan ke dalam persamaan faktor friksi Blake-Kozeny, Burke-Plummer atau Ergun pada persamaan (2.6) – (2.8) untuk mendapatkan estimasi langsung nilai ΔP (*pressure drop*). Hasil substitusi persamaan (2.14) dengan ketiga persamaan tersebut adalah sebagai berikut:

Untuk Aliran Laminar (Re<10)

Hasil substitusi dengan persamaan **Blake-Kozeny**:

$$\Delta p = \frac{150\mu LV_s}{D_p^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \dots\dots\dots (2.15)$$

Untuk Aliran Turbulen (Re>1000)

Hasil substitusi dengan persamaan **Burke-Plummer**:

$$\Delta p = \frac{1.75\rho V_s^2 L}{D_p} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \dots\dots\dots (2.16)$$

Untuk Aliran Intermediet (10<Re<1000)

Hasil substitusi dengan persamaan **Ergun** :

$$\Delta p = \frac{150\mu V_s L_b}{D_p^2} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + \frac{1.75\rho V_s^2 L_b}{D_p} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \dots\dots\dots (2.17)$$

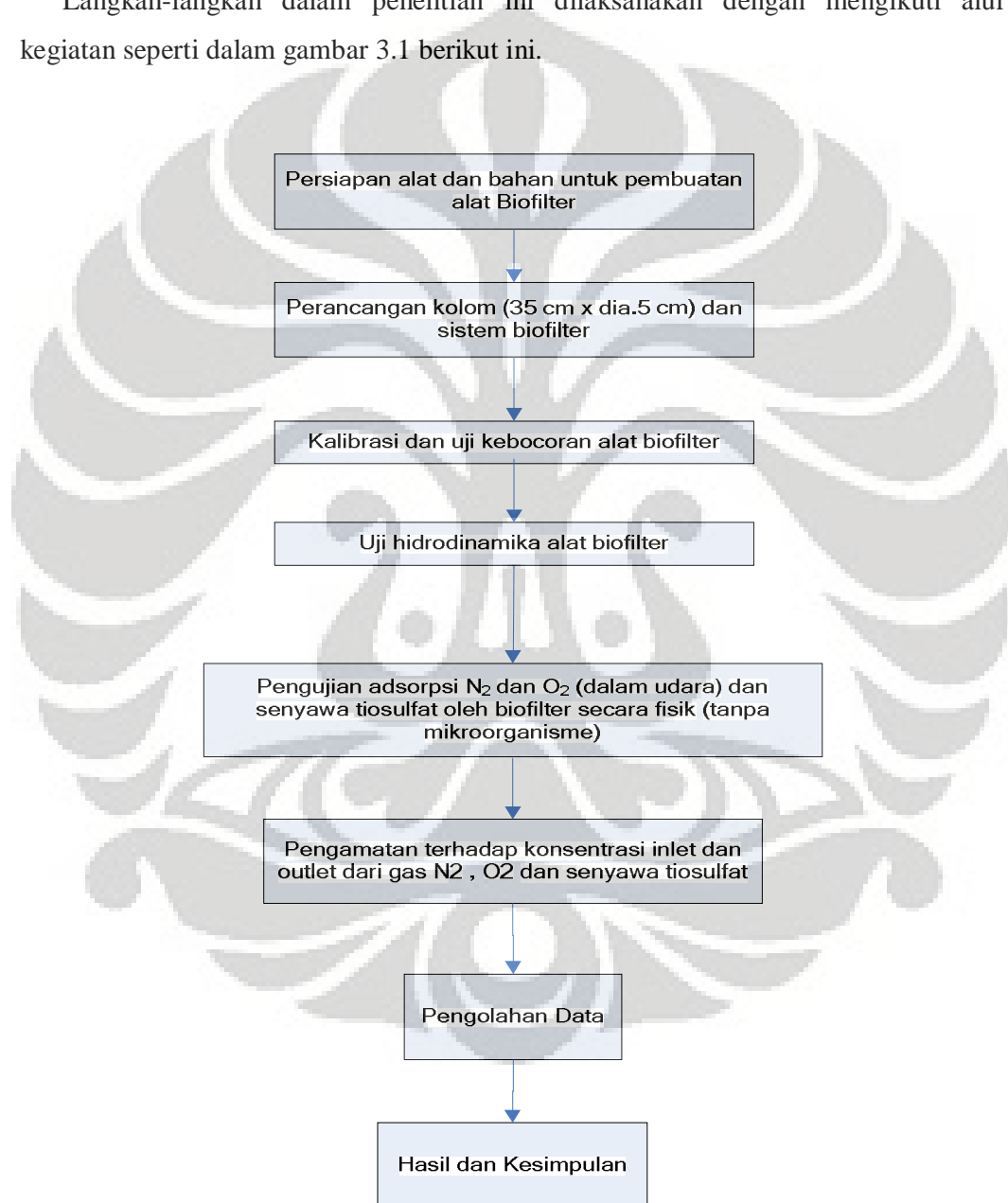
Dari ketiga persamaan tersebut, masing-masing dapat diperoleh hubungan antara Δp (*pressure drop*) dengan kecepatan superfisial fluida (V_s), tinggi bed yang berada dalam kolom serta diameter partikel bahan pengisi.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah dalam penelitian ini dilaksanakan dengan mengikuti alur kegiatan seperti dalam gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Pelaksanaan Penelitian

Secara umum penelitian yang akan dilakukan ini akan terdiri dari tiga tahapan berikut:

- Tahap 1 = Perancangan alat biofilter.
- Tahap 2 = Pengujian kinerja biofilter (uji kebocoran dan uji hidrodinamika)
- Tahap 3 = Pengujian adsorpsi N_2 dan O_2 (dalam udara) serta senyawa tiosulfat secara fisik.

Selanjutnya ketiga tahapan ini akan dijelaskan dengan rinci.

3.2.1 Tahap Perancangan Alat Biofilter

Keseluruhan alat biofilter yang dirancang dan dibangun adalah seperti yang terlihat dalam Gambar 3.2. Bagian paling utama dari keseluruhan sistem ini adalah berupa kolom kaca akrilik yang dimensi tinggi dan diameternya ditentukan melalui perhitungan pada proses perancangan kolom biofilter. Kolom ini memiliki dua buah penutup (atas dan bawah) dan total tiga buah saluran (*septum*) untuk fungsi yang berbeda. *Inlet port* yang terletak di tutup bagian bawah kolom merupakan saluran tempat masuknya gas yang akan diadsorpsi, sedangkan *outlet port* pada tutup bagian atas kolom adalah saluran tempat keluaran gas setelah adsorpsi yang kemudian dialirkan menuju ke *gas bubbler*. Tiga saluran lain terdapat di sisi kanan kolom, dimana septum paling atas dan bawah dihubungkan dengan manometer-U dan septum bagian tengah sampai saat ini belum memiliki fungsi apapun sehingga ditutup sepenuhnya dan tidak digunakan. Pada batas antara kolom dan tutup bagian bawah diberikan cakram penyaring (*filter disc*) untuk mencegah masuknya zeolit (*packing*) ke dalam selang yang digunakan untuk mengalirkan gas ke dalam kolom.

Kolom dan kedua penutupnya (bagian atas dan bawah) dihubungkan oleh cincin penyambung (*flange*) yang terbuat dari *stainless steel*. Pada setiap *flange* tersebut ditambahkan dua buah cincin silikon yang diameternya disesuaikan dengan diameter kolom, untuk mencegah kebocoran dari sekat yang ada.

Gas umpan masuk dialirkan dari bagian bawah kolom untuk memaksimalkan kontak dengan adsorben (zeolit). Sebelum masuk ke dalam kolom terlebih dahulu udara dari kompresor dihubungkan dengan sebuah *check valve*, dimana pemasangan valve ini berfungsi untuk mencegah aliran balik (*backflow*) udara ke kompresor sehingga laju aliran udara menjadi lebih stabil. Sedangkan gas keluaran yang merupakan gas hasil adsorpsi dialirkan melalui rangkaian selang silikon ke dalam

bubbler untuk menangkap molekul-molekul gas. *Bubbler* memiliki septum yang digunakan untuk tempat pengambilan sampel (*sampling*) dengan alat *syringe*, kemudian sampel gas tersebut dianalisa dengan alat kromatografi gas (GC-TCD) untuk ditentukan kandungan nitrogen (N_2) dan oksigen (O_2) di dalamnya.

3.2.1.1 Kolom Adsorpsi

Kolom yang digunakan sebagai tempat terjadinya adsorpsi gas ini terbuat dari bahan kaca akrilik (*Plexiglass*). Bahan tersebut dipilih dengan alasan biaya yang relatif murah, penanganan yang mudah serta tidak berwarna (transparan) sehingga memudahkan untuk melihat fenomena yang terjadi di dalam kolom tersebut selama proses *running*. Spesifikasi dari kolom adsorpsi ini baru dapat diketahui setelah dilakukan perhitungan pada perancangan alat.

3.2.1.2 Kompresor

Kompresor digunakan untuk mengalirkan udara sebagai gas umpan ke dalam kolom adsorpsi, sekaligus juga digunakan sebagai tempat pengaturan laju alir udara. Untuk mengalirkan udara, bagian *discharge* (keluaran) kompresor dapat dihubungkan langsung dengan *inlet port* pada kolom ataupun digabungkan terlebih dahulu dengan aliran uap thiosulfat jika diperlukan. Spesifikasi dari kompresor yang digunakan adalah sebagai berikut :

- Merk (*brand*) : GAST (General Electric)
- Daya : 1/6 HP (≈ 125 Watt)
- Tegangan : 220 V
- Kecepatan putaran : 1425 RPM

3.2.1.3 Manometer

Manometer digunakan sebagai alat untuk melihat beda tekanan (*pressure drop*) pada kolom adsorpsi ketika ada fluida yang dialirkan dengan laju alir tertentu. Manometer yang digunakan adalah tipe-U karena lebih mudah dalam pembuatan dan pembacaannya. Spesifikasi manometer yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Bahan : Pipa akrilik
- Fluida kerja : Air
- Ketinggian fluida kerja : Berkisar antara 7 – 10 cm

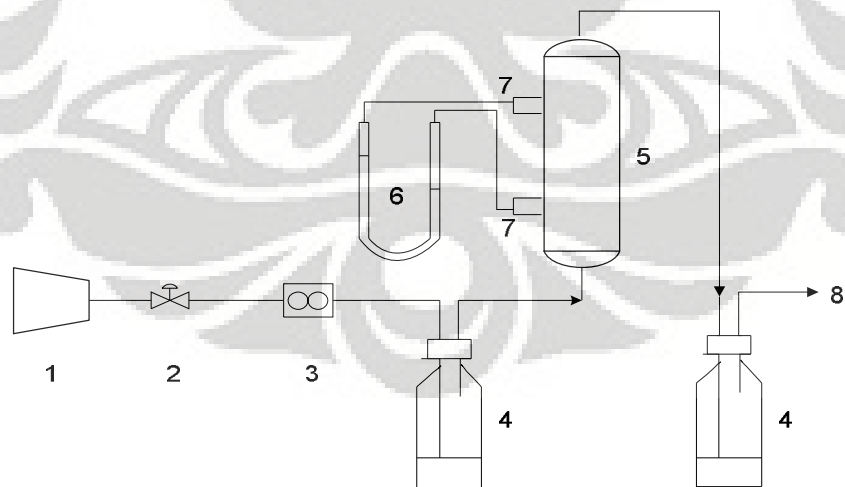
3.2.1.4 Bubbler

Bubbler digunakan untuk menangkap molekul-molekul gas agar terlarut dalam larutan yang ada di dalamnya. Komponen bubbler terdiri dari: sebuah erlenmeyer dengan volume 250 ml, sebuah stopper silikon yang digunakan untuk menutup lubang pada erlenmeyer, dan dua buah pipa-L untuk mengalirkan gas masuk dan keluar. Pipa untuk mengalirkan gas masuk diatur sedemikian rupa agar bagian bawahnya sedikit berada di dalam larutan, sementara pipa untuk gas keluaran berada di atas permukaan air. Spesifikasi untuk *bubbler* adalah sebagai berikut:

- Bahan erlenmeyer : Pyrex
- Volume larutan *bubbler* : 100 ml
- Diameter dalam pipa : 3 mm
- Diameter luar pipa : 6 mm
- Panjang pipa-L inlet : 27 cm
- Panjang pipa-L outlet : 23 cm

3.2.2 Tahap Pengujian Kebocoran dan Hidrodinamika Biofilter

Tahap selanjutnya dari penelitian ini adalah pengujian kebocoran dan hidrodinamika dari alat biofilter yang telah dirancang. Rancangan keseluruhan alat biofilter dapat dilihat dalam gambar berikut:



Gambar 3.2 Skema Alat Biofilter Skala Laboratorium. (1) Kompresor Udara (2) Check Valve (3) Flowmeter (4) Bubbler Sampling (5) Kolom Biofilter (6) Manometer (7) Septum (8) Gas Outlet

3.2.2.1 Kalibrasi Flowmeter Gas

Sebelum digunakan untuk pengujian, baik uji hidrodinamika maupun uji adsorpsi, flowmeter yang digunakan harus terlebih dahulu dikalibrasi. Tujuan dari proses kalibrasi ini adalah mendapatkan laju alir aktual (sesungguhnya) dari gas yang dialirkan ke dalam sistem biofilter. Hal ini dikarenakan pembacaan laju alir yang diset pada flowmeter belum tentu menghasilkan laju alir yang sama, tergantung pada jenis flowmeter serta jenis gas yang digunakan.

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

Dalam penelitian ini kalibrasi dibagi menjadi dua tahap, yaitu kalibrasi untuk flowmeter udara serta kalibrasi untuk flowmeter gas H₂S. Prosedur untuk kedua tahap tersebut sama, perbedaannya hanya terletak pada jenis gas yang dialirkan. Prosedur kalibrasi flowmeter gas adalah sebagai berikut:

- Menghubungkan kedua tube pada flowmeter dengan kompresor udara dan *bubble soap*, tube bagian bawah dihubungkan ke kompresor sedangkan tube bagian atas dihubungkan ke *bubble soap*.
- Mengatur tekanan pada kompresor agar tidak terlalu tinggi, disesuaikan dengan batas maksimum laju alir pada flowmeter yang akan dikalibrasi.
- Mengalirkan gas sesuai dengan laju alir yang diset pada flowmeter, sambil menekan pipet pada botol *bubble soap* tepat ketika gas dialirkan, sampai terlihat ada gelembung sabun yang berjalan di sepanjang botol.
- Hitung dan catat waktu yang dibutuhkan gelembung sabun untuk mencapai skala dari 0 sampai 10, untuk berbagai kondisi laju alir yang diset pada flowmeter.

Pengolahan Data Kalibrasi

Setelah diperoleh data waktu gelembung sabun ($t_{bubble\ soap}$) untuk berbagai variasi laju alir, dapat dihitung laju alir aktual gas yang dialirkan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$F = \frac{V_{bs} \cdot 60 \text{ detik}}{t_{bubble}} \dots\dots\dots (3.1)$$

Dimana V_{bs} = Skala volume yang terbaca pada *bubble soap* (skala 5-15)

t_{bubble} = Waktu yang dibutuhkan gelembung sabun dari 0 untuk mencapai V_{bs}

F = laju alir aktual hasil kalibrasi flowmeter (cc/min)

Dari data tersebut kemudian dapat dibuat kurva kalibrasi, yaitu kurva antara laju alir yang diset pada flowmeter (F_{set}) terhadap laju alir aktual hasil kalibrasi (F). Berdasarkan kurva tersebut dapat diperoleh persamaan garis yang sesuai, persamaan ini yang disebut persamaan kalibrasi. Selanjutnya persamaan inilah yang digunakan untuk mengeset laju alir pada flowmeter dalam menentukan laju alir aktual yang diinginkan.

3.2.2.2 Kalibrasi Kompresor

Kalibrasi kompresor dilakukan untuk mengetahui korelasi (hubungan) antara tekanan keluaran udara dari kompresor terhadap laju alir udara keluaran kompresor. Hal ini dilakukan jika tidak ada flowmeter yang menghubungkan antara kompresor dan kolom adsorpsi, sehingga sulit menentukan laju alir udara yang masuk ke kolom. Proses kalibrasi hampir sama dengan kalibrasi flowmeter gas, yaitu melibatkan kompresor dan *bubble soap* tetapi tanpa ada flowmeter.

Bubble soap yang digunakan untuk kalibrasi kompresor berbeda dengan yang digunakan dalam kalibrasi flowmeter, hal ini dikarenakan laju alir udara keluaran langsung dari kompresor jauh lebih besar dibandingkan udara keluaran dari flowmeter, sehingga *bubble soap* ukuran kecil (yang digunakan dalam kalibrasi flowmeter) tidak mampu mengakomodasi laju alir yang sangat besar tersebut.

Prosedur kalibrasi kompresor adalah sebagai berikut:

- Menghubungkan kompresor udara langsung dengan *bubble soap*.
- Mengatur tekanan pada kompresor agar tidak terlalu tinggi, disesuaikan dengan batas maksimum laju alir pada kompresor yang akan dikalibrasi.
- Mengalirkan gas (udara) sesuai dengan tekanan yang diset pada kompresor, sambil menekan pipet pada botol *bubble soap* tepat ketika gas dialirkan, sampai terlihat ada gelembung sabun yang berjalan di sepanjang botol.

- Hitung dan catat waktu yang dibutuhkan gelembung sabun untuk mencapai skala dari 0 cm sampai 30 cm pada penggaris, untuk berbagai kondisi tekanan yang diset pada kompresor.

Pengolahan Data Kalibrasi

Setelah diperoleh data waktu gelembung sabun ($t_{bubble \text{ soap}}$) untuk berbagai variasi tekanan kompresor, dapat dihitung laju alir aktual gas yang dialirkan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$F = \frac{\pi r_{bubble}^2 \cdot 30 \text{ cm}}{t_{bubble}} \dots\dots\dots (3.2)$$

Dimana t_{bubble} = Waktu yang dibutuhkan gelembung sabun dari 0 sampai 30 cm

r_{bubble} = Jari-jari kolom *bubble soap* yang digunakan (cm)

F = Laju alir aktual hasil kalibrasi flowmeter (cm³/sec)

Dari data tersebut kemudian dapat dibuat kurva kalibrasi, yaitu kurva antara tekanan yang diset pada kompresor (P_c) terhadap laju alir aktual hasil kalibrasi (F). Berdasarkan kurva tersebut dapat diperoleh persamaan garis yang sesuai, persamaan ini yang disebut persamaan kalibrasi. Selanjutnya persamaan inilah yang digunakan untuk mengeset tekanan pada kompresor dalam menentukan laju alir aktual gas yang diinginkan.

Faktor Koreksi Kompresor

Dari proses pengkalibrasian kompresor yang telah dilakukan, harus dapat dipastikan bahwa hasil kalibrasi tersebut memiliki tingkat keakuratan yang tinggi. Hal ini sangat diperlukan untuk mencegah terjadinya kesalahan/deviasi dalam hasil perhitungan maupun pengolahan data-data selanjutnya yang terkait dengan laju alir kompresor. Untuk itu diperlukan suatu faktor koreksi terhadap hasil kalibrasi kompresor yang dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$F_c = \frac{P_H - P_L}{P_H} = \frac{\Delta P}{P_H}$$

Dimana : P_L = Batas tekanan minimum kompresor

P_H = Batas tekanan maksimum kompresor

ΔP = Beda batas tekanan maksimum dan minimum ($P_H - P_L$)

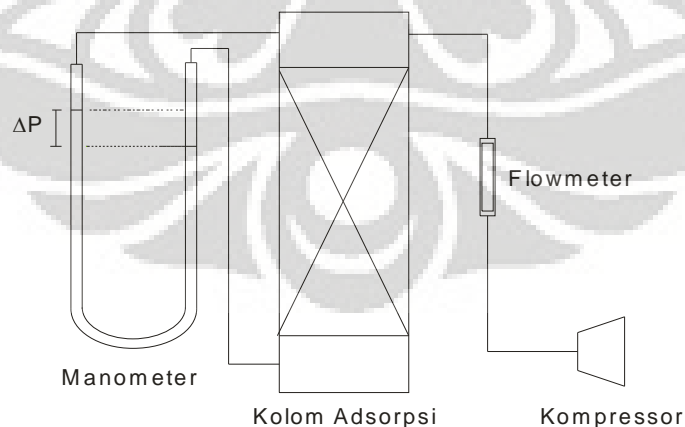
3.2.2.4 Uji Kebocoran

Uji kebocoran dilakukan dengan cara mengalirkan udara di sepanjang sistem biofilter tersebut, kemudian melihat apakah terjadi kebocoran pada setiap komponen sistem tersebut. Jika diketahui terjadi kebocoran pada selang atau sambungan pipa, maka dilakukan isolasi pada bagian yang bocor. Sedangkan jika kebocoran terjadi pada komponen/alat tertentu seperti kolom adsorpsi, botol humidifikasi atau *sampling port* maka dilakukan penggantian dengan alat yang baru untuk menjaga agar sistem tetap berjalan dengan baik.

3.2.2.5 Uji Hidrodinamika

Pengujian ini dilakukan untuk menentukan jatuh tekanan udara (*pressure drop*) ΔP di sepanjang kolom adsorpsi kering, sebagai fungsi dari laju alir udara (*air flowrate*) v yang dialirkan ke dalam kolom. Uji hidrodinamika ini dilakukan dengan mekanisme sebagai berikut:

- Kolom adsorpsi yang akan digunakan harus berada dalam keadaan kering. Hal ini dapat dilakukan dengan cara mengalirkan udara dengan laju alir cukup tinggi di sepanjang kolom sehingga tidak ada lagi uap air yang terlihat baik di dinding kolom maupun pada bahan pengisi kolom (zeolit).
- Menghubungkan masing-masing bagian atas dan bawah kolom dengan alat manometer air untuk membaca tekanannya ketika udara dialirkan.
- Melakukan pembacaan manometer yang berupa perbedaan (selisih) tekanan bagian atas dan bawah kolom untuk berbagai variasi laju alir udara.



Gambar 3. 3 Skema Alat Uji Hidrodinamika Kolom Adsorpsi Biofilter

Setelah pengambilan data, kemudian diplot antara *pressure drop* (ΔP) kolom dengan laju alir udara (Q) dalam skala logaritma, untuk menentukan hubungan antara kedua variabel tersebut. Hasil yang diharapkan dari pengujian ini adalah hubungan antara log *pressure drop* (ΔP) dan log laju alir udara (Q) adalah linear, sesuai dengan persamaan Ergun:

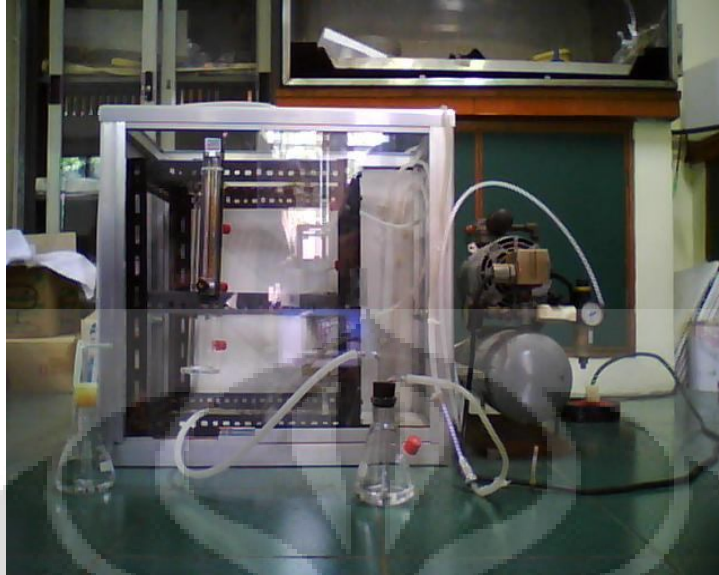
$$\Delta p = \frac{150\mu V_s L_b (1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75\rho V_s^2 L_b (1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} \dots\dots (3.3)$$

3.2.3 Pengujian Adsorpsi Secara Fisik oleh Biofilter

3.2.3.1 Uji Adsorpsi Udara

Setelah dapat dipastikan bahwa pada sistem biofilter yang telah dirancang tidak terdapat kebocoran dan secara hidrodinamika mampu bekerja dengan baik, maka tahap selanjutnya dalam penelitian ini adalah melakukan pengujian adsorpsi gas N_2 dan O_2 dalam udara secara fisik tanpa menggunakan medium maupun bakteri.

Skema desain alat biofilter dapat dilihat pada gambar 3.2 di atas. Kolom kaca yang berisi zeolit yang telah dipersiapkan sebelumnya dimasukkan ke dalam kolom adsorpsi. Udara dialirkan melalui kompresor ke dalam *bubbler*. Gas tersebut lalu dialirkan ke dalam kolom kaca dengan laju alir tertentu, serta temperatur gas yang dijaga konstan pada kisaran 28 ± 2 °C. Proses pengujian ini dilakukan secara kontinu selama jangka waktu tertentu. Pada akhirnya konsentrasi N_2 dan O_2 inlet dan outlet secara kontinyu diukur menggunakan alat kromatografi gas (GC). Pengujian adsorpsi ini dinyatakan selesai ketika konsentrasi N_2 dan O_2 dalam gas outlet sudah tidak berubah.



Gambar 3. 4 Rangkaian Alat Uji Adsorpsi Udara

3.2.3.2 Pengukuran Konsentrasi N₂ dan O₂ dalam Sampel

Analisa sampel dilakukan setiap 15 menit selama operasi pengujian adsorpsi. Alat yang digunakan untuk menganalisa sampel keluaran kolom adsorpsi adalah Kromatografi Gas (GC-TCD) dengan spesifikasi dan kondisi operasi:

- Kolom isian *Molecular Sieve 5A*
- Gas *carrier* yang digunakan adalah Helium (He)
- Temperatur injektor/detektor = 130 °C
- Temperatur kolom (inisial/final) = 50 °C

Hasil analisa dengan alat GC-TCD ini adalah berupa plot puncak-puncak berikut waktu tinggal (*retention time*) dari setiap komponen dalam gas aliran keluaran kolom adsorpsi. Dari hasil plot ini kemudian dapat dilakukan analisa kuantitatif untuk menentukan konsentrasi gas dalam aliran keluaran.

Analisa kuantitatif untuk pengukuran konsentrasi dilakukan dengan memperhatikan besaran luas puncak dari masing-masing komponen aliran gas keluaran. Dalam penelitian ini besaran luas puncak yang diperhatikan hanya puncak untuk N₂ dan O₂. Selanjutnya luas puncak N₂ dan O₂ dari hasil analisa GC dibandingkan dengan hasil kalibrasi yang telah dilakukan terhadap masing-masing

komponen. Hasil perbandingan ini dapat digunakan untuk menentukan volum N_2 dan O_2 yang terkandung dalam aliran gas keluaran.

3.2.3.3 Kalibrasi Senyawa Tiosulfat

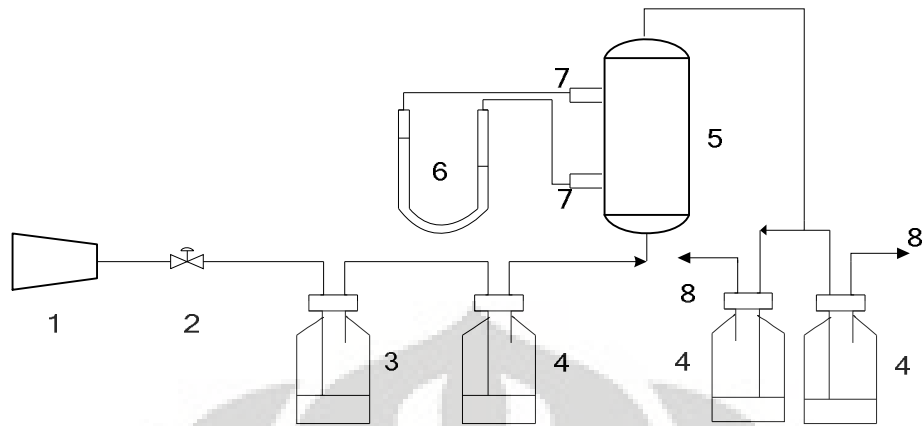
Sebelum dilakukan pengujian adsorpsi menggunakan senyawa tiosulfat, terlebih dahulu harus dilakukan kalibrasi terhadap larutan senyawa tiosulfat yang akan digunakan. Kalibrasi ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui konsentrasi senyawa tiosulfat yang dapat terbawa dalam fasa gas ketika larutan ini di-*bubbling* dengan aliran udara dari kompresor, sehingga dapat diketahui konsentrasi larutan natrium tiosulfat yang digunakan jika ingin menghasilkan gas umpam yang mengandung senyawa tiosulfat dengan konsentrasi tertentu (misal 200 ppm). Selain itu juga ingin diketahui hubungan antara konsentrasi senyawa tiosulfat dalam fasa gas dan waktu, sehingga dapat diketahui kapan terjadi penurunan konsentrasi tiosulfat dan memerlukan penambahan kembali.

Untuk mencapai tujuan tersebut maka kalibrasi dibagi menjadi dua tahap, yaitu dengan melakukan variasi konsentrasi larutan natrium tiosulfat dan variasi waktu kalibrasi. Hasil kalibrasi pertama merupakan plot grafik antara konsentrasi larutan tiosulfat terhadap konsentrasi senyawa tiosulfat dalam fasa gas, sedangkan hasil kalibrasi kedua merupakan plot grafik antara konsentrasi senyawa tiosulfat dalam fasa gas terhadap waktu.

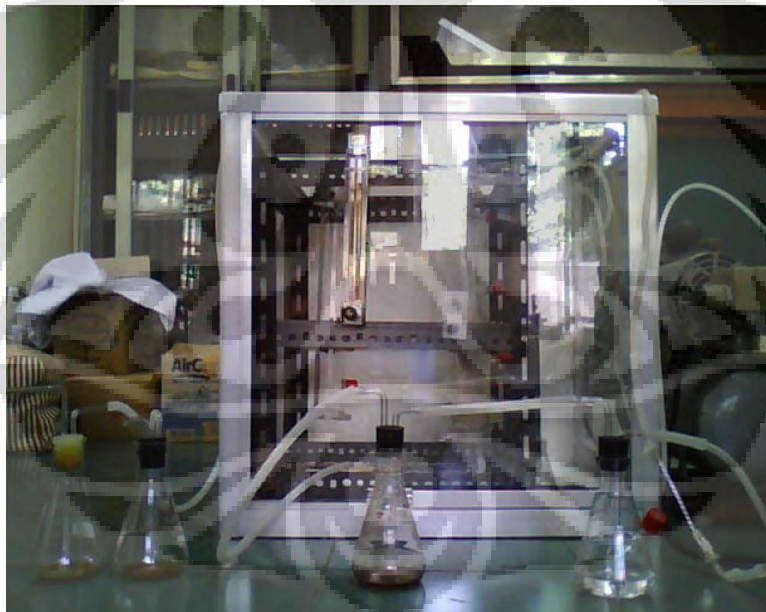
3.2.3.4 Uji Adsorpsi Senyawa Tiosulfat

Tahap terakhir dalam penelitian ini adalah pengujian adsorpsi senyawa sulfur dengan hasil rancangan alat biofilter. Tujuan dari dilakukannya tahap ini adalah hanya untuk mengetahui apakah rancangan alat biofilter yang telah dibangun mampu mengadsorpsi senyawa sulfur, sesuai dengan tujuan awal dari keseluruhan penelitian yang dilakukan. Sedangkan pembahasan mengenai kinerja adsorben (zeolit alam Lampung) dan penambahan bakteri *Thiobacillus* dilakukan oleh Aryo PH dan Esty Maulidyasti F.

Rancangan alat untuk pengujian adsorpsi senyawa tiosulfat ini seperti yang diperlihatkan pada gambar berikut :



Gambar 3. 5 Skema Alat Biofilter untuk Uji Adsorpsi Tiosulfat. (1) Kompresor Udara (2) *Check Valve* (3) *Bubbler* Tiosulfat (4) *Trapper* (Larutan Iodin) (5) Kolom Biofilter (6) Manometer (7) Septum (8) Gas Outlet



Gambar 3. 6 Rangkaian Alat Uji Adsorpsi Senyawa Tiosulfat

Secara umum susunan alat biofilter yang digunakan untuk pengujian ini sama dengan uji adsorpsi udara, hanya saja pada pengujian adsorpsi tiosulfat ini diperlukan komponen tambahan seperti bubbler untuk larutan natrium tiosulfat dan larutan pemerangkap (*trapper solution*) yang berupa larutan iodin. Senyawa sulfur yang

digunakan diperoleh dari hasil *bubbling* larutan natrium tiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), sehingga diharapkan gas yang keluar dari *bubbler* mengandung sejumlah uap tiosulfat ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$). Sedangkan larutan iodine (I_2) digunakan sebagai larutan penangkap, sehingga senyawa tiosulfat (dalam fasa gas) yang keluar dari *bubbler* dapat terperangkap dalam larutan iodin.

Seperti pada uji adsorpsi udara, prosedur yang dilakukan dalam pengujian adsorpsi senyawa tiosulfat juga tidak jauh berbeda. Udara dialirkan dari kompresor melalui *check valve* ke dalam *bubbler* yang berisi larutan natrium tiosulfat selanjutnya melalui *bubbler* berisi larutan iodin pertama. Keberadaan senyawa tiosulfat dalam gas ini diindikasikan dengan perubahan warna larutan iodin yang berwarna coklat pekat menjadi coklat muda atau kuning tua. Gas umpan yang diharapkan telah mengandung senyawa tiosulfat ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) ini kemudian masuk ke melalui bagian bawah kolom biofilter untuk diadsorpsi kandungan tiosulfatnya. Gas keluaran kemudian keluar dari bagian atas kolom dan dialirkan menuju *bubbler* yang berisi larutan iodin kedua dan ketiga dengan cara dibagi (*split*) dengan sambungan bercabang. Pembagian ini dilakukan agar dapat diperoleh dua buah data sekaligus dalam satu waktu. Selanjutnya ketiga *bubbler* yang berisi sampel (senyawa tiosulfat dalam larutan iodin) diambil untuk dititrasi dengan metode titrasi iodometri.

3.2.3.5 Analisa Konsentrasi Senyawa Tiosulfat dalam Sampel

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, metode penentuan konsentrasi senyawa tiosulfat ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) dalam sampel dilakukan dengan metode titrasi iodometri. Prosedur untuk menentukan kandungan senyawa $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ dalam sampel adalah sebagai berikut:

1. Larutan sampel ditambahkan larutan iodin 0,025 N hingga berwarna coklat kembali seperti warna coklat larutan iodin asli. Volume larutan iodin yang ditambahkan ini kemudian dicatat.
2. Tambahkan indikator larutan kanji 1 % sebanyak tiga tetes ke dalam sampel tersebut hingga larutan berubah warna menjadi biru tua.
3. Kemudian larutan tersebut dititrasi dengan larutan natrium tiosulfat 0,025 N (0,05 M) hingga larutan berubah warna menjadi bening. Volume larutan natrium tiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) yang ditambahkan juga dicatat.

Setelah titrasi kandungan senyawa tiosulfat ($S_2O_3^{2-}$) dalam sampel dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

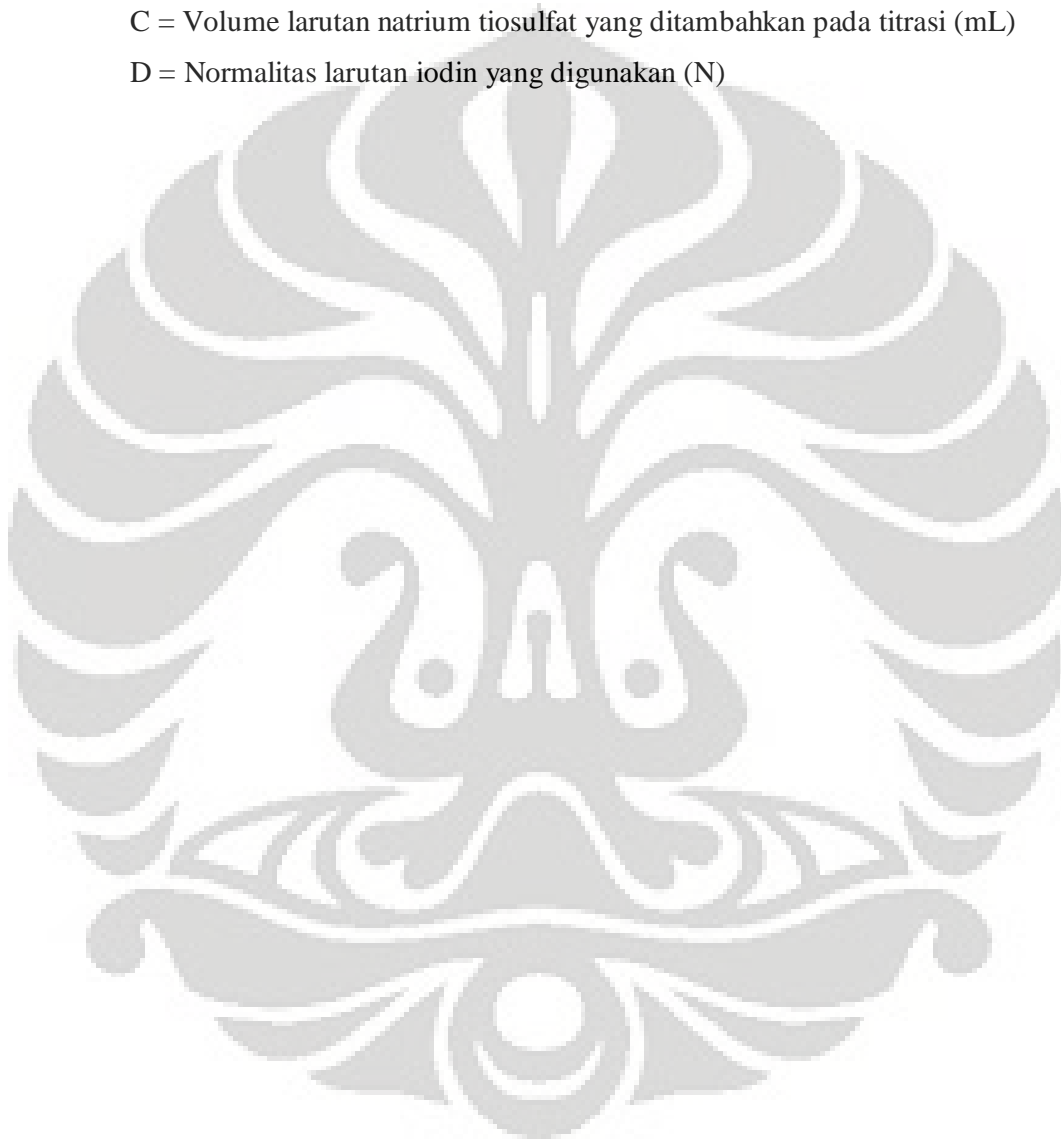
$$S_2O_3^{2-} (mg/L) = \frac{[(A \times B) - (C \times D)]1,12.10^5}{C} \dots\dots\dots (3.4)$$

dimana: A = Volume larutan iodin yang ditambahkan (mL)

B = Normalitas larutan iodin yang digunakan (N)

C = Volume larutan natrium tiosulfat yang ditambahkan pada titrasi (mL)

D = Normalitas larutan iodin yang digunakan (N)

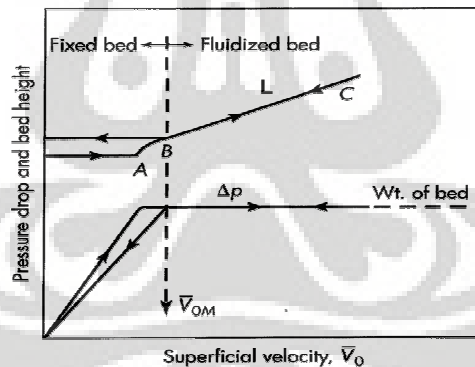


BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemilihan Jenis Kolom Adsorpsi

Seperti yang telah dijelaskan dalam tinjauan pustaka, terdapat dua jenis kolom isian (*packed column*) yang biasa digunakan untuk proses separasi yaitu kolom *fixed bed* dan kolom terfluidisasi (*fluidized bed*). Jika dibandingkan, laju perpindahan massa (*mass transfer rates*) antara adsorbat dan adsorben pada kolom *fluidized bed* umumnya lebih baik dari kolom *fixed bed*, dikarenakan kontak yang lebih optimal antara bahan pengisi (*packing*) dan fluida. Namun jika dilihat dari tinjauan mekanika fluida dan dari hasil penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya, ternyata kolom *fluidized bed* baru dapat berlaku pada kisaran bilangan Reynolds (*Re*) yang tinggi, atau dapat dikatakan pada kondisi laju alir fluida yang lebih tinggi dibandingkan pada kondisi kolom *fixed bed*.



Gambar 4. 1 Grafik Hubungan Kecepatan Superfisial Fluida dengan Jenis Kolom

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mereduksi kandungan gas senyawa sulfur, dimana gas ini merupakan gas yang sangat berbahaya bagi manusia apabila terakumulasi dalam jumlah besar di lingkungan bebas. Dengan pertimbangan keamanan (*safety*) dan keterbatasan kondisi yang ada maka dalam penelitian ini dipilih kolom jenis *fixed bed* untuk digunakan sebagai kolom adsorpsi.

4.2 Perancangan Alat Biofilter

4.2.1. Sifat-sifat bahan yang digunakan

- **Bahan Pengisi Kolom (*Packing Material*)**

Bahan pengisi untuk kolom biofilter yang digunakan dalam penelitian ini adalah zeolit alam Lampung (klionoptilolit) dengan diameter partikel rata-rata antara 1,7 – 2 mm. Berdasarkan data yang bersumber dari literatur Pusat Sumber Daya Geologi (<http://www.dim.esdm.go.id>) diperoleh besarnya densitas rata-rata zeolit alam Lampung adalah 2,2 g/cm³. Sedangkan untuk mempermudah perhitungan bentuk partikel zeolit diasumsikan berbentuk bulat sempurna (sferikal) dengan spherisitas (Φ_s) sama dengan 1.

- **Fluida**

Fluida yang digunakan sebagai gas umpan ke kolom biofilter adalah udara yang dihasilkan dari kompresor. Sifat-sifat udara berikut yang digunakan dalam penelitian dihitung pada kondisi tekanan = 1 atm dan temperatur ruang = 25 °C :

Densitas (ρ_f)	1,16	kg/m ³
Viskositas (μ)	0,0000185	N.s/m ²

- **Kolom Biofilter**

Kolom biofilter yang digunakan terbuat dari bahan kaca akrilik (dengan densitas $\rho_c=1,19$ g/cm³). Pemilihan ini didasarkan pada pertimbangan bahwa material tersebut memiliki kemudahan dalam penanganan dan perawatannya, serta memiliki warna yang bening transparan sehingga akan memudahkan untuk melihat fenomena yang terjadi di dalam kolom selama proses operasi.

Sedangkan jenis kolom yang digunakan lebih dipilih jenis kolom unggun tetap (*fixed-bed*) dibandingkan unggun terfluidisasi (*fluidized bed*). Pemilihan ini didasarkan pada pertimbangan berikut:

- Kolom unggun terfluidisasi digunakan pada kondisi dimana aliran fluidanya memiliki bilangan Reynolds (Re) yang besar atau berarti bahwa aliran fluida memiliki kecepatan superfisial dan laju alir yang sangat tinggi. Sedangkan dalam penelitian ini hanya melibatkan aliran fluida dengan laju alir yang kecil

dan sedang, maka kolom unggul tetap lebih dipilih dibandingkan unggul terfluidisasi.

- Tujuan dari penelitian ini pada akhirnya adalah mendesain suatu sistem biofilter, untuk itu sangatlah penting untuk mempertimbangkan faktor biologis dalam perancangan sistem ini. Karena nantinya biofilter ini pada operasinya akan melibatkan mikroorganisme yang harus memiliki kondisi sesuai untuk hidup dan berkembang, maka kolom unggul tetap dirasa lebih sesuai digunakan karena pada kolom ini kondisi mikroorganisme relatif lebih stabil dan tidak terganggu oleh aliran fluida yang relatif tidak terlalu besar.

4.2.2 Perhitungan Perancangan Alat Biofilter

Sebagaimana yang telah dijelaskan dalam sub-bab 2.5 pada tinjauan pustaka, dalam perancangan (*sizing*) suatu kolom adsorpsi diperlukan beberapa parameter penting yang harus diketahui yaitu :

- *Void fraction* unggul zeolit dalam kolom (ε)
- *Void fraction* unggul pada kondisi fluidisasi minimum (ε_{mf})
- Tinggi dan berat unggul pada kondisi fluidisasi minimum ($L_{b,mf}$ dan $W_{b,mf}$)
- Luas area (*cross-sectional*) total kolom (A_T)
- Kecepatan fluidisasi minimum (u_{mf})
- Dimensi Kolom (Diameter dan Tinggi Kolom)

Berikut ini akan dijelaskan mengenai persamaan-persamaan yang digunakan serta hasil perhitungan parameter-parameter tersebut. Sedangkan cara perhitungan secara rinci akan dijelaskan kemudian di dalam lampiran makalah.

1. *Void fraction* unggul zeolit dalam kolom (ε)

Fraksi kekosongan (*void fraction*) dari unggul suatu kolom adsorpsi didefinisikan sebagai volume dari ruang kosong yang berada di antara partikel-partikel unggul zeolit, dapat dihitung dengan persamaan :

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{bed}}{\rho_{solids}} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{1,19 \text{ g/cm}^3}{2,2 \text{ g/cm}^3} = 0,4509$$

Dimana ρ_{bed} adalah densitas kolom biofilter dan ρ_{solids} merupakan densitas partikel unggun (zeolit) yang mengisi kolom. Penjelasan mengenai penurunan persamaan ini dapat dilihat pada lampiran.

Berdasarkan persamaan tersebut dapat dihitung fraksi kekosongan (ε) unggun zeolit adalah 0,4509.

2. Void fraction unggun pada kondisi fluidisasi minimum (ε_{mf})

Pada kondisi fluidisasi minimum ada beberapa parameter yang harus dipenuhi agar kondisi aliran fluida tidak sampai menyebabkan unggun mencapai kondisi terfluidisasi. Salah satu parameternya adalah fraksi kekosongan pada fluidisasi minimum (ε_{mf}). Nilai ε_{mf} dapat dihitung dengan korelasi yang ditemukan Wen dan Yu :

$$\phi_s \varepsilon_{mf}^3 \cong \frac{1}{14} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

Dimana ϕ_s merupakan spherisitas partikel zeolit dalam unggun (diasumsikan bernilai 1). Setelah perhitungan dengan persamaan tersebut diperoleh nilai ε_{mf} adalah sebesar 0,415.

Berdasarkan salah satu literatur (*Unit Operations, University of Austin Texas*) diketahui bahwa nilai standar ε_{mf} untuk partikel sferikal pada kolom adsorpsi berkisar antara 0,4 – 0,45. Karena dari hasil perhitungan diperoleh nilai ε_{mf} pada penelitian ini berada di antara kisaran tersebut, maka dapat disimpulkan fraksi kekosongan unggun zeolit pada kolom biofilter yang digunakan masih memenuhi spesifikasi dari kolom unggun tetap (*fixed bed*).

3. Tinggi dan berat unggun pada kondisi fluidisasi minimum ($L_{b,mf}$ dan $W_{b,mf}$)

Parameter lain yang harus diperhitungkan pada kondisi fluidisasi minimum adalah tinggi dan berat unggun zeolit yang digunakan. Tinggi unggun zeolit yang digunakan dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$L_{b,mf} = \frac{M_{bed}}{S(1 - \varepsilon_{mf})\rho_p} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

dimana S adalah luas penampang kolom dan ρ_p adalah densitas partikel zeolit.

Setelah dilakukan perhitungan diperoleh nilai $L_{b,mf}$ adalah sebesar 11,88 cm atau dibulatkan menjadi 12 cm. Ini berarti bahwa tinggi maksimum unggun zeolit yang diperbolehkan (dengan kondisi operasi dan kolom yang disesuaikan dalam penelitian ini) agar tetap berada pada kondisi unggun tetap adalah 12 cm, dan jika melebihi nilai ini maka karakter unggun akan mulai berubah menjadi unggun terfluidisasi, dimana hal ini tidak diinginkan.

Untuk perhitungan berat unggun zeolit pada kondisi fluidisasi minimum dilakukan secara langsung. Pengukuran dilakukan dengan mengisi kolom biofilter dengan sejumlah zeolit sampai tinggi unggun mencapai 12 cm, kemudian semua zeolit tersebut dikeluarkan lagi untuk ditimbang dengan neraca elektronik. Setelah ditimbang diketahui nilai $W_{b,mf}$ adalah ± 176 gram.

4. Luas Penampang (*Cross-Sectional Area*) Total Kolom

Luas penampang total kolom (A_T) merupakan luas area pada kolom yang mungkin dilewati oleh fluida ketika mengalir di sepanjang kolom. Nilai A_T dapat dihitung dengan persamaan luas lingkaran biasa :

$$A_T = \frac{1}{4}\pi D_{in}^2 \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

Dimana D_{in} merupakan diameter bagian dalam kolom biofilter.

Setelah dihitung diperoleh nilai luas penampang total kolom biofilter (A_T) adalah sebesar $0,0019625 \text{ m}^2$ ($19,625 \text{ cm}^2$).

5. Kecepatan Fluidisasi Minimum (u_{mf})

Parameter yang paling penting dalam perhitungan hidrodinamika kolom adsorpsi adalah kecepatan fluidisasi minimum (u_{mf}), dimana kecepatan ini adalah kecepatan maksimum fluida yang diperbolehkan untuk mengalir di dalam kolom agar tetap berfungsi sebagai kolom unggun tetap (*fixed bed*). Sebagaimana yang telah dijelaskan pada Gambar 4.1, terdapat suatu titik tertentu dimana kecepatan fluida yang tinggi akan menyebabkan gaya tarik (*drag*) dan gaya apung (*buoyancy*) fluida dapat mengalahkan besarnya gaya gravitasi sehingga unggun akan terekspansi dan terjadi fluidisasi, kondisi inilah yang disebut dengan fluidisasi minimum.

Kecepatan fluidisasi minimum dari fluida yang mengalir dalam kolom unggun tetap dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$(\rho_p - \rho_f)g = \frac{1,75\rho u_{mf}^2(1 - \varepsilon_{mf})}{D_p \varepsilon_{mf}^3} + \frac{150u_{mf} \mu(1 - \varepsilon_{mf})^2}{D_p^2 \varepsilon_{mf}^3 \rho_f} \dots\dots\dots (4.5)$$

Untuk mempermudah perhitungan persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi persamaan kuadrat :

$$E = \frac{C \times u_{mf}^2}{D} + \frac{A \times u_{mf}}{B}$$

Karena variabel A, B, C, D dan E merupakan bilangan desimal yang membentuk persamaan kuadrat yang rumit, maka untuk menyelesaikan persamaan tersebut dilakukan metode “Trial and Error” dengan prosedur sebagai berikut:

1. Menghitung terlebih dahulu nilai A,B,C,D dan E yang ada dalam persamaan dimana nilai:

$$\begin{aligned} A &= 150 \mu (1 - \varepsilon_{mf})^2 & D &= D_p \varepsilon_{mf}^3 \\ B &= D_p^2 \varepsilon_{mf}^3 \rho_f & E &= (\rho_p - \rho_f)g \\ C &= 1,75 \rho_f (1 - \varepsilon_{mf}) \end{aligned}$$

2. Melakukan trial terhadap nilai u_{mf} sehingga nilai E pada hasil perhitungan no.1 sama dengan nilai E hasil trial. Ketika nilai E persamaan = E trial, proses trial dihentikan dan nilai u_{mf} yang dimasukkan tersebut merupakan penyelesaian dari persamaan di atas.

Hasil perhitungan kecepatan dan laju alir volumetrik fluidisasi minimum kolom biofilter dengan metode “Trial and Error” adalah sebagai berikut (cara perhitungan dapat dilihat pada lampiran) :

Kecepatan Fluidisasi Minimum : $u_{mf} = 1.37391 \text{ m/s}$
Laju Alir Volumetrik Fluidisasi Minimum : $Q_{mf} = 0.002696301 \text{ m}^3/\text{s}$

Berdasarkan teori pada tinjauan pustaka, agar kolom biofilter hasil perancangan layak digunakan sebagai kolom unggun tetap, maka nilai kecepatan superfisial fluida (V_s) selama operasi tidak boleh melebihi nilai u_{mf} . Dan berdasarkan hasil perhitungan hidrodinamika (lihat lampiran) kolom diperoleh hasil bahwa nilai V_s selama operasi tidak pernah melebihi nilai u_{mf} di atas (1,37391 m/s), sehingga dapat disimpulkan bahwa kecepatan fluida yang digunakan dalam penelitian ini masih memenuhi spesifikasi untuk digunakan pada kolom unggun tetap.

6. Dimensi Kolom

Perhitungan dimensi kolom adsorpsi unggun tetap (*fixed bed*) mencakup perhitungan diameter (D_k) dan tinggi (h) kolom (“*Chemical Process Equipment*” hal. 120-125). Cara perhitungan akan dijelaskan sebagai berikut.

• Diameter Kolom

Dimensi diameter kolom biofilter dapat ditentukan dari persamaan berikut :

$$D = \sqrt{\frac{\bar{Q}_{operation}}{\bar{u}_{operation} (\pi / 4)}} \dots\dots\dots (4.6)$$

dimana $Q_{operation}$ dan $u_{operation}$ merupakan laju alir volumetrik rata-rata dan kecepatan rata-rata fluida yang digunakan pada pengoperasian biofilter. Sebelumnya telah ditetapkan bahwa besarnya laju alir volumetrik (Q) dan kecepatan (u) fluida selama operasi disesuaikan dengan kemampuan kompresor yang ada, yaitu antara 160 – 710 cm³/s. Setelah dihitung diperoleh :

Tabel 4. 1 Hasil Perhitungan Kecepatan Superfisial dan Laju ALir Volumetrik Rata-rata

P kompresor (bar)	Q (cm ³ /s)	Q (m ³ /s)	u (m/s)
0.5	145.076	0.000145076	0.07392
0.6	194.429	0.000194429	0.09907

0.7	243.782	0.000243782	0.12422
0.8	293.135	0.000293135	0.14937
0.9	342.489	0.000342489	0.17452
1.0	391.842	0.000391842	0.19966
1.1	441.195	0.000441195	0.22481
1.2	490.549	0.000490549	0.24996
1.3	539.902	0.000539902	0.27511
1.4	589.255	0.000589255	0.30026
1.5	638.609	0.000638609	0.32541
Rata-rata		0.000342489	0.17452

Setelah memasukkan nilai yang diperlukan dan dihitung menggunakan persamaan di atas maka dapat diperoleh nilai diameter kolom biofilter yang diperlukan :

$$\text{Diameter kolom} = 4,9987 \text{ cm} \approx 5 \text{ cm}$$

- **Tinggi Kolom**

Sedangkan tinggi kolom biofilter (h) dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut ini :

$$L = \frac{M_{\text{packing}}}{\rho_p (1 - \varepsilon_{mf}) (\pi / 4) D^2} + TDH \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

Untuk menghitung persamaan tersebut telah diketahui :

- Ditetapkan massa bahan pengisi (*packing*) yang digunakan dalam kolom tidak melebihi 0,2 kg (200 g). Dasar penetapan ini bersumber dari salah satu jurnal bioteknologi (Chung ,1996) yang menetapkan kondisi tersebut sebagai kondisi optimal pada biofilter rancangannya. Sehingga diketahui $M_{\text{packing}} = 200 \text{ g}$.
- Dari hasil perhitungan sebelumnya diperoleh nilai $\varepsilon_{mf} = 0,415$.
- Densitas bahan pengisi (zeolit) : $\rho_p = 2,2 \text{ g/cm}^3$.
- TDH (*Transport Disengagement Height*), dihitung dari grafik 6.10(i) pada buku “*Chemical Process Equipment*”. Dengan memasukkan nilai $u_o = \bar{u}_{\text{operation}} = 22,185 \text{ cm/s}$, diperoleh nilai $TDH \approx 27,5 \text{ cm}$

Setelah memasukkan parameter yang diperlukan ke dalam persamaan, diperoleh:

$$\text{Tinggi kolom} = 7,914 \text{ cm} + 27,5 \text{ cm} = 35,414 \text{ cm} \approx 35 \text{ cm}$$

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, maka dalam penelitian ini diputuskan untuk membuat kolom biofilter dengan dimensi diameter dalam (D_{in}) 5 cm dan tinggi (h) 35 cm.

4.3 Uji Kebocoran Sistem Biofilter

Sebelum dilakukan pengujian hidrodinamika dan adsorpsi, terlebih dahulu harus dilakukan uji kebocoran terhadap alat biofilter yang telah dirancang. Pengujian ini bertujuan untuk melihat ada atau tidaknya kebocoran yang terjadi pada alat biofilter, baik pada kolom adsorpsi, daerah-daerah penyambungan (pada selang silikon), maupun pada sekat-sekat yang memungkinkan keluarnya gas dari dalam sistem. Proses pengujian ini cukup sederhana, hanya dilakukan dengan mengalirkan udara dari kompresor ke sepanjang sistem biofilter kemudian melihat apakah bagian-bagian yang mengalami kebocoran. Kebocoran terjadi apabila ada gas yang keluar dari dalam sistem, dan biasanya hal ini diindikasikan dengan adanya bunyi berdesis pada bagian yang bocor ketika udara dialirkan.

Pengujian tahap pertama adalah uji kebocoran kolom biofilter. Pengujian dilakukan dengan meneteskan larutan air sabun pada bagian/ sekat yang berpotensi mengalami kebocoran. Bagian yang dimaksud ini terletak pada sekat antara badan kolom dan tutup kolom (atas dan bawah) yang direkatkan dengan menggunakan *flange*. Ketika ditetaskan air sabun, ternyata ada buih-buih yang muncul pada bagian tersebut yang mengindikasikan adanya kebocoran. Karena kebocoran yang terjadi cukup besar sehingga tidak dapat diatasi dengan hanya memberikan *thread seal* ataupun *silicon grease*, maka diputuskan untuk merekatkan sambungan tersebut secara permanen dengan memberikan lem silikon. Setelah penambahan tersebut dilakukan kembali uji kebocoran, dan ternyata sudah tidak ada lagi gas yang keluar dari bagian kolom tersebut.

Pengujian tahap kedua dilakukan terhadap bagian-bagian lain dari sistem biofilter tersebut, seperti pada sambungan selang silikon, outlet keluaran kompresor serta *gas bubbler*. Selama pengujian diketahui terjadi beberapa kebocoran kecil pada sambungan selang dan *gas bubbler*. Karena kebocoran yang terjadi kecil, maka cukup diatasi dengan penambahan *thread seal* pada bagian-bagian yang bocor.

4.4 Pengujian Hidrodinamika

4.4.1 Pengukuran Jatuh Tekanan (Pressure Drop) Kolom

Salah satu parameter penting yang harus diperhatikan dalam pengujian hidrodinamika suatu alat proses (dalam hal ini kolom adsorpsi) adalah jatuh tekanan (*pressure drop*) kolom, karena hal ini dapat mempengaruhi kondisi aliran fluida yang mengalir dalam kolom tersebut yang juga akan mempengaruhi besarnya kecepatan maksimum fluida yang diperbolehkan untuk mengalir di sepanjang kolom.

Untuk memperoleh data jatuh tekanan kolom, udara dialirkan dengan laju alir tertentu menggunakan kompresor menuju bagian bawah kolom. Bagian atas dan bawah kolom biofilter ini sebelumnya telah dihubungkan ke manometer dengan cara menyambungkan septum atas dan bawah pada bagian samping kolom ke kedua *tube* manometer dengan selang silikon. Manometer yang digunakan berbentuk pipa-U dan berisi fluida kerja berupa air biasa. Data yang diambil adalah perbedaan ketinggian fluida kerja pada manometer yang kemudian dapat dikonversikan menjadi besaran tekanan dalam satuan mmH₂O.

Kesulitan yang timbul dalam pengukuran jatuh tekanan kolom ini terletak pada besarnya laju alir udara yang dialirkan ke sepanjang kolom. Pada awalnya, antara sambungan kompresor dan kolom adsorpsi diletakkan flowmeter untuk mengontrol laju alir udara yang masuk ke dalam kolom, namun setelah dilakukan pengujian ternyata tidak ada perbedaan ketinggian yang terlihat pada manometer yang mengindikasikan bahwa tidak ada jatuh tekanan yang terdeteksi pada kolom tersebut. Setelah diteliti lebih lanjut, diketahui bahwa flowmeter yang digunakan hanya berkapasitas maksimum 150 cc/menit sehingga tidak sesuai untuk digunakan pada kolom adsorpsi sebesar itu karena laju alirnya terlalu kecil. Dengan adanya keterbatasan tersebut, maka diputuskan untuk tidak menggunakan flowmeter sehingga pengontrolan laju alir udara dilakukan langsung dari kompresor yang telah dikalibrasi terlebih dahulu sebagaimana telah dijelaskan pada metode penelitian.

4.4.2 Perhitungan Hidrodinamika

Setelah melakukan pengambilan data jatuh tekanan (*pressure drop*) kolom biofilter serta menghitung parameter-parameter yang dibutuhkan untuk perhitungan hidrodinamika, maka tahap selanjutnya adalah melakukan pengolahan atas data-data tersebut dengan menggunakan persamaan yang sesuai hingga dapat ditentukan kelayakan atas hasil rancang bangun biofilter yang telah dibuat, yang ditinjau dari perspektif mekanika fluida dan operasi teknik kimia.

Perhitungan hidrodinamika suatu kolom unggun tetap (*fixed bed*) mencakup kondisi aliran fluida yang terwakili oleh besarnya bilangan Reynolds (*Re*), kecepatan superfisial dan faktor friksi fluida serta penurunan tekanan (*pressure drop*) teoritis yang diperlukan untuk perbandingan terhadap data hasil eksperimen.

Berikut ini akan dijelaskan mengenai cara perhitungan tersebut satu persatu, sedangkan untuk hasil pengolahan data hidrodinamika selengkapnya dapat dilihat pada bagian lampiran.

1. Kecepatan Superfisial Fluida

Kecepatan superfisial merupakan fungsi dari laju alir volumetrik fluida (*Q*) per satuan luas penampang total kolom (*A_T*), atau secara matematis ditulis sebagai:

$$V_s = \frac{Q}{A_T} \quad \dots\dots\dots (4.8)$$

Laju alir volumetrik fluida ditentukan dengan menggunakan persamaan hasil kalibrasi kompresor udara. Berdasarkan hasil pengujian hidrodinamika, pada variasi tekanan kompresor 0,5 – 1,5 bar diperoleh kisaran kecepatan superfisial fluida (udara) 0,074 – 0,325 m/s.

2. Kondisi Aliran Fluida

Kondisi aliran suatu fluida di dalam kolom adsorpsi dapat diwakili oleh besarnya bilangan tak berdimensi yang disebut bilangan Reynolds (*Re*). Besarnya bilangan ini dapat menentukan apakah aliran fluida berada dalam kondisi laminar, intermediet atau turbulen. Besarnya *Re* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$Re = \frac{\rho V_s D_p}{\mu(1 - \varepsilon)} \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

Dari hasil pengolahan data (lihat lampiran), pada pengujian dengan kisaran kecepatan superfisial fluida 0,074 – 0,325 m/s, diperoleh besarnya Re dari aliran fluida adalah 14,327 sampai dengan 63,066. Berdasarkan sub-bab 2.5, maka dapat diketahui bahwa aliran fluida dalam kolom biofilter ini berada dalam kondisi intermediet (transisi), karena nilai Re berada dalam kisaran 10 sampai 1000.

3. Penurunan Tekanan (*Pressure Drop*) Teoritis

Penurunan tekanan (ΔP) teoritis ditentukan dengan menggunakan persamaan Ergun (persamaan 2.12). Alasan pemilihan penggunaan persamaan ini dan bukan persamaan Blake-Kozeny atau Burke-Plummer didasarkan pada besarnya nilai Re aliran fluida yang besarnya antara 15 – 64, sehingga memenuhi kondisi yang ditentukan dalam persamaan Ergun ($10 < Re < 1000$). Nilai ΔP teoritis dihitung menggunakan persamaan Ergun berikut ini:

$$\Delta p = \frac{150\mu u_0 L_b (1-\varepsilon)^2}{D_p^2 \varepsilon^3} + \frac{1.75\rho u_0^2 L_b (1-\varepsilon)}{D_p \varepsilon^3} \dots\dots\dots (4.10)$$

4. Faktor Friksi

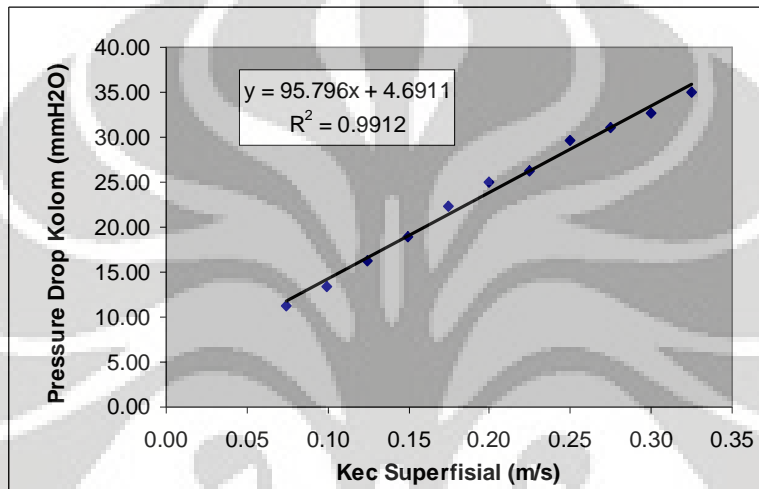
Faktor friksi fluida (f) ditentukan dengan menggunakan penurunan persamaan Ergun :

$$f = \frac{150}{Re} + 1.75 \dots\dots\dots (4.11)$$

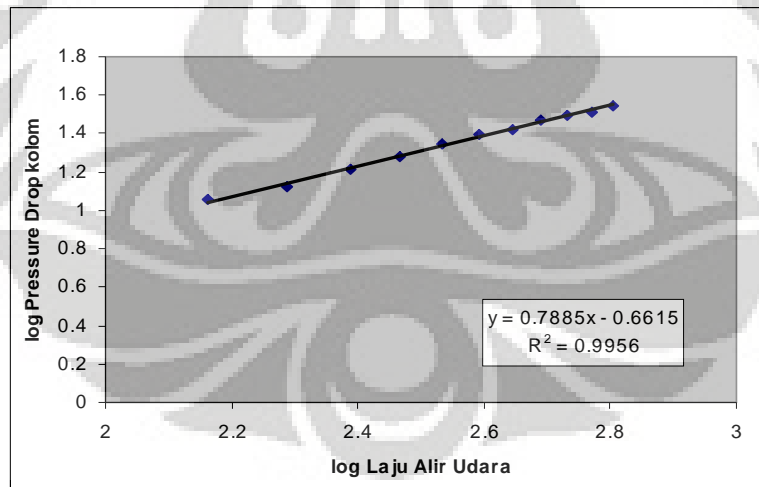
Pemilihan persamaan ini dikarenakan dalam perhitungan penurunan tekanan (*pressure drop*) kolom digunakan persamaan Ergun, karena terdapat kaitan yang sangat erat antara faktor friksi (f) dengan *pressure drop* (ΔP) sehingga perhitungan faktor friksi juga dilakukan dengan penurunan persamaan Ergun.

4.4.3 Pembahasan Hasil Pengolahan Data

Pengambilan data jatuh tekanan kolom dilakukan pada rentang tekanan kompresor 0,5 – 1,5 bar atau jika dikonversikan ke dalam satuan laju alir dan dikalikan faktor koreksi adalah sekitar 145 – 638 cm³/s. Hasil pengambilan data beda tekanan kolom dapat dilihat pada lampiran. Pada grafik-grafik berikut dapat dilihat jatuh tekanan kolom pada berbagai laju alir udara.



(a)



(b)

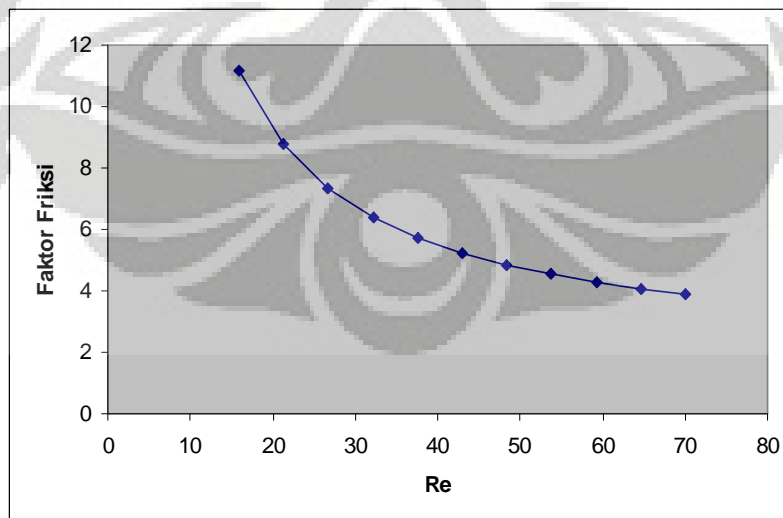
Gambar 4. 2 Profil Aliran Fluida selama Uji Hidrodinamika (a) Kec.Superfisial vs. Pressure Drop (b) log Laju Alir Udara vs. Pressure Drop

Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa untuk rentang kecepatan superfisial fluida antara 0 – 0,4 m/s, jatuh tekanan kolom bervariasi antara 10 sampai 35

mmH₂O. Pada kecepatan udara terendah 0,07392 m/s, jatuh tekanan kolom adalah sebesar 11,33 mmH₂O, sedangkan pada kecepatan udara tertinggi 0,32541 m/s jatuh tekanan kolom adalah sebesar 35 mmH₂O.

Gambar 4.2(a) menunjukkan hubungan antara kecepatan superfisial terhadap jatuh tekanan kolom biofilter selama pengujian hidrodinamika. Kecenderungan gambar yang dihasilkan menunjukkan bahwa pada kondisi kecepatan superfisial udara yang semakin besar akan menghasilkan jatuh tekanan kolom yang semakin besar pula. Hasil ini telah sesuai persamaan Ergun yang menyatakan bahwa korelasi (hubungan) antara kecepatan superfisial fluida (u_o) dan jatuh tekanan (Δp) pada kolom unggun tetap adalah linear. Hal ini disebabkan pada kecepatan superfisial fluida yang semakin tinggi akan menyebabkan perubahan tiba-tiba akibat ekspansi atau kontraksi pada aliran fluida di sepanjang unggun zeolit, yang mengakibatkan perbedaan tekanan yang semakin besar di sepanjang kolom dan menghasilkan jatuh tekanan yang semakin besar pula.

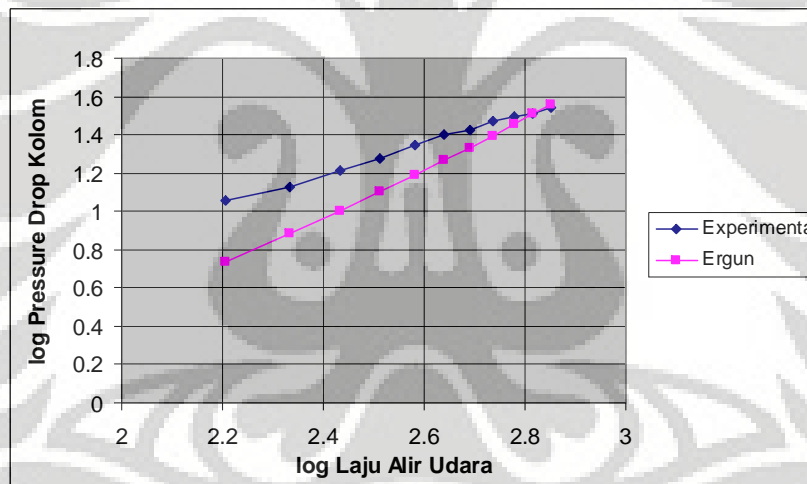
Sedangkan pada Gambar 4.2(b) menunjukkan hubungan antara log laju alir udara terhadap log jatuh tekanan kolom. Gambar tersebut menunjukkan korelasi yang linear, dan berhubungan dengan penjelasan dari grafik sebelumnya dimana kecepatan superfisial fluida yang semakin besar akan menghasilkan jatuh tekanan kolom yang semakin besar pula. Karena kecepatan superfisial merupakan fungsi dari laju alir volumetrik udara ($v = Q/A_T$), maka laju alir volumetrik udara yang semakin besar juga akan berdampak pada semakin besarnya jatuh tekanan kolom.



Gambar 4. 3 Hubungan Bilangan Reynolds (Re) Fluida terhadap Faktor Friksi

Gambar 4.3 menunjukkan plot antara bilangan Reynolds (Re) fluida terhadap faktor friksi selama pengujian hidrodinamika. Kecenderungan dari gambar tersebut menunjukkan bahwa untuk nilai Re yang semakin tinggi akan berdampak pada semakin kecilnya faktor friksi di dalam kolom. Hal ini dikarenakan selama fluida mengalir di sepanjang saluran (*channel*) di dalam unggun zeolit, terjadi penyempitan luas permukaan saluran (*sudden contraction*) yang akhirnya menyebabkan aliran fluida mengalami kehilangan friksi (*friction loss*). Karena bilangan Reynolds (Re) merupakan fungsi dari kecepatan superfisial fluida (berbanding lurus), maka dengan semakin besarnya nilai Re , maka kecepatan superfisial fluida juga semakin besar yang berdampak pada semakin besarnya *friction loss* pada fluida. Fenomena ini sesuai dengan persamaan *friction loss*, dimana kehilangan friksi (h_{fc}) berbanding lurus kuadrat dengan kecepatan fluida:

$$h_{fc} = K_c \frac{V_b^2}{2g_c}$$



Gambar 4. 4 Perbandingan Hasil Eksperimental dengan Persamaan Ergun

Gambar 4.4 menunjukkan perbandingan antara nilai jatuh tekanan kolom (*pressure drop*) yang diperoleh dari hasil pengambilan data (eksperimental) dengan nilai teoritis yang dihitung melalui persamaan Ergun. Dari plot gambar tersebut dapat dilihat bahwa data eksperimental mengalami deviasi (penyimpangan) dari persamaan Ergun. Faktor yang mempengaruhi terjadinya deviasi ini kemungkinan akibat asumsi yang digunakan dalam perhitungan, terkait dengan sferisitas partikel zeolit dalam unggun. Dalam perhitungan sferisitas partikel zeolit diasumsikan bernilai 1, sedangkan dalam kenyataannya partikel zeolit yang digunakan tidak sepenuhnya

sferikal sehingga nilai sferisitas (ϕ) seharusnya kurang dari 1. Karena dalam perhitungan dalam persamaan Ergun variabel sferisitas merupakan denominator (penyebut), maka nilai sferisitas yang semakin kecil (kurang dari 1) akan menyebabkan nilai jatuh tekanan (*pressure drop*) semakin besar. Hal ini menjelaskan penyebab terjadinya perbedaan nilai *pressure drop* eksperimental dan teoritis.

Faktor lain yang menjadi penyebab terjadinya deviasi ini adalah dari hasil kalibrasi kompresor. Ketika kalibrasi, pada kondisi tekanan rendah level tekanan pada kompresor tidak stabil, dalam artian bahwa laju alir udara dari kompresor menjadi berubah-ubah (tidak konstan). Variabel laju alir fluida sendiri merupakan parameter yang sangat penting dalam menghitung jatuh tekanan pada kolom adsorpsi, sehingga kesalahan dalam perhitungan laju alir udara akan menyebabkan perbedaan yang cukup signifikan pada nilai jatuh tekanan kolom. Hal ini menjelaskan penyebab perbedaan nilai jatuh tekanan (eksperimental dan teoritis) yang cukup jauh pada kondisi laju alir udara yang rendah. Tetapi pada Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa pada kondisi laju alir udara yang semakin tinggi, perbedaan (deviasi) yang terjadi semakin kecil, sehingga dapat dikatakan bahwa hasil pengambilan data jatuh tekanan eksperimental juga menjadi semakin akurat jika dibandingkan dengan hasil teoritis dari persamaan Ergun .

4.5 Uji Adsorpsi Udara

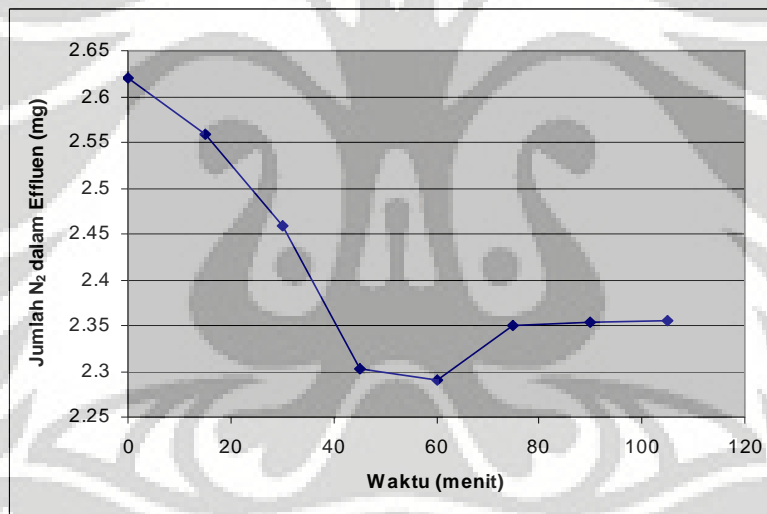
Setelah pengujian hidrodinamika kolom biofilter menunjukkan bahwa rancangan alat memenuhi spesifikasi jika ditinjau dari segi mekanika fluida, maka tahap selanjutnya yang dilakukan adalah melakukan pengujian adsorpsi, untuk melihat apakah rancangan biofilter ini juga mampu melakukan proses adsorpsi dengan baik. Untuk mencapai tujuan ini pengujian dilakukan dengan gas umpan udara terlebih dahulu, baru kemudian dengan senyawa sulfur jika pengujian dengan udara berjalan dengan baik.

Untuk pengujian adsorpsi awal ini digunakan bahan pengisi kolom berupa zeolit alami tanpa aktivasi terlebih dulu, tetapi telah dilakukan pre-kalsinasi sebelumnya, yaitu pemanasan dengan oven pada temperatur 110 °C. Pemanasan ini hanya bertujuan untuk menghilangkan kandungan uap air dalam zeolit, tanpa mengubah sruktur atau sifat fisik/kimia zeolit itu sendiri. Sedangkan untuk gas umpan berasal dari aliran udara kompresor.

Dalam pengujian ini dilakukan reduksi kandungan gas nitrogen (N_2) dan oksigen (O_2) yang terdapat dalam gas umpan udara oleh partikel adsorben (zeolit) dalam kolom biofilter. Hasil adsorpsi tersebut dapat dilihat dalam Tabel 4.2 – 4.3 dan Gambar 4.5 – 4.7 berikut ini :

Tabel 4. 2 Perbandingan Hasil N_2 dan O_2 yang Teradsorpsi oleh Zeolit Alami

T (menit ke-)	Konsentrasi (mg/mL)		% Reduksi	
	N_2	O_2	N_2	O_2
0	2.6206	1.8636	0	0
15	2.5589	1.8435	2.357644	1.075907
30	2.4580	1.7561	6.205907	5.770272
45	2.3024	1.6809	12.14461	9.80245
60	2.2907	1.6910	12.59022	9.259122
75	2.3508	1.7071	10.29602	8.398162
90	2.3532	1.7078	10.20589	8.361451
105	2.3558	1.6952	10.10576	9.03396

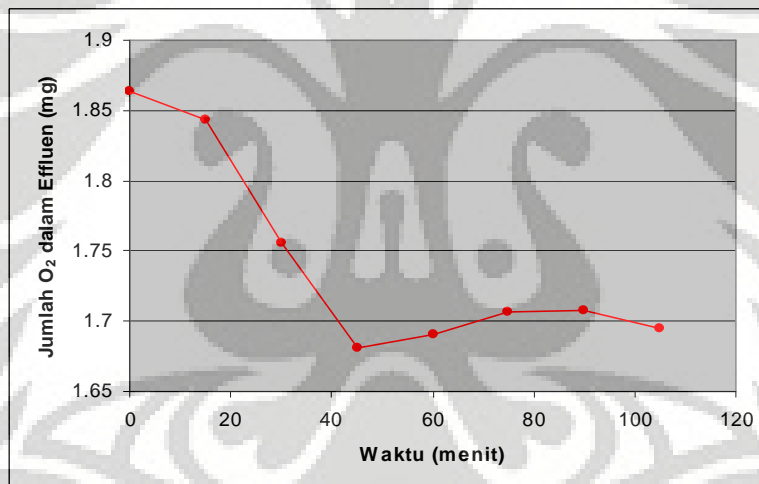


Gambar 4. 5 Profil Konsentrasi N_2 dalam Effluen pada Uji Adsorpsi Udara Menggunakan Zeolit Alam Lampung

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa gas nitrogen dapat langsung teradsorpsi sejak awal operasi. Sejak menit ke-0 sampai dengan menit ke-60 konsentrasi N_2 dalam aliran gas keluaran (effluen) cenderung berkurang dari 2,62 mg/mL sampai 2,29 mg/mL, dimana ini merupakan konsentrasi terendah N_2 dalam gas effluen. Setelah menit ke-60, konsentrasi N_2 dalam effluen cenderung meningkat kemudian konstan. Kenaikan konsentrasi N_2 ini mengindikasikan bahwa zeolit telah mulai jenuh melakukan adsorpsi, tetapi belum sampai kondisi benar-benar jenuh. Seharusnya

konsentrasi N_2 akan semakin meningkat hingga konsentrasi N_2 pada effluen sama dengan konsentrasi awalnya, sehingga dapat dikatakan bahwa disini terjadi penyimpangan. Hal ini diperkirakan terjadi akibat kurang lamanya waktu operasi sehingga belum terlihat kondisi jenuh dari zeolit.

Pada proses adsorpsi O_2 , gas oksigen tidak langsung teradsorp secara signifikan pada awal operasi sebagaimana halnya nitrogen, tetapi baru mulai pada saat pengambilan data kedua (menit ke-15). Gas O_2 mulai teradsorp secara signifikan sejak menit ke-15 (1,87 mg/mL) hingga menit ke-45 (1,68 mg/mL). Setelah menit ke-45 konsentrasi gas O_2 dalam effluen relatif konstan, dimana hal ini mengindikasikan bahwa adsorben (zeolit) sudah mulai mengalami kejenuhan dalam proses adsorpsi. Seharusnya tren grafik setelah menit ke-45 menunjukkan kenaikan konsentrasi O_2 dalam effluen sampai sama dengan konsentrasi masukan, namun hal ini tidak terlihat dalam grafik. Seperti halnya pada adsorpsi N_2 , hal ini dimungkinkan akibat kurangnya waktu operasi, serta terjadinya kompetisi antara molekul nitrogen dan oksigen.



Gambar 4. 6 Profil Konsentrasi O_2 dalam Effluen pada Uji Adsorpsi Udara Menggunakan Zeolit Alam Lampung

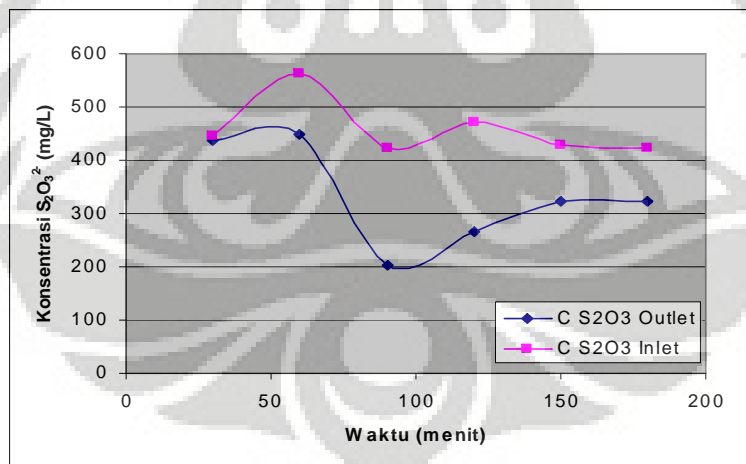
Sebagaimana telah diketahui bahwa ukuran molekul adsorbat ikut mempengaruhi daya adsorpsi, dimana molekul adsorbat harus berukuran sama atau lebih kecil dari ukuran adsorbennya. Dari hasil karakterisasi BET untuk zeolit alami diketahui diameter porinya adalah $17,2 \text{ \AA}$ sedangkan diameter kinetik molekul N_2 dan O_2 ($3,64 \text{ \AA}$ dan $3,46 \text{ \AA}$) sama-sama berukuran lebih kecil pori zeolit sehingga memungkinkan kedua molekul tersebut dapat terserap dan melibatkan kompetisi antar keduanya. Adanya kompetisi antara molekul N_2 dan O_2 dapat dibuktikan dari hasil

adsorpsi pada tabel 4.2 di atas. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa zeolit cenderung lebih kuat mengadsorpsi molekul nitrogen dibanding oksigen, yang diindikasikan dengan lebih tingginya persentase reduksi maksimum N₂ (12,59 %) dari O₂ (9,80 %).

Dari hasil pengujian ini dapat disimpulkan bahwa kinerja alat biofilter dalam mereduksi gas N₂ dan O₂ dalam udara cukup baik, sehingga penelitian layak dilanjutkan ke tahap selanjutnya yaitu pengujian adsorpsi menggunakan senyawa tiosulfat.

4.6 Uji Adsorpsi Senyawa Tiosulfat

Tahap pengujian terakhir dalam penelitian ini adalah pengujian adsorpsi dengan menggunakan senyawa sulfur (dalam bentuk tiosulfat) sebagai gas umpannya. Tujuan dari dilakukannya tahap ini adalah untuk membuktikan bahwa rancangan alat biofilter mampu melakukan adsorpsi senyawa sulfur, sebelum digunakan gas H₂S sebagai gas umpan pada penelitian selanjutnya. Hal ini semata-mata dilakukan karena keterbatasan gas umpan H₂S yang dimiliki, sehingga diperlukan kepastian yang tinggi sebelumnya bahwa hasil rancangan alat biofilter ini mampu mereduksi senyawa sulfur dengan baik. Hasil pengujian adsorpsi senyawa tiosulfat ini dapat dilihat pada Gambar 4.7 berikut :



Gambar 4. 7 Profil Konsentrasi S₂O₃²⁻ pada Uji Adsorpsi Tiosulfat

Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa konsentrasi tiosulfat (S₂O₃²⁻) yang masuk tidak konstan, hal ini dikarenakan gas tiosulfat yang masuk ke dalam kolom merupakan hasil *bubbling* larutan natrium tiosulfat (Na₂S₂O₃) sehingga jumlah gas yang terbentuk sangat tergantung dari kondisi tekanan serta temperatur dalam

erlenmeyer (*bubbler*) yang digunakan. Pada saat larutan natrium tiosulfat di-*bubbling* oleh aliran udara, maka ion tiosulfat ($S_2O_3^{2-}$) akan terurai seperti reaksi berikut :



Senyawa SO_3 merupakan senyawa yang lebih mudah larut di dalam sulfida, oleh karena itu SO_3 menjadi fasa terdispersi yang lebih banyak terkandung dalam aliran udara yang keluar dari *bubbler*.

Konsentrasi tiosulfat yang terkandung dalam sampel inlet dan outlet pada menit ke-30 relatif tidak berubah (± 440 mg/L), hal ini menandakan bahwa proses adsorpsi yang berlangsung masih sangat sedikit. Sedangkan mulai pada menit ke-60 hingga ke-90 konsentrasi outlet tiosulfat menurun tajam sebanyak 32 % hingga mencapai konsentrasi outlet terendah yaitu 201,8 mg/L, menunjukkan adanya aktivitas adsorpsi tiosulfat yang cukup besar pada permukaan zeolit alami. Setelah itu konsentrasi tiosulfat kembali naik dan kemudian konstan yang mengindikasikan bahwa zeolit yang digunakan sudah mulai jenuh mengadsorpsi molekul tiosulfat.

Tabel 4. 3 Hasil Adsorpsi Ion Tiosulfat ($S_2O_3^{2-}$) oleh Zeolit Alami

C $S_2O_3^{2-}$ Inlet	C $S_2O_3^{2-}$ Outlet	C/Co
446.9248	436.64544	0.977
562.0832	447.83424	0.79674
423.8976	201.80496	0.47607
472.69376	266.09408	0.562931
429.3184	323.12896	0.752656
422.2848	322.1344	0.762837

Jika dibandingkan dengan hasil pengujian adsorpsi N_2 dan O_2 , pada adsorpsi senyawa tiosulfat (S_2O_3) ini kolom biofilter menunjukkan kinerja yang jauh lebih baik, hal ini dapat terlihat dari persentase reduksi tiosulfat yang dapat mencapai 48 % konsentrasi inlet, sedangkan persentase reduksi N_2 dan O_2 hanya mencapai 12,14 % dan 9,80 %. Hal ini dikarenakan ukuran diameter molekul anion tiosulfat ($S_2O_3^{2-}$) ($2,01 \text{ \AA} \times 1,47 \text{ \AA}$) lebih kecil dari diameter molekul N_2 dan O_2 sehingga memungkinkan pori zeolit untuk ditempati lebih banyak molekul tiosulfat.

Selain itu kepolaran senyawa adsorbat juga ikut mempengaruhi daya adsorpsi zeolit. Sebagaimana telah dijelaskan pada tinjauan pustaka, zeolit cenderung lebih dapat mengadsorpsi senyawa-senyawa yang polar. Struktur molekul tiosulfat menunjukkan bahwa senyawa ini bersifat polar sedangkan struktur molekul nitrogen

dan oksigen menunjukkan bahwa senyawa ini bersifat non-polar. Faktor lain yang ikut mempengaruhi hasil ini adalah fasa dari senyawa tiosulfat yang diadsorp, yaitu fasa uap (*vapor*). Fasa uap dari senyawa tiosulfat ini sangat berpotensi berubah menjadi fasa cair kembali ketika terjadi perubahan tekanan di dalam kolom yang memungkinkan terjadinya perubahan fasa. Sesuai dengan hukum termodinamika, untuk sejumlah tiosulfat yang sama akan menghasilkan volume yang lebih besar jika berada dalam fasa cair dibandingkan ketika berada dalam fasa uap. Hal ini dapat menjelaskan alasan mengapa jumlah senyawa tiosulfat dapat teradsorpsi lebih banyak jika dibandingkan senyawa N_2 dan O_2 . Berdasarkan hasil tersebut maka dapat disimpulkan bahwa hasil rancangan alat biofilter sesuai digunakan untuk mereduksi kandungan senyawa sulfur dalam gas.



BAB V

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah :

5.1 Hasil Perancangan Alat

1. Kolom biofilter hasil rancang bangun adalah kolom adsorpsi unggun tetap dengan umpan terdiri atas dua fasa yaitu fasa padat (unggun zeolit) dan fasa gas. Fasa gas masuk dari bagian bawah kolom sedangkan fasa padat tetap berada di dalam kolom.
2. Dimensi kolom biofilter hasil rancangan memiliki dimensi : tinggi = 35 cm, diameter dalam = 5 cm, tebal kolom = 1 cm dan diameter luar = 6 cm.
3. Agar tetap berperilaku sebagai kolom unggun tetap, kecepatan maksimum fluida gas yang diizinkan mengalir di dalam kolom adalah 1.37391 m/s, sedangkan laju alir volumetrik fluida maksimum adalah 0.002696301 m³/s.

5.2 Pengujian Hidrodinamika

1. Laju alir udara yang masuk diatur dengan menggunakan bukaan kompresor, sedangkan jatuh tekanan (*pressure drop*) diukur menggunakan manometer air. Laju alir udara diatur sedemikian rupa agar tidak melampaui kecepatan fluidisasi minimum (u_{mf}).
2. Selama pengoperasian alat, *pressure drop* kolom meningkat secara linier seiring dengan bertambahnya laju alir dan kecepatan superficial udara.
3. Faktor friksi udara berbanding terbalik dengan kecepatan superficial udara, dimana faktor friksi semakin kecil seiring dengan meningkatnya kecepatan superficial udara.
4. Perbedaan nilai *pressure drop* hasil eksperimental dan teoritis (persamaan Ergun) semakin kecil seiring dengan bertambahnya laju alir udara, menunjukkan bahwa adanya ketidakstabilan aliran udara kompresor pada kondisi laju alir yang rendah.

5.3 Kinerja Adsorpsi Biofilter

1. Adsorpsi yang terjadi pada kolom biofilter dapat diklasifikasikan sebagai adsorpsi fisika, hal ini dapat dibuktikan pada hasil penelitian dimana adsorpsi dapat terjadi pada kondisi temperatur rendah (ambien) serta kesetimbangan adsorpsi dapat tercapai dalam waktu yang relatif singkat.
2. Biofilter hasil rancang bangun mampu mengadsorpsi gas nitrogen (N_2) dan oksigen (O_2) yang terkandung dalam udara, dengan persentase reduksi maksimum N_2 adalah 12,59 % dan O_2 adalah 9,8 % dari konsentrasi awal masukan sebesar 2,62 mg/mL dan 1,86 mg/mL.
3. Perbedaan besarnya N_2 dan O_2 yang dapat teradsorpsi pada pengujian adsorpsi udara menunjukkan adanya kompetisi antara molekul N_2 dan molekul O_2 pada penyerapan di permukaan zeolit.
4. Biofilter hasil rancang bangun juga mampu mengadsorpsi ion tiosulfat ($S_2O_3^{2-}$) yang terkandung dalam senyawa $Na_2S_2O_3$, dengan persentase reduksi maksimum $S_2O_3^{2-}$ adalah 47,6 % dari konsentrasi awal masukan sebesar 423,8 mg/L.
5. Kinerja biofilter dalam mengadsorpsi gas senyawa sulfur (tiosulfat) lebih baik dibandingkan gas N_2 dan O_2 , hal ini disebabkan oleh perbedaan ukuran molekul, kepolaran serta perbedaan fasa dari senyawa tiosulfat dengan senyawa N_2 dan O_2 yang diadsorpsi oleh kolom biofilter.

DAFTAR PUSTAKA

- Chung, Yien-Chien, et al., *Operation Optimization of Thiobacillus thioparus CH11 Biofilter for Hydrogen Sulfide Removal*. Elsevier Journal of Biotechnology, 26 September 1996.
- Fierdaus, Mochammad, et al., *Penelitian Reduksi Kandungan Sulfur dalam Gas Bumi dengan Aktivitas Mikroba secara Biofilter*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi LEMIGAS, Desember, 2006.
- Guimard, Pierre, et al. *Pressure Drops for Flow Through Packed Beds*. Team 4 Carnegie Mellon University, 18 Maret, 2004.
- Karmini, Renilda. *Rancang Bangun Reaktor Fasa Jamak Berunggun Ganda dan Uji Hidrodinamika Sistem Air-Udara pada Konfigurasi Umpan Udara Bawah*, Skripsi, Jurusan Teknik Gas dan Petrokimia Universitas Indonesia, Depok, 1995.
- McCabe, Warren L., et al., *Unit Operations of Chemical Engineering*. 4th edition. McGraw-Hill Book Company, Singapore, 1987.
- Perry, Robert H., Don Green. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 6th edition. McGraw-Hill Book Company, 1989.
- Sandidge, Jennifer, et al., *Fluid Flows Through packed Beds: Experimental Data vs Ergun Equation*. Team 6 Carnegie Mellon University, 31 Maret, 2005.
- Suhendra, Edi. *Studi Kinerja Beberapa Jenis Zeolit Alam sebagai Adsorben H₂O dalam Kandungan Gas*. Skripsi, Jurusan Teknik Gas dan Petrokimia UI, Depok, Januari, 1997.
- Wahyuni, Ahnur. *Penghilangan H₂S dengan Metode Biofilter Menggunakan Media Kompos dan Arang Aktif yang Diinokulasi dengan Thiobacillus sp.* Institut Pertanian Bogor, 2004.
- Walas, Stanley M., *Chemical Process Equipment : Selection and Design*. Butterworth-Heinemann Publishing, Newton USA, 1990.
- Yang, Ralph T. *Gas Separation by Adsorption Processes Volume 1*. Imperial College Press, 1997

LAMPIRAN A

A.1 Kalibrasi Kompresor

P kompresor = 0.4 bar

t bubble (sekon)	F terukur (ml/s)
2.61	110.532
2.60	110.957
2.44	118.233
F rata-rata	113.240

P kompresor = 0.8 bar

t bubble (sekon)	F terukur (ml/s)
0.82	351.814
0.88	327.827
0.89	324.143
F rata-rata	334.595

P kompresor = 0.5 bar

t bubble (sekon)	F terukur (ml/s)
1.71	168.706
1.81	159.385
1.74	165.797
F rata-rata	164.630

P kompresor = 0.9 bar

t bubble (sekon)	F terukur (ml/s)
0.75	384.650
0.68	424.246
0.77	374.659
F rata-rata	394.518

P kompresor = 0.6 bar

t bubble (sekon)	F terukur (ml/s)
1.47	196.250
1.46	197.594
1.39	207.545
F rata-rata	200.463

P kompresor = 1.0 bar

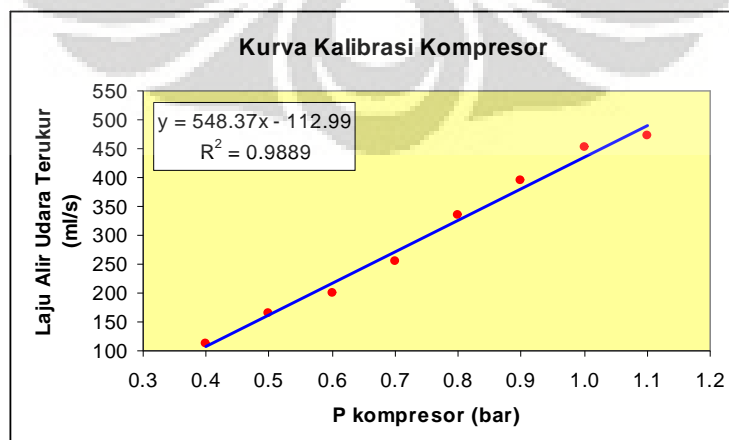
t bubble (sekon)	F terukur (ml/s)
0.68	424.246
0.61	472.930
0.63	457.917
F rata-rata	451.698

P kompresor = 0.7 bar

t bubble (sekon)	F terukur (ml/s)
1.10	262.261
1.14	253.059
1.15	250.859
F rata-rata	255.393

P kompresor = 1.1 bar

t bubble (sekon)	F terukur (ml/s)
0.65	443.827
0.62	465.302
0.57	506.118
F rata-rata	471.749



A.2 Hasil Pengukuran Eksperimental Beda Tekanan (*Pressure Drop*) Kolom

dimana :

Aliran udara inlet ke kolom dari bagian bawah

P kompresor (bar)	Laju Alir (ml/s)	ΔP (mmH ₂ O)			ΔP rata-rata (mmH ₂ O)
		I	II	III	
0.5	161.20	11	12	11	11.33
0.6	216.03	13	13	14	13.33
0.7	270.87	16	17	16	16.33
0.8	325.71	19	20	18	19.00
0.9	380.54	23	23	21	22.33
1.0	435.38	25	25	25	25.00
1.1	490.22	27	26	26	26.33
1.2	545.05	29	30	30	29.67
1.3	599.89	31	31	31	31.00
1.4	654.73	33	32	33	32.67
1.5	709.57	35	35	35	35.00

A.3 Perhitungan Void Fraction

$$\text{Neraca Massa : } V_{bed} = V_{fluid} + V_{solids} \quad \text{and} \quad W_{bed} = W_{fluid} + W_{solids}$$

$$\rho_{bed} V_{bed} = \rho_{fluid} V_{fluid} + \rho_{solids} V_{solids}$$

$$\rho_{solids} V_{solids} \gg \rho_{fluid} V_{fluid}$$

$$\therefore \rho_{bed} V_{bed} \cong \rho_{solids} V_{solids} \quad \text{and} \quad \varepsilon = \frac{V_{bed} - \frac{\rho_{bed} V_{bed}}{\rho_{solids}}}{V_{bed}}$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{bed}}{\rho_{solids}} = 1 - \frac{1190 \frac{kg}{m^3}}{2200 \frac{kg}{m^3}} = 0.459090$$

A.4 Faktor Koreksi Kompresor

Batas tekanan minimum kompresor (P_L) = 0,1 bar

Batas tekanan maksimum kompresor (P_H) = 1 bar

$$F_c = \frac{1 - 0,1}{1} = \frac{0,9}{1} = 0,9$$

LAMPIRAN B

B.1 Data Hasil Perhitungan Hidrodinamika Kolom Biofilter

P kompresor (bar)	Laju Alir (cm ³ /s)	Faktor koreksi kompresor (Fc)	Laju Alir Terkoreksi (m ³ /s)	Vs (m/s)	ΔP (mmH ₂ O)	Re	Friction Factor (f)	Flow of Fluid	ΔP Teoritis (mmH ₂ O)	Kesalahan Relatif (%)
0.5	161.20	0.90	0.000145076	0.07392	11.33	14.327	12.21970285	TRANSITION	4.81693	135.28
0.6	216.03	0.90	0.000194429	0.09907	13.33	19.201	9.562100758	TRANSITION	6.75382	97.42
0.7	270.87	0.90	0.000243782	0.12422	16.33	24.075	7.980553333	TRANSITION	8.84210	84.72
0.8	325.71	0.90	0.000293135	0.14937	19.00	28.949	6.931555608	TRANSITION	11.08178	71.45
0.9	380.54	0.90	0.000342489	0.17452	22.33	33.823	6.184883182	TRANSITION	13.47285	65.77
1.0	435.38	0.90	0.000391842	0.19966	25.00	38.697	5.62630059	TRANSITION	16.01531	56.10
1.1	490.22	0.90	0.000441195	0.22481	26.33	43.571	5.192687118	TRANSITION	18.70917	40.75
1.2	545.05	0.90	0.000490549	0.24996	29.67	48.445	4.846323944	TRANSITION	21.55443	37.64
1.3	599.89	0.90	0.000539902	0.27511	31.00	53.318	4.563283998	TRANSITION	24.55108	26.27
1.4	654.73	0.90	0.000589255	0.30026	32.67	58.192	4.327656295	TRANSITION	27.69912	17.93
1.5	709.57	0.90	0.000638609	0.32541	35.00	63.066	4.128448417	TRANSITION	30.99856	-12.91

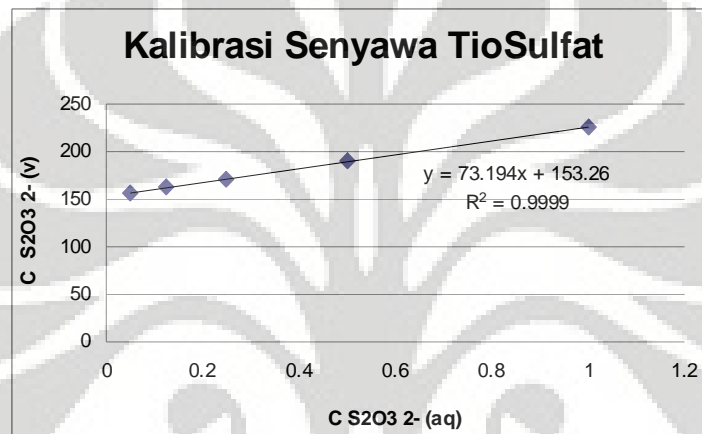
B.2 Perhitungan Kecepatan Fluidisasi Minimum dengan Metode “Trial and Error”

u _{mf} trial	E trial	
1.30	19450.288	A = 0.000540544
1.32	20007.549	B = 2.39607E-07
1.34	20572.628	C = 1.18755
1.370	21434.908	D = 0.000121505
1.371	21463.954	E = 21548.632
1.3730	21522.104	
1.3735	21536.654	
1.3739	21548.632	

LAMPIRAN C

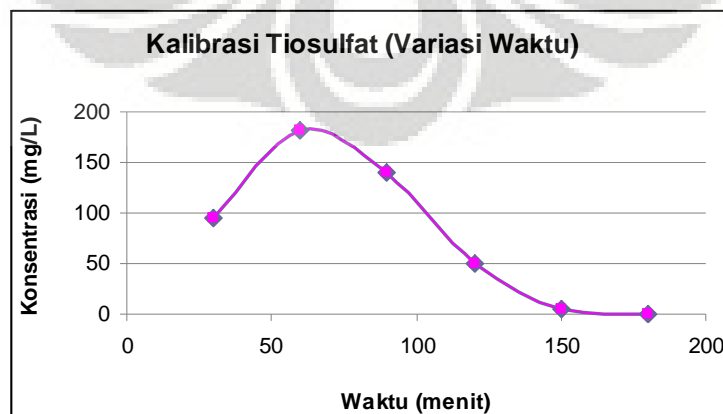
C.1 Kalibrasi Larutan Natrium Tiosulfat (Variasi Konsentrasi)

C Na ₂ S ₂ O ₃ (M)	Vol sampel	A	B	C	D	mg/L
1	125	14	0.025	3.9	0.025	226.24
0.5	125	13.5	0.025	5	0.025	190.4
0.25	125	13	0.025	5.35	0.025	171.36
0.125	125	14	0.025	6.75	0.025	162.4
0.05	125	13.5	0.025	6.5	0.025	156.8



C.2 Kalibrasi Larutan Natrium Tiosulfat (Variasi Waktu)

C Na ₂ S ₂ O ₃ (M)	Vol sampel	A	B	C	D	mg/L	t
1	125	19.25	0.025	15	0.025	95.2	30
1	125	18	0.025	9.875	0.025	182	60
1	125	14.75	0.025	8.5	0.025	140	90
1	125	13.5	0.025	11.25	0.025	50.4	120
1	125	15	0.025	14.75	0.025	5.6	150
1	125	11	0.025	11	0.025	0	180



C.3 Adsorpsi Senyawa Tiosulfat

Inlet

C Na ₂ S ₂ O ₃ (M)	Vol sampel	A	B	C	D	mg/L	t
1	125	18	0.03785	7.3	0.025	446.9248	30
1	125	24.5	0.03785	12	0.025	562.0832	60
1	125	16	0.03785	5.3	0.025	423.8976	90
1	125	21.6	0.03785	11.6	0.025	472.6938	120
1	125	19	0.03785	9.6	0.025	429.3184	150
1	125	18	0.03785	8.4	0.025	422.2848	180

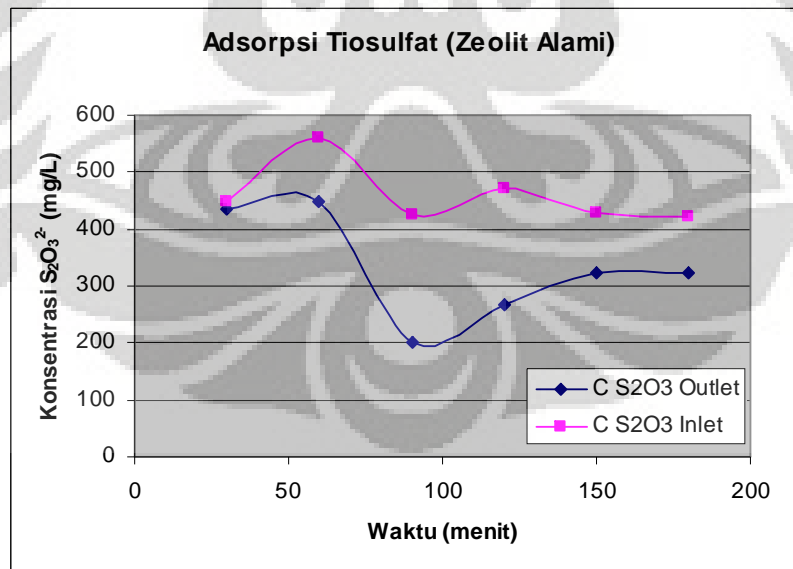
Outlet

→ Tabung 1

C Na ₂ S ₂ O ₃ (M)	Vol sampel	A	B	C	D	mg/L	t
1	125	18	0.03785	8	0.025	431.2448	30
1	125	21.5	0.03785	10.8	0.025	487.2224	60
1	125	15.5	0.03785	6.5	0.025	117.2304	90
1	125	12.3	0.03785	6.5	0.025	271.5373	120
1	125	14.2	0.03785	8.2	0.025	297.8931	150
1	125	16	0.03785	11	0.025	296.2176	180

→ Tabung 2

C Na ₂ S ₂ O ₃ (M)	Vol sampel	A	B	C	D	mg/L	t
1	125	20.3	0.03785	11	0.025	442.0461	30
1	125	20.3	0.03785	12.5	0.025	408.4461	60
1	125	13.2	0.03785	7.2	0.025	286.3795	90
1	125	13.3	0.03785	8.5	0.025	260.6509	120
1	125	18	0.03785	11.7	0.025	348.3648	150
1	125	17	0.03785	10.2	0.025	348.0512	180



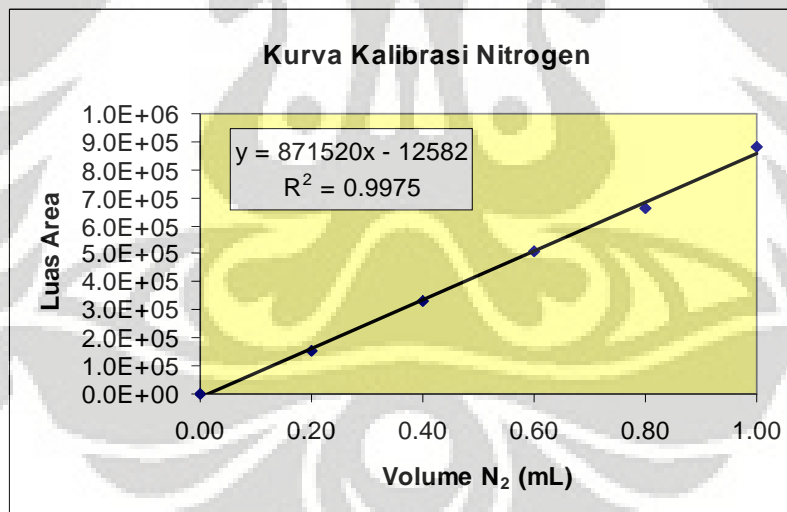
LAMPIRAN D

D.1 Kalibrasi Gas Nitrogen (N₂)

Kondisi Operasi

T = 25 °C
P = 1 atm
Mr = 28 gr/mol
R = 0.08205 L.atm/mol.K

Volume (mL)	Luas Area Terdeteksi
0.00	0
0.20	155406
0.40	330645
0.60	511776
0.80	660243
1.00	881000



Persamaan Kalibrasi

$$Y = 871520x - 12582$$

Modifikasi

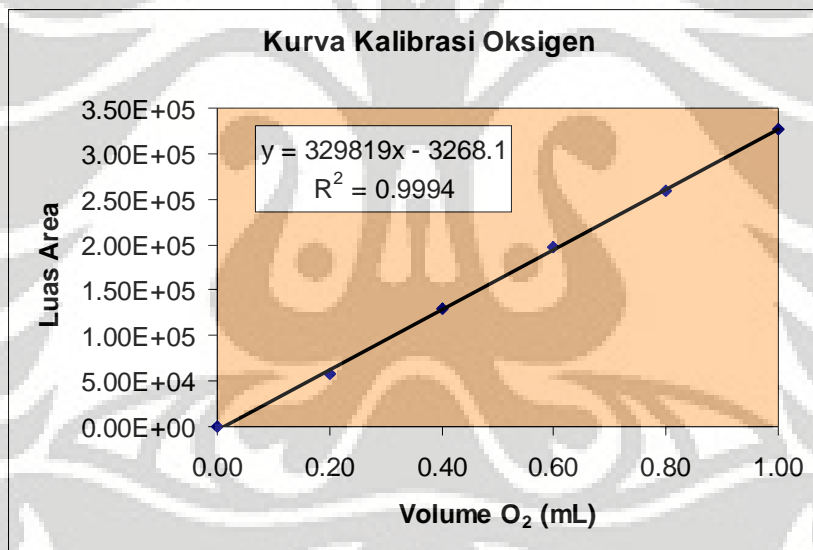
$$X = (Y + 12582) / 871520$$

D.2 Kalibrasi Gas Oksigen (O₂)

Kondisi Operasi

T = 25 °C
P = 1 atm
Mr = 28 gr/mol
R = 0.08205 L.atm/mol.K

Volume (mL)	Luas Area Terdeteksi		
	Y1	Y2	Y rata-rata
0.00	0	0	0
0.20	57175	57392	57283.50
0.40	128745	128759	128752.00
0.60	198472	196472	197472.00
0.80	259919	259918	259918.50
1.00	326353	326489	326421.00



Persamaan Kalibrasi

$$Y = 329819x - 3268.1$$

Modifikasi

$$X = (Y + 3268.1) / 329819$$

D.3 Pengolahan Data Luas Area N₂ dan O₂ Pada Uji Adsorpsi Udara

Sampel Zeolit Dealuminasi
 Massa ± 176 gram
 Laju Alir Udara 161.195 ml/s
 P kompresor 0.5 bar
 Basis 1 mL

T= 25 °C
 P= 0.5 atm
 R= 0.08205 L.atm/mol.K

T (menit ke-)	Luas Area (Inlet)]		Luas Area (Outlet)		Volum (mL)		Mol		Massa (mg)		Konsentrasi (mg/mL)		C/Co	
	N2	O2	N2	O2	N2	O2	N2	O2	N2	O2	N2	O2	N2	O2
0	3978309	936497	3978309	936497	4.5792	2.8493	9.36E-05	5.82E-05	2.6206	1.8636	2.6206	1.8636	1.0000	1.0000
15	-	-	3884218	926386	4.4713	2.8187	9.14E-05	5.76E-05	2.5589	1.8435	2.5589	1.8435	0.9764	0.9892
30	-	-	3730638	882270	4.2950	2.6849	8.78E-05	5.49E-05	2.4580	1.7561	2.4580	1.7561	0.9379	0.9423
45	-	-	3493631	844377	4.0231	2.5700	8.22E-05	5.25E-05	2.3024	1.6809	2.3024	1.6809	0.8786	0.9020
60	-	-	3475847	849483	4.0027	2.5855	8.18E-05	5.28E-05	2.2907	1.6910	2.2907	1.6910	0.8741	0.9074
75	-	-	3567406	857574	4.1078	2.6100	8.4E-05	5.33E-05	2.3508	1.7071	2.3508	1.7071	0.8970	0.9160
90	-	-	3571003	857919	4.1119	2.6111	8.4E-05	5.34E-05	2.3532	1.7078	2.3532	1.7078	0.8979	0.9164
105	-	-	3574999	851599	4.1165	2.5919	8.41E-05	5.3E-05	2.3558	1.6952	2.3558	1.6952	0.8989	0.9097

