



UNIVERSITAS INDONESIA

**UJI ADSORPSI GAS KARBON MONOKSIDA (CO)
MENGUNAKAN ZEOLIT ALAM MALANG DAN LAMPUNG**

SKRIPSI

ADITYA ZULFA

0706269565

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**UJI ADSORPSI GAS KARBON MONOKSIDA (CO)
MENGUNAKAN ZEOLIT ALAM MALANG DAN LAMPUNG**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

ADITYA ZULFA

0706269565

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JULI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Aditya Zulfa

NPM : 0706269565

Tanda Tangan :



Tanggal : 30 Juni 2011

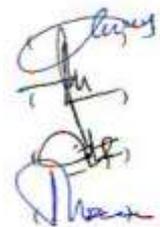
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Aditya Zulfa
NPM : 0706269565
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Seminar : Uji Adsorpsi Gas Karbon Monoksida (CO)
Menggunakan Zeolit Alam Malang dan Lampung

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Yuliusman, M.Eng
Penguji I : Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo DEA
Penguji II : Prof. Dr. Ir. Slamet M.T.
Penguji III : Prof. Ir. Sutrasno Kartohardjono M.Sc., Ph.D



Ditetapkan di : Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Tanggal : 30 Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan seminar ini. Penulisan seminar ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral;
2. Ir. Yuliusman, M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan seminar ini;
3. Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu P., DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI;
4. Ibunda dan ayahanda tercinta yang telah memberikan dukungan moril maupun materill;
5. Rekan satu penelitian saya, Sukma Pamungkas, Kak Gondang dan Kak Reza yang telah bersedia berdiskusi dan saling mendukung satu sama lain selama proses penyelesaian skripsi ini.
6. Kang Jajat dan Mang Ijal selaku teknisi laboratorium yang telah membantu saya dalam hal teknis

Semoga skripsi ini dapat memberikan kontribusi dan manfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta peningkatan daya saing bangsa Indonesia.

Depok, 30 Juni 2011

Penulis

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

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

Nama : Aditya Zulfa
NPM : 0706269565
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non-exclusive Royalty- Free Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

UJI ADSORPSI GAS KARBON MONOKSIDA (CO) MENGGUNAKAN
ZEOLIT ALAM MALANG DAN LAMPUNG

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

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 30 Juni 2011

Yang menyatakan



(Aditya Zulfa)

ABSTRAK

Nama : Aditya Zulfa
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Uji Adsorpsi Gas Karbon Monoksida (CO) Menggunakan Zeolit Alam Malang dan Lampung

Gas karbonmonoksida merupakan salah satu gas yang berbahaya bagi kesehatan apabila dihirup dalam jumlah tertentu. Oleh karena itu, perlu dilakukan suatu upaya untuk mengurangi konsentrasi gas tersebut di alam yaitu dengan menggunakan metode adsorpsi. Dalam penelitian ini, zeolit alam Malang dan Lampung diuji kapasitas adsorpsi gas CO-nya dalam proses adsorpsi dari 0 psia sampai 178 psia dengan interval 25 psi dengan variasi ukuran dan suhu adsorpsi. Kedua jenis zeolit tersebut dibandingkan kapasitas adsorpsi, baik setelah maupun sebelum mengalami pengaktifan. Proses pengaktifan menggunakan metode dealuminasi, pertukaran ion dan kalsinasi. Dari hasil penelitian diketahui bahwa adsorben dengan kapasitas adsorpsi terbesar yaitu zeolit alam Lampung dengan ukuran 37-50 mikron dan suhu adsorpsi 25°C dengan kapasitas adsorpsi sebesar 0,5866 mmol/g pada tekanan 175 psia. Hasil ini juga ditunjang dengan karakterisasi adsorben menggunakan metode BET dan XRF untuk mengetahui luas permukaan, ukuran pori dan kandungan Si/Al pada tiap adsorben. Dengan demikian telah didapatkan spesifikasi zeolit dengan kapasitas adsorpsi terbesar terhadap gas CO dari kedua zeolit alam yang digunakan pada percobaan ini.

Kata Kunci :

Adsorben, adsorpsi, karbon monoksida, zeolit Lampung, zeolit Malang

ABSTRACT

Name : Aditya Zulfa
Major : Chemical Engineering
Title : Adsorption Testing of Carbon Monoxide (CO) Using Malang and Lampung Natural Zeolite.

Carbon monoxide is one of a toxic gas which harmful for health if being sniffed in current volume. Thus, it is need to be treated to decrease the concentration of those gas in our environment using adsorption method. In this research, Malang and Lampung natural zeolite are being tested its adsorption capacity of CO in pressure condition 0 to 178 psia with 25 psi interval and using variation of adsorbent size and adsorption temperature. Both of those zeolites are being compared its adsorption capacity, before and after the activation process. Activation processes are de-alumination, ion exchange, and calcinations. The result of this research is Lampung natural zeolite which has 37-50 mikron in size that being operated in 25°C is an adsorbent which has the highest adsorption capacity of CO, 0,5866 mmol/g at 175 psia. This result is supported with characterization of each adsorbent using BET and XRF method to know its surface area, porous size, and ratio of Si/Al. So, it can be found the best specification of an adsorbent which has the highest adsorption capacity of CO between two of natural zeolite in this research.

Key Words :

Adsorbent, adsorption, carbon monoxide, Lampung natural zeolite, Malang natural zeolite.

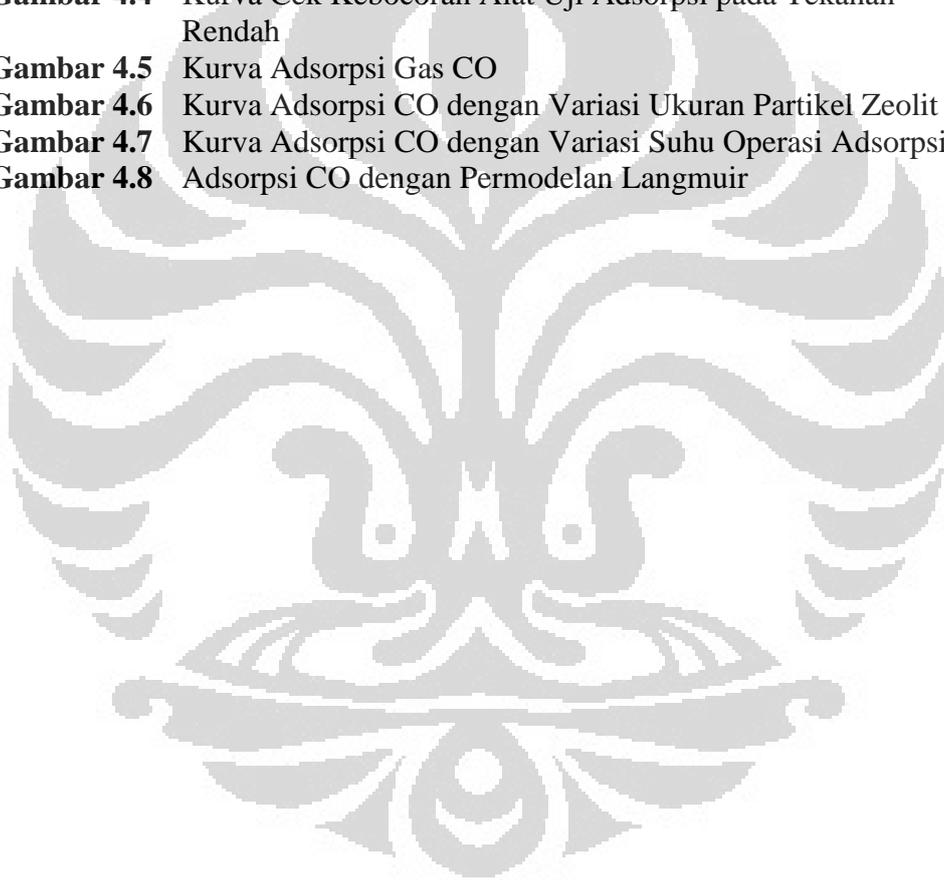
DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Penulisan	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Karbon Monoksida (CO)	5
2.2 Adsorpsi	8
2.2.1 Jenis Adsorpsi	8
2.2.2 Adsorpsi <i>Monolayer</i> dan <i>Multilayer</i>	10
2.2.2.1 Adsorpsi Isoterm Langmuir	11
2.2.2.2 Adsorpsi Isoterm BET	12
2.2.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi	13
2.2.3.1 Sifat Adsorben	13
2.2.3.2 Jenis Adsorbat	13
2.2.3.3 Temperatur	14
2.2.3.4 Tekanan	14
2.2.3.5 Pusat Aktif	14
2.3 Adsorben	15
2.3.1 Adsorben Tak Berpori	15
2.3.2 Adsorben Berpori	15
2.3.3 Gel Silika	16
2.3.4 Karbon Aktif	17
2.3.5 Zeolit	18
2.3.5.1 Struktur Zeolit	18
2.3.5.2 Sifat Zeolit	19
2.3.5.3 Pemanfaatan Zeolit	20
2.3.5.4 Jenis-jenis Zeolit	22
2.3.5.5 Zeolit Alam Malang dan Lampung	22
2.3.5.6 Metode Aktivasi Zeolit	24
2.4 Sumber	26

BAB 3	METODE PENELITIAN	27
3.1	Diagram Alir Penelitian	27
3.2	Tahapan Penelitian	28
3.2.1	Preparasi Adsorben	28
3.2.1.1	Peralatan Penelitian	28
3.2.1.2	Bahan yang Digunakan pada Penelitian	28
3.2.1.3	Prosedur Penelitian	29
3.2.2	Karakterisasi Adsorben	30
3.2.3	Uji Adsorpsi Adsorben	30
3.2.3.1	Peralatan Penelitian	30
3.2.3.2	Bahan-bahan Uji Adsorpsi CO	31
3.3	Persiapan Alat Uji Adsorpsi CO	31
3.4	Persiapan Adsorben	33
3.5	Cek Kebocoran Peralatan Adsorpsi	33
3.6	Pengujian Adsorpsi CO	33
3.7	Variabel dalam Penelitian	35
3.8	Pembuatan Kurva Adsorpsi	35
3.9	Pembuatan Model Adsorpsi	36
BAB 4	PEMBAHASAN	37
4.1	Preparasi Adsorben	37
4.2	Penyaringan Adsorben	40
4.3	Preparasi Peralatan Adsorpsi	40
4.4	Cek Kebocoran Alat Uji	41
4.5	Kalibrasi <i>Void Volume Area Sampling</i>	42
4.6	Uji Adsorpsi dan Desorpsi Gas CO pada Zeolit	44
4.6.1	Uji Adsorpsi Gas CO dengan Perbandingan Zeolit Alam Terktivasi dan Tak Teraktivasi	44
4.6.2	Uji Adsorpsi Gas CO dengan Variasi Ukuran Partikel Zeolit	45
4.6.3	Uji Adsorpsi Gas CO dengan Variasi Suhu Operasi Adsorpsi	47
4.7	Representasi Data Adsorpsi dengan Model Langmuir	49
4.8	Analisa BET	51
4.9	Analisa XRF	52
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	53
5.1	Kesimpulan	53
5.2	Saran	53
	DAFTAR PUSTAKA	55
	LAMPIRAN	57

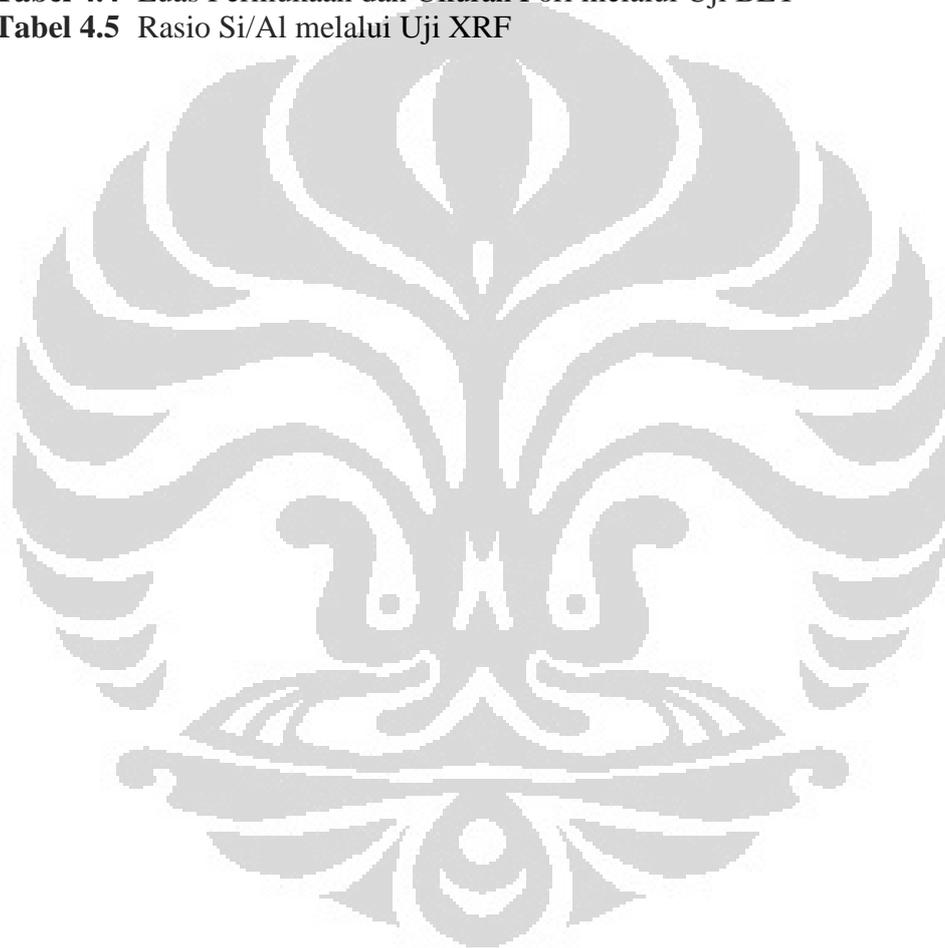
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi Isotermis Brunauer	11
Gambar 2.2	Interaksi Adsorbat dengan Adsorben	13
Gambar 2.3	Struktur Zeolit	19
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	27
Gambar 3.2	Diagram Alir Proses Preparasi Zeolit Alam	29
Gambar 3.3	Skema Ruang Uji	31
Gambar 4.1	Perubahan Warna Larutan HF menjadi Keruh dan HCl Menjadi Kuning	37
Gambar 4.2	Perubahan Warna Larutan NH_4Cl menjadi Putih Keabuan	38
Gambar 4.3	Rangkaian Peralatan Uji Adsorpsi	40
Gambar 4.4	Kurva Cek Kebocoran Alat Uji Adsorpsi pada Tekanan Rendah	41
Gambar 4.5	Kurva Adsorpsi Gas CO	44
Gambar 4.6	Kurva Adsorpsi CO dengan Variasi Ukuran Partikel Zeolit	46
Gambar 4.7	Kurva Adsorpsi CO dengan Variasi Suhu Operasi Adsorpsi	48
Gambar 4.8	Adsorpsi CO dengan Permodelan Langmuir	49



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Konsentrasi Karbon Monoksida dan Waktu Paparan	5
Tabel 2.2	Komponen Beracun Utama dalam Gas Pembakaran	8
Tabel 2.3	Karakteristik Adsorpsi Fisika dan Kimia	9
Tabel 2.4	Karakteristik Zeolit Alam Indonesia	22
Tabel 2.5	Komposisi Kimia Zeolit Alam Lampung	23
Tabel 4.1	Penurunan Massa Adsorben pada Suhu 150-200 °C	39
Tabel 4.2	Hasil Perhitungan Helium <i>Void Volume</i>	43
Tabel 4.3	Parameter Model Isotermal Langmuir	50
Tabel 4.4	Luas Permukaan dan Ukuran Pori melalui Uji BET	51
Tabel 4.5	Rasio Si/Al melalui Uji XRF	52



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Gas CO merupakan komponen gas yang sangat beracun karena lebih cepat untuk mengikat haemoglobin menjadi *carboxyhaemoglobin* sehingga menyebabkan penghambatan aliran O₂ untuk mengikat haemoglobin. Kekurangan suplai O₂ pada batas tertentu, yaitu pada konsentrasi O₂ kurang dari 14% akan menyebabkan meningkatnya resiko kematian. Kasus kebakaran sebagai penghasil gas CO yang cukup tinggi juga masih menjadi salah satu permasalahan yang harus diselesaikan, mengingat seringnya terjadi kebakaran, baik di daerah penduduk maupun di daerah industri. Pada kasus kebakaran, sering terdapat korban meninggal yang penyebabnya tidak selalu karena luka bakar, melainkan karena menghirup dan terinfeksi oleh gas-gas beracun yang dihasilkan selama proses kebakaran berlangsung, di antaranya adalah gas CO. (Wei W, dkk, 2007). Pada kasus kebakaran, tingkat kematian karena keracunan gas buang pembakaran jauh lebih besar dibandingkan kematian akibat luka bakar. Data penelitian menyatakan 85% kematian pada kasus kebakaran di dunia disebabkan oleh asap berat dan gas beracun. Komponen gas buang pembakaran bergantung pada material yang dibakar. (Wei W, dkk, 2007).

Asap yang dihasilkan dari proses kebakaran mengandung berbagai macam gas yang dapat membahayakan kesehatan apabila terhirup dalam jumlah yang banyak. Salah satu dari gas tersebut adalah CO. Kandungan gas CO pada asap hasil kebakaran ini dapat menyebabkan keracunan bahkan kematian kepada makhluk hidup yang terpapar dalam jumlah yang besar.

Gas CO merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, dan beracun bagi pernapasan. Gas CO utamanya dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna. Pembakaran tidak sempurna sangat mungkin terjadi terutama pada peristiwa kebakaran. Secara teori, pembakaran tidak sempurna terjadi salah satunya karena kekurangan gas oksigen dalam proses pembakarannya. Karena sifatnya yang tidak berbau, tidak berasa, dan tidak berwarna, sangat sulit untuk

mengenali keberadaannya. Dari uraian di atas, terlihat bahwa diperlukan suatu usaha untuk dapat mengurangi kadar CO hasil pembakaran pada kasus kebakaran, salah satunya adalah dengan metode adsorpsi menggunakan zeolit alam.

Zeolit merupakan bahan galian non logam atau mineral industri multiguna karena memiliki sifat-sifat fisika dan kimia yang unik, yaitu sebagai penyerap, penukar ion, penyaring molekul dan sebagai katalisator. Hal ini didukung dengan letak geografis Indonesia yang berada di jalur pegunungan berapi dunia membuatnya menjadi kaya akan potensi sumber daya alam, seperti batuan gunung berapi yang merupakan sumber mineral zeolit.

Russell dkk (1996) melakukan penelitian model adsorpsi untuk menganalisa kesetimbangan gas-padatan pada bahan berpori, adsorpsi dilakukan pada gas N₂, CO, CO₂, menggunakan 2 jenis *porous carbonaceous* yaitu A-572 dan PPAN yang mempunyai luas permukaan yang berbeda yaitu 1159 m²/g dan 880 m²/g. Hasil yang didapatkan kapasitas adsorpsi CO untuk *porous carbonaceous* A-572 lebih besar dari pada PPAN. Sementara Xu, Y. dkk (2003) melakukan penelitian berkaitan dengan adsorpsi asap rokok yang menunjukkan bahwa zeolit mempunyai kemampuan mengadsorpsi asap rokok lebih baik dibandingkan material lain.

Dari beberapa uraian di atas, dapat disimpulkan bahwa zeolit alam memiliki potensi sebagai penyerap berbagai macam gas yang salah satunya adalah gas CO. Akan tetapi, untuk kepentingan komersial zeolit alam yang ada di Indonesia belum dimanfaatkan secara optimal. Agar dapat dimanfaatkan, terutama sebagai adsorben, zeolit harus memiliki spesifikasi tertentu. Untuk memperoleh zeolit dengan kemampuan tinggi diperlukan beberapa pengolahan antara lain: preparasi, aktivasi, dan modifikasi.

Dari permasalahan yang telah dipaparkan dan berbagai penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, penulis ingin mengetahui kapasitas adsorpsi dari zeolit alam Malang dan Lampung baik yang teraktivasi maupun tak teraktivasi terhadap salah satu gas beracun yang dihasilkan dari peristiwa kebakaran yakni gas karbon monoksida (CO).

1.2 Rumusan Masalah

Gas CO merupakan salah satu gas beracun yang ada di alam yang dapat diminimalisasi atau bahkan dihilangkan dengan cara diserap menggunakan adsorben berupa zeolit alam Malang dan Lampung. Akan tetapi, zeolit alam ini masih mengandung pengotor sehingga perlu dilakukan proses preparasi atau aktivasi terlebih dahulu sebelum digunakan untuk proses penyerapan.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Memperoleh adsorben berupa zeolit alam dengan ukuran dan kondisi operasi yang optimal, yang mampu mengadsorpsi karbon monoksida
2. Mendapatkan kondisi optimum kapasitas adsorpsi karbon monoksida pada zeolit alam Malang dan Lampung.
3. Optimalisasi penggunaan zeolit alam Malang dan Lampung sebagai adsorben gas CO.

1.4 Batasan Masalah

1. Gas yang diadsorpsi adalah gas CO.
2. Adsorben yang digunakan adalah zeolit alam Malang dan Lampung yang diproduksi oleh PT. Bratachem Bandung
3. Kondisi adsorpsi yang dilakukan pada penelitian ini adalah kondisi adsorpsi isotermis.
4. Software pengalibrasi tekanan dan temperatur uji adsorpsi adalah Adam View dengan Perangkat Data Aquisition *Advantech USB 4718*.
5. Proses aktivasi zeolit alam menggunakan metode peneliti terdahulu.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam makalah skripsi ini dilakukan dengan membagi tulisan menjadi lima bab, yaitu:

BAB 1 PENDAHULUAN

Meliputi latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah penelitian dan sistematika penulisan makalah.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tinjauan pustaka yang menjadi dasar penelitian yang meliputi pengertian proses Adsorpsi Isotermis, persamaan-persamaan kimia fisik adsorpsi, mekanisme dasar adsorpsi, pengaruh tekanan terhadap adsorpsi gas, kesetimbangan adsorpsi, karakterisasi calon adsorben.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Berisi diagram alir penelitian, alat dan bahan penelitian, prosedur penelitian yang meliputi tahap aktivasi zeolit, tahap uji adsorpsi, serta pengolahan data.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi data-data karakterisasi adsorben, data yang diperoleh dari penelitian, hasil dan hasil pengolahannya, serta analisa dari hasil adsorpsi dan perhitungan kapasitas yang didapatkan.

BAB 5 KESIMPULAN

Berisi kesimpulan yang berhasil ditarik dari analisa yang dilakukan serta saran yang diperoleh dari analisa penelitian dan hasil percobaan.

DAFTAR PUSTAKA

Bagian yang berisi rujukan dan referensi yang digunakan dalam analisa data dan pendukung teori penelitian

LAMPIRAN

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida merupakan gas tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa. Gas yang tidak menyebabkan iritasi merupakan gas pembunuh bagi kesehatan manusia. Orang yang keracunan karbon monoksida sulit untuk diketahui dan didiagnosa. Karbonmonoksida merupakan urutan pertama kematian yang disebabkan oleh keracunan di United State dari tahun 1979 sampai 1988 berdasarkan death certificate review (>5000 kematian per tahun) (Mark Goldstein, 2008). Karbonmonoksida dapat membunuh dalam hitungan detik hingga jam tergantung dari paparannya. Berdasarkan dari departemen buruh Amerika, pekerja dapat bekerja pada konsentrasi karbonmonoksida < 35 ppm dalam waktu 8 jam kerja. Tabel 2.1 menunjukkan konsentrasi karbonmonoksida waktu paparan yang dibolehkan.

Tabel 2.1 Konsentrasi Karbon Monoksida dan Waktu Paparan (Stuttman I dkk, 1998)

Konsentrasi Karbonmonoksida	Tingkat COHb	Tanda-tanda dan Gejala
35 ppm	< 10%	Sakit kepala dan pusing bila terpapar di bawah 6-8 jam
100 ppm	> 10%	Sakit kepala ringan dalam 2-3 jam terpapar
200 ppm	20%	Sakit kepala ringan dalam 2-3 jam terpapar dan hilang kesadaran
400 ppm	25%	Sakit kepala berat bila terpapar di bawah 1-2 jam
800 ppm	30%	Pusing, mual dan kejang-kejang bila terpapar 45 meni dan mati rasa bila terpapar selama 2 jam
1600 ppm	40%	Sakit kepala, pusing dan mual bila

Tabel 2.1 Konsentrasi Karbon Monoksida dan Waktu Paparan (Stuttman I dkk, 1998) (Lanjutan)

Konsentrasi Karbonmonoksida	Tingkat COHb	Tanda-tanda dan Gejala
		terpapar selama 20 menit dan mengalami kematian kurang dari 2 jam
3200 ppm	50%	Sakit kepala, pusing dan mual bila terpapar selama 5-10 menit dan mengalami kematian kurang dari 30 menit
6400 ppm	60%	Sakit kepala dan pusing bila terpapar selama 1-2 menit, kejang-kejang dan mengalami kematian kurang dari 20 menit
12800 ppm	>70%	Mengalami kematian bila terpapar kurang dari 3 menit

CO yang terdapat di alam terbentuk dari salah satu dari tiga proses. Pertama, pembakaran tidak sempurna terhadap karbon atau komponen yang mengandung karbon. Kedua, reaksi antara karbon dioksida (CO_2) dan komponen yang mengandung karbon pada suhu tinggi. Ketiga, pada suhu tinggi, CO_2 terurai menjadi CO dan O.

Adapun konsentrasi sumber CO:

- 0.1 ppm - kadar latar alami atmosfer
- 0.5 to 5 ppm - rata-rata kadar latar di rumah
- 5 to 15 ppm - kadar dekat kompor gas rumah
- 100-200 ppm - daerah pusat kota Meksiko
- 5,000 ppm - cerobong asap rumah dari pembakaran kayu
- 7,000 ppm - gas knalpot mobil yang tidak diencerkan - tanpa pengubah katalitik
- 30,000 ppm - asap rokok yang tidak diencerkan

Baku mutu keberadaan CO adalah 10.000 ug/Nm³ udara dengan rata-rata waktu pengukuran 24 jam. Jika CO sebanyak 30 ppm dihisap oleh manusia selama delapan (8) jam akan menimbulkan rasa pusing dan mual. Konsentrasi CO sebanyak 1000 ppm dan waktu paparan (kontak) selama satu (1) jam

menyebabkan pusing dan kulit berubah menjadi kemerah-merahan. Selanjutnya, untuk waktu paparan yang sama dengan konsentrasi CO sebanyak 1300 ppm menyebabkan kulit langsung berubah menjadi merah tua dan disertai rasa pusing yang hebat. Untuk keadaan yang lebih tinggi lagi dapat menimbulkan akibat lebih fatal, yaitu kematian.

Senyawa ini sangat beracun karena dapat berikatan kuat dengan haemoglobin dan menghambat proses pengangkutan oksigen ke dalam jaringan-jaringan tubuh. Karbonmonoksida berikatan 200 kali lebih kuat dengan haemoglobin daripada oksigen. Oleh karena itu, CO sangat sulit untuk dilepaskan ketika telah berikatan dengan darah. Karbonmonoksida dalam sel darah merah berikatan langsung dengan Hb (haemoglobin) menjadi molekul carbonxyhemoglobin (COHb). Konsentrasi di dalam darah dipengaruhi secara langsung oleh konsentrasi CO dari udara yang terhisap. Pada konsentrasi CO tertentu di udara, maka konsentrasi COHb di dalam darah akan mencapai konsentrasi kesetimbangan setelah beberapa waktu tertentu. Konsentrasi kesetimbangan COHb tersebut akan tetap dipertahankan di dalam darah selama konsentrasi CO pada udara sekelilingnya tidak berubah. COHb secara perlahan-lahan akan berubah sesuai dengan perubahan konsentrasi CO di udara untuk mencapai kesetimbangan yang baru. COHb dapat menurunkan kadar oksigen dalam darah karena Hb dalam darah merah seharusnya berikatan dengan afinitas karbonmonoksida 200 kali lebih besar dibandingkan dengan molekul oksigen (Mark Goldstein, 2008).

Pembentukan gas CO yang merupakan gas beracun disebabkan oleh kondisi smouldering sampai developed flaming. Yield CO atau CO_2/CO ratio bisa mengindikasikan kondisi pembakaran. Produksi CO dari pembakaran tidak sempurna yang sering terjadi pada kasus kebakaran dapat meningkat dengan :

- Panas yang tidak memadai dalam fase gas (seperti selama smouldering)
- Pendinginan tiba-tiba dari reaksi nyala (seperti ketika terdapat halogen dalam reaksi nyala atau ventilasi yang berlebihan)
- Keberadaan molekul yang stabil, seperti aromatik yang tahan lebih nyala dalam zona nyala sehingga memberikan yield CO yang tinggi dalam

kondisi well-ventilated, tetapi lebih rendah dibandingkan yield pada kondisi under-ventilated.

- O₂ yang kurang (seperti yang terjadi pada pembakaran under-ventilated atau fluks panas radiasi yang besar sehingga membakar bahan bakar)

Selain gas CO, masih terdapat beberapa senyawa gas buang pembakaran yang bersifat racun. Tabel 2.2 menunjukkan komponen beracun dalam gas pembakaran.

Tabel 2.2 Komponen Beracun Utama dalam Gas Pembakaran

Yield independent of fire ventilation	Yield increase with ventilation	Yield decrease with ventilation
HF (2900; 500 ppm)	CO ₂ , tidak beracun secara khusus, tetapi mempengaruhi kadar O ₂ dan meningkatkan laju pernapasan	CO (5700 ppm)
HCl (3800; 1000 ppm)	NO ₂ (250; 170 ppm)	HCN (165 ppm)
HBr (3800; 1000 ppm)	SO ₂ (1400; 150 ppm)	Alyphatic ang aromatic hydrocarbon, PAH

2.2 Adsorpsi

Proses adsorpsi adalah proses pemisahan molekul terdifusi dari suatu fluida yang terserap pada permukaan padatan adsorben (Ruthen, Douglas M, 1984). Selain itu, adsorpsi biasa diartikan sebagai proses yang terjadi ketika gas atau cairan terlarut terakumulasi pada permukaan suatu padatan atau cairan (adsorben) dan membentuk lapisan molekul atau atom (adsorbat). Istilah adsorpsi biasa digunakan untuk menggambarkan keberadaan suatu bahan tertentu (cairan atau padatan) dengan konsentrasi yang lebih tinggi pada permukaannya daripada di dalam medium fasa ruahnya. Secara singkat, adsorpsi menunjukkan kelebihan konsentrasi pada permukaan.

Adsorben biasanya berbentuk partikel kecil yang aktif menyerap komponen-komponen dari suatu fluida. Adsorben dapat mengalami kejenuhan perlu diregenerasi untuk mengembalikan adsorben menjadi baru kembali. Proses

adsorpsi terjadi ketika molekul-molekul mengalami difusi dari fasa fluida dalam waktu periode tertentu dengan driving force menuju permukaan adsorben.

2.2.1 Jenis Adsorpsi

Proses adsorpsi secara umum diklasifikasikan sebagai :

- Adsorpsi fisika

Adsorpsi fisika disebabkan terutama oleh gaya Van der Waals dan gaya elektrostatis antara molekul adsorbat dan atom-atom yang menyusun permukaan adsorben. Hal ini ditunjukkan pada semua suhu rendah dan sedang. Adsorpsi fisika terjadi bila gaya intermolekul, yaitu gaya tarik antar molekul fluida dan permukaan padatan lebih besar daripada gaya tarik antar molekul fluida itu sendiri ($\text{adhesi} > \text{kohesi}$). Adsorpsi fisika bersifat reversible sehingga bila tekanan diturunkan, maka akan terjadi desorpsi gas. Proses adsorpsi fisika bersifat eksotermis dimana jumlah senyawa yang diadsorpsi bertambah dengan penurunan temperatur.

- Adsorpsi kimia

Adsorpsi kimia terjadi karena adanya ikatan kimia (ikatan kovalen) antara adsorbat dengan adsorben. Adsorpsi kimia bersifat irreversible dan diperlukan temperatur yang tinggi untuk menghilangkan gas-gas yang teradsorpsi.

Perbedaan antara adsorpsi fisika dan kimia adalah adsorpsi fisika hanya melibatkan gaya intermolekular yang lemah, sedangkan adsorpsi kimia pada dasarnya terjadi pembentukan ikatan kimia antara molekul adsorbat dan permukaan adsorben. Ciri-ciri umum yang membedakan adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia pada Tabel 2.3 berikut :

Tabel 2.3 Karakteristik Adsorpsi Fisika dan Kimia

ADSORPSI FISIKA	ADSORPSI KIMIA
Panas adsorpsi rendah (< 2 atau 3 kali panas laten evaporasi).	Panas adsorpsi tinggi (> 2 atau 3 kali panas laten evaporasi). $50 \text{ kJ/mol} < \Delta H < 800$

ADSORPSI FISIKA	ADSORPSI KIMIA
	kJ/mol
Tidak spesifik	Sangat spesifik
Monolayer atau multilayer	Hanya monolayer
Tidak terdapat disosiasi spesi yang teradsorpsi	Mungkin terjadi disosiasi
Hanya signifikan pada temperatur rendah	Dapat terjadi di rentang temperatur yang lebih lebar

Gejala adsorpsi timbul sebagai akibat hasil gaya permukaan pada padatan, gas, uap, cairan atau larutan, dan material tersuspensi atau koloid. Kira-kira 20% sampai 50% dari volume total kristal zeolit terdiri dari ruang terbuka, yaitu kerangka struktur aluminosilikat dan rongga antar kristal. Struktur dalam ini bersifat sangat hidrofilik sehingga biasanya penuh dengan air. Bila air ini dikeluarkan, baik dengan pemanasan atau dengan evakuasi, zeolit yang telah mengalami dehidrasi akan menjadi adsorben air yang baik. Bila zeolit dehidrat terkena udara, maka akan dengan cepat menyerap air lembab. Oleh karena itu, zeolit dehidrat efektif untuk mengatur tingkat kelembaban dalam kondisi kelembaban rendah. Sifat zeolit yang dapat terdehidrasi/terehidrasi dapat digunakan sebagai alat pendingin.

2.2.2 Adsorpsi Monolayer dan Multilayer

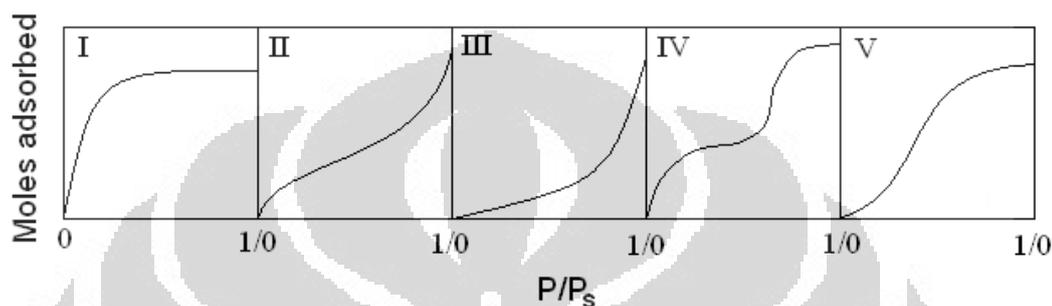
Brunauer membagi adsorpsi fisika isotermis menjadi 5 tipe seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.1 :

- Tipe 1

Isoterm pada adsorben yang memiliki mikropori sebenarnya, dimana ukuran pori tidak jauh lebih besar dari diameter molekul sorbat. Hal ini dikarenakan pada adsorben jenis itu terdapat batas kejenuhan yang berhubungan dengan telah terisinya mikropori. Terkadang, jika efek daya tarik intermolekular cukup besar, maka selanjutnya akan ditinjau dengan isoterm tipe 5.

- Tipe 2 dan 3

Isoterm yang hanya terjadi pada adsorben yang memiliki ukuran pori dengan rentang yang cukup besar. Pada sistem ini terdapat deret kontinu dengan kenaikan pemuatan dari monolayer menjadi multilayer dan selanjutnya menjadi kondensasi kapiler. Kenaikan kapasitas pada tekanan tinggi dikarenakan terjadinya kondensasi kapiler di dalam pori yang menaikkan diameter ketika tekanan dinaikkan.



Gambar 2.1 Klasifikasi Isotermis Brunauer

- Tipe 4

Pembentukan dua permukaan layer, di atas bidang permukaan atau di dinding pori, yang sangat jauh lebih lebar dibandingkan dengan diameter molekul sorbat.

2.2.2.1 Adsorpsi Isoterm Langmuir

Model yang paling sederhana untuk adsorpsi monolayer adalah Langmuir. Model Langmuir pertama kali dikembangkan untuk menunjukkan adsorpsi kimia pada kumpulan tempat adsorpsi yang dilokalisasi. Penurunan kinetik sederhana diberikan di bawah ini.

Asumsi dasar yang digunakan sebagai dasar dari model Langmuir adalah :

- Molekul diadsorpsi pada jumlah yang tetap pada suatu tempat.
- Setiap tempat dapat menangani satu molekul adsorbat.
- Setiap tempat memiliki daya adsorpsi yang sama besar.
- Tidak terdapat interaksi antara molekul yang diadsorpsi pada tempat yang berdekatan.

Dengan menganggap terdapat pertukaran molekul antara fasa teradsorpsi dan fasa gas:

$$\text{Laju adsorpsi} = k_a p(1 - \Theta) \quad (2.1)$$

$$\text{Laju desorpsi} = k_d \Theta \quad (2.2)$$

dimana q adalah jumlah tempat per unit massa atau volume adsorben, dan $\theta = q/q_s$ adalah fraksi kekosongan. Pada kondisi kesetimbangan, laju adsorpsi dan desorpsi adalah sama, yaitu :

$$\frac{\Theta}{(1 - \Theta)} = \frac{k_a}{k_d} p = bp \quad (2.3)$$

dimana $b = k_a/k_d$ merupakan konstanta kesetimbangan adsorpsi. Persamaan (2.22) dapat disusun menjadi bentuk yang lebih umum :

$$\Theta = \frac{q}{q_s} = \frac{bp}{1 + bp} \quad (2.4)$$

2.2.2.2 Adsorpsi Isoterm BET

Karena hampir semua adsorben yang penting merupakan padatan berpori, maka parameter kunci yang dibutuhkan untuk mengkarakterisasi adsorben adalah luas permukaan spesifik. Luas area spesifik dari padatan mikropori adalah sangat besar. Sangat jelas, bahwa jika kapasitas adsorpsi fisika dibatasi pada close-packed monolayer, maka penentuan batas kejenuhan dari isoterm eksperimental dengan ukuran molekul yang diketahui, akan memberikan metode yang sangat jelas dan sederhana dalam mengestimasi luas area spesifik. Kesulitan utamanya adalah bahwa pada adsorpsi kimia, biasanya tempat akan diisi, sehingga batas kejenuhan akan menunjukkan hubungan yang tidak jelas dengan luas area spesifik pada saat adsorpsi fisika mulai melibatkan multilayer. Pembentukan lapisan molekul kedua dan lapisan molekul berikutnya akan mulai pada tekanan dibawah tekanan yang diperlukan untuk penyelesaian lapisan monolayer, sehingga tidak bisa dengan segera ditentukan dengan jelas berapa kapasitas monolayer dari isoterm eksperimental. Masalah ini pertama kali diselesaikan oleh Brunauer, Emmett, dan Teller (BET) yang mengembangkan model isoterm sederhana untuk

menghitung adsorpsi multilayer dan model ini digunakan untuk mengetahui kapasitas monolayer dan juga luas permukaan spesifik.

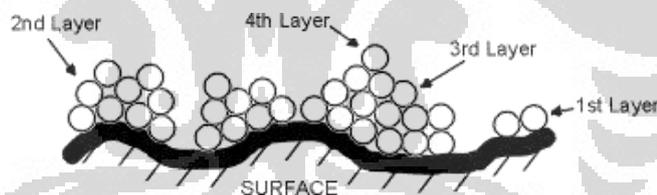
Persamaan isoterm kesetimbangan BET dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{q}{q_m} = \frac{b(p/p_s)}{(1-p/p_s)(1-p/p_s + bp/p_s)} \quad (2.5)$$

dimana p_s menunjukkan tekanan uap jenuh dari cairan jenuh sorbat pada temperatur tertentu. Persamaan ini, yang mempunyai bentuk umum klasifikasi isoterm Brunauer tipe II, ditemukan untuk memberikan gambaran yang baik dari isoterm adsorpsi fisika eksperimental bahwa jangkauan tekanan yang diturunkan dibatasi pada $0,05 < p/p_s < 0,35$.

Konsep dari teori ini adalah pengembangan dari teori langmuir yang digunakan untuk adsorpsi molekular monolayer, menjadi teori adsorpsi molekular multilayer dengan hipotesa sebagai berikut:

- Molekul gas yang teradsorp secara fisik pada permukaan solid pada banyak lapisan.
- Tanpa adanya interaksi antar tiap lapisan adsorpsi



Gambar 2.2 Interaksi Adsorbat dengan Adsorben

2.2.3 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi daya adsorpsi, seperti yang tersebut di bawah ini:

2.2.3.1 Sifat Adsorben

- Kemurnian adsorben
Adsorben yang lebih murni memiliki daya adsorpsi yang lebih baik
- Luas permukaan dan volume/jumlah pori adsorben.

Semakin besar luas permukaan adsorben, maka semakin besar pula jumlah adsorbat yang dapat diserap. Dengan jumlah pori-pori mikro yang sangat banyak pada karbon aktif, akan menimbulkan gejala kapiler yang menyebabkan adanya daya serap.

2.2.3.2 Jenis Adsorbat

- Kepolaran adsorbat

Apabila berdiameter sama, maka molekul-molekul polar lebih kuat diadsorpsi daripada molekul-molekul yang kurang polar. Molekul-molekul yang lebih polar dapat menggantikan molekul-molekul yang kurang polar, yang telah diserap terlebih dahulu.

- Ukuran molekul adsorbat

Rongga tempat terjadinya adsorpsi dapat dicapai melewati ukuran yang sesuai. Sehingga molekul-molekul yang bisa diadsorpsi adalah molekul-molekul yang berdiameter sama atau lebih kecil dari diameter pori adsorben.

2.2.3.3 Temperatur

Ketika molekul-molekul adsorbat melekat pada permukaan adsorben terjadi pembebasan sejumlah energi (panas). Oleh karena itu, adsorpsi adalah peristiwa eksotermis. Sesuai dengan azas Le Chatelier pada proses fisika, dengan berkurangnya temperatur akan menambah jumlah adsorbat yang teradsorpsi, demikian pula sebaliknya. Adsorpsi fisika yang substansial, biasanya terjadi pada temperatur di bawah titik didih adsorbat terutama 50°C.

2.2.3.4 Tekanan

Peningkatan tekanan adsorbat pada adsorpsi fisika, dapat menaikkan jumlah adsorbat yang diadsorpsi. Sebaliknya pada adsorpsi kimia, peningkatan tekanan adsorbat justru mengurangi jumlah yang diadsorpsi.

2.2.3.5 Pusat aktif

Pada permukaan yang beragam, hanya sebagian permukaan yang mempunyai daya serap. Hal ini dapat terjadi, disebabkan oleh permukaan yang heterogen. Sehingga hanya beberapa jenis zat yang dapat diserap oleh bagian permukaan yang aktif, disebut sebagai pusat aktif (active centre). Kelajuan adsorpsi bertambah dengan berkurangnya ukuran partikel adsorben. Sehingga kelajuan ditentukan oleh proses difusi. Ada dua proses difusi yang menentukan proses adsorpsi, yaitu:

- Proses difusi pada suatu lapisan tipis cairan di sekeliling partikel adsorben, yang disebut dengan difusi film.
- Proses adsorpsi dalam partikel adsorben, yang disebut difusi partikel.

Proses difusi ditentukan oleh beberapa faktor yang meliputi besar dari muatan partikel adsorben, besar dari muatan molekul atau ion adsorbat dari konsentrasi larutan adsorbat. Parameter fisis yang berpengaruh pada proses adsorpsi, biasanya dinyatakan sebagai jenis adsorben, waktu adsorpsi, konsentrasi awal larutan adsorbat, komposisi adsorbat, ukuran partikel adsorben, dosis partikel, dan temperatur larutan adsorbat.

2.3 Adsorben

Berdasarkan struktur dari unsur pembangunnya, adsorben dapat digolongkan menjadi dua, yaitu adsorben tak berpori (non porous adsorbents) dan adsorben berpori (porous adsorbents).

2.3.1 Adsorben Tak Berpori

Adsorben tak berpori dapat diperoleh dengan cara presipitasi deposit kristalin seperti BaSO_4 atau penghalusan padatan kristal. Luas permukaan spesifiknya kecil, tidak lebih dari $10 \text{ m}^2/\text{g}$. Umumnya luas permukaan spesifiknya antara $0,1-1 \text{ m}^2/\text{g}$. Bahan tak berpori seperti filler karet (rubber filler) dan karbon hitam bergrafit (graphitized carbon blacks) adalah jenis adsorben tak berpori yang telah mengalami perlakuan khusus, sehingga luas permukaannya dapat mencapai ratusan m^2/g .

2.3.2 Adsorben Berpori

Luas permukaan spesifik adsorben berpori berkisar antara 100-1000 m²/g. Biasanya dipergunakan sebagai penyangga katalis, dehidrator dan penyeleksi komponen, umumnya berbentuk granular. Beberapa jenis adsorben berpori yang terkenal adalah : silika gel, alumina, karbon aktif, zeolit (molecular sieves), dan porous glasses. Kebanyakan adsorben industri termasuk salah satu dari tiga kelas di bawah ini:

- Senyawa yang mengandung oksigen – biasanya hidrofilik dan polar, termasuk material seperti silika gel dan zeolite
- Senyawa berbasis karbon – biasanya hidrofobik dan non-polar, termasuk material seperti karbon teraktivasi dan grafit,
- Senyawa berbasis polimer – merupakan gugus fungsi polar dan non-polar di dalam matriks polimer.

Kriteria kinerja adsorbent dapat dilihat dari parameter berikut ini (Deng, Shuguang, 2008):

1. Selektivitas tinggi
2. Kapasitas adsorpsi besar
3. Kinetika adsorpsi cepat
4. Mudah digenerasi
5. Kekuatan mekanik tinggi
6. Murah

Untuk mencapai kinerja di atas adsorben harus memenuhi kriteria sebagai berikut:

1. Volume pori internal besar
2. Luas permukaan besar
3. Distribusi pori mikro
4. Ikatan adsorbat dan adsorben lemah (adsorpsi fisika)
5. Stabil secara mekanik
6. Bahan baku murah

2.3.3 Gel Silika

Adsorben ini dihasilkan dari dehidrasi asam polymer colloidal silicic dengan komposisi air yang tinggi, dapat dirumuskan seperti SiO₂.nH₂O.

Komposisi air tersebut terbentuk secara kimia dari lapisan hydroxyl group dengan berkomposisi berkisar 5%. Metode lain dalam menghasilkan silika gel yaitu dihasilkan dari hydrolysis logam alkali silikat dengan asam, logam alkali tersebut adalah sodium. Kemudian sodium tersebut dipisahkan dari sodium silikat dengan metode ion exchange. Pada proses pengeringan, partikel-partikel tersebut membentuk struktural pori berukuran mikro. Pembentukan ikatan antar partikel terjadi karena proses eliminasi air terhadap senyawa hydroxil group dan membentuk struktur akhir yang kokoh. Setelah pengeringan struktur mikropori silika gel yang telah kering akan sensitif terhadap pH dan akan dengan mudah mengalami proses presipitasi dengan kation lain yang ada pada suatu larutan. Kehadiran hydroxyl group memberikan pengaruh derajat polaritas ke permukaan, dengan molekul air, alkohol, phenol, hidrokarbon tidak jenuh dan amina dapat membentuk ikatan hydrogen. Silika gel digunakan sebagai adsorben pada proses pemisahan senyawa aromatik dari parafin dan naphane.

2.3.4 Karbon Aktif

Karbon aktif merupakan padatan amorf yang sangat porous, yang terdiri dari mikrokristalit dengan lapisan grafit, biasanya disiapkan dalam bentuk pelet kecil atau bubuk. Senyawa ini nonpolar dan murah. Salah satu kekurangannya adalah senyawa ini dapat terbakar. Karbon aktif dapat dibentuk dari material karbon, termasuk batubara (bitumen, subbitumen, dan lignit), kayu, atau tempurung kelapa. Proses pembuatannya terdiri atas dua fase, karbonisasi dan aktivasi. Proses karbonisasi termasuk ke dalamnya adalah pengeringan dan pemanasan untuk memisahkan produk samping, dan juga untuk menghilangkan gas-gas yang terbentuk. Proses karbonisasi selesai dengan cara pemanasan material hingga 400-600°C dalam suasana kurang oksigen yang tidak dapat mendukung pembakaran.

Karbon aktif digunakan untuk proses adsorpsi senyawa organik dan adsorbat nonpolar dan juga digunakan untuk pengolahan limbah gas (dan limbah air). Zat ini merupakan salah satu adsorben yang paling banyak digunakan. Manfaatnya umumnya dikarenakan volume mikropori dan mesopori yang besar dan menghasilkan luas permukaan yang tinggi. Karbon aktif, juga disebut arang

yang diaktifkan atau batubara yang diaktifkan, merupakan suatu bentuk karbon telah diproses untuk membuatnya sangat berpori dan membuatnya memiliki luas permukaan yang besar yang berguna dalam proses adsorpsi atau reaksi kimia. Kata diaktifkan biasanya dapat diganti dengan aktif. Karena tingginya jumlah mikropori, hanya satu gram karbon aktif saja dapat memiliki luas permukaan sekitar 500 m^2 , seperti yang didapat saat adsorpsi gas nitrogen. Aktivasi yang cukup untuk aplikasi yang berguna mungkin dikarenakan tingginya luar permukaan, walaupun perlakuan kimia lebih lanjut dapat menaikkan performa adsorpsi material tersebut. Karbon aktif biasanya dibuat dari arang, (CPL Caron Link, diakses 2008).

2.3.5 Zeolit

Zeolit alam terbentuk dari reaksi antara batuan tufa asam berbutir halus dan bersifat riolitik dengan air pori atau air meteorik. Penggunaan zeolit adalah untuk bahan baku water treatment, pembersih limbah cair dan rumah tangga, untuk industri pertanian, peternakan, perikanan, industri kosmetik, industri farmasi, dan lain-lain. Zeolit terdapat di beberapa daerah di Indonesia yang diperkirakan mempunyai cadangan zeolit sangat besar dan berpotensi untuk dikembangkan, yaitu Jawa Barat dan Lampung.

2.3.5.1 Struktur Zeolit

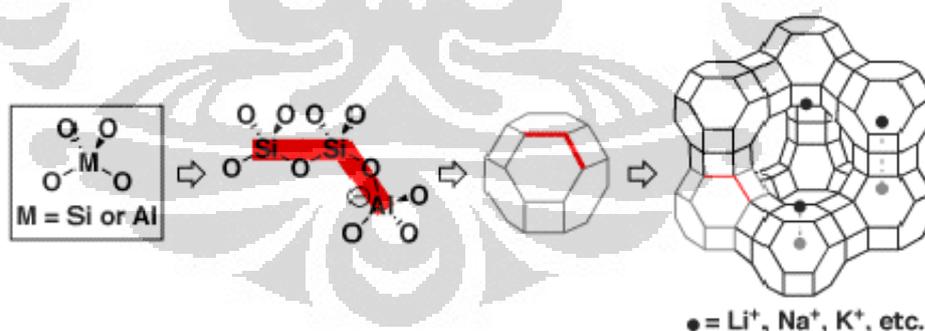
Zeolit adalah hasil dari pengkristalan alumino silikat yang terbentuk Kristal yang memiliki pori-pori yang seragam. Zeolit terdiri dari SiO_4 dan AlO_4 tetrahedra, dimana tetrahedra tersusun oleh 4 anion oksigen yang menyebar mengelilingi suatu ion silikon dan ion aluminium. Setiap atom oksigen bermuatan -2, tiap atom silicon bermuatan +4 dan akan membentuk silika tetrahedral yang tidak bermuatan (netral) sedangkan atom aluminium akan membentuk juga alumina tetrahedral dengan mengikat sisa muatan -1 dari tiap atom oksigen sehingga terjadi keseimbangan ion dan membentuk kristal yang mempunyai pori-pori dimensi molekular dan menjadi molekul-molekul yang dapat menetrasi.

Pertukaran ion-ion ini terjadi menuju ke posisi susunan rangka yang lebih cocok sehingga menjadi komposisi yang kuat sebagai adsorben. Pertukaran

kation-kation dengan menggunakan ion exchange akan sangat membantu menjadi adsorben yang kuat. Struktur mikropori yang membentuk kristal akan mempunyai ukuran pori yang seragam tanpa diketahui ukuran pori semula. Permukaan ini yang membedakan zeolit sebagai adsorben dari permukaan pori yang dimiliki oleh adsorben lainnya.

Seperti halnya mineral kwarsa dan felspar, maka mineral zeolit mempunyai struktur kristal 3 dimensi tetrahedra silikat yang biasa disebut tectosilicate. Dalam struktur ini sebagian silikon (tidak bermuatan atau netral) terkadang diganti oleh aluminium bermuatan listrik, sehingga muatan listrik kristal zeolit tersebut bertambah. Kelebihan muatan ini biasanya diimbangi oleh kation-kation logam K, Na, dan Ca yang menduduki tempat tersebar dalam struktur zeolit alam yang bersangkutan. Dalam susunan kristal zeolit terdapat dua jenis molekul air, yaitu molekul air yang terikat kuat dan molekul air yang bebas.

Berbeda dengan struktur kisi kristal kwarsa yang kuat dan pejal, maka struktur kisi kristal zeolit terbuka dan mudah terlepas. Volume ruang hampa dalam struktur zeolit cukup besar hingga mencapai 50 Angstrom, sedangkan garis tengah ruang hampa tersebut bermacam-macam, berkisar antara 2A hingga lebih dari 8A, tergantung dari jenis mineral zeolit yang bersangkutan. Gambar 2.3 di bawah ini struktur dari zeolit:



Gambar 2.3 Struktur zeolit

Rasio Si terhadap Al pada suatu zeolit tidak kurang dari 1. Komposisi adsorben akan mengalami transisi atom-atom aluminium secara sistematis dan kaya akan atom aluminium, sehingga menjadi bersifat afinitas tinggi terhadap air dan senyawa polar lainnya, sedangkan struktur mikropori silika seperti silikalite

menyebabkan sifat hydrophobic dan menyerap n-parafin terhadap air. Transisi dari hydrophilic menjadi hydrophobic akan terjadi jika rasio Si terhadap Al antara 8 hingga 10. Setiap adsorben zeolite akan memiliki jenis yang berbeda-beda tergantung pada struktur rangka dari rasio perbandingan Si terhadap Al dan bentuk susunan kation, dengan perbedaan komposisi tersebut akan pula menjadi adsorben yang selektif dalam pemilihan molekul yang akan dipisahkan.

2.3.5.2 Sifat Zeolit

Zeolit mempunyai sifat dehidrasi (melepaskan molekul H_2O) apabila dipanaskan. Pada umumnya struktur kerangka zeolit akan menyusut. Tetapi kerangka dasarnya tidak mengalami perubahan secara nyata. Disini molekul H_2O seolah-olah mempunyai posisi yang spesifik dan dapat dikeluarkan secara reversibel. Sifat zeolit sebagai adsorben dan penyaring molekul, dimungkinkan karena struktur zeolit yang berongga, sehingga zeolit mampu menyerap sejumlah besar molekul yang berukuran lebih kecil atau sesuai dengan ukuran rongganya. Selain itu kristal zeolit yang telah terdehidrasi merupakan adsorben yang selektif dan mempunyai efektivitas adsorpsi yang tinggi.

Zeolit juga sering disebut sebagai molecular sieve/molecular mesh (saringan molekuler) karena zeolit memiliki pori-pori berukuran molekuler sehingga mampu memisahkan/menyaring molekul dengan ukuran tertentu. Zeolit mempunyai beberapa sifat antara lain : mudah melepas air akibat pemanasan, tetapi juga mudah mengikat kembali molekul air dalam udara lembab. Oleh sebab sifatnya tersebut maka zeolit banyak digunakan sebagai bahan pengering. Disamping itu zeolit juga mudah melepas kation dan diganti dengan kation lainnya, misal zeolit melepas natrium dan digantikan dengan mengikat kalsium atau magnesium. Sifat ini pula menyebabkan zeolit dimanfaatkan untuk melunakkan air. Zeolit dengan ukuran rongga tertentu digunakan pula sebagai katalis untuk mengubah alkohol menjadi hidrokarbon sehingga alkohol dapat digunakan sebagai bensin.

Kemampuan zeolit sebagai katalis berkaitan dengan tersedianya pusatpusat aktif dalam saluran antar zeolit. Pusat-pusat aktif tersebut terbentuk karena adanya gugus fungsi asam tipe Bronsted maupun Lewis. Perbandingan

kedua jenis asam ini tergantung pada proses aktivasi zeolit dan kondisi reaksi. Pusat pusat aktif yang bersifat asam ini selanjutnya dapat mengikat molekul-molekul basa secara kimiawi. Sedangkan sifat zeolit sebagai penukar ion karena adanya kation logam alkali dan alkali tanah. Kation tersebut dapat bergerak bebas didalam rongga dan dapat dipertukarkan dengan kation logam lain dengan jumlah yang sama. Akibat struktur zeolit berongga, anion atau molekul berukuran lebih

2.3.5.3 Pemanfaatan Zeolit

Berdasarkan penelitian, kemampuan karbon aktif dan silika gel sebagai bahan penyerap ternyata tidak melebihi zeolit alam. Zeolit sintetis dapat lebih murni dan mempunyai kemampuan lebih luas dibandingkan dengan zeolit alam, terutama sebagai bahan katalis. Zeolit sintetis jauh lebih disukai dibandingkan dengan zeolit alam, di samping karena keaktifan, dan selektivitasnya yang lebih baik juga kestabilannya. Kinerja ini terutama ditentukan oleh kemurnian, struktur kristal, dan komposisi kimia dari zeolit tersebut, kecil atau sama dengan rongga dapat masuk dan terjebak.

Dalam pemanfaatan zeolit telah mengalami pengembangan sedemikian rupa sehingga dapat digunakan untuk beberapa keperluan dalam industri dan pertanian, juga bagi lingkungan, terutama untuk menghilangkan bau, karena zeolit dapat menyerap molekul-molekul gas seperti CO, CO₂, H₂S dan lainnya. Zeolit merupakan bahan galian non logam atau mineral industri multi guna karena memiliki sifat-sifat fisika dan kimia yang unik yaitu sebagai penyerap, penukar ion, penyaring molekuler dan sebagai katalisator. (Herry, 2007)

Zeolit yang terdehidrasi akan mempunyai struktur pori terbuka dengan internal surface area besar sehingga kemampuan mengadsorpsi molekul selain air semakin tinggi. Ukuran pori ini menentukan ukuran molekul yang dapat teradsorpsi. Sifat ini yang menjadikan zeolit mempunyai kemampuan penyaringan yang sangat spesifik yang dapat digunakan untuk pemurnian dan pemisahan. Zeolit yang digunakan sebagai penyaring molekuler tidak menunjukkan perubahan cukup besar pada struktur kerangka dasar pada dehidrasi walaupun kation berpindah menuju posisi dengan koordinasi lebih rendah. Setelah dehidrasi,

zeolit sangat stabil terhadap pemanasan dan tidak terdekomposisi di bawah 700°C. (Zeolit, 2010)

Kemampuan zeolit aktif untuk mengadsorb gas ditentukan oleh ukuran diameter saluran yang berkisar antara 2,5 Å sampai 4,3 Å (tergantung pada jenis zeolit). Pada ukuran saluran tertentu, memungkinkan zeolit untuk bertindak sebagai molecular gas sieves dan secara selektif mengadsorb gas seperti ammonia, hidrogen sulfida, karbon monoksida, karbon dioksida, sulfur dioksida, uap air, oksigen, nitrogen, formaldehid, dan lain sebagainya. Terdapat suatu hasil penelitian yang dilakukan oleh Youchang Xie, dkk bahwa gas CO dapat diserap dengan sangat efektif menggunakan zeolit yang dimodifikasi dengan CuCl pada suhu 30°C. (Xie, Youchang, 1996).

2.3.5.4 Jenis-jenis Zeolit

Zeolit tersusun atas tetrahedral alumina dan silika sehingga kandungan Si dan Al turut mempengaruhi struktur yang terbentuk. Berdasarkan perbandingan Si/Al tersebut beberapa zeolit dikelompokkan sebagai berikut (Riberio, dkk, 1984)

- Zeolit dengan kadar Si/Al rendah (1-1,5) Yaitu zeolit Adan X
- Zeolit dengan kadar Si/Al menengah (1,5-10)
 - a. Zeolit alam
Erionit, chabazit, clinoptilolit, mordenit.
 - b. Zeolit sintetis
Y, L, omega, mordenit dengan pori besar.
- Zeolit dengan kadar Si/Al tinggi (10-100)
 - a. Dari modifikasi kerangka Y dari jenis yang kaya akan silika, mordenit, erionit
 - b. Hasil sintetis langsung ZSM-5

Karakteristik zeolit alam Indonesia sebagai berikut :

Tabel 2.4 Karakteristik Zeolit Alam Indonesia (<http://www.bionatura.unpad.ac.id>, 2010)

Sumber	Perbandingan Si/Al	Isi Rongga (m ³ /g)	Luas permukaan (m ² /g)
Malang	2,86	0,5	183,78
Cikalong	3,14	0,6	211,92
Banten	4,01	0,5	163,69
Lampung	3,78	0,4	170,81
Bogor	2,84	0,6	285,72

2.3.5.5 Zeolit Alam Malang dan Lampung

Zeolit, disamping dapat menyerap senyawa carcinogenic nitrosamines (NDMA and NPYR) tetapi juga secara katalitik mendegradasi karsinogenik berbahaya menjadi senyawa dengan tingkat karsinogenik lebih rendah pada suhu tertentu, meskipun ada gas N₂. Terlihat dari penemuan peneliti sebelumnya bahwa zeolit merupakan salah satu material yang berpotensi digunakan sebagai adsorben.

Zeolit alam Lampung memiliki komposisi 78% klinoptilolit, analcim 14% dan modernit 8%. Klinoptilolit memiliki persamaan kimia (NaK)₆.(Al₆Si₃₀O₇₂).20H₂O. Sedangkan rumus kimia mordenit adalah (Ca,Na₂,K₂)Al₂Si₁₀O₂₄•7H₂O. Sistem kristal mordenit adalah ortorombik. Mineral ini biasanya ditemukan di dalam batuan volcanik bersama-sama dengan Stilbit dan Heulandit. Mordenit merupakan salah satu jenis zeolit alam dengan rasio Si/Al yang tinggi. Hal ini menyebabkan mordenit memiliki stabilitas termal yang tinggi. Dehidrasi terjadi pada range 80°C – 400°C.

Rumus molekul zeolit alam Lampung adalah Na_{2,94}K_{1,35}Ca_{0,63}Mg_{0,21}Al_{6,25}Si_{29,74}O₇₂.24H₂O. Komposisi kimia zeolit alam Lampung dapat dilihat pada Tabel 2.5 berikut ini.

Tabel 2.5 Komposisi Kimia Zeolit Alam Lampung

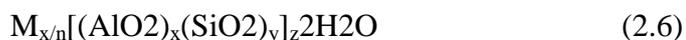
Senyawa	Prosentase
SiO ₂	72,6
Al ₂ O ₃	12,4
Fe ₂ O ₃	1,19
Na ₂ O	0,45
TiO ₂	0,16
MgO	1,15
K ₂ O	2,17
CaO	3,56
Lain-lain	6,32

Zeolit alam Malang mengandung mordenit. Zeolit alam ini memiliki daya adsorpsi yang cukup baik karena memiliki luas permukaan dan ukuran pori yang relatif besar bila dibandingkan dengan zeolit alam lainnya. Klinoptilolit memiliki atom Al sedikit sehingga kapasitas pertukaran ionnya kecil. Hal ini berarti bahwa sebagian besar ion pusat struktur adalah silica yang bermuatan +4 dan mengikat empat atom oksigen sehingga netral. Adanya ion Al yang bermuatan +3 menjadikan struktur tidak stabil dan menarik kationkation di sekitarnya untuk menetralkan muatan.

Selain itu Al dapat ditukar dengan ion-ion lain untuk menghasilkan zat padat baru yang berpori. Jenis klinoptilolit sangat baik digunakan sebagai penapis molekul yaitu penyerap molekul-molekul dari udara, limbah (Lab. Pertamina Pulogadung).

Pada umumnya zeolit yang didapatkan dari alam masih mengandung banyak zat pengotor dan masih berbentuk batuan yang dapat mengurangi kegunaan dari zeolit itu. Untuk meningkatkan nilai tambah zeolit dan pemanfaatannya untuk proses adsorpsi, dibutuhkan suatu perlakuan awal dan pengaktifan zeolit alam tersebut. Zeolit alam harus dibuat menjadi butiran-butiran agar luas permukaan serapannya lebih besar kemudian dibersihkan dari senyawa pengotornya.

Zeolit merupakan aluminosilikat kristalin dari elemen alkali dan alkali tanah dengan stoikiometrinya :



Pada saat adsorben mencapai kapasitas adsorpsi maksimum, (ditandai dengan mulai jenuhnya adsorben) maka perlu dilakukan suatu proses untuk mendapatkan kembali kemampuan adsorpsi dari adsorben yang telah jenuh tersebut. Proses ini disebut dengan nama regenerasi.

1. Regenerasi fisika

Metode yang paling umum untuk regenerasi fisika adalah membersihkan pengotor atau adsorbat dengan meletakkan adsorben dalam unggun yang dilalui gas panas. Suhu dan tekanan operasi dalam proses ini disesuaikan dengan karakteristik adsorben. Suhu keluaran gas umumnya lebih tinggi sekitar 10°C daripada suhu pada ujung unggun.

2. Regenerasi kimia

Regenerasi kimia dilakukan dengan cara pertukaran ion berdasarkan deret keaktifan ion. Berbeda dengan regenerasi fisika, regenerasi kimia dapat meningkatkan daya adsorpsi dari adsorben. Hal ini disebabkan oleh ion regeneran yang bukan saja mampu mengusir ion adsorbat, namun ion tersebut juga dapat meningkatkan driving force adsorben sehingga kinerja adsorben setelah diregenerasi menjadi baik.

2.3.5.6 Metode Aktivasi Zeolit

Proses aktivasi zeolit dilakukan untuk menghasilkan zeolit dengan sifat-sifat yang diinginkan sehingga dapat digunakan sebagai adsorben. Aktivasi zeolit alam dapat dilakukan secara fisika maupun kimia. Secara fisika, aktivasi dapat dilakukan dengan pemanasan pada suhu 300-400°C dengan udara panas atau dengan sistem vakum untuk melepaskan molekul air. Sedangkan aktivasi secara kimia dilakukan melalui pencucian zeolit dengan larutan Na₂EDTA atau asam-asam anorganik seperti HF, HCl dan H₂SO₄ untuk menghilangkan oksida-oksida pengotor yang menutupi permukaan pori (Zeolit, 2010). Terdapat beberapa tahap

dalam melakukan aktivasi terhadap zeolit. Adapun tahapan tersebut adalah dealuminasi, pertukaran ion, dan kalsinasi (Scott, Kathleen, Prabir, 2003).

1. Dealuminasi

Metode ini adalah teknik yang digunakan untuk mengurangi kandungan alumunium zeolit. Proses ini menyebabkan pergeseran tetrahedral alumunium dari posisi rangka ke posisi non rangka tetapi tidak menghilangkan alumunium dari zeolit. Pada proses ini dilakukan pencucian zeolit dengan asam kuat. Larutan asam yang umumnya digunakan adalah asam florida dan klorida. Florin maupun klorin adalah zat yang sangat sensitif terhadap zeolit, dimana hal tersebut tergantung pada kondisi perlakuannya seperti konsentrasi, lamanya pencucian, kadar air, dan temperatur pencucian. Alumina dan silika dapat bereaksi dengan florin dan klorin pada kondisi yang tidak terlalu pekat dan lingkungan biasa (temperatur kamar). Dealuminasi zeolit dengan florin akan menghasilkan $AlF_x(OH)_y$ dan dengan klorin akan menghasilkan $AlCl_x(OH)_y$.

2. Pertukaran Ion

Pertukaran ion dalam zeolit adalah proses dimana kation yang ada dalam sistem pori intrakristalin ditutup dengan kation lain yang berasal dari larutan. Larutan zeolit akan mencapai kesetimbangan sesuai dengan persamaan berikut:



(2.7)

dimana z_a dan z_b adalah muatan kation A dan B yang bertukar dan z dan s menunjukkan zeolit dan larutan. Pertukaran ion tersebut tidak akan berlangsung sempurna jika konsentrasi larutan yang digunakan tidak sangat besar atau temperatur sistem dinaikkan sehingga menggeser kesetimbangan. Dalam pertukaran ion tersebut, terdapat dua hal penting yaitu jenis dan konsentrasi dari larutan pertukaran ion yang digunakan (Royae, dkk, 2007).

3. Kalsinasi

Kalsinasi adalah perlakuan panas terhadap zeolit pada temperatur yang relatif tinggi dalam furnace. Hal ini dilakukan untuk menghilangkan zat organik

yang dikandung zeolit, juga untuk menguapkan amoniak zeolit sehingga diperoleh H-zeolit. Mekanismenya adalah sebagai berikut:



dimana K adalah kation (umumnya logam alkali). Persamaan (2.9) merupakan hasil dari pertukaran ion, yaitu antara K-zeolit dengan larutan NH_4NO_3 , sedangkan persamaan (2.8) merupakan proses kalsinasi. Pada proses kalsinasi ini terjadi penyusunan kembali alumina silika yang tidak stabil menjadi bentuk yang lebih stabil dan menghasilkan susunan kristal yang lebih baik.

2.4 Sumber

Saat ini, produksi tahunan zeolit alam dunia mencapai 4 juta ton. Dari jumlah ini, 2,6 juta ton dipasarkan ke pasar Cina untuk digunakan pada industri beton. Eropa Timur, Eropa Barat, Australia, dan Asia merupakan produsen utama zeolit alam untuk memenuhi kebutuhan dunia. Sebagai perbandingan, hanya 57.400 metrik ton (sumber: Survei Geologi AS, 2004) zeolit (hanya 1% dari produksi dunia saat itu) diproduksi di Amerika Utara.

Ada beberapa jenis zeolit sintetik yang dibentuk dari suatu proses kristalisasi gel silika-alumina dalam kehadiran alkali dan senyawa organik. Salah satu dari proses tersebut digunakan untuk melakukan sintesis zeolit dalam proses sol-gel. Sifat produk bergantung pada komposisi campuran reaksi, pH sistem, temperatur operasi, waktu pengumpanan sebelum reaksi, waktu reaksi, dan juga senyawa yang digunakan. Dalam proses sol-gel, elemen lainnya (logam, oksida logam) dapat dengan mudah bergabung. Sol silikalil yang terbentuk dengan metode hidrotermal sangatlah stabil. Juga kemudahan untuk scale up proses ini membuatnya menjadi salah satu rute sintesis zeolit yang disukai.

BAB 3

METODE PENELITIAN

Dalam bab ini akan dibahas diagram alir proses penelitian, peralatan dan bahan yang digunakan dan prosedur penelitian. Penelitian dilakukan di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (RPKA), Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia yang terdiri dari 3 tahap, yaitu:

1. Preparasi adsorben
2. Uji adsorpsi adsorben
3. Karakterisasi adsorben

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan seperti diagram alir proses yang dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Untuk langkah-langkah yang lebih jelas dan lebih detail dapat dilihat pada bagian prosedur penelitian.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Tahapan Penelitian

Percobaan uji kapasitas adsorpsi gas CO dengan menggunakan zeolit alam Malang dan Lampung ini memiliki 3 tahapan, yaitu:

3.2.1 Preparasi Adsorben

Preparasi adsorben ini bertujuan untuk menghilangkan materi-materi pengotor yang ada pada zeolit sehingga kapasitas adsorpsinya meningkat. Hal-hal yang diperlukan pada tahapan ini adalah:

3.2.1.1 Peralatan Penelitian

Alat-alat yang digunakan untuk proses preparasi zeolit alam yaitu:

1. Beaker glass
2. Spatula kaca
3. *Magnetic stirrer*
4. Kertas saring dan corong
5. *Atmospheric furnace*
6. Cawan
7. Pipet tetes dan pipet volume
8. Timbangan mekanik
9. Pengayak 37-50 mikron, 125 mikron dan 312.5 mikron
10. lumpang porselin

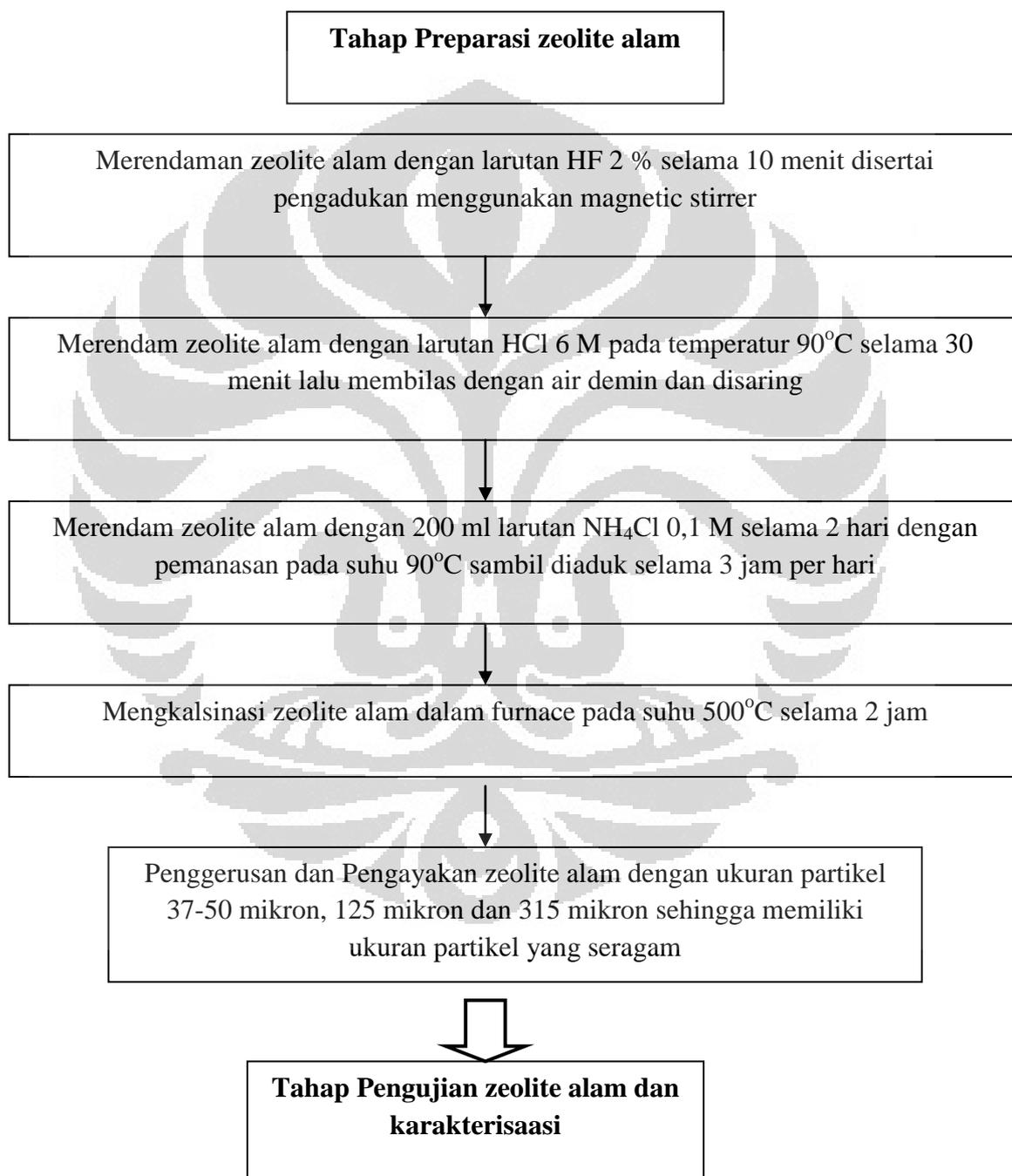
3.2.1.2 Bahan yang Digunakan pada Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan untuk treatment awal zeolit alam tersebut adalah:

1. Zeolit alam Lampung
2. Zeolit alam Malang
3. HF 2 % (Merck)
4. HCL 6 M (Merck)
5. NH_4Cl 0,1 M (Merck)
6. Demineralized water

3.2.1.3 Prosedur Penelitian

Percobaan pada tahapan ini bertujuan untuk mendapatkan efektifitas adsorben dalam menyerap gas CO yang merupakan gas paling berbahaya yang terdapat dalam asap kebakaran. Adsorben yang digunakan adalah adsorben hasil screening pada percobaan 3.4.



Gambar 3.2 Diagram alir proses preparasi zeolit alam

3.2.2 Karakterisasi Adsorben

Proses karakterisasi dilakukan di Lemigas dengan menggunakan metode BET yang bertujuan untuk mengetahui luas permukaan dan ukuran pori dari zeolit alam tersebut, baik yang teraktivasi maupun tak teraktivasi. Selain itu, juga dilakukan uji XRF di PT. Intertek Services untuk mengetahui rasio Si/Al serta kandungan logam yang ada pada zeolit tersebut.

3.2.3 Uji Adsorpsi Adsorben

Uji adsorpsi ini dilakukan untuk mengetahui kapasitas adsorpsi dari tiap adsorben yang digunakan pada penelitian ini sehingga dapat didapatkan spesifikasi adsorben yang memiliki kapasitas adsorpsi terbesar akan gas CO.

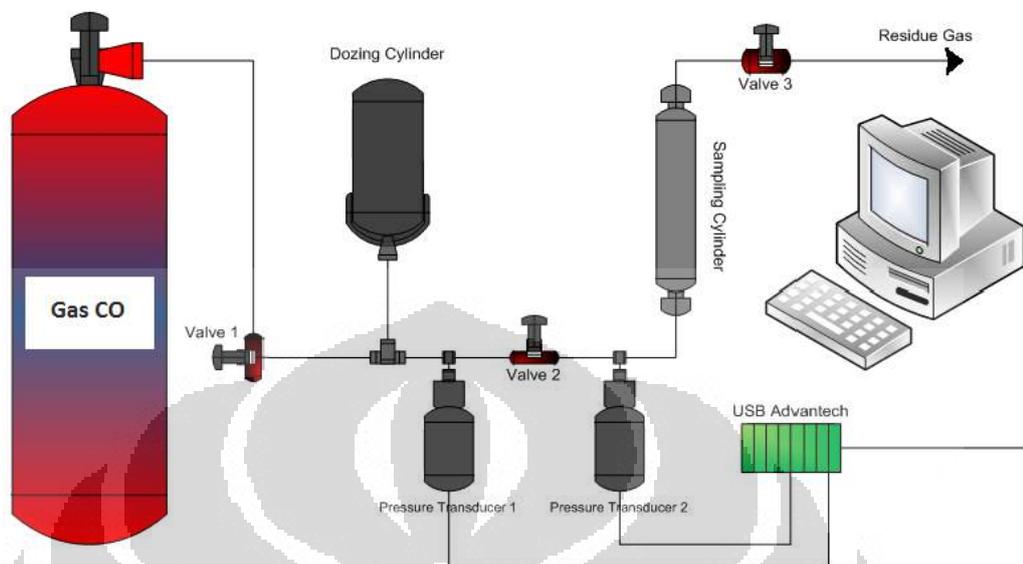
3.2.3.1 Peralatan Penelitian

Alat-alat yang digunakan untuk uji aktivasi zeolit alam meliputi:

1. *Dozing Cylinder*
2. *Pressure Transducer (Omegadyne)*
3. Oven
4. CO storage
5. Termometer/termokopel
6. Timbangan
7. Pengontrol suhu
8. *USB Data Acquisition (Advantech USB 4718)*
9. *Power Supply Regulator*
10. Perangkat computer

Alat uji yang akan digunakan adalah alat uji adsorpsi gas tekanan tinggi yang ada di Lab. RPKA DTK UI. *Adsorption Storage* berbentuk silinder berdiameter 1 cm yang dilengkapi dengan *pressure transducer* pada pipa penyalurnya yang dihubungkan dengan komputer dengan *software* Adam View dan USB Data Acquisition. Pembacaan parameter tekanan dan temperatur merupakan suatu kalibrasi tegangan listrik yang dihasilkan dari *pressure*

transducers dan diterjemahkan sebagai besaran tekanan dan temperatur oleh computer dengan bantuan USB Data Acquisition.



Gambar 3.3 Skema Ruang Uji

3.2.3.2 Bahan-bahan Uji Adsorpsi CO

Bahan-bahan yang digunakan untuk uji kapasitas adsorpsi zeolit alam adalah:

1. Zeolit alam yang belum dan telah diaktifkan
2. Gas Helium *High Purity* (99,995%)
3. Gas Carbon monoksida (CO) *High Purity* (99,995%)
4. *Glass woll* (Merck)

3.3 Persiapan Alat Uji Adsorpsi CO

Alat uji adsorpsi CO yang akan dipakai dalam penelitian ini merupakan modifikasi dari peralatan uji adsorpsi yang ada di Laboratorium Teknologi Energi Berkelanjutan Departemen Teknik Kimia. Rangkaian alat uji adsorpsi CO tersusun sebagai berikut :

1. *Dosing Cylinder*

Dosing Cylinder dibuat berukuran mini dimana volumenya kira-kira dua kali dari volume tabung penyimpanan CO (atau disebut *sampling cylinder*).

Silinder ini terbuat dari pipa *stainless steel* 0.25 inch dengan panjang 50 cm dan dihubungkan dengan tabung gas bertekanan, *pressure transducer* dan tabung penyimpan CO melalui pipa *stainless steel* 1/8 inch. Pada masing-masing sambungan *dozing cylinder* dengan gas bertekanan dan tabung penyimpan CO dipasang *needle valve* untuk menutup dan membuka aliran gas yang masuk maupun yang keluar. *Dozing cylinder* digunakan untuk mengetahui jumlah gas CO yang diinjeksikan atau yang akan dilepaskan ke atau dari dalam *sampling cylinder*.

Setelah rangkaian alat *dozing cylinder* terpasang, maka selanjutnya dilakukan penentuan volume aktual rangkaian ini dengan cara mengukur volume air yang dibutuhkan untuk memenuhi seluruh ruang dalam rangkaian alat *dozing cylinder*.

2. *Sampling Cylinder*

Pada percobaan ini, *sampling cylinder* dibuat berukuran mini untuk kapasitas adsorben sebanyak +/- 2 gram. Bahan silinder ini terbuat dari pipa *stainless steel* ¼ inch dengan panjang 20 cm. Silinder ini dihubungkan dengan *dozing cylinder* dan *pressure transducer* pada ujung depan dan selang buangan gas pada ujung belakang.

3. *Pressure Transducer*

Dua buah *pressure transducer* dihubungkan dengan *dozing cylinder* dan *sampling cylinder* melalui pipa *stainless steel* 1/8 inch untuk mengetahui tekanan gas pada masing-masing silinder. *Pressure transducer* juga dihubungkan dengan *power supply* regulator dan *data acquisition* yang masing-masing terhubung melalui dua buah kabel positif-negatif. Kedua *pressure transducer* yang digunakan sebelumnya telah dikalibrasi pada interval tekanan 14.7 sampai 1014.7 psia dengan voltase input dari *power supply* diatur sebesar 10 volt. Hasil kalibrasi ini didapat persamaan garis linier antara tekanan terhadap milivolt yang dihasilkan dari sinyal output *pressure transducer*.

4. *Data Acquisition*

Alat mirip multimeter ini dihubungkan dengan dua buah *pressure transducer* dan komputer berturut-turut melalui dua buah kabel positif-negatif dan satu kabel USB. Sinyal listrik keluaran dari *pressure transducer* dideteksi oleh *data acquisition* dan nilainya dibaca melalui program Adam View berupa milivolt di komputer. Dengan memasukkan besar milivolt yang dihasilkan ke dalam persamaan garis linier antara tekanan terhadap voltase, maka besar tekanan baik pada *dozing cylinder* maupun *sampling cylinder* dapat diketahui nilainya.

3.4 **Persiapan Adsorben**

Bahan zeolit yang digunakan adalah zeolit alam teraktivasi dan belum teraktivasi yang tersedia di Departemen Teknik Kimia. Kedua bahan ini ditimbang kira-kira 2 gram, lalu masing-masing dimasukkan ke silinder pengujian untuk kemudian diuji kemampuan adsorpsi gas karbonmonoksida serta diamati perilaku dinamis adsorpsinya. Sebelum bahan-bahan tersebut diuji, dipanaskan terlebih dahulu pada temperatur 50°C dan kondisi vakum selama 5 jam untuk menghilangkan uap air kesetimbangan yang mungkin terperangkap dalam bahan.

3.5 **Cek Kebocoran Peralatan Adsorpsi**

Setelah semua rangkaian alat uji penyimpan CO tersusun dengan benar dan zeolit telah siap dipreparasi, maka selanjutnya dilakukan uji kebocoran peralatan untuk mengetahui kesiapan dan kualitas alat uji dalam pengujian adsorpsi yang akan dilakukan. Pada uji ini, gas helium diinjeksikan ke dalam rangkaian alat uji penyimpan CO sampai tekanan kira-kira 300 psia. Lalu diamati kestabilan tekanan pada *dozing cylinder* dan *sampling cylinder*.

3.6 **Pengujian Adsorpsi CO**

Pada analisis ini adsorbat yang dipakai adalah gas CO. Prosedur penelitiannya adalah sebagai berikut :

1. Kalibrasi volume void *sampling cylinder*

Pada *sampling cylinder* terdapat zeolit sebagai adsorben dengan massa zeolit yang dimasukkan sekitar 2 gram. Volume void dari *sampling cylinder* adalah volume total dari ruang kosong yang terdapat pada *sampling cylinder*.

$$V_{\text{void}} = V_{\text{SC}} - V_{\text{ruang yang terisi zeolit}} + V_{\text{pori-pori zeolit}} \quad (3.1)$$

Prosedur pencarian volume void dari *sampling cylinder* adalah sebagai berikut :

- Mengisi *dozing cylinder* dengan gas He sampai penuh dengan cara membuka valve V-1 dan mengalirkan gas He ke dalam alat tersebut. Sementara itu, valve V-2 dalam keadaan tertutup dan semua pompa vakum dalam keadaan mati. Valve V-1 ditutup ketika *dozing cylinder* terisi penuh. Setelah itu, mencatat temperatur (T_i) dan tekanan (P_i) CO di *dozing cylinder*. Dengan data ini, maka kita bisa mengetahui jumlah mol He yang terdapat pada *dozing cylinder* menurut persamaan berikut ini :

$$n = \frac{P_i V_{\text{dozing cylinder}}}{Z_{\text{He}} RT_i} \quad (3.2)$$

Pada prosedur ini $V_{\text{dozing cylinder}} = V_{\text{He}}$

- Membuka valve V-2 dan mengalirkan gas He tersebut ke dalam *sampling cylinder*. Ketika semua gas He telah masuk ke dalam *sampling cylinder*, valve V-2 ditutup serta mencatat temperatur (T_f) dan tekanan (P_f) dari *dozing cylinder*. Dengan data ini, maka kita akan dapat mengetahui jumlah mol (n_i) dari gas He yang dimasukkan ke *sampling cylinder* dengan persamaan :

$$n = \left(\frac{P_i}{Z_{\text{He}} RT_i} - \frac{P_f}{Z_{\text{He}} RT_f} \right) V_{\text{dozing cylinder}} \quad (3.3)$$

- Mencari volume void dari *sampling cylinder*. Data yang sudah diketahui adalah temperatur *sampling cylinder* (T_f), tekanan *sampling cylinder* (P_f)

$$V_{\text{void}} = \frac{n_i Z_{\text{He}} RT_f}{P_f} \quad (3.4)$$

- Mengeluarkan gas He dari *sampling cylinder* dengan menyalakan pompa vakum

2. Adsorpsi Gas CO

- Mengisi *dozing cylinder* dengan gas CO dengan membuka valve V-1 dan mengalirkannya ke *dozing cylinder* sampai tekanan yang diinginkan. Setelah

tekanan tercapai, valve V-1 ditutup dan mencatat temperatur (T_i) dan tekanan (P_i) CO di *dozing cylinder*.

- Mengalirkan gas CO ke *sampling cylinder* dengan membuka valve V-2. Ketika semua gas CO telah masuk ke dalam *sampling cylinder*, menutup valve V-2 dengan cepat serta mencatat temperatur (T_f) dan tekanan (P_f) CO pada *sampling cylinder* setelah mencapai kesetimbangan.
- Mencari jumlah mol zat yang teradsorpsi dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$n_{CO \text{ teradsorp}} = n_{CO,i} - n_{CO \text{ tidak teradsorp}} \quad (3.5)$$

$$n_{CO \text{ teradsorp}} = \left[\left(\frac{P_i}{z_{CO,i}RT_i} - \frac{P_f}{z_{CO,f}RT_f} \right) V_{dozing \ cylinder} \right] - \left[\frac{P_f V_{void}}{z_{CO,f}RT_f} \right] \quad (3.6)$$

- Menentukan jumlah gas CO teradsorpsi pada zeolit dalam bentuk % *excess* adsorpsi dan % kapasitas penyimpanan :

$$\% \text{ excess adsorpsi} = \frac{m_{CO \text{ teradsorpsi}}}{m_{CO \text{ teradsorpsi}} + m_{zeolit}} \times 100\% \quad (3.7)$$

$$\% \text{ kapasitas penyimpanan} = \frac{m_{CO \text{ total}}}{m_{CO \text{ total}} + m_{zeolit}} \times 100\% \quad (3.8)$$

Prosedur di atas dilakukan untuk masing-masing zeolit sampai diperoleh kurva adsorpsi isothermal dengan tekanan 0-300 psia.

3.7 Variable Dalam Penelitian

Variasi ukuran zeolit alam dan suhu pada operasi uji adsorpsi. Variasi ini dilakukan untuk mendapatkan material zeolit dengan spesifikasi ukuran dan kondisi operasi suhu yang optimum dalam penyerapan CO. Ukuran zeolit alam yang divariasikan tersebut adalah 37-50 mikron, 100 mikron dan 300 mikron. Sedangkan variasi suhu meliputi 25°C, 35°C dan 50°C.

3.8 Pembuatan Kurva Adsorpsi

Kurva adsorpsi CO pada zeolit dibuat dengan cara menghubungkan jumlah mol CO yang teradsorpsi (didapat dari persamaan 3.5) per gram zeolit terhadap tekanan silinder penyimpanan CO yaitu 0 sampai 300 psia.

3.9 Pembuatan Model Adsorpsi

Model adsorpsi gas CO pada zeolit yang digunakan dalam penelitian ini adalah model adsorpsi Langmuir. Pengolahan data dalam membuat model ini menggunakan program *Microsoft Excel*. Adapun langkah-langkah dalam menentukan konstanta model adsorpsi Langmuir sebagai berikut :

- Menentukan jumlah mol adsorpsi Gibbs (n_{adsgibbs}) pada setiap tekanan adsorpsi dengan memasukkan harga coba-coba konstanta b dan kapasitas adsorpsi maksimum (n_{maks}) ke dalam persamaan berikut :

$$n_{\text{ads}}^{\text{abs}} = n_{\text{maks}} \frac{bP}{1+bP} \quad (3.9)$$

- Menentukan % AAD (*absolute average deviation*) dari jumlah mol adsorpsi Gibbs yang didapat dari persamaan model di atas (n_{model}) dengan jumlah mol adsorpsi Gibbs dari data eksperimen (n_{eksp}). Persamaannya sebagai berikut :

$$\%AAD = \frac{\sum_i^N \left| \frac{n_{\text{eksp}} - n_{\text{model}}}{n_{\text{eksp}}} \right| \times 100}{N} \quad (3.10)$$

- Dengan bantuan program *Solver*, dilakukan minimalisasi nilai % AAD dengan merubah konstanta b dan n_{maks} sehingga didapat jumlah mol adsorpsi Gibbs dari model yang sama dengan jumlah mol adsorpsi Gibbs dari eksperimen.

BAB 4

PEMBAHASAN

4.1 Preparasi Adsorben

Zeolit pada umumnya dapat dibedakan menjadi dua, yaitu zeolit alam dan zeolit sintetik. Zeolit alam biasanya mengandung kation-kation K^+ , Na^+ , Ca^{2+} atau Mg^{2+} , sedangkan zeolit sintetik biasanya hanya mengandung kation-kation K^+ atau Na^+ . Pada zeolit alam, adanya molekul air dalam pori dan oksida bebas di permukaan seperti Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O dapat menutupi pori-pori atau situs aktif dari zeolit sehingga dapat menurunkan kapasitas adsorpsi maupun sifat katalis dari zeolit tersebut. Inilah alasan mengapa zeolit alam perlu diaktivasi terlebih dahulu sebelum digunakan. (Zeolit, 2010)

Preparasi zeolit alam dilakukan untuk proses aktivasi zeolit. Aktivasi ini berfungsi untuk mengurangi zat pengotor, kandungan air, meningkatkan rasio Si/Al, menguatkan struktur, serta meningkatkan daya serap pada proses adsorpsi gas dengan zeolit alam. Pengamatan selama proses aktivasi adalah sebagai berikut:

- Dealuminasi menggunakan larutan HF 2% dan HCl 6 M

Timbul larutan berwarna putih keabuan dan keruh saat direndam dengan HF 2%. Ini mengindikasikan adanya logam yang larut ke dalam larutan. Perendaman dengan larutan HCL membuat larutan yang awalnya bening berubah menjadi kuning, lalu timbul endapan di bawahnya. Hal ini juga mengindikasikan adanya logam yang terlarut di dalamnya.



Gambar 4.1 Perubahan Warna Larutan HF menjadi Keruh dan HCl menjadi Kuning

- Pertukaran ion menggunakan NH_4Cl 0.1 M

Pertukaran ion ini menyebabkan larutan yang awalnya bening menjadi larutan putih keabuan, dan pada zeolit alam terjadi pengikisan sehingga menjadi lebih halus.



Gambar 4.2 Perubahan Warna Larutan NH_4Cl menjadi Putih Keabuan

- Kalsinasi

Zeolit berubah dari warna putih kekuningan menjadi lebih putih bersih. Dalam tahap ini, terjadi pengurangan bobot dari zeolit yang menunjukkan bahwa terdapat senyawa organik yang teruapkan yang terdapat di dalam zeolit.

Dari pengamatan selama proses aktivasi zeolit ini, didapatkan bahwa zeolit alam yang telah dilakukan *treatment* sebelumnya mengalami beberapa perubahan secara fisika maupun kimia yang akan dibuktikan dengan melakukan uji karakterisasi.

Selain aktivasi zeolit alam, dilakukan pula beberapa perlakuan sebagai proses aktivasi lanjutan. Dalam buku *Fundamental of Physical Chemistry, Maron and Lando* dinyatakan bahwa proses adsorpsi akan berlangsung lebih baik jika pada adsorben dilakukan aktivasi lanjutan dengan memanaskannya pada suhu tinggi dan tekanan tertentu, baik dalam kondisi vakum ataupun tidak. Aktivasi ini dapat menghilangkan zat-zat pengotor untuk meningkatkan luas permukaan adsorpsi. Untuk itu, perlakuan berupa pemanasan pada suhu 150-200°C selama 3 jam adalah bagian dari aktivasi adsorben yang akan diujikan untuk mengadsorpsi gas CO (Jadhav, 2007).

Pada awalnya adsorben dipanaskan dalam oven untuk mengeringkan dan menghilangkan kadar air di dalamnya. Diketahui bahwa titik didih air adalah 100°C. Berdasarkan hal ini, diharapkan setelah dipanaskan pada suhu di atas 100°C, maka air yang ada di dalam adsorben telah teruapkan seluruhnya dan adsorben berada dalam kondisi kering.

Salah satu parameter dari telah teruapkannya sebagian atau seluruh kandungan air di dalam adsorben adalah dengan mengamati perubahan massa adsorben sebelum dan setelah proses pemanasan. Hasilnya adalah sebagai berikut:

Tabel 4.1 Penurunan Massa Adsorben pada Suhu 150-200°C

Adsorben	Penurunan Massa pada Suhu Tertentu (g)	
	T = 150°C	T = 200°C
Zeolit Malang teraktivasi	0.164	0.172
Zeolit Malang tak teraktivasi	0.137	0.141
Zeolit Lampung teraktivasi	0.121	0.133
Zeolit Lampung tak teraktivasi	0.105	0.129

Dari Tabel 4.1 terlihat bahwa terjadi pengurangan massa adsorben setelah dipanaskan selama 3 jam pada suhu 150-200°C. Perbedaan pengurangan massa pada suhu 150°C dan 200°C tidak terlihat terlalu signifikan. Oleh karena itu, untuk proses selanjutnya digunakan suhu 200°C selama 3 jam untuk proses pemanasan adsorben.

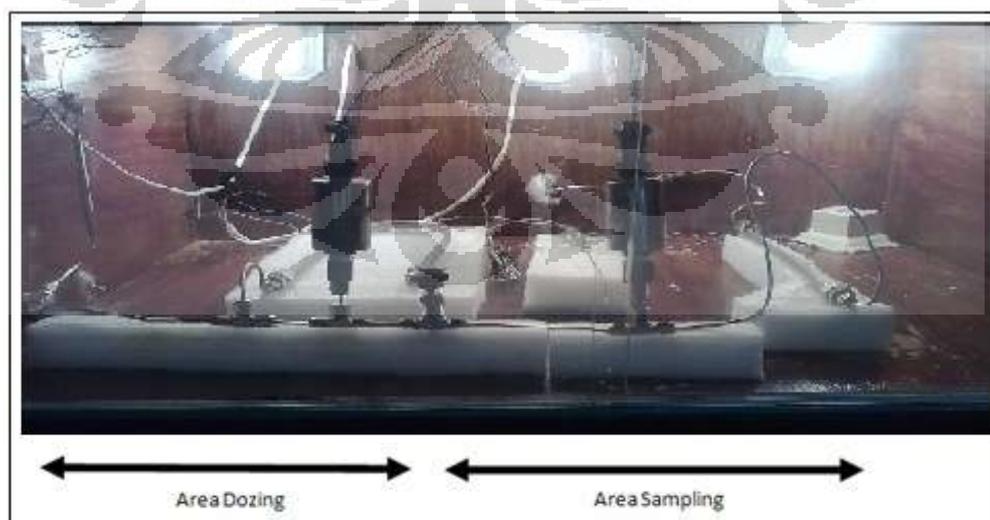
Berat adsorben yang digunakan untuk pengujian adsorpsi CO adalah 2 gram dimana sesuai dengan kapasitas *sampling cylinder* mini yang dipakai pada penelitian ini. Adapun hasil perhitungan berat zeolit yang digunakan secara detail dapat dilihat pada tabel yang disajikan pada Lampiran. Data berat zeolit tersebut dipakai dalam menghitung banyaknya gas CO yang teradsorpsi per gram adsorben sehingga kapasitas adsorpsi antara kedua jenis zeolit yang digunakan dapat dibandingkan dengan baik.

4.2 Penyaringan Adsorben

Proses penyaringan adsorben ini perlu dilakukan agar ukuran partikel adsorben menjadi seragam sehingga kapasitas adsorpsinya dapat dibandingkan satu sama lain dengan ukuran partikel yang sama. Adsorben tersebut disaring dengan menggunakan saringan yang berukuran 37-50 mikron, 125 mikron dan 315 mikron. Penggunaan saringan dengan ukuran partikel sekecil mungkin ditujukan supaya proses adsorpsi berjalan optimal. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, didapatkan bahwa semakin kecil ukuran partikel maka proses adsorpsi akan berjalan semakin baik dan kapasitas adsorpsi dari adsorben akan semakin besar (Yudha, apriawan, 2009).

4.3 Preparasi Peralatan Adsorpsi

Alat uji adsorpsi yang digunakan dalam penelitian ini terangkai seperti Gambar 4.3 di bawah ini. Secara garis besar, alat uji ini terbagi dalam dua area yang terpisah, yaitu area *dozing* dan area *sampling*. Kedua area ini sama-sama diletakkan dalam sebuah kotak kayu agar temperaturnya dapat dikontrol dengan mudah sehingga kondisi isotermis dapat dicapai. Di antara kedua area ini diletakkan satu buah termokopel untuk membaca temperatur ruang dalam kotak yang juga merupakan temperatur adsorpsi.

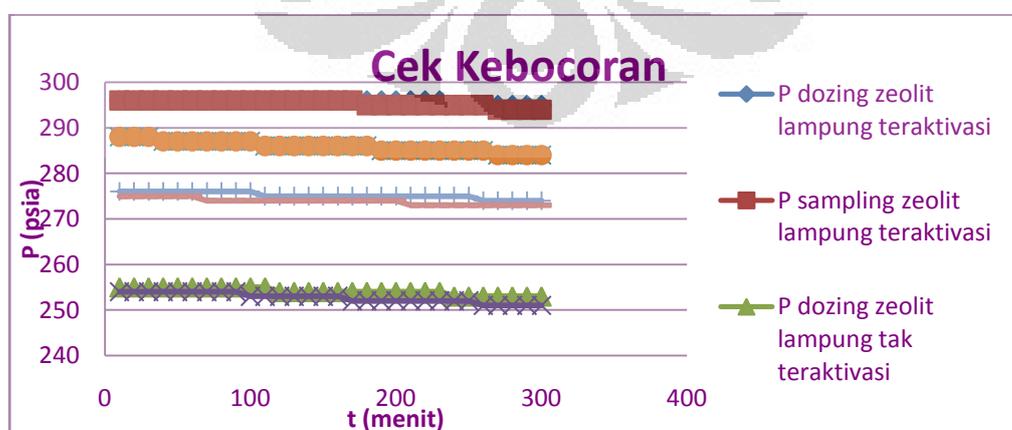


Gambar 4.3 Rangkaian Peralatan Uji Adsorpsi

Volume area *dozing* sangat ditentukan oleh volume *dozing cylinder*. Volume *dozing cylinder* yang digunakan pada alat uji kira-kira dua kali lebih besar dari volume *sampling cylinder*. Hal ini dimaksudkan agar perubahan tekanan pada area *dozing* setelah injeksi ke *sampling cylinder* tidak terlalu kecil atau terlalu besar. Bila perubahan terlalu kecil, maka kesalahan pembacaan tekanan yang kecil menghasilkan *error* yang besar sehingga akurasi hasil uji rendah. Sedangkan bila terlalu besar, maka dibutuhkan tekanan awal area *dozing* yang jauh lebih tinggi untuk injeksi ke *sampling cylinder*. Hasil pengukuran dengan menggunakan air didapat volume area *dozing* sebesar 23 ml. Volume ini digunakan dalam menentukan jumlah mol gas yang terdapat dalam area *dozing* (Prolessara, 2011).

4.4 Cek Kebocoran Alat Uji

Cek kebocoran alat uji penting dilakukan untuk melihat kesiapan alat uji yang digunakan. Hal ini disebabkan karena pada uji adsorpsi dilakukan dengan menggunakan gas berbahaya yaitu CO. Cek kebocoran alat dilakukan dengan memonitor tekanan baik pada area *dozing* maupun *sampling* selama kurang lebih 5 jam pada tekanan tertinggi yang digunakan untuk uji adsorpsi yaitu sekitar 300 psia. Gas yang digunakan untuk cek ini adalah gas helium yang diketahui merupakan gas inert yang tidak berbahaya. Cek kebocoran juga dilakukan dengan menggunakan air untuk mengidentifikasi langsung letak kebocoran sehingga dapat segera diatasi.



Gambar 4.4 Kurva Cek Kebocoran Alat Uji Adsorpsi pada Tekanan Rendah

Cek kebocoran dilakukan setiap akan melakukan uji adsorpsi baik pada zeolit teraktivasi maupun zeolit belum teraktivasi. Dari Gambar 4.4 dapat dilihat bahwa tekanan baik di area *dozing* maupun *sampling* pada cek kebocoran untuk adsorben zeolit teraktivasi cenderung stabil pada tekanan 294 psia selama 5 jam. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terjadi kebocoran pada kedua area ini dan alat uji siap untuk digunakan. Pada cek kebocoran untuk adsorben zeolit tidak teraktivasi, terjadi penurunan sekitar 1 sampai 3 psia pada area *sampling* selama 5 jam yaitu dari 254 menjadi 251 psia. Sedangkan pada area *dozing* terjadi penurunan sekitar 1 sampai 2 psia yaitu dari 255 menjadi 253 psia. Meskipun hal tersebut terjadi, alat uji ini masih dapat dan layak untuk digunakan sebagai penguji adsorpsi CO dari zeolit teraktivasi dan tidak teraktivasi karena uji dilakukan pada tekanan yang rendah dan waktu adsorpsi yang dibutuhkan pada masing-masing tekanan adalah 5 jam sehingga kebocoran tersebut tidak terlalu berpengaruh pada hasil uji.

4.5 Kalibrasi Void Volume Area Sampling

Void volume area *sampling* merupakan volume ruang yang ditempati gas di dalam area *sampling* dimana di dalamnya termasuk volume kosong dari pori zeolit. *Void volume* ini ditentukan dengan menggunakan gas Helium. Selain bersifat inert sehingga tidak berinteraksi dengan atom-atom pada zeolit, gas ini juga memiliki diameter molekul yang kecil sehingga dapat mengisi ruang kosong dari pori-pori zeolit yang rata-rata berukuran mikropori. Banyaknya adsorben yang digunakan dapat mempengaruhi besarnya *void volume*, semakin besar jumlah adsorben dalam *sampling storage* menyebabkan *void volume* yang didapat semakin kecil. Pengukuran helium *void volume* dilakukan pada range tekanan dari uji adsorpsi, yaitu 0-300 psia. Dari hasil pengukuran pada beberapa tekanan ini, didapat rata-rata helium *void volume* yang mewakili untuk digunakan pada perhitungan banyaknya gas yang tidak teradsorpsi pada tekanan rendah. Tabel 4.2 di bawah ini menunjukkan hasil perhitungan helium *void volume* tiap adsorben.

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Helium *Void Volume*

Helium void volume zeolit Lampung teraktivasi						
Tekanan <i>sampling</i> (psia)	25.21	50.18	75.74	101.27	126.71	152.41
He <i>void volume</i> (ml)	20.88	21.19	21.08	21.17	21.16	21.60
He <i>void volume</i> rata-rata	21.18					
Standar deviasi	0.134					
Helium void volume zeolit Lampung tak teraktivasi						
Tekanan <i>sampling</i> (psia)	26.43	51.97	77.08	102.08	128.11	153.17
He <i>void volume</i> (ml)	20.53	20.51	20.70	20.75	20.71	20.57
He <i>void volume</i> rata-rata	20.64					
Standar deviasi	0.1136					
Helium void volume zeolit Malang teraktivasi						
Tekanan <i>sampling</i> (psia)	25.64	51.34	77.64	101.97	125.46	149.53
He <i>void volume</i> (ml)	21.51	21.72	21.64	21.51	21.73	21.88
He <i>void volume</i> rata-rata	21.67					
Standar deviasi	0.1087					
Helium void volume zeolit Malang tak teraktivasi						
Tekanan <i>sampling</i> (psia)	25.77	51.33	76.68	102.72	128.53	154.19
He <i>void volume</i> (ml)	20.56	20.91	20.81	20.91	20.92	20.99
He <i>void volume</i> rata-rata	20.86					
Standar deviasi	0.1515					

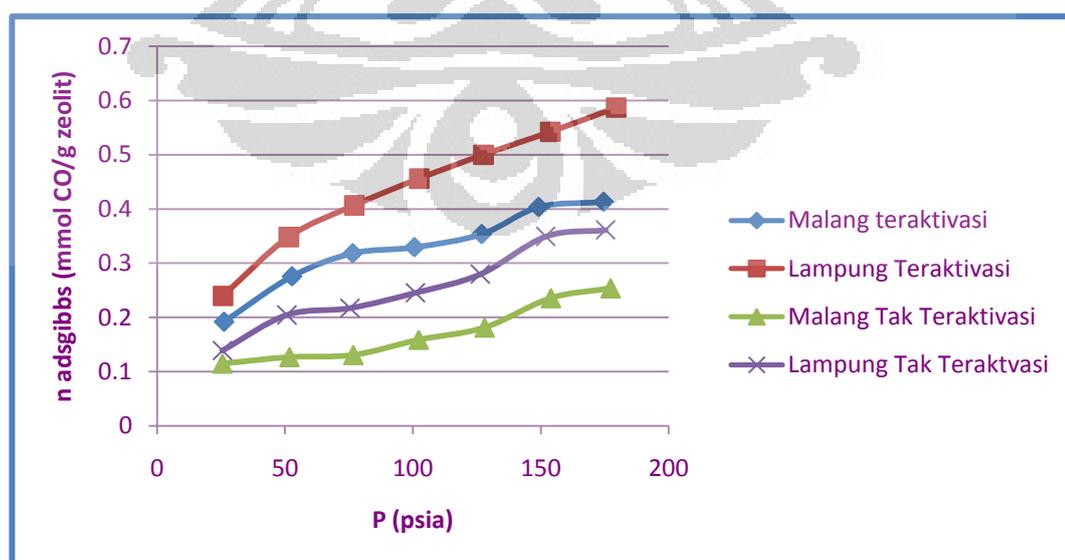
Sebagaimana terlihat dari data yang ditampilkan pada tabel di atas, perbedaan besar nilai *void volume* pada beberapa tekanan *sampling* baik pada zeolit teraktivasi maupun tidak teraktivasi relatif kecil. Hal ini dapat dilihat dari nilai standar deviasi yang diperoleh pada kedua zeolit yang cukup kecil, yaitu kurang dari 0,16 sehingga *void volume* rata-rata yang diperoleh cukup mewakili untuk dipakai dalam perhitungan banyaknya gas yang tidak teradsorpsi pada interval tekanan uji adsorpsi.

4.6 Uji Adsorpsi Gas CO pada Zeolit

Pada pengambilan data pengujian zeolit alam terhadap kapasitas adsorpsi dilakukan di Laboratorium RPKA (Rekayasa Proses Bahan Kimia Alam) Teknik Kimia Universitas Indonesia. Proses pengambilan data menggunakan unit peralatan proses adsorpsi yang terdapat di laboratorium RPKA. Adapun proses pengujian zeolit alam dengan variasi-variasi yang digunakan dalam pengambilan data yaitu ukuran zeolit dan suhu adsorpsi. Dalam pengambilan data, zeolit alam yang digunakan adalah zeolite yang terlebih dahulu telah dilakukan perlakuan awal/preparasi dengan berbagai tahapan proses.

4.6.1 Uji Adsorpsi Gas CO dengan Perbandingan Zeolit Alam Teraktivasi dan Tak Teraktivasi

Banyaknya gas CO yang teradsorpsi pada zeolit teraktivasi dan tidak teraktivasi dari hasil uji ini direpresentasikan dalam bentuk mol adsorpsi Gibbs. Proses pengambilan data pada setiap kenaikan tekanan adsorpsi dilakukan setelah 15 menit dimana tekanan tidak berubah secara signifikan yang menandakan kesetimbangan adsorpsi telah tercapai. Hasil pengujian adsorpsi gas CO pada kedua sampel zeolit ini dapat dilihat pada Gambar 4.5 di bawah ini. Data perhitungan pengujian adsorpsi pada kedua zeolit secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran.



Gambar 4.5 Kurva Adsorpsi Gas CO

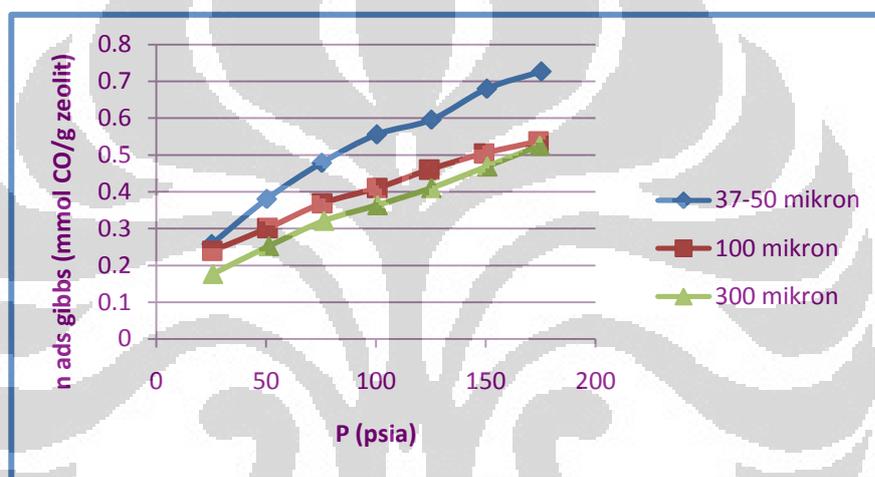
Pada gambar di atas dapat dilihat bahwa kemampuan adsorpsi gas CO yang paling tinggi diperoleh dengan menggunakan zeolit teraktivasi. Pada tekanan tertinggi adsorpsi yaitu sekitar 175 psia, zeolit teraktivasi mampu mengadsorpsi gas CO sebesar 0.5866 mmol/g zeolit sedangkan zeolit tak teraktivasi hanya sebesar 0.2537 mmol/g zeolit. Lebih rendahnya kemampuan dari zeolit tak teraktivasi dapat disebabkan karena zeolit ini belum murni, masih terdapat zat pengotor yang menutupi permukaan atau pori dari zeolit sehingga menghalangi adsorpsi dari molekul CO. Di samping itu, ukuran pori zeolit tak teraktivasi yang masih cukup kecil, yaitu 33.93 Å dimana tersusun atas banyak lapisan serta tidak memberikan ruang pori yang banyak bagi molekul CO untuk terperangkap dan berinteraksi dengan atom-atom dari zeolit sehingga kemampuan adsorpsinya menjadi kecil.

Pada gambar di atas juga dapat dilihat bahwa jumlah mol CO yang teradsorpsi terus bertambah dengan kenaikan tekanan adsorpsi. Semakin tinggi tekanan di fasa ruah gas maka semakin banyak pula molekul CO berdifusi mendekati ke permukaan dan masuk ke pori zeolit untuk berinteraksi dengan atom-atom sehingga jumlah mol CO yang teradsorpsi semakin besar. Kurva adsorpsi isothermal kedua zeolit memiliki kecenderungan untuk masih terus naik dengan menaikkan tekanan di atas 200 psia. Oleh karena itu, pada perbandingan zeolit alam teraktivasi dan zeolit alam tak teraktivasi ini dapat diartikan bahwa proses aktivasi sangat berpengaruh pada luas permukaan internal partikel zeolit yang semakin besar dan perbandingan Si/Al yang semakin besar pula. (Zeolit, 2010)

4.6.2 Uji Adsorpsi Gas CO dengan Variasi Ukuran Partikel Zeolit

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, yaitu perbandingan kapasitas adsorpsi pada zeolit alam Malang dan Lampung baik yang sudah diaktivasi maupun yang belum diaktivasi, memberikan hasil bahwa zeolit alam Lampung yang sudah diaktivasi memiliki kapasitas adsorpsi terbesar yaitu sebesar 0.5866 mmol CO/gram zeolit. Oleh karena itu, untuk mengefektifkan proses penelitian agar didapatkan zeolit alam dengan kapasitas penyerapan gas CO terbaik, maka digunakan zeolit alam Lampung teraktivasi pada percobaan selanjutnya.

Dalam pengambilan data pengujian sampel zeolit yang telah dilakukan proses perlakuan awal dan variasi ukuran partikel 37-50 mikron, 100 mikron dan 300 mikron. Setiap masing-masing ukuran partikel dilakukan pengambilan data terhadap gas CO sebagai umpan adsorbat yang akan diserap. Sehingga akan didapatkan pengaruh ukuran partikel zeolit alam pada proses penyerapan gas CO yang dilakukan perhitungan dan didapatkan konsentrasi gas CO yang diserap dalam waktu kurang lebih 105 menit dengan 7 kali pengambilan data yaitu tiap 15 menit sekali. Dengan disajikan data penelitian dan grafik seperti pada gambar 4.6 berikut:



Gambar 4.6 Kurva Adsorpsi CO dengan Variasi Ukuran Partikel Zeolit

Pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa pada berbagai ukuran zeolit yang digunakan sebagai adsorben, yaitu 37-50 mikron, 100 mikron dan 300 mikron untuk menyerap gas CO dapat menghasilkan konsentrasi gas CO teradsorpsi terbesar yaitu pada ukuran partikel zeolit alam terkecil yaitu 37-50 mikron dan konsentrasi gas CO teradsorpsi terkecil yaitu pada ukuran partikel terbesar yaitu 300 mikron.

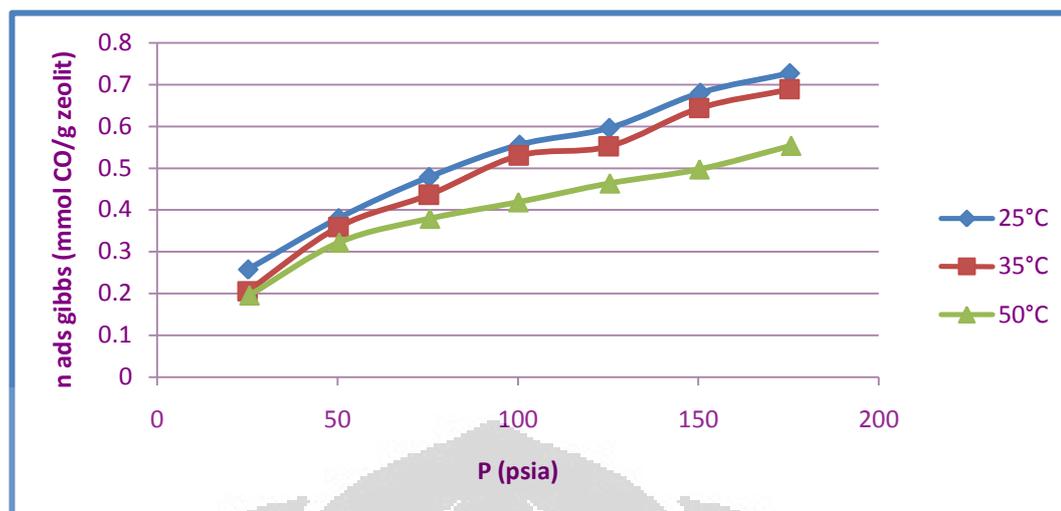
Dengan ukuran partikel zeolit alam yang semakin kecil akan mempengaruhi semakin besarnya jumlah gas CO yang terserap sebagai adsorbat. Hal ini dapat terjadi karena ukuran partikel zeolit alam yang semakin kecil akan mempengaruhi semakin besarnya ukuran luas kontak antar tiap partikel zeolit dengan komponen-komponen molekul gas CO yang dilewatkan pada tumbukan

zeolit alam tersebut. Selain itu juga, tiap partikel zeolit memiliki 3 tipe pori yaitu *macropore*, *micropore* dan *mesopore*. *Macropore* merupakan pori paling luar partikel dan sebagai jalan masuk molekul-molekul adsorbat ke dalam partikel menuju *micropore*. *Micropore* tidak berkontribusi terhadap besarnya luas permukaan zeolit sedangkan *micropore* sangat berpengaruh terhadap besarnya luas permukaan zeolit dan berpengaruh pada besarnya daya adsorp zeolit. Dengan ukuran partikel tiap zeolit yang semakin kecil, maka jarak antara *macropore* dan *micropore* akan semakin dekat sehingga dengan proses adsorpsi yang berlangsung secara kontinu terhadap waktu akan menghasilkan jumlah adsorbat yang semakin banyak pula (Zeolit, 2010).

4.6.3 Uji Adsorpsi Gas CO dengan Variasi Suhu Operasi Adsorpsi

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, yaitu perbandingan kapasitas adsorpsi pada zeolit alam Lampung teraktivasi dengan variasi ukuran zeolit, memberikan hasil bahwa zeolit alam Lampung teraktivasi yang berukuran terkecil yaitu 37-50 mikron memiliki kapasitas adsorpsi terbesar yaitu sebesar 0.5866 mmol CO/gram zeolit. Oleh karena itu, untuk mengefektifkan proses penelitian agar didapatkan zeolit alam dengan kapasitas penyerapan gas CO terbaik, maka digunakan zeolit alam Lampung teraktivasi berukuran 37-50 mikron pada percobaan selanjutnya.

Dalam pengambilan data pengujian sampel zeolit yang telah dilakukan proses perlakuan awal dan variasi suhu adalah 25°C, 35°C dan 50°C. Setiap masing-masing variasi suhu dilakukan pengambilan data terhadap gas CO sebagai umpan adsorbat yang akan diserap. Sehingga akan didapatkan pengaruh suhu pada proses penyerapan gas CO yang dilakukan perhitungan dan didapatkan konsentrasi gas CO yang diserap dalam waktu kurang lebih 105 menit dengan 7 kali pengambilan data yaitu tiap 15 menit sekali. Dengan disajikan data penelitian dan grafik seperti pada gambar 4.7 berikut:



Gambar 4.7 Kurva Adsorpsi CO dengan Variasi Suhu Operasi Adsorpsi

Pada Gambar 4.7 menunjukkan bahwa pada beberapa variasi suhu yang digunakan saat adsorpsi, yaitu 25°C, 35°C dan 50°C sebagai kondisi operasi penyerapan gas CO dapat menghasilkan konsentrasi gas CO teradsorp terbesar yaitu pada suhu operasi terkecil yaitu 25°C dan konsentrasi gas CO teradsorp terkecil yaitu pada suhu operasi terbesar yaitu 50°C.

Hal tersebut di atas disebabkan oleh adanya factor pertukaran ion dalam zeolit yang dapat mempengaruhi besarnya kapasitas adsorpsi dari zeolit tersebut. Pertukaran ion adalah proses dimana kation yang ada dalam sistem pori intrakristalin ditutup dengan kation lain yang berasal dari senyawa lain, dalam proses ini adalah gas CO sebagai adsorbat, sampai terjadi kesetimbangan. Pertukaran ion tersebut tidak akan berlangsung sempurna jika konsentrasi gas yang digunakan tidak sangat besar atau temperatur sistem dinaikkan sehingga menggeser kesetimbangan. Oleh karena pada percobaan ini temperature sistem dinaikkan, maka proses pertukaran ion antara zeolit dan gas CO menjadi tidak sempurna sehingga kapasitas adsorpsi mengalami penurunan. Dalam pertukaran ion tersebut, terdapat dua hal penting yaitu jenis dan konsentrasi dari gas yang digunakan (Royae, dkk, 2007).

4.7 Representasi Data Adsorpsi dengan Model Langmuir

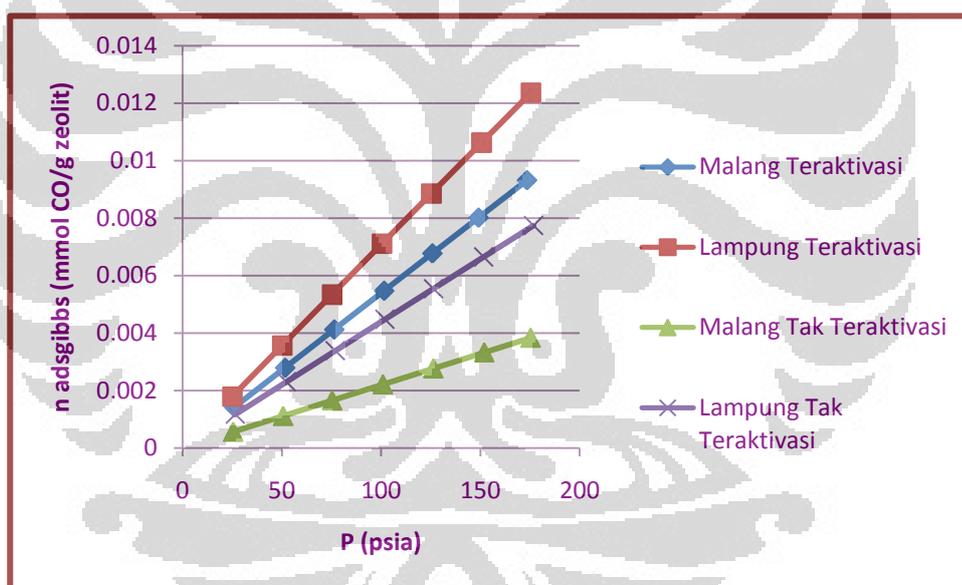
Sebagaimana telah dijelaskan di atas, adsorpsi isothermal CO baik pada zeolit teraktivasi maupun tidak teraktivasi mengikuti kurva adsorpsi isothermal tipe

1 atau dikenal juga dengan adsorpsi isoterml Langmuir. Persamaan model adsorpsi isoterml Langmuir dapat dilihat pada persamaan di bawah ini :

$$n_{gibbs} = n_{maks} \frac{bP}{1 + bP}$$

Persamaan model di atas menghubungkan jumlah mol gibbs zat yang teradsorpsi terhadap tekanan dan temperatur percobaan. Konstanta n_{maks} menunjukkan kapasitas adsorpsi maksimum dari adsorben yang sebanding dengan banyaknya permukaan aktif yang dimiliki oleh adsorben. Sedangkan b adalah konstanta Langmuir yang merupakan fungsi dari temperatur dan menggambarkan besarnya interaksi yang terjadi antara adsorbat dan permukaan aktif dari adsorben.

Hasil perbandingan antara data adsorpsi CO hasil penelitian terhadap permodelan Langmuir dapat dilihat pada Gambar 4.8 di bawah ini :



Gambar 4.8 Adsorpsi CO dengan Permodelan Langmuir

Sedangkan data parameter model Langmuir yang dihasilkan dari kedua zeolit dapat dilihat pada Tabel 4.3 di bawah ini :

Tabel 4.3 Parameter Model Isotermal Langmuir

Zeolit	n_{maks}	b	% AAD
Lampung tak teraktivasi 37-50 mikron pada suhu 25°C	0.1136	0.00012	0.9575
Lampung teraktivasi 37-50 mikron pada suhu 25°C	0.3482	0.00018	4.397
Malang tak teraktivasi 37-50 mikron pada suhu 25°C	0.1007	0.00008	0.5633
Malang teraktivasi 37-50 mikron pada suhu 25°C	0.2315	0.00011	1.775
Lampung teraktivasi 100 mikron pada suhu 25°C	0.2104	0.00033	4.669
Lampung teraktivasi 300 mikron pada suhu 25°C°	0.1751	0.00029	3.4536
Lampung teraktivasi 37-50 mikron pada suhu 35°C	0.1636	0.00026	2.891
Lampung teraktivasi 37-50 mikron pada suhu 50°C	0.1586	0.00022	2.3883

Pada Gambar 4.8 di atas secara umum data adsorpsi baik pada zeolit teraktivasi maupun tak teraktivasi dapat direpresentasikan dengan baik oleh permodelan Langmuir. Hal ini didukung oleh nilai % AAD yang didapat untuk kedua zeolit berada di bawah 5. Dari konstanta n_{maks} yang dihasilkan dapat diketahui bahwa jumlah maksimum mmol CO yang dapat teradsorpsi per gram zeolit tak teraktivasi yaitu sebesar 0.1136 untuk zeolit alam Lampung dan 0.1007 untuk zeolit alam Malang, sedangkan pada zeolit teraktivasi jumlah maksimum mmol CO yang dapat teradsorpsi tiap gramnya lebih besar daripada zeolit tak teraktivasi yaitu sebesar 0.3482 untuk zeolit alam Lampung dan 0.2315 untuk zeolit alam Malang.

Nilai konstanta b yang didapat dari persamaan model untuk kedua zeolit sangat kecil (mendekati nol). Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan adsorpsi gas CO baik pada zeolit teraktivasi maupun tak teraktivasi sangat kecil karena dipengaruhi oleh interaksi yang terjadi antara molekul CO dengan atom-atom yang terdapat pada zeolit. Selain itu, dipengaruhi juga oleh banyaknya luas permukaan yang tersedia pada zeolit tersebut. (Prolessara, 2011)

4.8 Analisa BET

Luas permukaan dan ukuran pori dan ukuran pori adsorben dapat mempengaruhi besarnya kemampuan daya serap adsorben tersebut. Untuk mengetahui luas permukaan adsorben, dilakukan uji BET dan hasilnya terdapat pada lampiran. Dari uji BET, didapatkan data luas permukaan dan ukuran pori dari keempat zeolit alam yang telah diujikan, yakni sebagai berikut :

Tabel 4.4 Luas Permukaan dan Ukuran Pori melalui Uji BET

Adsorben	Luas permukaan (m ² /g)	Ukuran pori (Å)
Zeolit Malang teraktivasi	76.32	12.34
Zeolit Malang tak teraktivasi	55.5	10.64
Zeolit Lampung teraktivasi	70.95	12.97
Zeolit Lampung tak teraktivasi	46.13	12.32

Dari Tabel di atas, dapat dibandingkan nilai luas permukaan dan ukuran pori dari keempat adsorben yang diujikan. Berdasarkan luas permukaan, zeolit Malang dan Lampung teraktivasi memiliki luas permukaan lebih besar dibandingkan dengan zeolit yang tak teraktivasi. Hal ini sesuai dengan kapasitas adsorpsi dari zeolit Malang dan Lampung teraktivasi yang lebih besar dibandingkan zeolit tak teraktivasi. Hal ini sesuai pula dengan teori adsorpsi dari Reynold (1982), yang mengatakan bahwa adsorpsi sangat tergantung pada luas permukaan adsorben. Semakin luas permukaan adsorben, maka semakin besar daya adsorpsinya dan makin besar pula tingkat efisiensi adsorpsinya.

Selain luas permukaan, ukuran pori juga dapat mempengaruhi proses adsorpsi. Ukuran pori dari adsorben harus lebih besar dari ukuran adsorbat yang diserap agar proses pengikatan molekul adsorbat oleh adsorben dapat berlangsung dan efektif. Dalam penelitian ini, gas CO yang bertindak sebagai adsorbat memiliki ukuran molekul sebesar 112.8 pm atau setara dengan 1.13 Å (Othmer, 1994), sedangkan adsorben yang diujikan memiliki ukuran pori jauh lebih besar dibandingkan adsorbatnya. Hal ini memperlihatkan bahwa proses adsorpsi dalam penelitian ini dapat berlangsung.

4.9 Analisa XRF

Rasio Si/Al merupakan perbandingan jumlah atom Si terhadap jumlah atom Al di dalam kerangka zeolit. Dari uji XRF, didapatkan data rasio Si/Al dari keempat zeolit alam yang telah diujikan, yakni sebagai berikut :

Tabel 4.5 Rasio Si/Al melalui Uji XRF

Adsorben	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Rasio Si/Al
Zeolit Malang teraktivasi	85.43	4.91	17.355
Zeolit Malang tak teraktivasi	46.07	8.55	5.375
Zeolit Lampung teraktivasi	83.23	4.72	17.607
Zeolit Lampung tak teraktivasi	71.637	12.81	5.604

Dari Tabel di atas, dapat dibandingkan nilai rasio Si/Al dari keempat adsorben yang diujikan. Berdasarkan rasio Si/Al tersebut zeolit Lampung teraktivasi memiliki rasio paling besar dibandingkan dengan ketiga adsorben lainnya. Hal ini sesuai dengan kapasitas adsorpsi dari zeolit Lampung teraktivasi tersebut yang menempati urutan tertinggi dibandingkan ketiga adsorben lainnya. Perubahan rasio Si/Al dari zeolit akan mengubah muatan zeolit sehingga pada akhirnya akan mengubah jumlah kation penyeimbang. Lebih sedikit atom Al artinya lebih sedikit muatan negatif pada zeolit sehingga lebih sedikit pula kation penyeimbang yang ada. Zeolit berkadar Si tinggi bersifat hidrofobik dan mempunyai affinitas terhadap hidrokarbon. (Zeolit, 2010). Semakin besar rasio Si/Al adsorben, maka semakin besar daya adsorpsinya dan makin besar pula tingkat efisiensi adsorpsinya.

Berdasarkan hasil uji XRF juga diketahui bahwa terkandung beberapa logam lain pada zeolit alam di antaranya CaO, Fe₂O₃, MgO, TiO₂ dan beberapa logam lain. Keberadaan logam-logam ini juga mempengaruhi daya adsorpsi dari zeolit tersebut. Oleh karena hanya berjumlah sedikit, maka pengaruhnya tidak terlalu besar. Apabila seluruh kandungan logam dari zeolit tersebut dijumlah maka hasilnya adalah kurang dari 100%. Hal ini disebabkan adanya kehilangan kandungan selama proses pemanasan.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

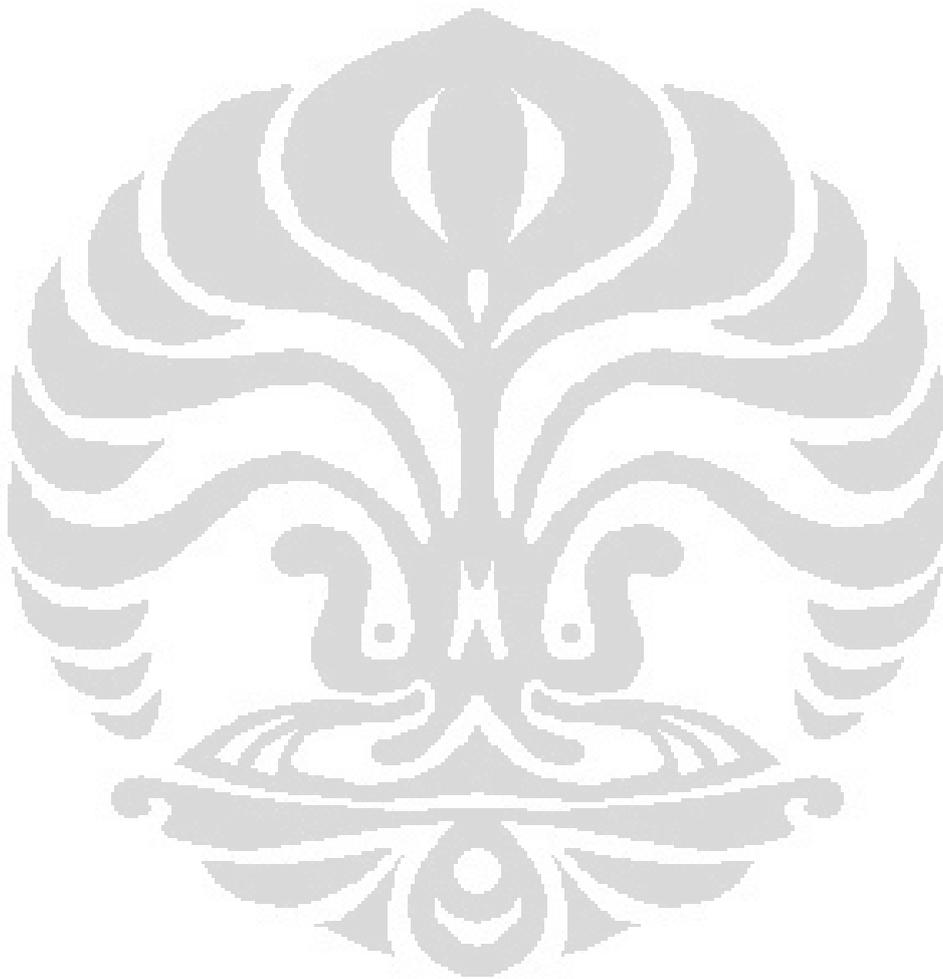
5.1 Kesimpulan

1. Proses pengaktifasian sangat penting dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi dari tiap adsorben, yaitu melalui beberapa tahapan seperti dealuminasi, pergantian ion dan kalsinasi.
2. Kapasitas adsorpsi terbesar dimiliki oleh zeolit alam yang teraktivasi dengan menggunakan beberapa langkah, yaitu dealuminasi, pergantian ion dan kalsinasi.
3. Semakin meningkat tekanan yang terdapat pada *sampling cylinder* yang terdapat adsorben di dalamnya, maka semakin meningkat pula mol gas CO yang teradsorp.
4. Berdasarkan percobaan proses adsorpsi yang menggunakan variasi ukuran zeolit, zeolit alam Lampung teraktivasi dengan ukuran terkecil yaitu 37-50 mikron memiliki kapasitas adsorpsi terbesar yaitu sebesar 0.727 mmol CO/g zeolit. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil ukuran partikel, maka semakin besar kapasitas adsorpsinya.
5. Berdasarkan percobaan proses adsorpsi yang menggunakan variasi suhu, proses adsorpsi dengan suhu terendah (suhu kamar) memiliki kapasitas adsorpsi terbesar yaitu sebesar 0.727 mmol CO/g zeolit. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu operasi adsorpsi, maka semakin kecil kapasitas adsorpsinya.
6. Berdasarkan nilai n_{maks} dan konstanta b , maka dapat disimpulkan bahwa zeolit alam memiliki potensi untuk digunakan sebagai adsorben gas CO meskipun dengan kapasitas adsorpsi yang masih kecil.

5.2 Saran

1. Proses pengaktifasian zeolit alam pada tahap dealuminasi sebaiknya menggunakan larutan lain selain HF dan merupakan golongan alkali yang memiliki daya ikat lebih tinggi agar proses pelepasan logam-logam pengotor pada zeolit alam semakin efektif.

2. Proses kalsinasi sebaiknya dilakukan pada suhu yang sesuai dengan prosedur dan dalam waktu yang tidak terlalu lama agar pemanasan tidak merusak struktur molekul pada zeolit tersebut.
3. Gas yang dialirkan sebaiknya menggunakan gas yang berasal dari proses pembakaran (bukan gas CO murni) agar dapat memberikan hasil yang lebih akurat dan dapat diaplikasikan pada kasus kebakaran yang sesungguhnya.



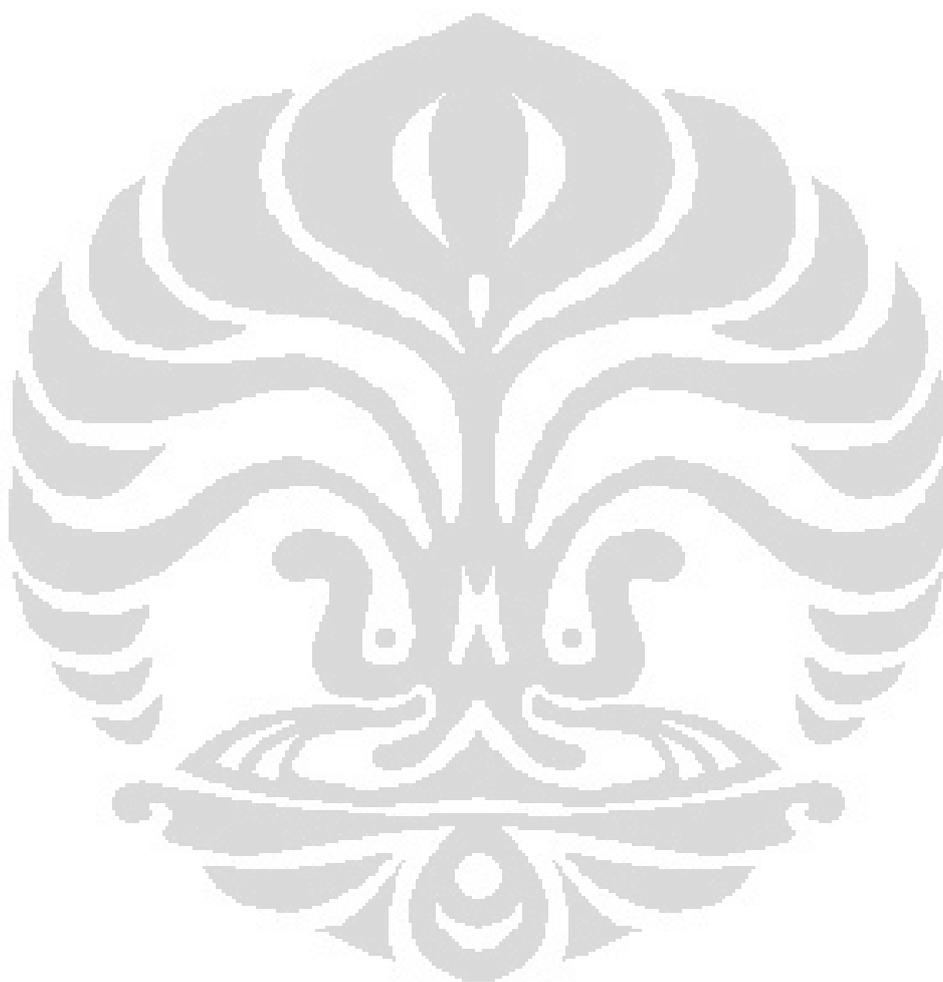
DAFTAR PUSTAKA

- Apriawan. 2009. *Adsorpsi Gas CO pada Kasus Kebakaran Menggunakan Zeolit Alam Teraktivasi*. Skripsi. Depok. Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Barrer, R.M. 1978. *Zeolite and clay Minerals as adsorbents and catalysis*. Academic Press: London.
- Ari Kesnawaty, Debie. 2010. *Uji Kapasitas Adsorpsi Gas Karbon Monoksida (CO) Menggunakan Oksida Logam dan Karbon Aktif*. Skripsi. Depok. Departemen Teknik Kimia FTUI.
- D.H.Olson, G.T.Kokotailo, S.L.Lawton, and W.M.Meier. 1981. *J.Phys.Chem.*
- G. T. Kokotailo and W. M. Meier, in. 1979. *Properties and Applications of Zeolites*. R. P. Townsend (ed.), special Publ.N0.33. Chemical Society: London.
- Las, T., Zamroni, H., *Penggunaan zeolite dalam bidang Industri dan Lingkungan*. Jurnal Zeolite Indonesia Vol 1 No.1 (November, 2002), hal 23- 26
- Pertiwi, Astri. 2007. *Preparasi dan Karakterisasi Zeolit Alam Malang serta Aplikasinya dalam Mengkatalisis Senyawa ABE (Aseton-Butanol-Etanol) menjadi Hidrokarbon*. Skripsi. Universitas Indonesia.
- Prasodjo, Prolessara. 2011. *Studi Kapasitas Adsorpsi serta Dinamika Adsorpsi dan Desorpsi dari Nanotube Karbon sebagai Penyimpan Hidrogen*. Tesis. Depok. Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Ramoa, R.F., et.al. 1984. *Zeolite: Science and Technology*. Martinus Nijhoff publishers.
- Ruthven, Douglas M. 1984. *Principles of Adsorption Processes*. Kanada: Published simultaneously.
- Shalikhawati, A. 2007. *Pengaruh Suhu Kalsinasi pada Aktivasi Zeolit terhadap Kadar Persenyawaan Fenol dan Benzo(a)pyrene dalam Asap Cair serta Aplikasinya pada Pengawetan Ikan*. Skripsi, Jurusan Kimia FMIPA Universitas Negeri Malang.
- Setyawan. D,P. Handoko. *Pengaruh Perlakuan Asam, Hydrothermal dan Impregnasi Logam Kromium pada Zeolit Alam dalam Preparasi Katalis*” (Universitas Jember : 2006). hal 103-109

Tsitsishvili, G.V T.G Andronikashvili, G.N. Knov L.D Filinova. 1992. *Natural Zeolite*. England: Ellis Harwood Limited.

Van Bekkum, H., Flanigan, E.M.,J.C Jansen. 1991. *Introduction to Zeolite Science and Practic*. Newyork: Elvesier Sciance Publihers B V.

Anonim. *Zeolit: Struktur dan Fungsi*. material-sciences.blogspot.com. 2010. (diakses 25 April 2010)



Tabel Hasil Perhitungan Berat Zeolit

Zeolit Malang teraktivasi	
Berat <i>sampling storage</i> + zeolit + <i>glasswool</i>	101.588 gram
Berat <i>sampling storage</i> + <i>glasswool</i>	103.6 gram
Berat bersih zeolit	2.012 gram
Zeolit Malang tidak teraktivasi	
Berat <i>sampling storage</i> + zeolit + <i>glasswool</i>	100.71 gram
Berat <i>sampling storage</i> + <i>glasswool</i>	102.7 gram
Berat bersih zeolit	1.99 gram
Zeolit Lampung teraktivasi	
Berat <i>sampling storage</i> + zeolit + <i>glasswool</i>	100.868 gram
Berat <i>sampling storage</i> + <i>glasswool</i>	102.88 gram
Berat bersih zeolit	2.012 gram
Zeolit Lampung tak teraktivasi	
Berat <i>sampling storage</i> + zeolit + <i>glasswool</i>	100.748 gram
Berat <i>sampling storage</i> + <i>glasswool</i>	102.76 gram
Berat bersih zeolit	2.012 gram

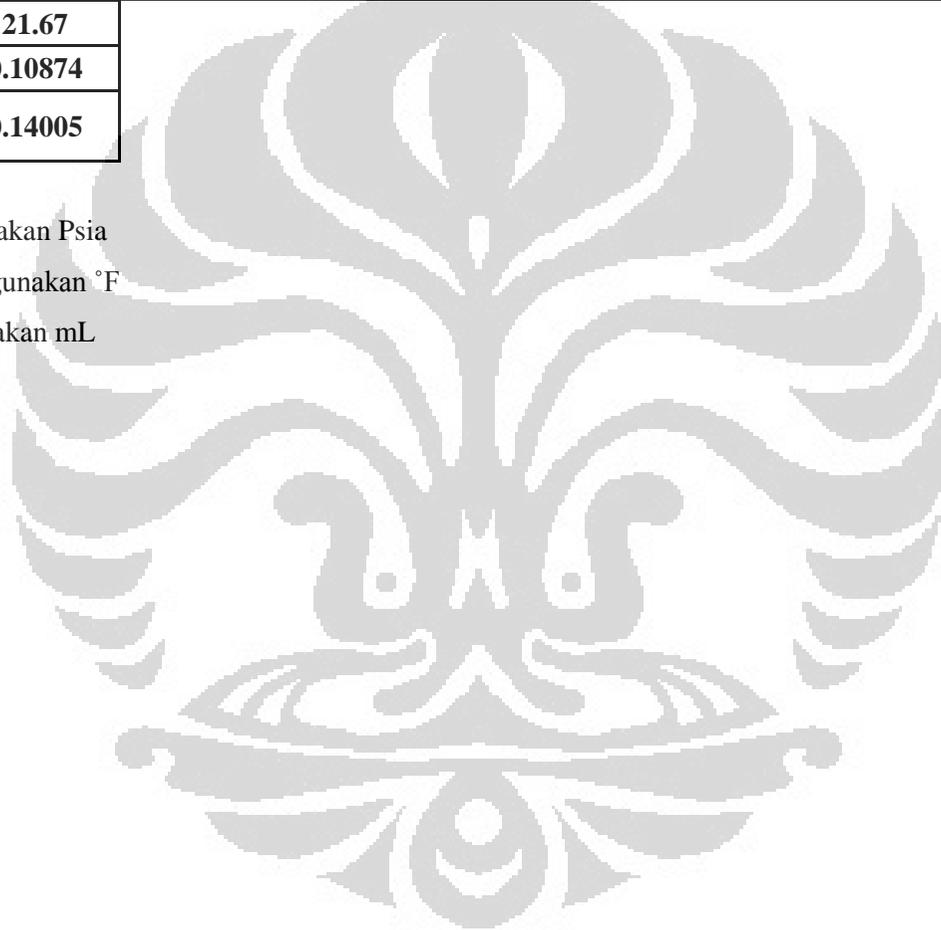
LAMPIRAN

Lampiran 1. Tabulasi Pengujian He Volume Void Pada Sampel Zeolit Alam Malang Teraktivasi

Volume Dozing	23	Calibrated	Helium	Water,	grams	0
TempPmp	86.0	Calibrated	R	PumpDead	669.9542893	
86.0	Readout @equilibrium	Pressure				
Ini Press	0.0	25.64	51.34	77.64	101.97	125.46
Fin Press	25.64	51.34	77.64	101.97	125.46	149.53
Cal Ini Pre	0.0	25.6	51.3	77.6	102.0	125.5
Cal Fin Pre	25.64	51.34	77.64	101.97	125.46	149.53
P Dozing ini	297.54	297.54	297.54	297.54	297.54	297.54
Cal P Dozing ini	297.54	297.54	297.54	297.54	297.54	297.54
P Dozing fin	273.13	248.26	223.44	200.94	177.63	153.85
Cal P Dozing fin	273.13	248.26	223.44	200.94	177.63	153.85
Helium Sol	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V (mL)	23	23	23	23	23	23
T dozing	78.582	78.632	78.573	78.63	78.583	78.621
T sampling ini	78.32	78.37	78.35	78.36	78.37	78.31
T sampling fin	78.634	78.54	78.614	78.586	78.572	78.554
Z dozing ini	1.00975631	1.00975528	1.0097565	1.00975532	1.0097563	1.0097555
Z dozing fin	1.00895591	1.00813956	1.00732672	1.00658813	1.0058245	1.0050443
Z sampling init	1.0	1.00084111	1.00168426	1.0025470	1.00334509	1.00411619

Z sampling final	1.00084064	1.0016836	1.00254564	1.00334356	1.00411391	1.00490337
Vvoid	21.51	21.72	21.64	21.51	21.73	21.88
Average	21.67					
Std. Dev	0.10874					
99% Confidence	0.14005					

- Satuan tekanan menggunakan Psia
- Satuan temperatur menggunakan °F
- Satuan volume menggunakan mL

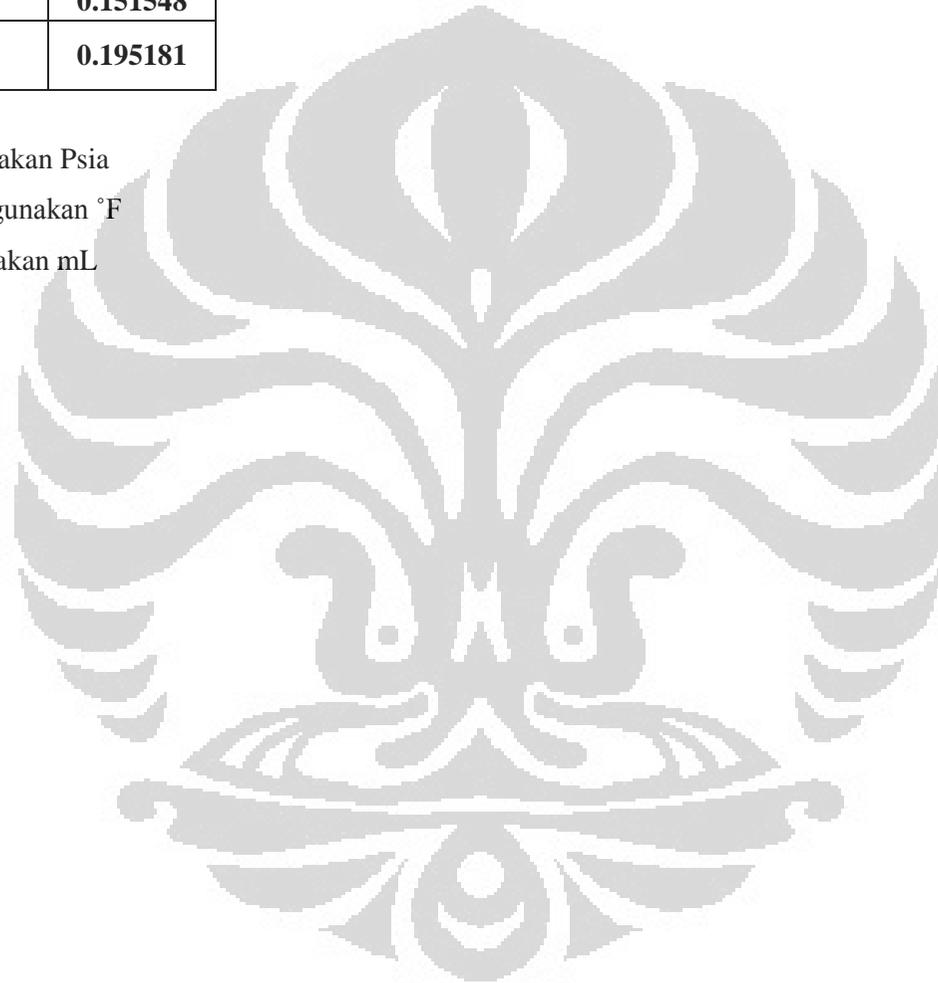


Lampiran 2. Tabulasi Pengujian He Volume Void Pada Sampel Zeolit Alam Malang Tak Teraktivasi

Volume Dozing	Helium	Water,	grams	0		
23	Calibrated	R	669.9542893			
TempPmp	86	Calibrated	PumpDead	52.92		
86	Readout @equilibrium	Pressure				
Ini Press	0.0	25.77	51.33	76.68	102.72	128.53
Fin Press	25.77	51.33	76.68	102.72	128.53	154.19
Cal Ini Pre	0.0	25.8	51.3	76.7	102.7	128.5
Cal Fin Pre	25.77	51.33	76.68	102.72	128.53	154.19
P Dozing ini	377.53	377.53	377.53	377.53	377.53	377.53
Cal P Dozing ini	377.53	377.53	377.53	377.53	377.53	377.53
P Dozing fin	353.96	329.87	306.76	282.45	258.73	235.23
Cal P Dozing fin	353.96	329.87	306.76	282.45	258.73	235.23
Helium Sol	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V (mL)	23	23	23	23	23	23
T dozing	78.68	78.55	78.63	78.66	78.57	78.63
T sampling ini	78.53	78.51	78.56	78.55	78.59	78.55
T sampling fin	78.73	78.64	78.71	78.73	78.67	78.72
Z dozing ini	1.0123766	1.01238001	1.0123779	1.01237713	1.01237949	1.0123779
Z dozing fin	1.0116039	1.01081714	1.01005761	1.00925998	1.00848395	1.00771239
Z sampling init	1.0	1.00084512	1.00168318	1.002514501	1.00336812	1.00421477
Z sampling final	1.00084473	1.0016829	1.00251365	1.00336712	1.0042137	1.0050544
Vvoid	20.56	20.91	20.81	20.91	20.91	20.92

Average	20.84
Std. Dev	0.151548
99% Confidence	0.195181

- Satuan tekanan menggunakan Psia
- Satuan temperatur menggunakan °F
- Satuan volume menggunakan mL

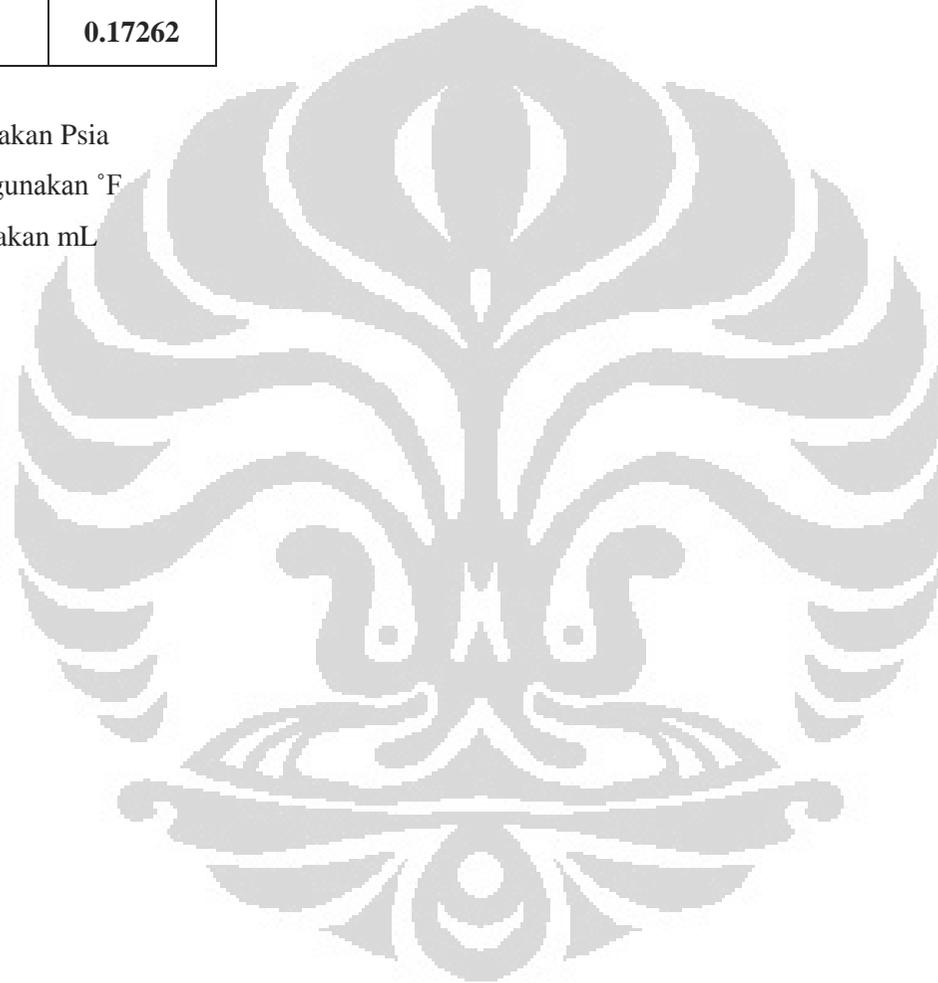


Lampiran 3. Tabulasi Pengujian He Volume Void Pada Sampel Zeolit Alam Lampung Teraktivasi

	Volume Dozing			Helium		
	23	Calibrated		Water,		0
TempPmp	86	Calibrated		grams		
	86	Readout @equilibrium		R	669.9542893	
				PumpDead	52.92	
				Pressure		
Ini Press	0.0	25.21	50.18	75.74	101.27	126.71
Fin Press	25.21	50.18	75.74	101.27	126.71	152.41
Cal Ini Pre	0.0	25.2	50.2	75.7	101.3	126.7
Cal Fin Pre	25.21	50.18	75.74	101.27	126.71	152.41
P Dozing ini	359.27	359.27	359.27	359.27	359.27	359.27
Cal P Dozing ini	359.27	359.27	359.27	359.27	359.27	359.27
P Dozing fin	335.88	312.09	288.56	264.34	240.86	217.12
Cal P Dozing fin	335.88	312.09	288.56	264.34	240.86	217.12
Helium Sol	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V (mL)	23	23	23	23	23	23
T dozing	78.685	78.69	78.64	78.68	78.61	78.63
T sampling ini	78.51	78.53	78.55	78.52	78.5	78.55
T sampling fin	78.65	78.67	78.66	78.64	78.69	78.64
Z dozing ini	1.01177786	1.01177774	1.01177898	1.001177799	1.01177973	1.01177923
Z dozing fin	1.01101107	1.01023106	1.00946069	1.00866589	1.00789731	1.00711862
Z sampling init	1.0	1.00082672	1.00164551	1.00248383	1.00332121	1.00415527
Z sampling final	1.00082651	1.001645091	1.00248309	1.00332023	1.00415386	1.0049969
Vvoid	20.88	21.19	21.08	21.19	21.17	21.16

Average	21.11
Std. Dev	0.13403
99% Confidence	0.17262

- Satuan tekanan menggunakan Psia
- Satuan temperatur menggunakan °F
- Satuan volume menggunakan mL

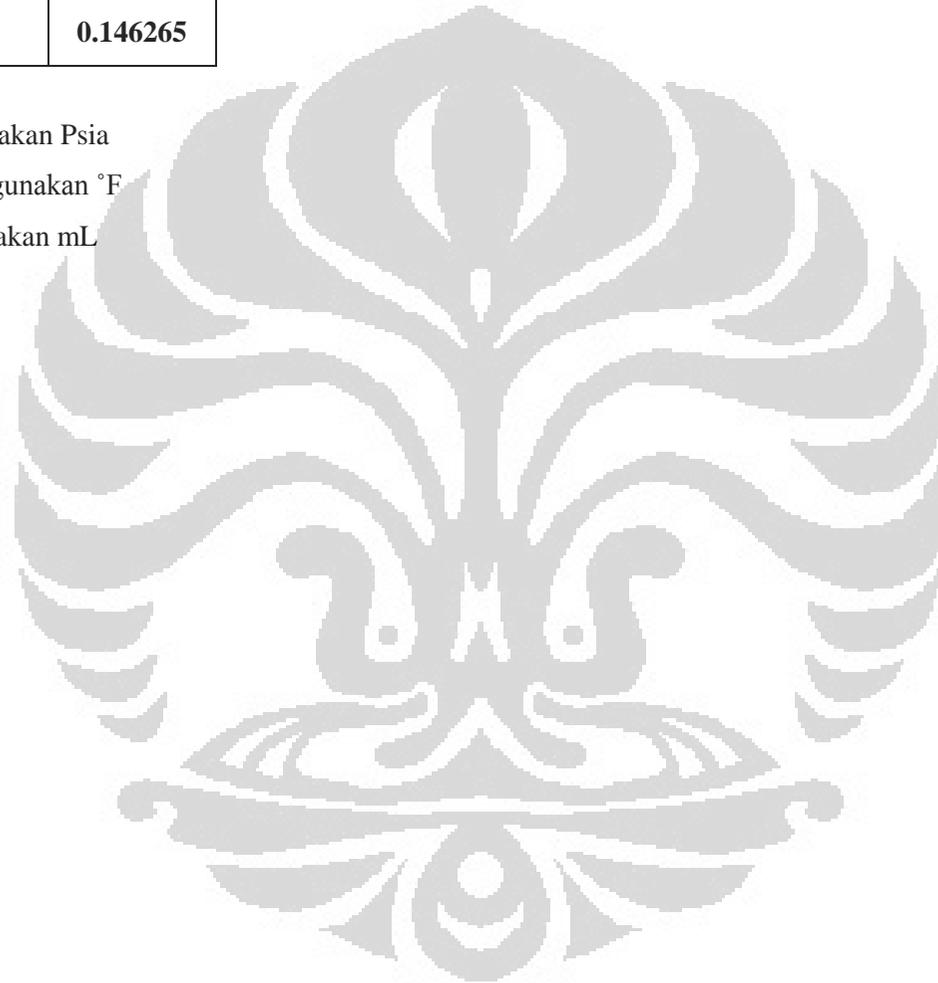


Lampiran 4. Tabulasi Pengujian He Volume Void Pada Sampel Zeolit Alam Lampung Tak Teraktivasi

	Volume Dozing			Helium		
	23	Calibrated		Water,		0
TempPmp	86	Calibrated		grams		
	86	Readout @equilibrium		R	669.9542893	
				PumpDead	52.92	
				Pressure		
Ini Press	0.0	26.43	51.97	77.08	102.84	128.11
Fin Press	26.43	51.97	77.08	102.84	128.11	153.17
Cal Ini Pre	0.0	26.4	52.0	77.1	102.8	128.1
Cal Fin Pre	26.43	51.97	77.08	102.84	128.11	153.17
P Dozing ini	348.62	348.62	348.62	348.62	348.62	348.62
Cal P Dozing ini	348.62	348.62	348.62	348.62	348.62	348.62
P Dozing fin	324.53	301.37	277.99	254.32	231.53	208.84
Cal P Dozing fin	324.53	301.37	277.99	254.32	231.53	208.84
Helium Sol	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
V (mL)	23	23	23	23	23	23
T dozing	78.63	78.67	78.68	78.71	78.65	78.67
T sampling ini	78.55	78.53	78.54	78.59	78.57	78.56
T sampling fin	78.61	78.63	78.66	78.62	78.69	78.66
Z dozing ini	1.01143006	1.01142909	1.01142885	1.01142812	1.011429573	1.01142909
Z dozing fin	1.01064023	1.00988006	1.00911338	1.00833687	1.00759076	1.00616677
Z sampling init	1.0	1.00086673	1.00170424	1.002527404	1.0033722	1.00502309
Z sampling final	1.00086659	1.00170392	1.00252703	1.00337184	1.00419976	1.00581454
Vvoid	20.53	20.51	20.7	20.75	20.72	20.57

Average	20.65
Std. Dev	0.113567
99% Confidence	0.146265

- Satuan tekanan menggunakan Psia
- Satuan temperatur menggunakan °F
- Satuan volume menggunakan mL



Lampiran 5. Tabulasi Hasil Uji Adsorpsi Karbon Monoksida Pada Zeolit Alam Malang Teraktivasi pada suhu 25°C (37-50 mikron)

	Uncalibrated*	Calibrated			CO		
Vvoid	21.67						
V dozing	23			MW	28		
Dozing Temp	86	86		Ads.phase dens	0.998		
Mass NTC	2.012			g/cm ³			
%moisture sample, mol H ₂ O	0.0000	0.0000					
R, gas constant	669.9542893	(psi cm ³)/ (mol °R)					
Final Sampling Press*	26.17	52.73	76.47	100.57	126.87	149.11	174.52
Calibrated	24.7	51.3	75.1	99.3	125.6	147.9	173.4
Initial P dozing	366.76	341.11	316.57	292.97	269.13	242.01	221.71
Final P dozing	341.11	316.57	292.97	269.13	242.01	221.71	196.74
Cal Final P dozing	341.498015	316.921417	293.28498	269.40693	242.242133	221.907548	196.89377
Sampling Temp*	78.67	78.63	78.59	78.61	78.64	78.61	78.57
Calibrated	78.67	78.62	78.59	78.61	78.64	78.61	78.57
densitycell, (g/cm ³)	0.00203	0.00411	0.00596	0.00785	0.00991	0.0117	0.0137
Z dozing awal	0.989211	0.981065	0.991034	0.9941676	0.999751	0.9880221	0.9919145
Z dozing final	0.999075	0.9910338	0.9941676	0.994963	0.9921207	0.9919145	0.989363
Zcell	0.999671	0.9966424	0.99654	0.9952762	0.9940417	0.9927782	0.9917021
ninj (mol)	0.00187	0.00367	0.00525	0.00679	0.00841	0.00977	0.01135
nunads (mol)	0.00149	0.00318	0.00461	0.00607	0.000767	0.00903	0.01058
nsolub (mol)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nads (mol)	0.00039	0.00049	0.00064	0.00072	0.00074	0.00075	0.00077
nadsgibbs (mmol/gr zeolit)	0.1916	0.2454	0.3181	0.3591	0.3662	0.3713	0.3826
nabsolute (mmol/gr zeolit)	0.192	0.2464	0.32	0.3619	0.3699	0.3757	0.3879

Lampiran 6. Tabulasi Hasil Uji Adsorpsi Karbon Monoksida Pada Zeolit Alam Malang Tak Teraktivasi pada suhu 25°C (37-50 mikron)

	Uncalibrated*	Calibrated			CO		
Vvoid	20.86						
V dozing	23			MW	28		
Dozing Temp	86	86		Ads.phase			
Mass NTC	1.99			dens	0.998		
%moisture sample, mol H2O	0.0000	0.0000		g/cm3			
R, gas constant	669.9542893	(psi cm3)/ (mol °R)					
Final Sampling Press*	25.57	51.74	76.72	102.25	128.03	153.94	177.27
Calibrated	24.1	50.3	75.4	101.0	126.8	152.8	176.1
Initial P dozing	381.79	357.13	334.81	310.19	286.33	262.37	239.97
Final P dozing	357.13	334.81	310.19	286.33	262.37	239.77	214.13
Cal Final P dozing	357.5411943	335.18874	310.53169	286.63451	262.635914	240.198698	214.3144
Sampling Temp*	78.84	78.81	78.77	78.76	78.74	78.76	78.73
Calibrated	78.84	78.81	78.77	78.76	78.74	78.76	78.73
densitycell, (g/cm3)	0.00142	0.00287	0.00427	0.0057	0.00714	0.0086	0.00991
Z dozing awal	0.989211	0.99075	0.99938	0.9941676	0.991451	0.9880221	0.9997145
Z dozing final	0.99075	0.99938	0.994168	0.994963	0.9921207	0.9997145	0.982363
Zcell	0.99966	0.999663	0.99654	0.9952762	0.9940417	0.9927782	0.9917021
ninj (mol)	0.00162	0.00324	0.00471	0.00626	0.00781	0.00944	0.01084
nunads (mol)	0.00139	0.00299	0.00445	0.00594	0.00745	0.00897	0.01034
nsolub (mol)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nads (mol)	0.00023	0.00025	0.00026	0.00032	0.00036	0.00047	0.0005
nadsgibbs (mmol/gr zeolit)	0.1145	0.1266	0.1305	0.1586	0.1812	0.2356	0.2537
nabsolute (mmol/gr zeolit)	0.1145	0.1266	0.1306	0.1587	0.1813	0.2358	0.254

Lampiran 7. Tabulasi Hasil Uji Adsorpsi Karbon Monoksida Pada Zeolit Alam Lampung Teraktivasi pada suhu 25°C (37-50 mikron)

	Uncalibrated*	Calibrated			CO		
Vvoid	21.18						
V dozing	23			MW	28		
Dozing Temp	86	86		Ads.phase			
Mass NTC	2.012			dens	0.998		
%moisture sample, mol H2O	0.0000	0.0000		g/cm3			
R, gas constant	669.9542893	(psi cm3)/ (mol °R)					
Final Sampling Press*	25.73	51.44	77.07	102.46	127.61	153.78	179.51
Calibrated	24.3	50.0	75.7	101.2	126.4	152.6	178.4
Initial P dozing	365.13	338.74	313.97	289.55	264.77	238.17	213.55
Final P dozing	338.83	313.97	289.55	264.77	238.17	213.55	187.83
Cal Final P dozing	339.2147	314.317463	289.859596	265.039836	238.3956601	213.73339	187.967816
Sampling Temp*	78.73	78.76	78.75	78.75	78.76	78.71	78.764
Calibrated	78.73	78.76	78.75	78.75	78.76	78.71	78.764
densitycell, (g/cm3)	0.002	0.00401	0.006	0.00799	0.00996	0.012	0.0141
Z dozing awal	0.989211	0.981065	0.991034	0.9941676	0.999651	0.9880221	0.9919145
Z dozing final	0.999075	0.9910338	0.9941676	0.994963	0.992121	0.9919145	0.989363
Zcell	0.999671	0.9966424	0.99654	0.9952762	0.994042	0.992778	0.9917021
ninj (mol)	0.00191	0.00373	0.00536	0.00696	0.00854	0.01019	0.01181
nunads (mol)	0.00143	0.00303	0.00454	0.00604	0.00754	0.0091	0.01063
nsolub (mol)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nads (mol)	0.00048	0.0007	0.00082	0.00092	0.00101	0.00109	0.00118
nadsgibbs (mmol/gr zeolit)	0.2398	0.3481	0.4065	0.4558	0.4997	0.5419	0.5866
nabsolute (mmol/gr zeolit)	0.2403	0.3495	0.409	0.4595	0.5048	0.5485	0.5949

Lampiran 8. Tabulasi Hasil Uji Adsorpsi Karbon Monoksida Pada Zeolit Alam Lampung Tak Teraktivasi pada suhu 25°C (37-50 mikron)

	Uncalibrated*	Calibrated			CO		
Vvoid	20.86						
V dozing	23			MW	28		
Dozing Temp	86	86		Ads.phase			
Mass NTC	1.99			dens	0.998		
%moisture sample, mol H2O	0.0000	0.0000		g/cm3			
R, gas constant	669.9542893	(psi cm3)/ (mol °R)					
Final Sampling Press*	25.57	50.74	75.42	100.95	126.33	151.94	175.27
Calibrated	24.1	49.3	74.1	99.7	125.1	150.8	174.1
Initial P dozing	381.79	357.88	334.81	310.19	286.33	262.37	239.77
Final P dozing	357.88	334.81	310.19	286.33	262.37	239.77	214.13
Cal Final P dozing	356.292266	335.18874	310.53169	286.63451	262.635914	239.998361	214.3144
Sampling Temp*	78.84	78.81	78.77	78.76	78.74	78.76	78.73
Calibrated	78.84	78.681	78.77	78.76	78.74	78.76	78.73
densitycell, (g/cm3)	0.00199	0.00394	0.00587	0.00787	0.00987	0.0119	0.0137
Z dozing awal	0.989211	0.99075	0.99938	0.9941676	0.991451	0.9880221	0.9997145
Z dozing final	0.99075	0.99938	0.994168	0.994963	0.9921207	0.9997145	0.982363
Zcell	0.99966	0.999663	0.99654	0.9952762	0.9940417	0.9927782	0.9917021
ninj (mol)	0.00167	0.00334	0.00481	0.00635	0.00791	0.00954	0.01094
nunads (mol)	0.00139	0.00293	0.00438	0.00587	0.00735	0.00885	0.01022
nsolub (mol)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nads (mol)	0.00028	0.00041	0.00043	0.00043	0.00056	0.00069	0.00072
nadsgibbs (mmol/gr zeolit)	0.1388	0.2042	0.2169	0.2451	0.2794	0.349	0.3609
nabsolute (mmol/gr zeolit)	0.139	0.205	0.2182	0.247	0.2822	0.3532	0.3659

Lampiran 9. Tabulasi Hasil Uji Adsorpsi Karbon Monoksida Pada Zeolit Alam Lampung Teraktivasi 25°C (100 mikron)

	Uncalibrated*	Calibrated			CO		
Vvoid	21.18						
V dozing	23			MW	28		
Dozing Temp	86	86		Ads.phase			
Mass NTC	2.012			dens	0.998		
%moisture sample, mol H2O	0.0000	0.0000		g/cm3			
R, gas constant	669.9542893	(psi cm3)/ (mol °R)					
Final Sampling Press*	25.54	50.62	75.53	100.61	124.32	149.27	174.04
Calibrated	24.1	49.2	74.2	99.3	123.1	148.1	172.9
Initial P dozing	360.8	334.64	311.74	287.67	263.47	238.02	214.47
Final P dozing	334.64	311.74	287.67	263.47	238.02	214.47	190.01
Cal Final P dozing	335.0185	312.08406	287.97663	263.73771	238.245406	214.65499	190.151735
Sampling Temp*	78.73	78.76	78.75	78.75	78.76	78.71	78.764
Calibrated	78.73	78.76	78.75	78.75	78.76	78.71	78.64
densitycell, (g/cm3)	0.00198	0.00394	0.00589	0.00785	0.00971	0.0117	0.0136
Z dozing awal	0.98933	0.981065	0.991034	0.994168	0.999651	0.988022	0.9919145
Z dozing final	0.999075	0.991034	0.994168	0.994963	0.9921207	0.9919145	0.989363
Zcell	0.999671	0.996642	0.99654	0.995276	0.9940417	0.992778	0.991702
ninj (mol)	0.0019	0.00359	0.0052	0.00676	0.00827	0.00984	0.01138
nunads (mol)	0.00141	0.00298	0.00445	0.00594	0.00734	0.00883	0.0103
nsolub (mol)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nads (mol)	0.00048	0.00061	0.00074	0.00083	0.00093	0.00101	0.00108
nadsgibbs (mmol/gr zeolit)	0.2396	0.3013	0.3686	0.4103	0.4602	0.5041	0.5367
nabsolute (mmol/gr zeolit)	0.24	0.3025	0.3708	0.4136	0.4647	0.5101	0.5442

Lampiran 10. Tabulasi Hasil Uji Adsorpsi Karbon Monoksida Pada Zeolit Alam Lampung Teraktivasi 25°C (300 mikron)

	Uncalibrated*	Calibrated			CO		
Vvoid	21.18						
V dozing	23			MW	28		
Dozing Temp	86	86		Ads.phase			
Mass NTC	2.012			dens	0.998		
%moisture sample, mol H2O	0.0000	0.0000		g/cm3			
R, gas constant	669.9542893	(psi cm3)/ (mol °R)					
Final Sampling Press*	25.71	51.21	76.39	100.72	125.31	150.72	174.64
Calibrated	24.3	49.8	75.0	99.4	124.1	149.5	173.5
Initial P dozing	352.86	328.47	304.69	280.37	256.77	230.63	206.19
Final P dozing	328.47	304.69	280.37	256.77	230.63	206.19	181.77
Cal Final P dozing	328.83933	305.02322	280.66502	257.12671	230.84286	206.3605	181.89687
Sampling Temp*	78.77	78.71	78.73	78.75	78.73	78.76	78.764
Calibrated	78.77	78.62	78.73	78.75	78.73	78.76	78.764
densitycell, (g/cm3)	0.002	0.00399	0.00595	0.00786	0.00979	0.0118	0.0137
Z dozing awal	0.98921	0.981065	0.991034	0.994168	0.999651	0.988022	0.9919145
Z dozing final	0.999075	0.991034	0.994168	0.994963	0.992121	0.9919145	0.989363
Zcell	0.999671	0.996642	0.99654	0.995276	0.9940417	0.992778	0.991702
ninj (mol)	0.00178	0.00353	0.00515	0.00667	0.00823	0.00986	0.0114
nunads (mol)	0.00142	0.00302	0.0045	0.00594	0.00740	0.00891	0.01034
nsolub (mol)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nads (mol)	0.00036	0.00051	0.00065	0.00073	0.00083	0.00094	0.00106
nadsgibbs (mmol/gr zeolit)	0.1773	0.2527	0.3215	0.3642	0.4108	0.4693	0.5258
nabsolute (mmol/gr zeolit)	0.1777	0.2538	0.3234	0.3670	0.4149	0.4749	0.5331

Lampiran 11. Tabulasi Hasil Uji Adsorpsi Karbon Monoksida Pada Zeolit Alam Lampung Teraktivasi 35°C (37-50 mikron)

	Uncalibrated*	Calibrated			CO		
Vvoid	21.18						
V dozing	23			MW	28		
Dozing Temp	86	86		Ads.phase		0.998	
Mass NTC	2.012			dens			
%moisture sample, mol H2O	0.0000	0.0000		g/cm3			
R, gas constant	669.9542893	(psi cm3)/ (mol °R)					
Final Sampling Press*	25.08	50.26	75.33	100.27	125.17	150.28	175.32
Calibrated	23.6	48.9	74.0	99.0	123.9	149.1	174.2
Initial P dozing	371.17	345.43	319.54	293.01	267.17	241.43	215.17
Final P dozing	345.43	319.54	293.01	267.17	241.43	215.17	189.03
Cal Final P dozing	345.82432	319.89592	293.32504	267.44374	241.66116	215.35621	189.16997
Sampling Temp*	95.16	95.27	95.16	95.24	95.27	95.16	95.27
Calibrated	95.16	95.27	95.16	95.24	95.27	95.16	95.27
densitycell, (g/cm3)	0.00189	0.0038	0.00569	0.00759	0.00948	0.0114	0.0133
Z dozing awal	0.98933	0.981065	0.991034	0.994168	0.999651	0.988022	0.9919145
Z dozing final	0.999075	0.991034	0.994168	0.994963	0.992121	0.9919145	0.989363
Zcell	0.999671	0.99654	0.99654	0.995276	0.994042	0.992778	0.991702
ninj (mol)	0.00182	0.00366	0.00537	0.00699	0.00847	0.01017	0.01177
nunads (mol)	0.00135	0.00287	0.00431	0.00574	0.00717	0.00863	0.01007
nsolub (mol)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nads (mol)	0.00047	0.00078	0.00106	0.00125	0.0013	0.00154	0.0017
nadsgibbs (mmol/gr zeolit)	0.2357	0.3891	0.5282	0.622	0.6448	0.7663	0.8433
nabsolute (mmol/gr zeolit)	0.2362	0.3906	0.5312	0.6268	0.6509	0.7757	0.8547

Lampiran 12. Tabulasi Hasil Uji Adsorpsi Karbon Monoksida Pada Zeolit Alam Lampung Teraktivasi 50°C (37-50 mikron)

	Uncalibrated*	Calibrated					
Vvoid	21.18				CO		
V dozing	23				MW	28	
Dozing Temp	86	86			Ads.phase		
Mass NTC	2.012				dens	0.998	
%moisture sample, mol H2O	0.0000	0.0000			g/cm3		
R, gas constant	669.9542893	(psi cm3)/ (mol °R)					
Final Sampling Press*	25.57	50.44	75.61	100.13	125.48	150.33	175.73
Calibrated	24.1	49.0	74.3	98.8	124.2	149.1	174.6
Initial P dozing	375.56	347.4	320.51	293.47	266.72	238.69	212.54
Final P dozing	347.4	320.51	293.47	266.72	238.69	212.54	185.52
Cal Final P dozing	347.79718	320.86738	293.78576	266.99301	238.91654	212.72163	185.65365
Sampling Temp*	122.52	122.47	122.43	122.47	122.47	122.52	122.31
Calibrated	122.52	122.47	122.47	122.47	122.47	122.52	122.31
densitycell, (g/cm3)	0.00184	0.00363	0.00545	0.00722	0.00906	0.0109	0.0127
Z dozing awal	0.98933	0.981065	0.991034	0.994168	0.999651	0.988022	0.9919145
Z dozing final	0.999075	0.991034	0.994168	0.994963	0.992121	0.9919145	0.989363
Zcell	0.999671	0.99654	0.99654	0.995276	0.994042	0.992778	0.991702
ninj (mol)	0.00188	0.00369	0.00535	0.00695	0.0085	0.01011	0.01169
nunads (mol)	0.00131	0.00275	0.00412	0.00546	0.00686	0.00822	0.00963
nsolub (mol)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
nads (mol)	0.00057	0.00094	0.00123	0.00149	0.00165	0.00189	0.00206
nadsgibbs (mmol/gr zeolit)	0.2837	0.4683	0.6134	0.7409	0.8179	0.9388	1.0259
nabsolute (mmol/gr zeolit)	0.2842	0.4700	0.6168	0.7463	0.8254	0.9491	1.0391

