

LAPORAN PENELITIAN

**Adsorpsi Spesi Sulfur dalam Ion Tiosulfat dengan Bantuan Zeolit Alam
Lampung teraktivasi sebagai Medium Adsorpsi**



Anggota Penelitian :

Ariyo Prabowo Hidayanto, M.Si. (NIK : 216110655)

Dr. Ir. Praswasti PDK Wulan, MT – Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia

Dr. Ir. Eva Fathul Karamah, MT - Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia

Dr. Ir. Dianursanti, MT - Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia

**PROGRAM STUDI BIOTEKNOLOGI
FAKULTAS ILMU-ILMU KESEHATAN
UNIVERSITAS ESA UNGGUL**

SEPTEMBER 2017

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR GAMBAR.....	iii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	2
1.3 Manfaat Penelitian.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	3
2.1 Zeolit sebagai Adsorben.....	3
2.2 Zeolit sebagai Penukar Ion.....	4
2.3 Adsorpsi.....	6
2.4 Analisis Kandungan Tiosulfat Dengan Metode Titrasi Iodometri.....	9
2.5 Biofilter.....	10
BAB III METODE PENELITIAN.....	12
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	19
BAB V KESIMPULAN.....	24
DAFTAR PUSTAKA.....	25

Universitas
Esa Unggul

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Breakthrough Curve.....	9
Gambar 3.1 Skema peralatan uji kalibrasi senyawa sulfur.....	16
Gambar 3.2 Gambar alat uji adsorpsi Sulfur dalam Natrium Tiosulfat.....	17
Gambar 4.1 Adsorpsi spesi sulfur pada ion tiosulfat untuk Zeolit Alami.....	19
Gambar 4.2 Adsorpsi spesi sulfur pada ion tiosulfat untuk Zeolit Dealuminasi.....	20
Gambar 4.3 Adsorpsi spesi sulfur pada ion tiosulfat untuk Zeolit DK.....	21
Gambar 4.4 Adsorpsi spesi sulfur pada ion tiosulfat untuk Zeolit DP.....	21
Gambar 4.5 Adsorpsi spesi sulfur pada ion tiosulfat untuk Zeolit DPK.....	22

Universitas
Esa Unggul

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Hasil tambang di sektor gas bumi, telah memberikan pendapatan yang berguna untuk meningkatkan kemakmuran negara kita. Dari keuntungan yang diperoleh, tidak dapat dipungkiri bahwa efisiensi dan peningkatan produksi di sektor gas bumi telah menjadi program utama pemerintah. Pada saat ini, kegiatan penambangan pun lebih banyak difokuskan ke arah sektor gas bumi. Jika dilihat, Indonesia memiliki cadangan gas bumi yang masih lebih besar dibandingkan dengan cadangan minyak bumi. Dari hasil audit Indonesia Energy Outlook & Statistics tahun 2006, cadangan minyak bumi Indonesia tahun 2005 sekitar 8,63 milyar barel sedangkan di tahun yang sama cadangan gas alam Indonesia sekitar 3,3 trilyun barel. Namun gas bumi yang ada tersebut masih kurang berkualitas sehingga dapat menurunkan nilai keekonomisannya. Penyebab utamanya karena tingginya kandungan gas non hidrokarbon seperti gas karbondioksida dan senyawa sulfur didalamnya.

Beraneka ragam senyawa sulfur terdapat dalam gas bumi, bentuknya pun bermacam-macam seperti gas H_2S , SO_2 , SO_3 , merkaptan dan sebagainya. Selain dapat menurunkan keekonomisan gas bumi, gas buang yang mengandung senyawa sulfur ini juga memiliki potensi untuk menimbulkan pencemaran udara jika terlepas ke udara. Senyawa sulfur seperti pada hidrogen sulfida pada konsentrasi yang masih sangat rendah yaitu 2 ppm sudah dapat membahayakan karena bersifat toksik (Fierdaus, 2006).

Telah banyak metode konvensional yang dikembangkan untuk mereduksi senyawa sulfur yang berbahaya, diantaranya adalah adsorpsi dengan karbon aktif, oksidasi ozon dan insinerasi (pembakaran). Tetapi, hampir semua metode itu memiliki kelemahan seperti tingginya kebutuhan energi dan biaya operasional yang dibutuhkan. Dalam mengatasi permasalahan itu, saat ini telah dikembangkan suatu metode baru dengan menggabungkan proses adsorpsi dengan aktivitas mikroba yang lebih sederhana serta lebih ramah lingkungan sehingga lebih efisien dibandingkan pengolahan gas secara kimia dan fisika biasa yaitu dengan proses Biofiltrasi.

Prinsip utama dari biofiltrasi adalah dengan melakukan penyaringan (filter) 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 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.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mempelajari kinerja zeolit alam lampung sebagai adsorben spesi sulfur dalam ion tiosulfat
2. Menentukan jenis perlakuan pada zeolit yang menghasilkan optimalisasi proses adsorpsi sulfur dalam ion tiosulfat
3. Menganalisis parameter-parameter penting yang mempengaruhi proses adsorpsi senyawa sulfur

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah

1. Penelitian ini diharapkan menjadi studi pemanfaatan zeolit alam lampung sebagai bioadsorben guna memisahkan spesi sulfur dari campurannya (dalam penelitian ini diwakili oleh ion tiosulfat)
2. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat dicapai suatu optimasi proses adsorpsi spesi sulfur dalam ion tiosulfat dengan adanya aktivasi awal zeolit

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Zeolit sebagai Adsorben

Zeolit adalah material adsorben yang unik, dalam keadaan normal ruang hampa dalam kristal zeolit terisi oleh molekul air bebas yang berada di sekitar kation. Bila kristal zeolit dipanaskan pada suhu 300-400 °C maka air tersebut akan keluar sehingga zeolit dapat berfungsi sebagai penyerap gas atau cairan. Luas permukaan yang tersedia untuk adsorpsi mencapai beberapa ratus meter kuadrat per gram sehingga beberapa mineral zeolit mampu untuk menyerap gas sampai sebanyak 30 % dari berat keringnya. Ada dua jenis adsorpsi yang terjadi pada permukaan zeolit yaitu:

1) Adsorpsi kimia

Terjadi karena adanya reaksi antara molekul-molekul adsorbat dengan adsorbennya. Adsorpsi jenis ini tidak reversible dan hanya membentuk lapisan tunggal. Adsorpsi ini umum terjadi pada suhu tinggi dan pada kalor adsorpsi yang tinggi pula

2) Adsorpsi fisika

Terjadi bila molekul-molekul adsorbat bergabung tanpa disertai reaksi pada permukaan adsorben. Molekul-molekul adsorbat terikat disebabkan karena adanya gaya tarik-menarik yang relatif lemah dengan permukaan adsorben, gaya ini adalah gaya Van Der Waals, sehingga adsorbat dapat bergerak dari satu bagian permukaan ke bagian permukaan lain dari adsorben. Adsorpsi ini berlangsung cepat, reversibel, dan pada kalor adsorpsi yang rendah

Faktor-faktor yang mempengaruhi adsorpsi pada permukaan zeolit diantaranya adalah:

1. Jenis adsorbat

♦ Ukuran molekul adsorbat

Rongga terjadinya adsorpsi dapat dicapai melewati ukuran yang sesuai sehingga molekul-molekul yang bisa diadsorpsi adalah molekul-molekul yang diameter molekulnya sama atau lebih kecil dari diameter pori

♦ Kepolaran adsorbat

Molekul polar akan lebih kuat diadsorpsi daripada molekul yang kurang polar apabila diameter molekulnya sebanding. Molekul yang lebih polar akan dapat menggantikan molekul yang kurang polar yang lebih dulu diadsorpsi

2. Luas permukaan zeolit

Jumlah molekul adsorbat akan bertambah dengan bertambahnya luas permukaan adsorben

3. Suhu

Proses adsorpsi merupakan proses eksotermis yang berarti jumlah senyawa yang diadsorpsi akan bertambah dengan pengurangan temperatur

4. Tekanan

Jumlah adsorbat yang mampu diserap oleh adsorben sangat tergantung pada tekanan adsorbat. Semakin besar tekanan adsorbat akan semakin banyak adsorbat yang dapat diserap oleh adsorben

5. Kemurnian adsorben

Adsorben yang lebih murni memiliki daya adsorpsi yang lebih baik

Penggunaan zeolit sebagai adsorben telah dikenal luas karena zeolit memiliki sifat yang selektif serta memiliki kapasitas yang tinggi. Sifat selektif dari zeolit yang dikenal yaitu:

- Zeolit merupakan pengadsorpsi yang selektif terhadap molekul polar
- Zeolit dapat memisahkan molekul-molekul berdasarkan ukuran molekul

2.2 Zeolit sebagai Penukar Ion

Kemampuan zeolit sebagai penukar ion tergantung pada banyaknya kation tukar pada zeolit. Banyaknya kation tukar pada zeolit ditentukan oleh banyaknya kation Si^{4+} yang diganti oleh kation lain yang bervalensi tiga atau lima. Pada zeolit alam, kation Si^{4+} biasanya akan diganti oleh kation Al^{3+} , sehingga kapasitas tukar kationnya akan ditentukan dari perbandingan antara silikon dengan aluminium (rasio Si / Al). Disini kation Si^{4+} biasanya dapat digantikan kation lain yang memiliki ukuran yang sesuai dengan ruang di pusat tetrahedral oksigen.

Penggantian ion Si^{4+} oleh kation lain yang tidak bervalensi empat disebut dengan penggantian isomorf (*Isomorphous substitution*). Penggantian ini akan memerlukan kation lain untuk menetralkan muatannya dan juga dapat berfungsi sebagai kation tukar. Penggantian secara isomorf dapat dijelaskan melalui mekanisme singkat berikut ini:



Kation tukar pada zeolit dapat ditukar dengan kation lain dari logam golongan alkali dan alkali tanah karena kation tukar tak terikat dalam empat atom oksigen seperti Si^{4+} dan Al^{3+} . Contoh mekanisme pertukaran kation digambarkan melalui skema berikut ini:



Sifat-sifat pertukaran ion pada dasarnya juga dipengaruhi hal-hal sebagai berikut:

1. Ukuran rongga zeolit

Semakin besar ukuran rongga zeolit maka akan semakin besar kemampuan zeolit untuk melakukan pertukaran ion

2. Rasio Si / Al

Karena muatan negatif dari zeolit merupakan fungsi dari banyaknya ion Al^{3+} maka kapasitas tukar kationnya juga merupakan fungsi dari rasio Si / Al, sehingga akan semakin memperbesar kapasitas tukar kation suatu zeolit. Pada

Tabel 2.1 berikut disajikan kapasitas tukar kation beberapa zeolit berdasarkan ukuran pori dan rasio Si / Al:

Tabel 2.1 Kapasitas tukar kation beberapa zeolit

Jenis Zeolit	Ukuran rongga	$\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$	Kapasitas tukar kation (meq/g)
Analsim	2,6 A	4	4,9
Klinoptilolit	3,7 A x 4,2 A	4	4,9
	4,0 A x 5,5 A	10	2,6
Erionit	3,6 A x 5,5 A	5	3,3
Ferierit	3,6 A x 5,2 A	11	2,4
	3,4 A x 4,6 A		
Mordenit	6,7 A x 7,0 A	10	2,6
	2,9 A x 5,7 A		
Philipsit	4,2 A x 4,4 A	4,4	4,7
	4,3 A x 4,0 A		

3. Volume ion

Ukuran dari ion-ion yang masuk dapat mempengaruhi laju dan jumlah pertukaran ion. Sebagai contoh, ion NH_4^+ akan mengalami proses pertukaran ion yang cukup lambat karena ukuran molekulnya hampir setara dengan

ukuran rongga zeolit

4. Selektifitas ion

Pada umumnya setiap jenis zeolit memperlihatkan urutan selektifitas ion yang berbeda-beda. Ion dengan selektifitas yang tinggi akan lebih mudah masuk dalam rongga-rongga zeolit

5. Suhu

Semakin besar temperatur maka laju pertukaran ion juga akan semakin cepat

2.3 Adsorpsi

Adsorpsi adalah suatu proses dimana molekul-molekul senyawa organik dalam bentuk gas dan cair yang terlarut diangkut masuk ke dalam butiran padat dengan difusi lalu diadsorp ke permukaan dalam yang luas dari senyawa yang dapat menyerap akibat dari adanya gaya adhesi. Senyawa-senyawa organik yang diadsorp disebut dengan adsorbat dan senyawa yang berfungsi untuk menyerap disebut adsorben. Proses adsorpsi ini mengakumulasikan adsorbat ke permukaan adsorben. Proses penyerapan akan berhenti pada saat adsorben sudah menjadi jenuh.

Proses adsorpsi ini sering dimanfaatkan dalam pengolahan air minum, terutama pada daerah yang air tanahnya tercemar. Adsorben yang paling banyak digunakan dalam pengolahan air adalah karbon aktif karena dapat menghilangkan komponen pencemar yang bervariasi. Umumnya karbon aktif digunakan dalam proses pengolahan air dalam rangka menghilangkan bau dan rasa pengotor yang dimiliki air tersebut.

Jenis-jenis Adsorpsi

Bentuk paling sederhana dari adsorpsi disebut dengan adsorpsi fisika (*physisorption*) yang disebabkan adanya mekanisme ikatan sekunder intermolekuler (gaya Van der Waals) yang relatif lemah dan oleh adanya gaya elektrostatis antara molekul-molekul adsorbat dengan atom-atom yang menyusun permukaan adsorben (Akbar, 2006). Gaya ini mengarahkan molekul-molekul adsorbat ke permukaan adsorben. Adsorpsi ini akan berlangsung cepat dan membentuk lapisan jamak dan juga bersifat dapat balik karena energi yang dibutuhkan relatif kecil. Biasanya energi aktivasi agar adsorpsi fisika terjadi tidak lebih dari 1 kkal/gmol (Adiprawiro, 2005).

Adsorpsi kimia mencakup adanya transfer elektron antara adsorbat dan adsorben (mirip dengan ikatan kimia). Adsorpsi kimia bersifat tidak dapat balik dan jika terjadi proses desorpsi, maka akan terjadi perubahan struktur kimia dari adsorbatnya. Ketika molekul adsorbat terserap pada permukaan adsorben maka molekul tersebut akan membentuk lapisan

tunggal. Panas adsorpsi dan energi aktivasi yang dibutuhkan untuk adsorpsi kimia ini lebih besar (masing-masing 9-90 kal dan kurang dari 9-60 kal/mol). Perbedaan adsorpsi Fisika dan Kimia digambarkan pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 Perbedaan adsorpsi Fisika dan adsorpsi Kimia

No	Parameter	Adsorpsi Fisika	Adsorpsi Kimia
1	Adsorben	Semua jenis	Terbatas
2	Adsorbat	Semua gas	Kecuali gas mulia
3	Jenis ikatan	Fisika	Kimia
4	Panas adsorpsi	5-10 kkal/gmol gas	10-100 kkal/gmol gas
5	Temperatur operasi	Dibawah temperatur kritis	Diatas temperatur kritis
6	Energi aktivasi	Kurang dari 1 kkal/gmol	10-60 kkal/gmol
7	Reversibilitas	Reversible	Irreversible
8	Tebal lapisan	Jamak (<i>multilayer</i>)	Tunggal(<i>monolayer</i>)
9	Kecepatan adsorpsi	Besar	Kecil
10	Jumlah zat teradsorpsi	Sebanding dengan kenaikan tekanan	Sebanding dengan banyaknya inti aktif adsorben yang dapat bereaksi dengan adsorbat
11	kegunaan	Untuk penentuan luas permukaan dan ukuran pori	Untuk penentuan daerah pusat aktif dan penjelasan kinetika reaksi permukaan

Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Daya Adsorpsi

Kemampuan adsorben untuk mengadsorpsi adsorbat dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain (Adiprawiro, 2005):

- o Jenis adsorbat, ditinjau dari:
 - a. Ukuran molekul adsorbat

Ukuran molekul yang sesuai merupakan hal yang penting agar proses adsorpsi dapat terjadi, karena molekul-molekul yang dapat diadsorpsi

adalah molekul-molekul yang diameternya lebih kecil atau sama dengan diameter pori adsorben

b. Polaritas molekul adsorbat

Jika diameter sama, maka molekul-molekul yang lebih polar akan lebih dapat diadsorpsi. Jadi polaritas molekul adsorbat juga perlu diperhatikan karena molekul-molekul yang lebih polar dapat menggantikan molekul-molekul yang kurang polar yang telah teradsorpsi

o Sifat adsorben, ditinjau dari:

a. Kemurnian adsorben

Sebagai zat yang digunakan untuk mengadsorpsi, maka adsorben yang lebih murni lebih diinginkan karena memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih baik

b. Luas permukaan adsorben

Dalam proses adsorpsi, seringkali adsorben diberikan perlakuan awal untuk meningkatkan luas permukaannya karena luas permukaan adsorben merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi proses adsorpsi. Semakin luas permukaan adsorben, maka jumlah adsorbat yang dapat diadsorpsi akan lebih banyak

o Temperatur

Dalam proses adsorpsi terjadi pelepasan panas ke lingkungan atau dengan kata lain merupakan suatu proses eksotermis. Jadi dengan berkurangnya temperatur adsorbat, jumlah adsorbat yang dapat diadsorpsi semakin bertambah

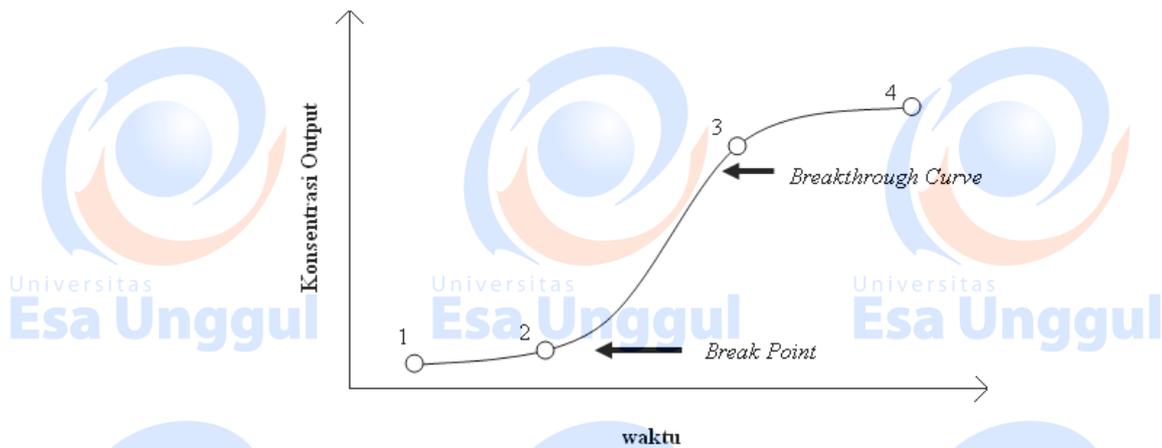
o Tekanan

Pada adsorpsi fisika, jumlah zat yang diadsorpsi akan bertambah dengan menaikkan tekanan adsorbat. Sebaliknya, pada adsorpsi kimia jumlah zat yang diadsorpsi akan berkurang dengan menaikkan tekanan adsorbat

Kurva Terobosan

Jika mempelajari adsorpsi, maka tidak bisa terlepas dari istilah *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.

Contoh *breakthrough curve* dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut :



Gambar 2.1 *Breakthrough Curve*

Breakthrough curve menggambarkan fenomena yang terjadi selama proses adsorpsi.

Dari gambar diatas terlihat:

- Proses adsorpsi dimulai pada titik 1, pada kondisi ini adsorpsi berjalan dalam laju yang relatif sama (konstan) sampai dengan titik 2
- Titik 2 pada kurva ini merupakan titik balik (*breakpoint*), dimana terjadi penurunan secara drastis jumlah adsorbat yang dapat diserap oleh adsorben sampai dengan titik 3. Daerah yang berada pada rentang antara titik 2 dan 3 ini disebut dengan kurva terobosan (*breaktrough curve*)
- Penurunan jumlah adsorbat terus terjadi dari titik 3 sampai dengan titik 4, tetapi tidak secara drastis sebagaimana sebelumnya. Titik 4 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

2.4 Analisis Kandungan Tiosulfat Dengan Metode Titrasi Iodometri

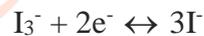
Titration merupakan proses pengukuran volume titran yang diperlukan untuk mencapai titik ekuivalensinya. Suatu metode titrasi untuk analisis didasarkan pada reaksi kimia sebagai berikut:



dengan a adalah molekul analit A yang bereaksi dengan t molekul titran sedikit demi sedikit secara inkremental dalam bentuk larutan dengan konsentrasi yang diketahui. Larutan ini disebut larutan standar dan konsentrasinya ditetapkan oleh suatu proses yang disebut

standardisasi. Selanjutnya penambahan titran terus dilakukan sampai telah dilakukan sejumlah T yang secara kimia setara dengan A (sebagai titik ekivalensi).

Salah satu reaksi kimia yang dapat berperan sebagai dasar untuk penetapan titrimetri adalah pada reaksi redoks seperti pada reaksi Iod sebagai berikut:



pada reaksi diatas, Iod digunakan sebagai zat pengoksidasi dan ion Iodida digunakan sebagai zat pereduksi (Iodometri). Untuk titrasi Iodometri ini umumnya digunakan ion poliatomik Tiosulfat ($S_2O_3^{2-}$) sebagai zat pereduksi yang cukup kuat.

Untuk larutan standar, umumnya digunakan senyawa natrium tiosulfat dalam bentuk hidratnya. Proses analisis ini nantinya juga dapat diaplikasikan pada proses degradasi spesi sulfur. Larutan natrium tiosulfat tidak stabil dalam waktu yang lama yang jika diuraikan dalam larutan asam dapat membentuk belerang:



tetapi reaksi ini lambat dan sebaliknya reaksi antara iod dan tiosulfat lebih cepat sehingga Iod akan mengoksidasi Tiosulfat menjadi ion tetrathionat sebagai berikut:



2.5 Biofilter

Saat ini 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 adsorpsi kontaminan maupun untuk pertumbuhan mikroba
3. Kemampuan untuk menyerap nutrisi dan menyuplainya ketika dibutuhkan oleh mikroba

4. Kemampuan menahan aliran udara (jatuh tekanan udara dan kekuatan angin yang dikeluarkan blower)
5. Material yang digunakan
6. Karakteristik fisik, seperti kestabilan fisik dan mudah dalam penanganan

Kinerja sistem biofilter dapat dinilai berdasarkan beberapa hal berikut :

1. Laju atau kapasitas degradasi maksimum (g/kg-media kering/hari)
2. Kecepatan tercapainya kondisi aklimatisasi mikroba. Parameter ini akan menunjukkan kinerja dari bioavailibilitas konsorsium mikroba yang dikembangkan untuk mendegradasi gas polutan. Semakin cepat masa adaptasi mikroba (*log phase*), maka kinerja biofilter akan semakin baik
3. Kemampuan mempertahankan rasio degradasi gas (efisiensi degradasi) dalam waktu yang lama. Rasio degradasi polutan gas dari biofilter umumnya di atas 95 % dan dapat bertahan dalam jangka waktu yang relatif lama
4. Kemampuan bahan pengisi dalam mempertahankan kondisi pH, temperatur dan kadar air. Kemampuan ini menggambarkan kinerja biofilter terhadap fluktuasi beban polutan gas yang tinggi, kurangnya humidifikasi dan masa tidak terpakainya biofilter akibat fluktuasi proses produksi pada industri

BAB III

METODE PENELITIAN

Alat dan Bahan

Penelitian dilakukan di beberapa laboratorium Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia. Dengan jenis peralatan yang dipakai dalam penelitian antara lain:

- Saringan (mesh) berukuran 1,7 mm
- Beaker glass 250 ml (2 buah)
- Pipet tetes plastik 10 ml (2 buah)
- Alu dan lumpang (masing-masing 1 buah)
- Pengaduk listrik
- Timbangan digital (300 gram)
- Sendok plastik
- Cawan penguap
- Oven
- Wadah plastik
- Furnace
- Desikator
- Rangkaian kolom Biofilter
- Buret dan statip (2 buah) untuk uji sampel Tiosulfat dengan metode titrasi iodometri

Sedangkan keseluruhan bahan yang dipakai untuk penelitian kali ini adalah:

- Zeolit alam dari Lampung
- Larutan HF 40 %
- Larutan ammonium nitrat (NH_4NO_3) 0,1 N
- Air Reverse Osmosis (RO water)
- Larutan natrium tiosulfat 1 M sebagai medium (sampel)
- Larutan natrium tiosulfat 0,025 N sebagai titran
- Larutan iodine 0,025 N sebagai titran
- HCl 6 M
- Larutan trapper yang terdiri dari (10 ml Iodine 0,025 N + 10 ml Air RO + 2 ml HCl 6 M)

- Larutan kanji sebagai indikator

Prosedur Penelitian

Dalam penelitian ini digunakan lima macam sampel zeolit yaitu:

1. Blank Zeolit (Zeolit alami)
2. Zeolit Dealuminasi
3. Zeolit Dealuminasi + Kalsinasi (Zeolit DK)
4. Zeolit Dealuminasi + Pertukaran Ion (Zeolit DP)
5. Zeolit Dealuminasi + Pertukaran Ion + Kalsinasi (Zeolit DPK)

Seluruh tahapan aktivasi dilakukan guna mengetahui kinerja daya adsorpsi zeolit yang terbaik dalam mengadsorpsi spesi sulfur pada ion Tiosulfat. Langkah-langkah yang dilakukan dalam seluruh tahapan sebagian diadaptasi dari penelitian terdahulu yang sudah dilakukan oleh Rifky (1996) dan Eddy Suhendra (1997).

Pembuatan Zeolit Alami

Tahapan pembuatan zeolit alami sebagai sampel pertama memiliki langkah-langkah sebagai berikut:

1. Zeolit alam murni yang masih memiliki dimensi heterogen (belum seragam) terlebih dahulu ditumbuk dengan alu dan lumpang. Selanjutnya disaring dengan menggunakan saringan (mesh) hingga diperoleh zeolit dengan ukuran diameter seragam yaitu 1,7 mm
2. Selanjutnya zeolit ini diambil dan ditimbang sebanyak $\pm 176 - 200$ gram atau sampai memiliki tinggi bed sebesar ± 12 cm pada kolom biofilter
3. Memanaskan (Pre kalsinasi) dalam oven pada suhu 110°C selama 2 jam untuk menghilangkan kadar airnya
4. Menyimpan sampel dalam desikator
5. Mengambil $\pm 0,5$ gram zeolit untuk dikarakterisasi dalam BET Autosorb *Apparatus* untuk mendapatkan properti fisik dan kimianya

Pembuatan Zeolit Dealuminasi

Tahapan pembuatan zeolit Dealuminasi sebagai sampel kedua memiliki langkah-langkah sebagai berikut:

1. Mengambil 1200 gram zeolit alam murni dengan ukuran diameter homogen (1,7 mm) yang sudah kering

2. Selanjutnya zeolit ini direndam dalam larutan HF 3 % dengan volume 100 ml untuk setiap 50 gram zeolit, sehingga untuk 1200 gram zeolit volume total larutan HF 3 % yang dibutuhkan sebesar 2400 ml
3. Mengencerkan larutan HF 40 % menjadi 3 % dengan volume larutan akhir 2400 ml yang memerlukan 180 ml HF 40 % (dari hasil perhitungan pengenceran)
4. Selama sampel direndam, diaduk dengan stirrer selama 20 menit dengan kecepatan 450 RPM pada suhu ruang
5. Setelah itu disaring dan dibilas sebanyak dua kali, lalu dikeringkan dalam oven (tahap pre kalsinasi) selama 2 jam pada suhu 110 °C
6. Menyimpan sampel dalam desikator atau dalam tempat yang tertutup rapat untuk menghindari adanya uap air yang masuk dalam pori-pori zeolit tersebut
7. Mengambil $\pm 0,5$ gram sampel zeolit ini untuk dikarakterisasi dalam BET Autosorb *Apparatus* untuk mendapatkan properti fisik dan kimianya

Pembuatan Zeolit Dealuminasi + Kalsinasi (Zeolit DK)

Tahapan pembuatan zeolit DK sebagai sampel ketiga memiliki langkah-langkah sebagai berikut:

1. Dari sampel zeolit yang sudah didealuminasi sebelumnya, diambil 200 gram untuk selanjutnya dikalsinasi dalam furnace (tungku udara) pada suhu 530 °C selama 5 jam (sampel diletakkan pada cawan penguap)
2. Setelah dikalsinasi, sampel ini selanjutnya didinginkan terlebih dahulu dan disimpan dalam desikator atau dalam tempat yang tertutup rapat untuk menghindari adanya uap air yang masuk dalam pori-pori zeolit tersebut
3. Mengambil $\pm 0,5$ gram sampel zeolit ini untuk dikarakterisasi dalam BET Autosorb *Apparatus* untuk mendapatkan properti fisik dan kimianya

Pembuatan Zeolit Dealuminasi + Pertukaran Ion (Zeolit DP)

Tahapan pembuatan zeolit DP sebagai sampel keempat memiliki langkah-langkah sebagai berikut:

1. Mengambil sampel zeolit yang sebelumnya sudah didealuminasi sebanyak 400 gram untuk selanjutnya diaktivasi dengan pertukaran ion pada proses selanjutnya
2. Pertukaran ion dimulai dengan mengambil 400 gram sampel ini selanjutnya dicampurkan dengan larutan NH_4NO_3 0,1 N sebanyak 12000 ml dalam wadah plastik

3. Untuk membentuk larutan NH_4NO_3 0,1 N maka diperlukan padatan NH_4NO_3 sebanyak 8 gram
4. Sesudah dicampurkan, selanjutnya dilakukan pengadukan dengan stirrer pada suhu kamar selama 2 jam dengan kecepatan 450 RPM
5. Setelah selesai pengadukan sampel disaring dan dibilas dengan air RO (*Reverse Osmosis*) sampai 4 kali atau sampai air sudah tidak keruh lagi
6. Hasil penyaringan selanjutnya diletakkan pada cawan penguap dan dikeringkan dalam oven selama 2 jam pada suhu 110°C
7. Sampel yang sudah kering ini disimpan dalam desikator atau dalam tempat yang tertutup rapat untuk menghindari adanya uap air yang masuk dalam pori-pori zeolit tersebut
8. Mengambil $\pm 0,5$ gram sampel zeolit ini untuk dikarakterisasi dalam BET Autosorb *Apparatus* untuk mendapatkan properti fisik dan kimianya

Pembuatan Zeolit Dealuminasi + Pertukaran Ion + Kalsinasi (Zeolit DPK)

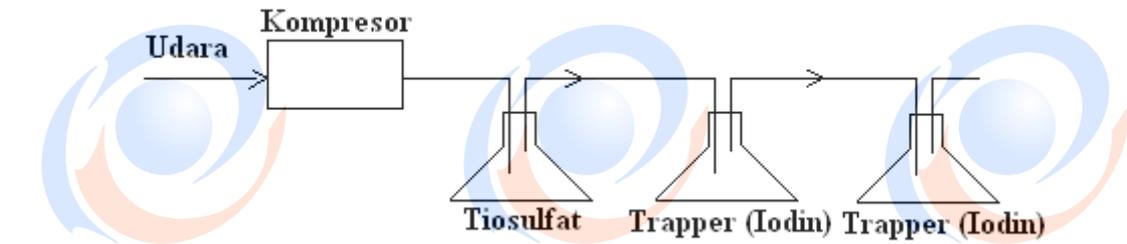
Tahapan pembuatan zeolit DPK sebagai sampel kelima memiliki langkah-langkah sebagai berikut:

1. Mengambil 200 gram sampel zeolit yang sudah didealuminasi dan sudah mengalami pertukaran ion untuk selanjutnya dikalsinasi dalam furnace (tungku udara) pada suhu 530°C selama 5 jam (sampel diletakkan pada cawan penguap)
2. Setelah dikalsinasi, sampel ini selanjutnya didinginkan terlebih dahulu dan disimpan dalam desikator atau dalam tempat yang tertutup rapat untuk menghindari adanya uap air yang masuk dalam pori-pori zeolit tersebut
3. Mengambil $\pm 0,5$ gram sampel zeolit ini untuk dikarakterisasi dalam BET Autosorb *Apparatus* untuk mendapatkan properti fisik dan kimianya

Kalibrasi Senyawa Tiosulfat

Tahap kalibrasi kandungan sulfur dalam senyawa Natrium Tiosulfat dilakukan dengan variasi konsentrasi larutan Tiosulfat yaitu:

1. Menghubungkan kompresor dari dan ke bubbler seperti pada Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1 Skema peralatan uji kalibrasi senyawa sulfur

2. Membuat empat macam variasi konsentrasi Natrium Tiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) yaitu 1 ; 0,5 ; 0,25 ; 0,125 ; 0,05 (dalam satuan molaritas) dengan jumlah volume larutan yang sama sebesar 125 ml
3. Mengkontakkan tiap larutan sampel tersebut ke dalam larutan trapper. Ketika senyawa sulfur dari Tiosulfat terperangkap dalam larutan trapper, maka setelah beberapa saat larutan trapper akan mengalami perubahan warna dari coklat tua hingga menjadi bening. Ketika perubahan warna terjadi selanjutnya trapper dititrasi dengan Iodin 0,025 N sampai kembali ke warna semula dan mencatat volume yang dibutuhkan oleh titran tersebut untuk mengubah warna larutan trapper
4. Memberikan 3 tetes larutan kanji dan mentitrasi kembali dengan natrium tiosulfat 0,025 N sampai larutan berwarna bening dan mencatat volume yang dibutuhkan titran tersebut untuk mengubah warna larutan trapper
5. Menghitung konsentrasi tiosulfat yang teruapkan dari larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ dengan metode

Titrasi Iodometri, dengan rumus:

$$\text{S}_2\text{O}_3^{2-} \text{ (mg/L)} = \frac{(A \times B) - (C \times D) \times 1,12 \cdot 10^5}{\text{ml sampel}}$$

dengan:

A =	Volume Iodine yg terpakai (ml)
B =	Normalitas larutan Iodin
C =	Volume Tiosulfat yg terpakai (ml)
D =	Normalitas larutan Tiosulfat

6. Memplot konsentrasi Tiosulfat yang teruapkan terhadap konsentrasi Tiosulfat masukan sebagai y vs x

Uji Adsorpsi sulfur dalam ion Tiosulfat

1. Merangkai dan menghubungkan alat seperti pada gambar Gambar 3.2 dibawah dengan spesifikasi:
 - ◆ Kompresor
 - ◆ Reaktor *lab scale* untuk proses adsorpsi
 - ◆ Pipa dan selang Silikon
 - ◆ Check valve untuk mencegah aliran balik (*Back Flow*) sehingga laju alir substrat yang masuk ke kolom dari kompresor akan lebih stabil
 - ◆ Manometer
 - ◆ Bubbler tertutup berupa erlenmeyer 250 ml sebagai medium larutan sampel Tiosulfat dan sebagai medium larutan trapper
 - ◆ Splitter aliran berbentuk Y



Gambar 3.2 Gambar alat uji adsorpsi Sulfur dalam Natrium Tiosulfat

2. Mengambil dan memasukkan sampel zeolit pertama (zeolit murni) dalam kolom Biofilter hingga diperoleh ketinggian *packing* ± 12 cm
3. Mengatur tekanan inlet udara pada kompresor sebesar 0,3 bar (dikondisikan supaya tak terjadi turbulensi aliran)
4. Larutan sampel natrium tiosulfat dikondisikan pada konsentrasi 1 M dengan volume 125 ml (hasil optimal yang diperoleh dari kalibrasi awal)
5. Membuat 3 macam larutan trapper dengan spesifikasi yang sama (spesifikasi terdapat pada penjelasan mengenai alat dan bahan), dengan ketentuan larutan pertama adalah larutan masukan kolom yang berisi campuran udara – Tiosulfat yang akan diadsorpsi oleh zeolit, dan larutan kedua dan ketiga merupakan larutan trapper keluaran kolom yang displitter oleh splitter berbentuk Y

6. Langkah uji titrasi dilakukan dengan tahapan yang sama seperti pada uji kalibrasi yang sudah dijelaskan sebelumnya untuk ketiga larutan trapper yang ada baik di masukan maupun keluaran kolom dengan waktu pengambilan data setiap 30 menit
7. Pengambilan data dilakukan hingga laju adsorpsi sudah konstan yang ditunjukkan oleh konsentrasi Tiosulfat keluaran kolom yang sudah menunjukkan hasil konstan (konsentrasi keluaran kolom ini merupakan konsentrasi rata-rata dari larutan trapper keluaran I dan II)
8. Memplot hasil adsorpsi blank zeolit yang dinyatakan dengan plot C/C_0 (konsentrasi keluaran berbanding konsentrasi masukan sampel) vs waktu operasi sebagai suatu plot y vs x
9. Melakukan langkah yang sama untuk semua sampel zeolit yang sudah diaktivasi

Universitas
Esa Unggul

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

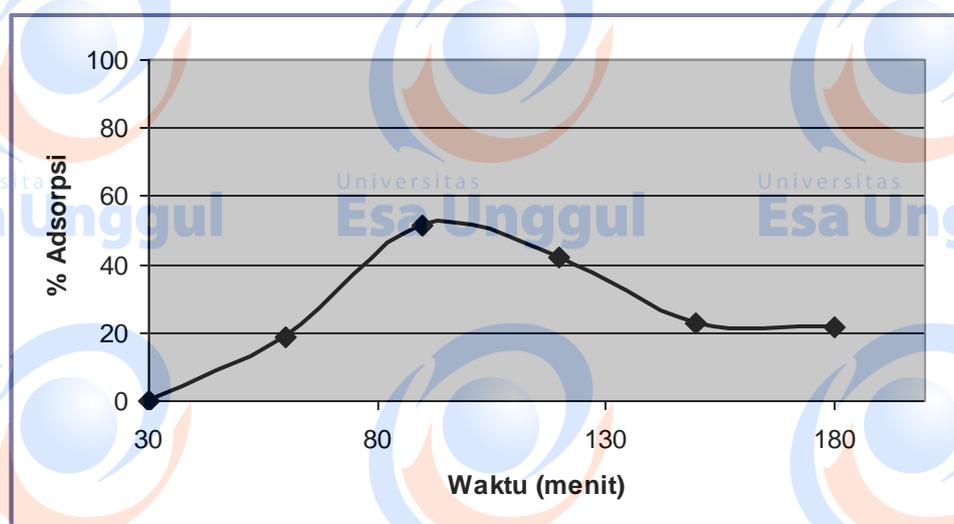
A. Uji Adsorpsi Spesi Sulfur

Uji adsorpsi spesi sulfur menggunakan larutan natrium tiosulfat yang mengandung sulfur sebagai sampel yang akan diadsorp. Disini, sampel dialiri udara dari kompresor dengan laju 51,521 ml/s, sehingga sampel berupa campuran udara - tiosulfat. Larutan trapper yang digunakan terdiri dari campuran larutan iodine 0,025 N, larutan HCl 6 M, dan air murni (Reverse Osmosis). Larutan trapper ini berfungsi sebagai media kontak gas sulfur di dalam ion tiosulfat. Uji adsorpsi dengan sampel sulfur ini dilakukan dengan metode titrasi iodometri dengan menggunakan natrium tiosulfat 0,025 N dan iodin 0,025 N. Metode ini dilakukan berdasarkan pertimbangan bahwa dengan metode ini, kita akan lebih mudah mengetahui konsentrasi kandungan ion $S_2O_3^{2-}$ yang teruapkan di keluaran kolom biofilter.

Adsorpsi spesi sulfur pada ion Tiosulfat oleh zeolit alami

Titrasi dilakukan dengan menggunakan larutan natrium tiosulfat dan iodin 0,025 N dengan waktu operasi tiap titrasi untuk semua variasi zeolit adalah 30 menit. Kapasitas adsorpsi ditunjukkan oleh % adsorpsi sebagai dengan persentase perbandingan selisih konsentrasi adsorbat mula-mula terhadap konsentrasi adsorbat tiap waktu dengan konsentrasi adsorbat pada kondisi inisialnya.

Hasil adsorpsi spesi sulfur pada ion tiosulfat oleh zeolit alami digambarkan pada Gambar 4.1 berikut:

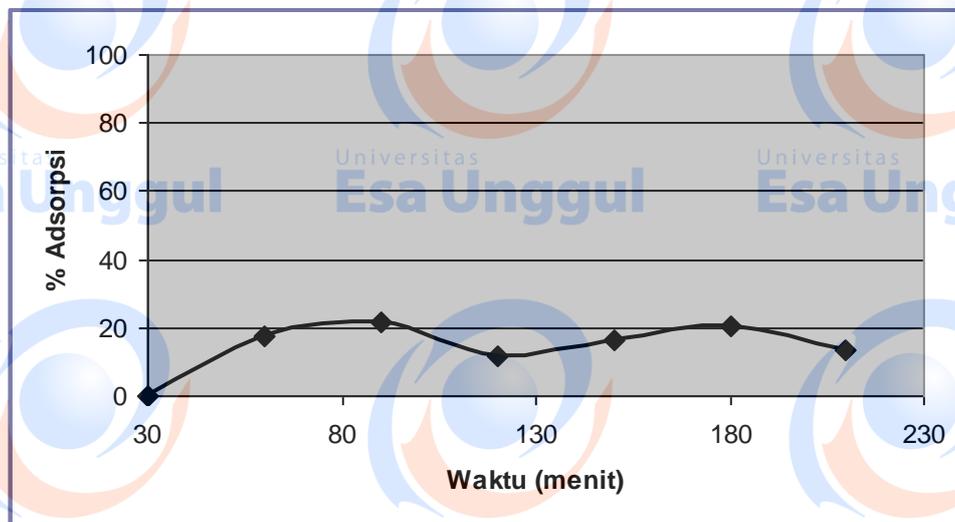


Gambar 4.1 Adsorpsi spesi sulfur pada ion tiosulfat untuk Zeolit Alami

Dari gambar diatas, terlihat bahwa persentase adsorpsi sulfur didalam ion poliatomiknya maksimum sebesar 50 % dan akan dapat berlangsung sampai mendekati 100 menit, setelah itu laju adsorpsi menurun dan menjadi konstan setelah 150 menit yang ditunjukkan oleh bentuk kurva yang sudah landai.

Adsorpsi spesi sulfur pada ion Tiosulfat oleh zeolit Dealuminasi

Hasil adsorpsi spesi sulfur pada ion tiosulfat oleh zeolit Dealuminasi digambarkan pada Gambar 4.2 berikut:

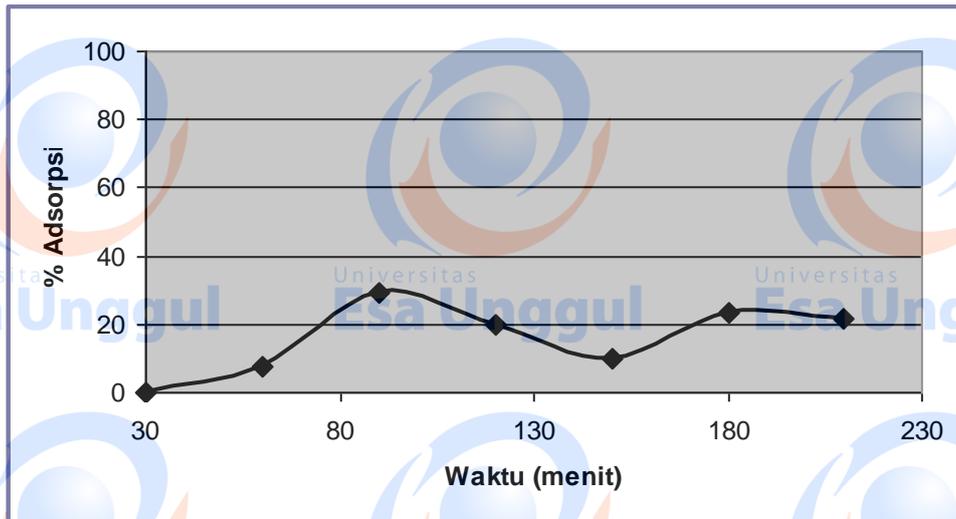


Gambar 4.2 Adsorpsi spesi sulfur pada ion tiosulfat untuk Zeolit Dealuminasi

Dari gambar diatas terlihat bahwa zeolit Dealuminasi kurang efektif dalam mengadsorp spesi sulfur pada ion tiosulfat, hal ini ditunjukkan oleh bentuk kurva yang hampir landai dimana persentase adsorpsi maksimum yang dimilikinya hanya sekitar 20 %. Selain itu, terlihat bahwa proses adsorpsi hanya efektif sampai pada menit ke 90 setelah itu naik dan turun kembali. Bentuk kurva yang naik dan turun ini juga mengindikasikan bahwa telah terjadi inkonsistensi dalam proses adsorpsi dengan zeolit ini.

Adsorpsi spesi sulfur pada ion Tiosulfat oleh zeolit DK

Hasil adsorpsi spesi sulfur pada ion Tiosulfat oleh zeolit DK digambarkan pada Gambar 4.3 berikut:

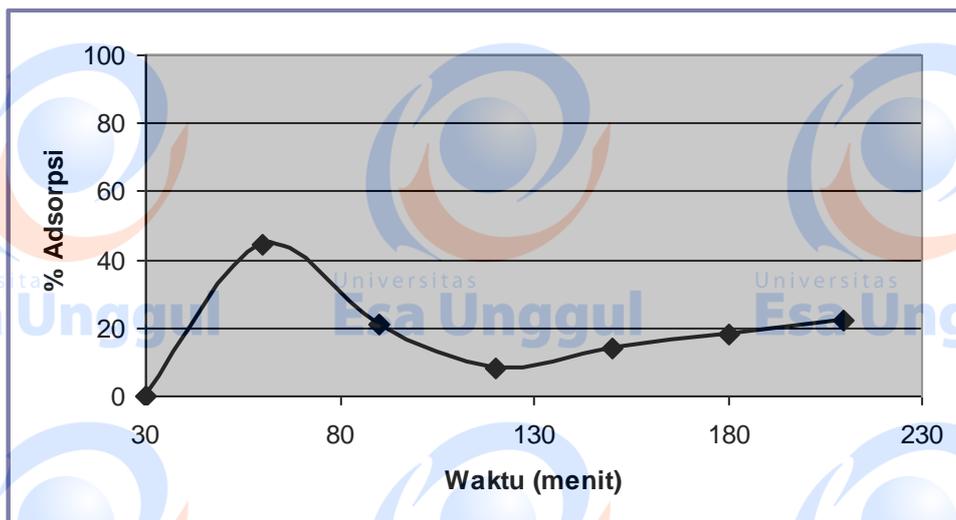


Gambar 4.3 Adsorpsi spesi sulfur pada ion Tiosulfat untuk Zeolit DK

Dari gambar diatas terlihat bahwa zeolit DK memiliki persentase adsorpsi maksium hingga sekitar 30 % pada menit ke 100, baru terjadi penurunan laju adsorpsi dan kemudian kembali naik lalu baru konstan setelah menit ke 180. Sehingga untuk zeolit inipun juga masih terjadi inkonsistensi.

Adsorpsi spesi sulfur pada ion Tiosulfat oleh zeolit DP

Hasil adsorpsi spesi sulfur pada ion Tiosulfat oleh zeolit DP digambarkan pada Gambar 4.4 berikut:



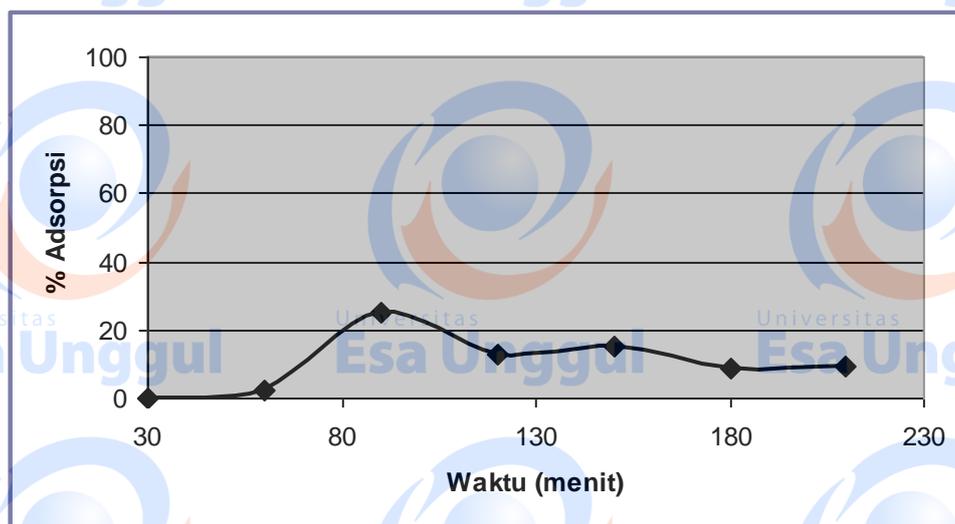
Gambar 4.4 Adsorpsi spesi sulfur pada ion Tiosulfat untuk Zeolit DP

Dari gambar diatas terlihat bahwa untuk zeolit DP, proses adsorpsi berlangsung efektif sampai pada menit 60 dimana persentase yang teradsorp maksimum mendekati 50 % seperti yang sudah ditunjukkan oleh sampel zeolit murni. Setelah itu terjadi penurunan laju adsorpsi yang ditunjukkan oleh bentuk kurva secara eksponensial.

Hal lain yang dapat kita peroleh dari Gambar 4.4 diatas adalah setelah menit ke 120 proses adsorpsi masih berjalan, walaupun tidak secara signifikan, hal ini ditandai dengan bentuk kurva yang relatif masih terjadi penurunan. Karena proses adsorpsi yang sudah selesai dan kondisi zeolit yang telah jenuh ditunjukkan oleh bentuk kurva yang landai, maka pada sampel zeolit inipun masih terjadi inkonsistensi walaupun tidak signifikan.

Adsorpsi spesi sulfur pada ion Tiosulfat oleh zeolit DPK

Hasil adsorpsi spesi sulfur pada ion Tiosulfat oleh zeolit DPK digambarkan pada Gambar 4.5 berikut:



Gambar 4.5 Adsorpsi spesi sulfur pada ion Tiosulfat untuk Zeolit DPK

Dari gambar diatas, proses adsorpsi yang ditunjukkan oleh zeolit dengan perlakuan ini maksimum hanya mengadsorp sekitar 25 % adsorbat yang berlangsung sampai pada menit ke 90 lalu terjadi penurunan laju adsorpsi. Jika dibandingkan dengan zeolit DP, pada zeolit DPK ini pun masih terjadi inkonsistensi laju adsorpsi walaupun tidak signifikan.

B. Hasil Analisis Adsorpsi Spesi Sulfur

Dari kelima hasil diatas, terlihat bahwa proses adsorpsi spesi sulfur dalam ion Tiosulfat optimal hanya sampai 50 % substrat dapat teradsorp, yang ditunjukkan oleh zeolit alami.

Oleh karena itu, zeolit alami adalah yang paling ideal dalam mengadsorpsi spesi sulfur dalam ion tiosulfatnya untuk kelima jenis kombinasi treatment yang dilakukan. Selain itu, telah diketahui bahwa salah satu faktor yang dapat meningkatkan laju adsorpsi adalah konsentrasi adsorbat. Konsentrasi adsorbat yang lebih besar dapat menaikkan laju adsorpsi proses. Pada zeolit alami, konsentrasi adsorbat masukan lebih besar dibandingkan konsentrasi adsorbat masukan pada zeolit lainnya. Hal inilah yang menyebabkan zeolit alami memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih besar dibandingkan zeolit lainnya dalam mendegradasi unsur sulfur dari ion poliatomik nya.

Analisis dengan menggunakan titrasi iodometri sejatinya bertujuan untuk menghitung kandungan sulfur dalam campuran yang kompleks. Dari hasil analisis ini, terlihat bahwa pada spesi sulfur lebih dominan teradsorpsi dalam zeolit alami. Hal ini dikarenakan gas yang terperangkap pada larutan *trapper* mengandung elemen sulfur yang cukup signifikan dibanding elemen lainnya (oksigen pada ion $S_2O_3^{2-}$). Sehingga pada proses adsorpsi spesi sulfur dalam ion poliatomik tiosulfat, spesi S hampir seluruhnya dapat teradsorpsi dalam zeolit alami.

Di lain pihak, berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Adiprawiro (2005), diketahui bahwa molekul polar akan lebih mudah diadsorpsi daripada molekul nonpolar. Senyawa natrium tiosulfat merupakan senyawa polar yang akan lebih mudah diadsorpsi jika dibandingkan dengan oksigen yang merupakan senyawa nonpolar. Sedangkan, jika kita tinjau sifat asamnya, unsur sulfur berada lebih dibawah dibandingkan oksigen, dengan demikian sifat asam S akan lebih besar dibandingkan O. Hal ini juga yang mendasari bahwa spesi S lebih mudah diadsorpsi oleh zeolit alami karena zeolit memiliki sifat yang sangat selektif terhadap spesi yang memiliki sifat keasaman besar karena zeolit juga dapat bertindak sebagai katalis yang membentuk inti asam.

Sifat keasaman yang tinggi yang dimiliki oleh zeolit alami ini juga memungkinkan dapat memperbesar konsentrasi adsorbat masukan sehingga zeolit alami memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih besar dibandingkan zeolit lainnya dalam mendegradasi sulfur dari ion poliatomik nya.



BAB V

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah :

1. Pada uji adsorpsi spesi sulfur pada ion tiosulfatnya, diperoleh persentase adsorpsi maksimum sebesar 50 % (pada suhu kamar) untuk zeolit alami
2. Pada uji adsorpsi ini, diperoleh hasil bahwa zeolit alami lebih dominan dalam mengadsorpsi sulfur yang bersifat polar daripada udara yang terdiri dari nitrogen dan oksigen yang bersifat nonpolar

Universitas
Esa Unggul

DAFTAR PUSTAKA

- Adiprawiro, David. (2005). *Adsorpsi Surfaktan Linear Alkylbenzene Sulfonate dengan Karbon Aktif*. Skripsi, Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
- Akbar, Muhammad (2006). *Optimasi Laju Alir Hidrogen Peroksida sebagai Akseptor Elektron dalam Proses Biobarrier dengan Kontaminan Benzena dan Toluena*. Seminar, Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
- Dennis, Jerry. (1997). *Eliminasi SO_x dengan CuO / Zeolit Alam: Preparasi CuO / Zeolit Alam dengan Metode Presipitasi dan Karakterisasinya*. Skripsi, Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
- Dianursanti. (1996). *Modifikasi dan Karakterisasi Zeolit Klinoptilolit untuk Katalis dan Penyangga Reaksi Dekomposisi Metanol*. Skripsi, Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
- Fessenden, Ralph, J., Fessenden, Joan, S.. (1983). *Kimia Organik*. Jilid 1, Penerbit Erlangga
- Fierdaus, Mochammad, et al. (2006). *Penelitian Reduksi Kandungan Sulfur dalam Gas Bumi dengan Aktivitas Mikroba secara Biofilter*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi, LEMIGAS
- J.R, Raday., Underwood A.L, (1986). *Analisis Kimia Kuantitatif*. Edisi V, Penerbit Erlangga
- Mailisa, R.. (2006). *Proses Katalitik dalam Sintesis Senyawa Hidrokarbon Setaraf Fraksi Bensin dari Minyak Sawit dengan Menggunakan Katalis B₂O₃ / Zeolit*. Skripsi, Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
- Oktianasari, Ira. (2002). *Karakteristik Pemisahan Campuran Gas H₂ / N₂ Menggunakan Adsorben Zeolit Alam dan Zeolit Alam / NiO dengan Teknik PSA*. Skripsi, Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
- Pengkajian Energi Universitas Indonesia. (2006). *Indonesia Energy Outlook & Statistics 2006, Executive Summary*
- Prabowo, Ariyo. (2008). *Preparasi Zeolit Alam Lampung sebagai Penyangga Biofilter untuk Proses Pemisahan Senyawa Sulfur*. Skripsi, Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

Rifky. (1996). *Preparasi CuO / Zeolit Alam dengan Metode Impregnasi dan Karakterisasinya untuk Eliminasi SO_x dari Gas Buang*. Skripsi, Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

Suhendra, Eddy. (1997). *Studi Kinerja Beberapa Jenis Zeolit Alam sebagai Adsorben H₂O dalam Kandungan Gas*. Skripsi, Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

Syamsu, Dian, N.. (1997). *Karakterisasi dan Aplikasi Zeolit Alam Lampung untuk Mengadsorpsi Ion Ca²⁺ dari Air*. Skripsi, Departemen Teknik Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

