



UNIVERSITAS INDONESIA

**PREPARASI ZEOLIT ALAM LAMPUNG DENGAN METODE
DEALUMINASI DAN KALSINASI UNTUK ADSORPSI GAS
CO**

SKRIPSI

YUDA PRIHATAMA

0706200541

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM EKSTENSI TEKNIK KIMIA
UNIVERSITAS INDONESIA
DEPOK
2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Yuda Prihatama
NPM : 0706200541
Tanda Tangan :
Tanggal : 20 Desember 2009

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi dengan judul:

**“PREPARASI ZEOLIT ALAM LAMPUNG DENGAN METODE
DEALUMINASI DAN KALSINASI UNTUK ADSORPSI GAS
CO”**

Oleh:

YUDA PRIHATAMA

0706200541

Dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik di Departemen Teknik Kimia FTUI dan telah disetujui untuk diajukan dalam seminar.

Depok , Desember 2009

Menyetujui,

Ir. Yuliusman, M.Eng

NIP. 132 127 784

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas kasih karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan makalah skripsi yang diberi judul “Adsorpsi Gas CO pada Kasus Kebakaran Menggunakan Zeolit Alam” disusun sebagai salah satu prasyarat dalam menyelesaikan studi program sarjana pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Dalam penyusunan makalah seminar ini, penulis mendapatkan banyak bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI.
2. Bapak Ir. Yuliusman, M.Eng selaku pembimbing seminar atas arahan, saran, dan bantuannya yang sangat berarti.
3. Para dosen Departemen Teknik Kimia FTUI yang telah membimbing dan memberikan ilmu yang sangat berguna bagi penulis.
4. Orang tuaku, kakak, dan adiku yang telah memberikan dukungan dan doa.
5. Tri Atmihardjo, atas bantuan, semangat, dukungan, dan doa.
6. Temanku Teknik kimia 2007 lainnya, atas bantuan, kebersamaan, canda tawa, dan dukungan.
7. Pihak-pihak lain yang mendukung dan membantu yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan tugas seminar ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik untuk memperbaiki penulisan di masa yang akan datang.

Depok, Desember 2009

Penulis

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

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

Nama : Yuda Prihatama

NPM : 0706200541

Program Studi : Teknik Kimia

Departemen : Teknik Kimia

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

“Preparasi Zeolit Alam Lampung Dengan Metode Dealuminasi Dan Kalsinasi
Untuk Adsorpsi Gas CO”

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 22 Desember 2009

Yang menyatakan

(Yuda Prihatama)

ABSTRAK

Nama : Yuda Prihatama
Program studi : Ekstensi Teknik Kimia
Judul : Preparasi zeolit alam Lampung dengan metode dealuminasi dan kalsinasi untuk adsorpsi gas CO

Gas CO yang dihasilkan dari kasus kebakaran merupakan gas yang berbahaya dan beracun. Untuk mengurangi kadar senyawa gas CO dapat dilakukan dengan proses adsorpsi dengan menggunakan zeolit alam lampung sebagai adsorben. Proses perlakuan pada zeolit alam ini meliputi : Proses dealuminasi zeolit alam dalam larutan HF 2% kemudian proses perendaman dengan larutan HCl . Kemudian dilanjutkan dengan proses kalsinasi pada temperatur 500 °C. Proses adsorpsi berlangsung secara kontinyu. Berdasarkan hasil aktivasi zeolit diperoleh peningkatan rasio Si/Al dari 7,56 menjadi 12,15, dan pada uji coba adsorpsi pada gas CO diperoleh efisiensi optimal sebesar 9,7% dengan ukuran adsorber 50 µm.

Kata Kunci:
Adsorpsi, aktivasi, gas CO, zeolit alam Lampung

ABSTRACT

Name : Yuda Prihatama
Study program: Ekstensi Teknik Kimia
Title : Preparation of Lampung natural zeolite with the method of dealumination and kalsination for CO gas adsorption

CO gas produced from gas fires are dangerous and poisonous. To reduce levels of CO gas compounds can be done by adsorption process using Lampung natural zeolite as an adsorbent. Treatment process on the natural zeolite include: natural zeolite dealumination process in 2% HF solution and then soaking process with a solution of HCl. Then proceed with the kalsination process temperature at 500 °C. Adsorption processes take place continuously. Based on the results obtained zeolite activation ratio increased Si/Al from 7,56 to 12,15, and the testing of gas adsorption of CO obtained at optimum efficiency of 9,7% with the adsorber size of 50 µm.

Keywords:
Adsorption, activation, CO gas, Lampung natural zeolit

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	x
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Pembakaran	5
2.2 Gas Karbon Carbon Monoksida (CO ₂).....	6
2.3 Adsorpsi.....	10
2.3.1 Definisi dan Sifat Adsorpsi.....	10
2.3.2 Adsorpsi Isoterm.....	11
2.3.3 Faktor faktor yang mempengaruhi adsorpsi.....	16
2.4 Macam Adsorben.....	17
2.4.1 Aktif alumina.....	17
2.4.2 Silika gel	17
2.4.3 Karbon aktif.....	18
2.4.4 Zeolit.....	19
2.4.4.1 Struktur Zeolit.....	19
2.4.4.2 Sifat Zeolit.....	21

2.4.4.3 Pemanfaatan Zeolit.....	22
2.4.4.4 Jenis-Jenis Zeolit.....	23
2.4.4.5 Zeolit Alam Lampung.....	24
2.4.4.6 Metode Aktivasi Zeolit.....	25
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	27
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	27
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	28
3.2.1 Peralatan Aktivasi Zeolit.....	28
3.2.2 Bahan Aktivasi Zeolit.....	28
3.2.3 Peralatan Uji Adsorpsi Zeolit.....	28
3.3 Prosedur Penelitian.....	29
3.3.1 Tahap Preparasi Zeolit.....	29
3.3.2 Tahap Uji Adsorpsi.....	31
3.4 Teknik Pengolahan Data.....	32
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1 Aktivasi Zeolit Alam.....	33
4.2 Karakterisasi Zeolit.....	35
4.3 Uji Adsorpsi Gas CO.....	38
4.3.1 Uji adsorpsi CO oleh zeolit sebelum dan sesudah treatment.....	39
4.3.2 Pengaruh ukuran partikel dengan laju alir gas CO sebesar 1%.....	41
4.3.3 Pengaruh ukuran partikel dengan laju alir gas CO sebesar 10%.....	43
4.3.4 Pengaruh ukuran partikel dengan laju alir gas CO sebesar 17%.....	44
4.3.5 Pengaruh laju alir.....	46
BAB 5 KESIMPULAN.....	47
5.1 Kesimpulan.....	47
5.2 Saran.....	48
DAFTAR PUSTAKA.....	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Kurva Isoterm Freundlich	11
Gambar 2.2	Proses Adsorpsi Isoterm BET	14
Gambar 2.3	Struktur Stereotip Clinoptilolite	18
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	26
Gambar 3.2	Skema Perangkaian Alat	30
Gambar 4.1	Tahap dealuminasi dengan larutan HF 2%.....	34
Gambar 4.2	Tahap dealuminasi dengan larutan HCl 6M.....	34
Gambar 4.3	Pengaruh Aktivasi Pada Luas Permukaan Zeolit Alam Lampung	35
Gambar 4.4	Pengaruh aktivasi terhadap kadar pengotor pada zeolit alam Lampung.....	36
Gambar 4.5	Pengaruh aktivasi terhadap kadar Si / Al pada zeolit.....	37
Gambar 4.6	Atmospheric Fixed Bed Reactor.....	39
Gambar 4.7	TCD GC.....	39
Gambar 4.8	Adsorpsi gas CO sebelum dan sesudah treatment.....	40
Gambar 4.9	Kapasitas penyerapan zeolit pada gas CO selama 55 menit.....	40
Gambar 4.10	Kapasitas penyerapan zeolit selama 55 menit (konsentrasi CO 1%).....	42
Gambar 4.11	Kapasitas penyerapan zeolit selama 55 menit (konsentrasi CO 10%).....	43
Gambar 4.12	Kapasitas penyerapan zeolit selama 55 menit (konsentrasi CO 17%).....	44
Gambar 4.13	Kapasitas penyerapan zeolit selama 55 menit (ukuran partikel 50 μ m).....	45
Gambar 4.14	Kapasitas penyerapan zeolit selama 55 menit (ukuran partikel 100 μ m).....	45
Gambar 4.15	Kapasitas penyerapan zeolit selama 55 menit (ukuran partikel 150 μ m)	46

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 ISO classification of fire stage, based on ISO 19706	7
Tabel 2.2 Komponen beracun utama dalam gas pembakaran	8
Tabel 2.3 Komposisi Kimia Zeolit Alam Lampung	22



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada saat ini kebakaran pada suatu gedung tertentu yang dialami masyarakat Indonesia baik dalam ruang tertutup maupun dalam ruang terbuka, dengan ventilasi yang cukup maupun tidak merupakan hal yang sering terjadi. Pada kasus kebakaran tersebut menghasilkan asap yang mengandung gas-gas berbahaya dan beracun. Gas-gas berbahaya dan beracun tersebut, jika dalam konsentrasi yang tinggi dapat membahayakan keselamatan orang yang terpapar, seperti CO, CO₂, serta gas-gas senyawa organik maupun anorganik yang berbahaya dan beracun lainnya. Adapun kebanyakan orang pada saat berada di tengah kebakaran akan menghirup gas-gas hasil kebakaran yang terus bertambah di mana oksigen yang dibutuhkan akan terus menurun sehingga akan membahayakan keselamatan orang tersebut. Demikian juga, banyak kematian pada saat akibat kebakaran terjadi karena menghirup gas beracun dari asap hasil pembakaran.

Pada studi pembakaran menunjukkan bahwa komposisi gas buang yang dihasilkan dari pembakaran akan dipengaruhi oleh faktor lingkungan, zona pembakaran, geometri ruang dan ventilasi ruang. Gas buang hasil pembakaran juga akan bervariasi tergantung kepada kondisi pembakaran, bahan dan material yang ikut terbakar dimana memiliki jumlah yang bergantung kepada laju pertumbuhan api. Adapun faktor lainnya untuk menyebabkan gas buang pembakaran yang lebih bervariasi dalam komposisi dan jumlah senyawa yaitu temperatur dan konsentrasi oksigen yang bervariasi pula.

Polimer yang hanya mengandung karbon, hidrogen dan oksigen akan menghasilkan karbondioksida dan air ketika terjadinya pembakaran secara sempurna, sedangkan pada pembakaran tidak sempurna maka akan memproduksi karbonmonoksida, hidrokarbon, produk oksidatif pirolisis seperti aldehid dan partikulat. ISO 19706 telah mengidentifikasi jumlah tingkatan pembakaran yang berbeda. Tingkatan pembakaran ISO, dari *non-flaming*, *well-ventilated flaming* sampai *under-ventilated flaming*, telah diklasifikasikan dalam terminologi

dari *heat flux*, temperatur, O_2 yang tersedia, dan rasio CO_2/CO serta efisiensi pembakaran.

Gas CO merupakan komponen gas yang sangat beracun karena lebih cepat untuk mengikat haemoglobin menjadi carboxyhaemoglobin sehingga menyebabkan penghambatan aliran O_2 untuk mengikat haemoglobin. Demikian juga gas CO_2 yang berlebihan akan berakibat buruk sebab dalam darah akan menstimulasi *hyperventilation* dan menyebabkan sesak nafas. Kekurangan suplai O_2 pada batas tertentu yaitu pada konsentrasi O_2 kurang dari 14% akan menyebabkan meningkatnya resiko kematian.

Kasus kebakaran sebagai penghasil gas CO dan CO_2 yang cukup tinggi juga masih menjadi salah satu permasalahan yang harus di selesaikan, mengingat seringnya terjadi kebakaran, baik di daerah penduduk maupun 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, diantaranya 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).

Gas CO merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, dan beracun terutama bagi pernapasan. Gas CO utamanya dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna. Pembakaran tidak sempurna sangat mungkin terjadi terutama pada peristiwa kebakaran. Secara teori, pembakaran tak 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 keberadaanya.

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.

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian yang berkaitan dengan penjernihan asap. Yadav, dkk (2007) menemukan bahwa oksida logam bisa digunakan untuk menjernihkan kabut asap buatan yang dibuat dari senyawa glikol, senyawa glikol adalah senyawa yang banyak digunakan dalam operasi militer untuk menghasilkan asap, sehingga tidak terlihat dengan jelas oleh musuh. Kajian dilakukan dalam skala laboratorium, menguji efektivitas struktur nano dalam menjernihkan asap pada ruang tertutup dan membandingkan dengan material yang berukuran konvensional. Sampel asap dibuat dari senyawa Glikol yang disemprot menggunakan alat pembuat asap. Material yang diuji adalah NaHCO_3 dan Ca(OH)_2 .

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. 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 molekul dan sebagai katalisator. Hal ini didukung dengan letak geologis 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.

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.

1.2 Rumusan Masalah

- 1 Gas CO yang merupakan gas beracun yang dihasilkan pada peristiwa kebakaran dapat diminimalisasi atau bahkan dihilangkan dengan cara diadsorpsi menggunakan adsorben berupa zeolit alam
- 2 Zeolit alam sebagai adsorber harus dibersihkan dari pengotor dan diaktivasi dahulu

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengadsorpsi gas CO yang merupakan gas beracun hasil pembakaran pada kasus kebakaran menggunakan zeolit alam.
2. Optimalisasi penggunaan zeolit alam sebagai adsorben gas CO.

1.4 Batasan Masalah

1. Zeolit yang digunakan adalah zeolit alam lampung
2. Gas yang diadsorpsi adalah gas CO

1.5 Sistematika Penulisan

Makalah sekripsi ini terdiri dari 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

Gas karbon monoksida (CO), adsorpsi, macam adsorben seperti aktif alumina, karbon aktif, silika gel, dan zeolit.

BAB 3 METODE PENELITIAN

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

BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang hasil penelitian dan pembahasannya sesuai dengan tujuan penelitian dan batasan masalah yang dirumuskan

BAB 5 KESIMPULAN

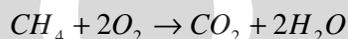
Bab ini berisi tentang kesimpulan yang diperoleh dari hasil dan saran penelitian secara keseluruhan

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembakaran

Pembakaran adalah reaksi kimia kompleks yang eksotermik antara bahan bakar (biasanya hidrokarbon) dan suatu pengoksidasi (oksidan) yang menghasilkan panas (atau terkadang panas yang bersamaan dengan cahaya). Dalam suatu reaksi pembakaran, suatu senyawa bereaksi dengan *oxidizing element*, seperti oksigen, sebagai contoh:

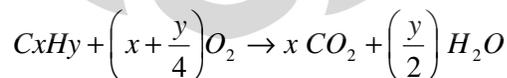


Berikut adalah komposisi udara atmosfer dalam keadaan standar yang digunakan sebagai pengoksidasi:

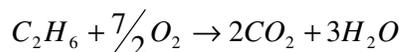
Tabel 2.1. Komposisi udara pada keadaan standar.

Spesifikasi	Fraksi Mol
N ₂	0,780840
O ₂	0,209476
Ar	0,009340
CO ₂	0,000314
Ne	0,000018
He	0,000005
Lain-lain	0,000007

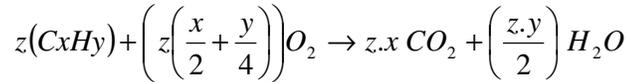
Biasanya diperkirakan sebagai 79% N₂, 21% O₂. Berat molekul rata-rata udara adalah 28,97. Banyak produk yang dibentuk, namun produk yang diharapkan hanya CO₂, H₂O, dan N₂. Secara umum, rumus kimia untuk stoikiometri, pembakaran dari hidrokarbon di oksigen adalah sebagai berikut:



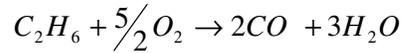
misalnya dari pembakaran etana berikut:



Secara umum, rumus kimia untuk stoikiometri tidak lengkap dari pembakaran hidrokarbon di oksigen adalah sebagai berikut:



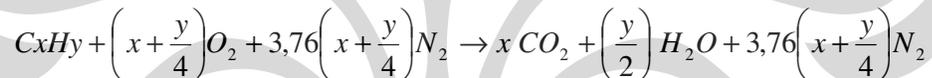
misalnya dari pembakaran propana berikut:



sehingga, persamaan kata yang sederhana untuk pembakaran dari hidrokarbon di oksigen adalah:

BAHAN BAKAR + OKSIGEN → PANAS + KARBONDIOKSIDA + AIR
Seringkali terbentuk CO dalam jumlah yang besar. Persyaratan udara stoikiometris (teoritis) adalah jumlah minimum udara yang diperlukan untuk melakukan pembakaran. Kelebihan udara adalah jumlah udara tambahan dalam pembakaran.

Jika pembakaran dilakukan dengan menggunakan udara sebagai sumber oksigen, nitrogen yang dapat ditambahkan ke persamaan, meskipun tidak bereaksi, untuk menampilkan komposisi dari cerobong gas:



misalnya dari pembakaran propana, yaitu:



sehingga, persamaan kata yang sederhana untuk pembakaran dari hidrokarbon di udara adalah:

BAHAN BAKAR + UDARA → PANAS + KARBONDIOKSIDA + AIR +
NITROGEN

2.2 Gas Karbon Monoksida (CO)

Gas karbon monoksida atau biasa disebut CO adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau dan tidak berasa. Karena sifatnya tersebut, sangat sulit untuk mengenali munculnya gas karbon monoksida di sekitar kita. Gas CO utamanya dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna dari minyak tanah, bensin, solar, batu bara, LPG atau kayu. Pembakaran tidak sempurna memang sangat mungkin terjadi. Secara teoritis ini terjadi salah satunya adalah karena kekurangan gas oksigen untuk proses pembakarannya.

Sumber gas CO lainnya yang dapat dijumpai di lingkungan sekitar adalah berasal dari kompor minyak tanah, kompor gas, pemanas air, perapian, pemanas ruangan dan kendaraan bermotor. Keracunan gas karbon monoksida dapat menyebabkan kematian. Ketika gas karbon monoksida terhirup, gas tersebut masuk ke paru-paru lalu masuk ke dalam molekul haemoglobin dalam sel darah merah. Karbon monoksida terikat pada haemoglobin dan memiliki kecenderungan yang sama dengan oksigen.

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:

- 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 8 ppm udara dengan rata-rata waktu pengukuran 24 jam. Jika CO sebanyak 30 ppm dihisap oleh manusia selama delapan jam akan menimbulkan rasa pusing dan mual. Konsentrasi CO sebanyak 1000 ppm dan waktu paparan (kontak) selama satu 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 sangatlah beracun karena dapat berikatan kuat dengan hemoglobin dan menghambat proses pengangkutan oksigen ke dalam jaringan-jaringan tubuh. Karbon monoksida berikatan 200 kali lebih kuat dengan

haemoglobin daripada oksigen dan oleh karenanya sangat sulit untuk melepaskannya ketika telah berikatan dengan darah.

Konsentrasi COHb 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 ekuilibrium setelah beberapa waktu tertentu. Konsentrasi ekuilibrium COHb tersebut akan tetap dipertahankan di dalam darah selama konsentrasi CO pada udara di sekelilingnya tetap tidak berubah. COHb secara perlahan-lahan akan berubah sesuai dengan perubahan konsentrasi CO di udara untuk mencapai ekuilibrium yang baru.

Pembentukan gas CO, gas yang paling beracun secara signifikan, disebabkan oleh kondisi dari *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, bisa meningkat dengan:

1. Panas yang tidak memadai dalam fase gas (seperti selama *smouldering*)
2. Pendinginan tiba-tiba dari reaksi nyala (seperti ketika halogen ada dalam nyala, atau ventilasi berlebihan mendinginkan nyala).
3. Keberadaan molekul yang stabil, seperti aromatik, yang tahan lebih lama dalam zona nyala, memberikan *yield CO* yang tinggi dalam kondisi *well-ventilated*, tetapi lebih rendah dibandingkan *yield* pada kondisi *under-ventilated*.
4. O_2 yang kurang, (seperti pembakaran *under-ventilated*, flux panas radiant yang besar membakar bahan bakar).

ISO 9706 mengidentifikasi jumlah tingkatan pembakaran yang berbeda akan memberikan perbandingan volume produk CO dan CO_2 berbeda, dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2.2. ISO Klasifikasi tingkat pembakaran, ISO 19706

Fire stage	Heat (kWm ⁻²)	Max temp (°C)		Oxygen (%)		Equiv ratio	VCO/VO ₂	Combustion efficiency (%)
		Fuel	Smoke	In	out			
Non flaming								
1a. Self sustained smouldering		450-800	25-85	20	0-20	-	0.1-1	50-90
1b. Oxidative, external radiation		300-600		20	20	<1		
1c. Anaerobic external radiation		100-500		0	0	>>1		
2. Well-ventilated flaming	0-60	350-650	50-500	20	0-20	<1	<0.05	>95
Under Ventilated flaming								
3a. Low Vent, room fire	0-30	300-600	50-500	15-20	5-10	>1	0.2-0.4	70-80
3b. Post flashover	50-150	350-650	.600	<15	<5	>1	0.1-0.4	70-90

(Sumber: Hull, 2006)

Selain gas CO, masih ada beberapa senyawa gas buang pembakaran yang bersifat racun, dapat dilihat pada Tabel 3 berikut ini.

Tabel 2.3. Komponen beracun utama dalam gas pembakaran

Yield independent of fire ventilation	Yield increases with ventilation	Yield decrease with ventilation
HF (2900 ; 500ppm)	CO ₂ (tidak beracun secara khusus, tetapi mengusung O ₂ dan meningkatkan laju pernafasan)	CO (5700 ppm)
HCl (3800 ; 1000 ppm)	NO ₂ (250 ; 170 ppm)	HCN (165 ppm)
HBr (3800 ; 1000 ppm)	SO ₂ (1400 ; 150 ppm)	Aliphatic and aromatic hydrocarbon, PAH

2.3 Adsorpsi

2.3.1 Definisi dan Sifat Adsorpsi

Adsorpsi adalah proses yang terjadi ketika gas atau cairan terlarut terakumulasi pada permukaan suatu padatan atau cairan (adsorben), 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.

Adsorpsi terbagi menjadi dua, yaitu adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia. Adsorpsi fisika disebabkan terutama oleh gaya Van der Waals dan gaya elektrostatik antara molekul-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 antara molekul-molekul fluida dan permukaan padatan lebih besar daripada gaya tarik antar molekul-molekul fluida sendiri (adhesi > kohesi). Adsorpsi fisika bersifat reversibel sehingga bila tekanan diturunkan maka akan terjadi desorpsi gas. Proses adsorpsi fisika bersifat eksotermis dimana jumlah senyawa yang diadsorpsi bertambah dengan penurunan temperatur. Sedangkan adsorpsi kimia terjadi karena adanya ikatan kimia antara adsorbat dengan adsorben. Adsorpsi kimia bersifat irreversibel dan diperlukan temperatur tinggi untuk menghilangkan gas-gas teradsorb.

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% volume total kristal zeolit terdiri dari ruang terbuka yaitu kerangka struktur aluminosilikat dan rongga antarkristal. Struktur dalam ini bersifat sangat lekat air (hidrofilik), biasanya penuh dengan air. Bila air ini dikeluarkan baik dengan pemanasan atau dengan evakuasi, zeolit yang telah mengalami dehidrasi menjadi adsorben air yang baik. Bila zeolit dehidrat terkena udara ia akan dengan cepat menyerap air lembab. Oleh karena itu, zeolit dehidrat terutama efektif untuk mengatur tingkat kelembaban dalam kondisi kelembaban rendah. Sifat zeolit yang dapat dehidrasi/rehidrasi dapat juga digunakan untuk alat pendingin.

2.3.2 Adsorpsi Isoterm

Hubungan antara jumlah zat yang diadsorpsi dengan kesetimbangan tekanan pada suhu konstan disebut adsorpsi isotermis. Ada lima tipe adsorpsi yang telah diteliti. Adsorpsi biasanya dijelaskan secara isotermal, yaitu jumlah adsorbat pada adsorben sebagai fungsi tekanannya (jika gas) atau konsentrasinya (jika cair) pada suhu tetap. Jumlah zat teradsorb hampir selalu dinormalisasi oleh massa adsorben untuk mengizinkan perbandingan dari material berbeda.

Persamaan matematika pertama untuk kondisi isotermal dipublikasikan oleh Freundlich dan Küster (1984) dan merupakan formula empiris murni untuk adsorbat fasa gas.

$$\frac{x}{m} = k P^{\frac{1}{n}} \quad (2.1)$$

di mana:

x = kuantitas adsorben

m = massa adsorben

P = tekanan adsorbat

k dan n = konstanta empiris untuk setiap pasangan adsorbat-adsorben pada suhu yang diberikan.

Fungsi ini memiliki asimtotik maksimum seiring peningkatan tekanan tanpa ikatan. Seiring peningkatan suhu, konstanta k dan n berubah menjadi merefleksikan pengamatan empiris bahwa kuantitas teradsorb meningkat lebih lambat dan tekanan yang lebih tinggi diharuskan untuk menjenuhkan permukaan.

1. Isoterm Freundlich

Adsorpsi isotermal freundlich merupakan adsorpsi isotermal, dimana kurva yang berhubungan dengan konsentrasi yang terlarut pada permukaan adsorben, hingga konsentrasi yang terlarut pada cairan yang terkontak. Untuk menggambarkan variasi jumlah adsorpsi per satuan luas atau satuan massa dengan tekanan, Freundlich merumuskan :

$$x/m = Kp^{1/n} \quad (2.2)$$

atau

$$x/m = Kc^{1/n} \quad (2.3)$$

dimana

x = massa adsorbat

m = massa adsorben

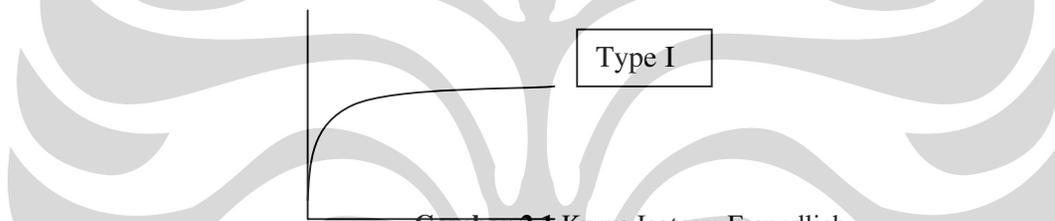
p = tekanan kesetimbangan dari adsorbat

c = konsentrasi kesetimbangan adsorbat pada larutan

K dan $1/n$ merupakan konstanta adsorbat dan adsorben pada temperatur tertentu dan n biasanya > 1

Persamaan ini diturunkan secara empirik dan berlaku untuk gas yang bertekanan rendah. Jika x/m dilambangkan dengan y , dengan memberikan logaritma pada kedua sisi, didapat:

$$\log y = \log k + \frac{1}{n} \log P \quad (2.4)$$



Gambar 2.1 Kurva Isoterm Freundlich

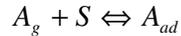
Jadi plot y sebagai fungsi dari $\log P$ akan berupa garis lurus dengan gradien $1/n$ dan akan memotong sumbu $\log y$ pada $\log k$.

2. Isoterm Langmuir

Irving Langmuir menyimpulkan persamaan yang jauh lebih baik untuk adsorpsi isoterm tipe I. Postulat Langmuir menyatakan bahwa gas yang diadsorpsi oleh permukaan padatan tidak dapat membentuk lebih dari satu lapisan. Isoterm langmuir merupakan jenis adsorpsi dengan metode chemisorpsi. Turunan kinetik yang sederhana dan turunan termodinamika yang akan menghasilkan konstanta keseimbangan isotherm langmuir.

Model adsorpsi langmuir merupakan model yang paling umum digunakan untuk menentukan jumlah adsorbat yang diadsorpsi sebagai fungsi tekanan parsial atau konsentrasi pada temperatur tertentu. Model ini mengasumsikan adsorpsi gas ideal pada permukaan ideal. Gas diasumsikan mengikat pada beberapa bagian

berbeda pada permukaan padatan dan proses adsorpsi diperlakukan sebagai reaksi dimana molekul gas A_g bereaksi dengan bagian yang kosong, S , untuk menghasilkan dan mengadsorp kompleks A_{ad}



Persamaan ini dapat diturunkan secara teoritis dengan menganggap bahwa hanya sebuah monolayer gas yang teradsorpsi, selain itu adsorpsi molekul gas terlokalisasi, yaitu sekali teradsorpsi, molekul-molekul ini tidak akan bergerak di sekeliling permukaan padatan. Selain itu juga diasumsikan bahwa panas adsorpsi, ΔH adsorpsi, tidak bergantung pada luas permukaan yang ditutupi gas.

Lebih jauh, ia menggambarkan proses adsorpsi sebagai penyatuan dua aksi yang berlawanan, kondensasi molekul dari fase gas menjadi permukaan lapisan, dan evaporasi molekul dari permukaan lapisan menjadi bentuk gas kembali. Ketika adsorpsi pertama kali, setiap molekul bertumbukkan dengan permukaan dan membentuk lapisan. Tapi pada proses selanjutnya hanya permukaan yang belum terlapiasi yang dapat mengadsorpsi molekul. Hasilnya adalah laju inisial dari kondensasi molekul pada permukaan adalah paling tinggi dan merosot sebagaimana area yang tersedia untuk adsorpsi berkurang. Di sisi lain, molekul yang teradsorpsi pada permukaan padat, oleh agitasi termal, terlepas dari permukaan dan pergi sebagai gas. Laju dimana terjadi desorpsi akan bergantung pada jumlah permukaan yang telah terlapiasi oleh molekul dan akan meningkat seiring dengan semakin penuhnya permukaan. Dua laju ini, kondensasi dan desorpsi akan menjadi sama, dan saat ini terjadi akan terbentuk keseimbangan adsorpsi.

Hal ini dapat diformulasikan secara matematik. Jika θ adalah fraksi dari total permukaan yang dilapiasi molekul pada saat tertentu, maka fraksi permukaan kosong adalah $(1-\theta)$. Sesuai dengan teori kinetik, laju molekul menumbuk satuan area permukaan sebanding dengan tekanan gas, laju kondensasi molekul ditentukan oleh tekanan dan fraksi permukaan kosong:

$$\text{Laju kondensasi} = k_1(1-\theta)P \quad (2.5)$$

Dimana k_1 adalah konstanta. Jika k_2 menjadi laju molekul berevaporasi dari permukaan yang sudah penuh, maka:

$$\text{Laju evaporasi} = k_2\theta \quad (2.6)$$

Pada keseimbangan adsorpsi, kedua laju adalah sama. Maka,

$$k_1(1-\theta)P = k_2\theta$$

$$\theta = \frac{k_1P}{k_2 + k_1P} = \frac{bP}{1+bP} \quad (2.7)$$

Dimana $b=k_1/k_2$. sekarang, jumlah gas yang diadsorpsi per satuan luas per satuan massa adsorben, y , sebanding dengan fraksi dari permukaan yang terlapsi. Maka,

$$y = k\theta = \frac{kbP}{1+bP} \quad (2.8)$$

$$y = \frac{aP}{1+bP}$$

Persamaan di atas adalah persamaan adsorpsi isotherm Langmuir. Konstanta a dan b adalah karakteristik yang didapat dari data percobaan. Dengan mengalikan kedua sisi dengan P dan membalikinya, maka akan diperoleh:

$$\frac{P}{y} = \frac{1}{a} + \left(\frac{b}{a}\right)P \quad (2.9)$$

Plot P/y dengan P maka akan diperoleh kurva dengan slope yang sama dengan b/a dan memotong P/y yang sama dengan $1/a$.

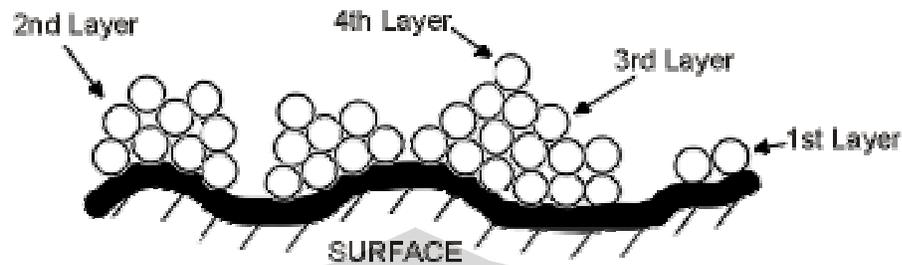
Baik persamaan Freundlich maupun Langmuir hanya sesuai jika zat yang diserap membentuk lapisan tunggal (monolayer) pada permukaan adsorben. Kedua isotherm ini tidak cocok lagi pada tekanan yang lebih tinggi, karena lapisan adsorbat yang terserap tidak lagi berbentuk lapisan tunggal, tetapi menjadi lapisan multi molekuler.

3. Isotherm BET

Isotherm BET adalah aturan untuk adsorpsi fisika oleh molekul-molekul gas pada suatu permukaan padat. Isotherm BET dikemukakan oleh Stephen Brunauer, Paul Hugh Emmett, dan Edward Teller. 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 teradsorpsi secara fisik pada permukaan solid pada banyak lapisan.

- Tanpa adanya interaksi antar tiap lapisan adsorpsi



Gambar 2.2 Proses Adsorpsi Isoterm BET

Lapis pertama dari molekul-molekul teradsorpsi dapat dibentuk, seperti pada teori Langmuir. Sekarang, adsorpsi juga dapat terjadi di atas material yang telah teradsorpsi. Interaksi vertikal terjadi antara molekul-molekul pada lapis pertama dan permukaan kosong, lapis kedua dan lapis pertama, dan seterusnya, tetapi interaksi ke samping diabaikan. Pada lapis teratas, situasi mendekati hubungan antara gas dan kondensat cairnya.

Jadi, persamaan untuk isoterm BET adalah:

$$\frac{P}{v(P^0 - P)} = \frac{1}{v_m c} + \left(\frac{c-1}{v_m c} \right) \frac{P}{P^0} \quad (2.10)$$

dimana:

v = volume gas diserap (0°C , 76 cmHg)

P = tekanan dari gas

P^0 = tekanan uap jenuh gas diserap pada temperatur T

v_m = volume gas diserap (0°C , 76 cmHg), diadsorpsi saat permukaan tertutup oleh lapisan unimolekular

c = konstanta

Secara praktikal hampir semua adsorben merupakan solid yang berpori dengan parameter utama yang dibutuhkan untuk membedakan suatu adsorben yaitu permukaan area spesifik. Spesifik area dari solid mikropori adalah besar, dan bernilai beberapa ratus meter persegi per gram adalah hal yang tidak mungkin. Pengukuran dengan akurat permukaan area dari solid mikropori adalah hal yang sulit dipelajari pada adsorpsi dan katalis.

2.3.3 Faktor-Faktor yang mempengaruhi adsorpsi

Jumlah fluida yang teradsorpsi pada permukaan adsorben dipengaruhi oleh faktor-faktor berikut ini:

1. Jenis adsorbat

a. Ukuran molekul adsorbat

Ukuran molekul yang sesuai merupakan hal yang paling penting agar proses adsorpsi dapat terjadi, karena molekul-molekul yang dapat diadsorpsi adalah molekul-molekul yang diameternya lebih kecil atau sama dengan diameter pori adsorben.

b. Kepolaran zat

Apabila berdiameter sama, molekul-molekul polar yang lebih kuat diadsorpsi daripada molekul-molekul yang kurang polar. Molekul-molekul yang lebih polar akan menggantikan molekul-molekul yang kurang polar yang telah lebih dulu di adsorpsi

2. Karakteristik Adsorben

a. Kemurnian adsorben

Sebagai zat yang digunakan untuk mengadsorpsi maka adsorben yang lebih murni memiliki kemampuan adsorpsi yang lebih baik.

b. Luas permukaan dan volume pori adsorben

Jumlah molekul adsorbat yang teradsorpsi akan meningkat dengan bertambahnya luas permukaan dan volume pori adsorben.

3. Temperatur

Proses adsorpsi adalah proses eksotermis, berarti peningkatan temperatur pada tekanan tetap akan mengurangi jumlah senyawa yang teradsorpsi.

4. Tekanan adsorbat

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

2.4 Macam Adsorben

2.4.1 Aktif alumina

Terbuat dari hidrat aluminium oksida yang mempunyai rumus molekul $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ dimana monohidrat tersebut hasil dari proses dehidrasi dan pengkristalan seiring dengan peningkatan temperatur atau dipanaskan. Permukaan alumina lebih polar daripada *silica gel* dan mempunyai *acidic* serta karakter dasar yang mengkilap seperti logam. Pada temperatur kamar sifat afinitas alumina aktif terhadap air sebanding dengan *silica gel* tetapi memiliki kapasitas lebih rendah. Pada saat temperatur dinaikkan kapasitas tampung alumina aktif melebihi *silica gel* dan dapat digunakan langsung untuk mengeringkan udara panas gas panas.

Sifat fisika:

- Luas permukaan 200 – 500 m²/gram
- Diameter pori sebesar 20 – 140 Å

Sifat kimia:

- Afinitas tinggi (daya tarik-menarik) terhadap air pada khususnya dan pada senyawa grup hidroksil pada umumnya.

2.4.2 Silika gel

Adsorben ini dihasilkan dari dehidrasi asam *polymer colloidal silicic* dengan komposisi air yang tinggi dan dapat dirumuskan seperti $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Komposisi air tersebut terbentuk secara kimia dari lapisan *hydroxyl group* dimana berkomporsi berkisar 5%. Metode lain dalam menghasilkan *silica gel* yaitu dihasilkan dari hidrolisis logam alkali silikat dengan asam, logam alkali tersebut adalah sodium. Kemudian sodium tersebut dipisahkan dari sodium silikat dengan metode *ion exchange*.

Asam silikat mengalami polimerisasi dan mengkondensasi menjadi larutan sehingga membentuk rantai dan jaring SiO_4 tetrahedra dengan diikuti pembentukan partikel spherical diameter berukuran 20 - 200Å. Pada proses pengeringan, partikel-partikel tersebut membentuk struktural pori berukuran mikro. Pembentukan ikatan antar partikel terjadi karena proses eliminasi air terhadap senyawa gugus hidroksil dan membentuk struktur akhir yang kokoh.

Setelah pengeringan struktur mikropori, silika gel yang telah kering akan sensitive terhadap pH dan akan dengan mudah mengalami proses presipitasi dengan kation lain yang ada pada suatu larutan. Kehadiran gugus hidroksil memberikan pengaruh derajat polaritas ke permukaan molekul seperti air, alkohol, fenol, dan amina (yang dapat membentuk ikatan hidrogen) dan hidrokarbon tidak jenuh dengan cara diserap ke dalam molekul-molekul nonpolar yang sangat kuat menarik kepolaritasannya. Oleh karena itu, untuk senyawa aromatik silika gel digunakan sebagai adsorben seperti contoh pemisahan senyawa aromatik dari parafin dan naphthene.

Sifat fisik:

- Luas area permukaan 600 – 800 m²/gram
- Diameter pori sebesar 20 – 50 Å

Sifat kimia:

- Bersifat hidrofilik, yang biasanya digunakan untuk mengeringkan gas

2.4.3 Karbon aktif

Terbuat dari hasil dekomposisi karbonasi kayu, yang diikuti aktivasi dengan steam atau karbondioksida pada tekanan atmosfer dan temperatur (700 °C – 1100 °C). Tetapi dekomposisi ini tidak memiliki pori maka harus ditambahkan proses aktivasi atau diolah dengan dicampurkan dengan bahan kimia seperti seng klorida asam posporic sebelum dikarbonasi.

Struktur karbon aktif terdiri dari grafit yang berbentuk mikrokristal, tetapi mikro kristal tersusun secara acak dan jarak antar kristal membentuk mikropori. Permukaan karbon adalah nonpolar atau sangat kecil tetapi dapat ditingkatkan dengan proses oksidasi. Karbon aktif digunakan sebagai adsorben pada *hydrophobic* dan *organophilic* saja. Karbon aktif biasanya digunakan untuk proses adsorpsi organik seperti pada pewarnaan gula, purifikasi air dan *recovery solvent* dari sistem yang ingin dipisahkan demikian juga dapat digunakan pada pemisahan uap gasoline pada kendaraan bermotor dan purifikasi udara lainnya.

Sifat fisik:

- Luas area permukaan 300 – 1200 m²/gram
- Diameter pori sebesar 10 – 60 Å

Sifat kimia:

- Karbon aktif digunakan berwujud partikel serbuk dan dicampurkan pada suatu liquid yang akan diolah kemudian difiltrasi dan dapat digenerasi ulang.
- Afinitas (daya tarik-menarik) terhadap air rendah maka adsorpsi akan lebih efektif jika dilakukan pada larutan atau gas basah.

2.4.4 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.

2.4.4.1 Struktur Zeolit

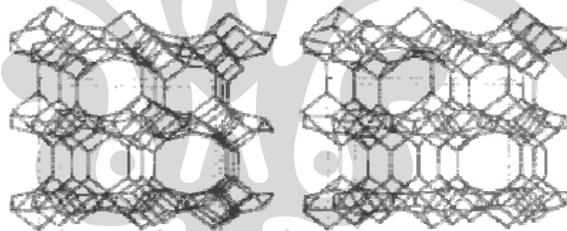
Zeolit adalah hasil dari pengkristalan alumino silicate yang terbentuk kristal yang memiliki pori-pori yang seragam. Zeolit terdiri dari SiO_4 dan AlO_4 tetrahedra, dimana tetrahedra tersusun oleh 4 anion oksigen yang menyebar mengelilingi suatu ion silicon dan ion aluminium. Setiap atom oksigen bermuatan -2, tiap atom silicon bermuatan +4 dan akan membentuk silica 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 zeolite 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 2Å hingga lebih dari 8Å, tergantung dari jenis mineral zeolit yang bersangkutan. Dibawah ini struktur stereotip clinoptilolite.



Gambar 2.3 Struktur Stereotip Clinoptilolite

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.

2.4.4.2 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 pusat-pusat 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 kecil atau sama dengan rongga dapat masuk dan terjebak.

2.4.4.3 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, disamping karena keaktifan, dan selektivitasnya yang lebih baik juga kestabilannya. Kinerja ini terutama ditentukan oleh kemurnian, struktur kristal, dan komposisi kimia dari Zeolit tersebut.

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 molekul dan sebagai katalisator. (Rodiana, Herry, 2007)

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 pada tahun bahwa gas CO dapat diserap dengan sangat efektif menggunakan zeolit yang dimodifikasi dengan CuCl pada suhu 30°C. (Xie, Youchang, 1996).

2.4.4.4 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, et al., 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

2.4.4.5 Zeolit Alam 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, analsim 14% dan modernit 8%. Klinoptilolit memiliki persamaan kimia $(\text{NaK})_6(\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}) \cdot 20\text{H}_2\text{O}$. Rumus molekul zeolit alam Lampung adalah $\text{Na}_{2,94}\text{K}_{1,35}\text{Ca}_{0,63}\text{Mg}_{0,21}\text{Al}_{6,25}\text{Si}_{29,74}\text{O}_{72} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$. Komposisi kimia zeolit alam Lampung dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 2.4. Komposisi Kimia Zeolit Alam Lampung

Senyawa	Persentase
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

Klinoptilolit memiliki atom Al sedikit sehingga kapasitas pertukaran ionnya kecil. Hal ini berarti bahwa sebagian besar ion pusat struktur adalah silika yang bermuatan +4 dan mengikat empat atom oksigen sehingga netral. Adanya ion Al yang bermuatan +3 menjadikan struktur tidak stabil dan menarik kation-kation 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, dsb (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.

2.4.4.6 Metode Aktivasi Zeolit

Proses aktivasi zeolit dilakukan untuk menghasilkan zeolit dengan sifat-sifat yang diinginkan sehingga dapat digunakan sebagai katalis. Terdapat beberapa tahap dalam melakukan aktivasi terhadap zeolit. Adapun tahapan tersebut adalah dealuminasi dan kalsinasi (Scott, Kathleen, Prabir, 2003).

1. Dealuminasi

Metode ini adalah teknik yang digunakan untuk mengurangi kandungan aluminium zeolit. Teknik ini merupakan kalsinasi bentuk amonium zeolit dalam sistem uap air. Proses ini menyebabkan pergeseran tetrahedral aluminium dari posisi rangka ke posisi non rangka tetapi tidak menghilangkan aluminium dari zeolit. Pada proses ini dilakukan pencucian zeolit dengan asam kuat.

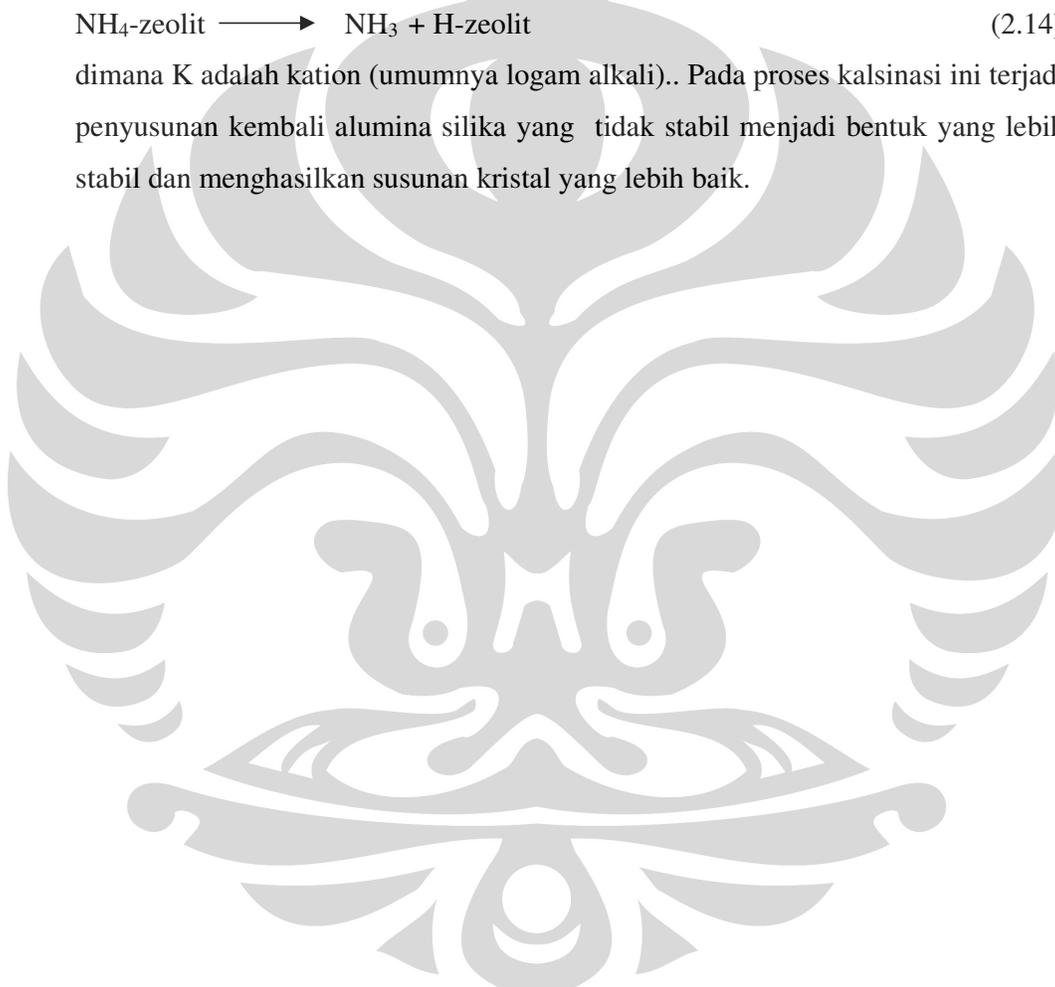
Larutan asam yang umumnya digunakan adalah asam florida dan klorida. Florida maupun klorida adalah zat yang sangat sensitif terhadap zeolit, dimana hal tersebut tergantung pada kondisi perlakuannya seperti konsentrasi, lamanya pencucian, kadar air, dan temperatur pencucian. Alumina dan silika dapat bereaksi dengan florida dan klorida pada kondisi yang tidak terlalu pekat dan lingkungan biasa (temperatur kamar). Dealuminasi zeolit dengan florin akan menghasilkan $\text{AlF}_x(\text{OH})_y$ dan dengan klorin akan menghasilkan $\text{AlCl}_x(\text{OH})_y$.

2. Kalsinasi

Kalsinasi adalah perlakuan panas terhadap zeolit pada temperatur yang relatif tinggi dalam *furnace* yang bertujuan menguapkan air yang terperangkap dalam pori-pori kristal zeolit, selain itu juga untuk menghilangkan zat organik yang dikandung zeolit, juga untuk menguapkan amoniak zeolit sehingga diperoleh H-zeolit. Mekanismenya adalah sebagai berikut:

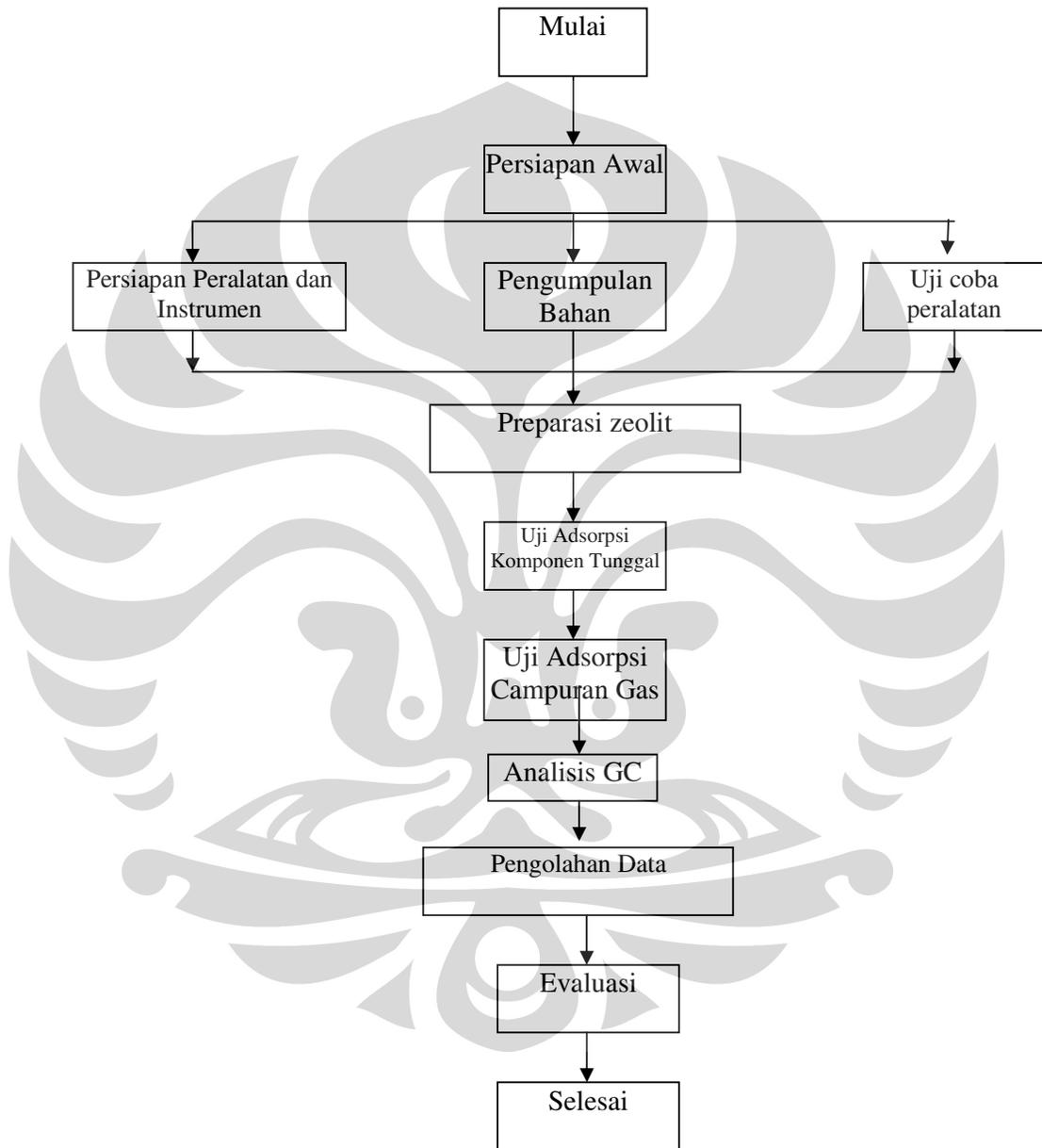


dimana K adalah kation (umumnya logam alkali).. Pada proses kalsinasi ini terjadi penyusunan kembali alumina silika yang tidak stabil menjadi bentuk yang lebih stabil dan menghasilkan susunan kristal yang lebih baik.



BAB 3
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Peralatan Aktivasi zeolit

- Beaker glass 250 mL, 500 mL dan 1000 mL
- Labu erlenmeyer
- Buret dan statip
- Gelas ukur
- Corong
- Spatula
- Pipet tetes
- Timbangan elektronik
- Stop watch
- Cawan porselen
- *Magnetic Stirrer*
- Oven
- *Furnace Controllable*
- Termometer
- Pengaduk kaca
- Wadah plastik

3.2.2 Bahan aktivasi zeolit

- Zeolit Alam Lampung
- Larutan HF 2%
- Larutan HCl 6M
- Air demin
- Aquades

3.2.3 Peralatan Uji Adsorpsi

- *Mixer*
- *Tubular Furnace*
- *Sample Selector*
- Temperatur kontroler
- GC

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Tahap Preparasi Zeolit

Zeolit yang akan digunakan adalah zeolit alam lampung, sebelum digunakan zeolit digerus terlebih dahulu, dicuci dengan air kemudian dikeringkan. setelah itu zeolit alam diaktifkan dengan tahapan sebagai berikut:

- Tahap dealuminasi

Tahapan ini bertujuan untuk mengurangi kadar alumina zeolit dan meningkatkan luas permukaan zeolit serta melarutkan senyawa-senyawa pengganggu yang ada dalam zeolit.

- Tahap kalsinasi

Tahapan ini bertujuan untuk menghilangkan kandungan air yang terperangkap pada pori- pori zeolit dan menguapkan senyawa organik atau gas-gas yang berasal dari sisa asam.

Prosedur preparasi zeolit secara detail adalah sebagai berikut:

1. Persiapan Sampel

- Penyaringan zeolit untuk mendapatkan ukuran zeolit dengan ukuran yang diinginkan.
- Zeolit tersebut dicuci dengan air demin 2-3 kali.
- Kemudian disaring dan dikeringkan dalam oven selama 2 jam pada suhu 110°C.
- Kemudian zeolit tersebut diambil sebanyak 200 gram.

2. Dealuminasi Zeolit

- Zeolit kemudian diaduk dalam larutan HF 2% dengan 100 ml untuk setiap 50 gram zeolit pada kecepatan 450 RPM dan waktu pengadukan 10 menit.
- Sampel dicuci dengan air demin 2-3 kali.
- Zeolit kemudian diaduk dalam HCl 200 ml dengan kecepatan 450 RPM selama 2 jam
- Zeolit dicuci dengan air demin sebanyak 2-3 kali dan dikeringkan.

3. Kalsinasi zeolit

Mengkalsinasi zeolit tersebut dalam furnace pada temperatur 500°C selama 5 jam. Kalsinasi bertujuan untuk menguapkan kandungan air yang terperangkap dalam kristal zeolit.

3.3.2 Tahap Uji Adsorpsi

1. Penentuan variabel operasi

Variabel Tetap

- Jenis zeolit yang digunakan adalah zeolit alam lampung
- Gas yang diujikan adalah gas CO
- Laju alir gas umpan tetap yakni 100 ml/menit

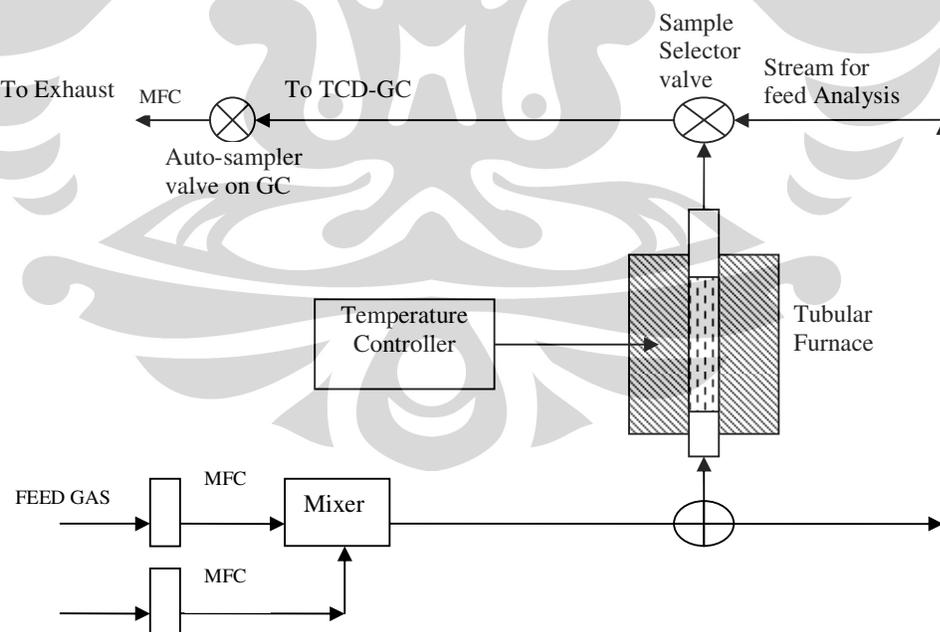
Variabel Bebas

- Komposisi gas umpan CO (1%, 10%, 17%,)
- Ukuran partikel zeolit (50,100, 150 μm)

Variabel Terikat

- Kapasitas adsorpsi zeolit (yang diukur dengan jumlah gas CO (% berat) sebelum memasuki bed/reaktor berisi zeolit dibandingkan setelah melewatinya) dalam waktu dan temperatur tertentu.

2. Skema Peralatan Uji Adsorpsi



Gambar 3.2 Skema Perangkaian Alat

Kapasitas adsorpsi gas CO oleh zeolit ditentukan sebagai fungsi dari waktu. Penelitian adsorpsi dilakukan, di mana gas umpan yang mengandung CO dilewatkan melalui adsorben dan waktu yang dibutuhkan sampai gas umpan terdeteksi di keluaran kolom adsorpsi dicatat. Adsorpsi oleh materi hingga mencapai titik tersebut disebut kapasitas adsorpsi penerobosan. Waktu terobos (menit) dikali dengan laju alir gas umpan (ml/min) dan hasilnya yang ditulis dalam per g adsorben memberikan kapasitas adsorpsi penerobosan (ml/g). Oleh karena itu, materi dengan kapasitas adsorpsi tertinggi akan memiliki waktu terobos yang paling lama.

Uji kinerja adsorpsi zeolit dilakukan menggunakan rangkaian alat pada **Gambar 3.2** di atas. Proses adsorpsi dilakukan secara kontinu selama waktu tertentu dimana konsentrasi gas keluar tidak berubah dari gas masuk. Gas umpan yang diujikan masing-masing adalah CO dengan gas nitrogen sebagai gas pembawa. Konsentrasi feed gas yaitu CO (1%, 10%, 17%), Uji adsorpsi dilakukan dengan memvariasikan komposisi gas umpan, dan ukuran partikel zeolit, jumlah. Proses adsorpsi berlangsung secara kontinyu, hasil adsorpsi sampel tercatat secara on line pada GC.

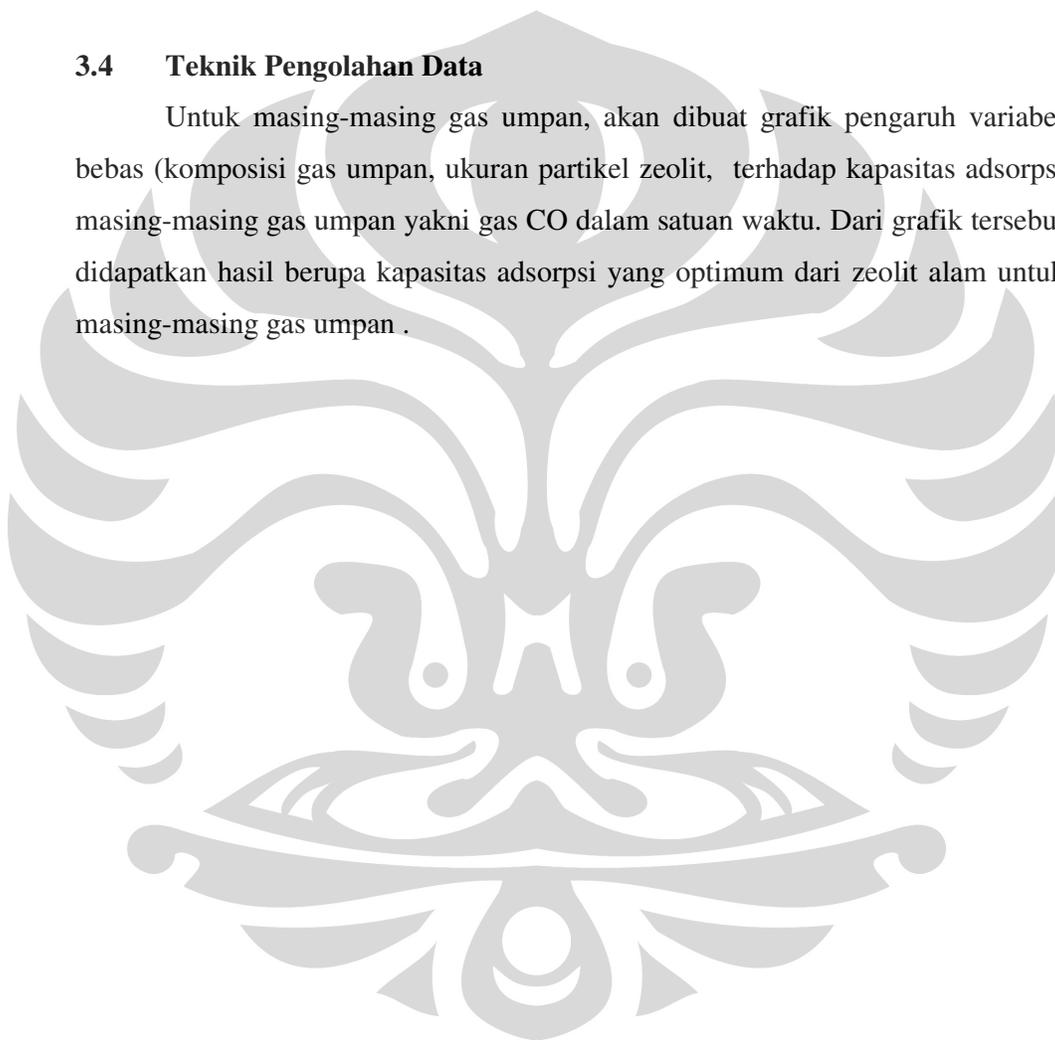
Mula-mula feed gas dan N₂ dilewatkan melalui kontroler laju alir massa (MFC). Mixer disediakan untuk mencampur dua aliran gas. Adsorben diletakkan dalam tabung gelas (diameter = 9 mm dan tinggi = 30 cm) dan dipanaskan dengan menggunakan furnace tubular yang dilengkapi dengan kontroler PID temperatur. Gas umpan dan aliran produk dilewatkan melalui katup sample auto ke kromatografi gas (GC) menggunakan katup selector sample untuk menseleksi aliran yang diinginkan.

Kemudian 1 g materi diisikan ke dalam kolom adsorpsi dan wol keramik dimasukkan di bagian atas dan bawah dari materinya untuk memastikan pengemasan yang baik. Materi tersebut diberi perlakuan awal pada 200°C. Materinya kemudian didinginkan sesuai dengan temperatur adsorpsi yang telah ditentukan sebelumnya. Aliran gas umpan dengan berbagai variasi konsentrasi dalam kesetimbangan, dilewatkan melewati materi dan keluaran dianalisis secara berkelanjutan. Laju alir gas umpan adalah 100 ml/min.

Gas keluaran dianalisis menggunakan detector konduktivitas panas-kromatografi gas (TCD-GC) dengan kolom Porapak-Q dan injektor sample yang dikontrol secara pneumatic. Percobaan dilanjutkan hingga mencapai kejenuhan, yaitu konsentrasi aliran keluar gas umpan sama dengan aliran masuknya. Percobaan ini dilakukan untuk uji masing-masing komponen *feed gas* yaitu gas CO, serta uji campuran gas CO

3.4 Teknik Pengolahan Data

Untuk masing-masing gas umpan, akan dibuat grafik pengaruh variabel bebas (komposisi gas umpan, ukuran partikel zeolit, terhadap kapasitas adsorpsi masing-masing gas umpan yakni gas CO dalam satuan waktu. Dari grafik tersebut didapatkan hasil berupa kapasitas adsorpsi yang optimum dari zeolit alam untuk masing-masing gas umpan .



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan pengujian terhadap zeolit alam lampung yang telah dilakukan treatment untuk mengadsorpsi gas CO. Penelitian ini dilakukan guna mengetahui kinerja zeolit alam lampung dalam mengadsorpsi kandungan gas CO. Hasil percobaan yang akan dibahas meliputi aktivasi zeolit alam karakterisasi material zeolit, uji adsorpsi zeolit, dan uji kinerja zeolit untuk mengadsorpsi gas CO.

4.1 Aktivasi Zeolit Alam

Aktivasi zeolit alam berfungsi untuk mengurangi zat pengotor, mengurangi kandungan air, meningkatkan rasio Si/Al, dan menguatkan struktur zeolit. Berikut adalah hasil pengamatan tahap aktivasi zeolit :

- Dealuminasi dengan larutan HF

Pada tahap ini zeolit direndam dengan larutan HF 2% selama 10 menit sambil diaduk dengan magnetic stirrer sehingga timbul larutan berwarna putih, hal ini mengindikasikan adanya logam yang larut ke dalam larutan.

- Dealuminasi dengan HCl 6M

Pada tahap ini zeolit direndam dengan larutan HCl 6M selama 30 menit dengan temperatur 90°C, Hasil pengamatan terlihat larutan berwarna kuning dan timbul endapan di bawah larutan, larutan berwarna kuning mengindikasikan adanya logam yang larut dalam HCl.

- Kalsinasi

Sebelum kalsinasi dilakukan pre kalsinasi pada temperatur 120°C tujuannya adalah untuk menguapkan air didalam zeolit. Pada pre kalsinasi terjadi pengurangan bobot zeolit sebesar 5,3%. Setelah itu dilakukan kalsinasi pada temperatur 500 °C, dari hasil pengamatan terlihat bahwa warna zeolit berubah dari

putih kusam menjadi putih bersih. Dan dalam tahap ini terjadi pengurangan bobot zeolit sebesar 7,5 % hal ini menandakan adanya senyawa organik yang teruapkan didalam zeolit



Gambar 4.1 tahap dealuminasi dengan larutan HF 2%

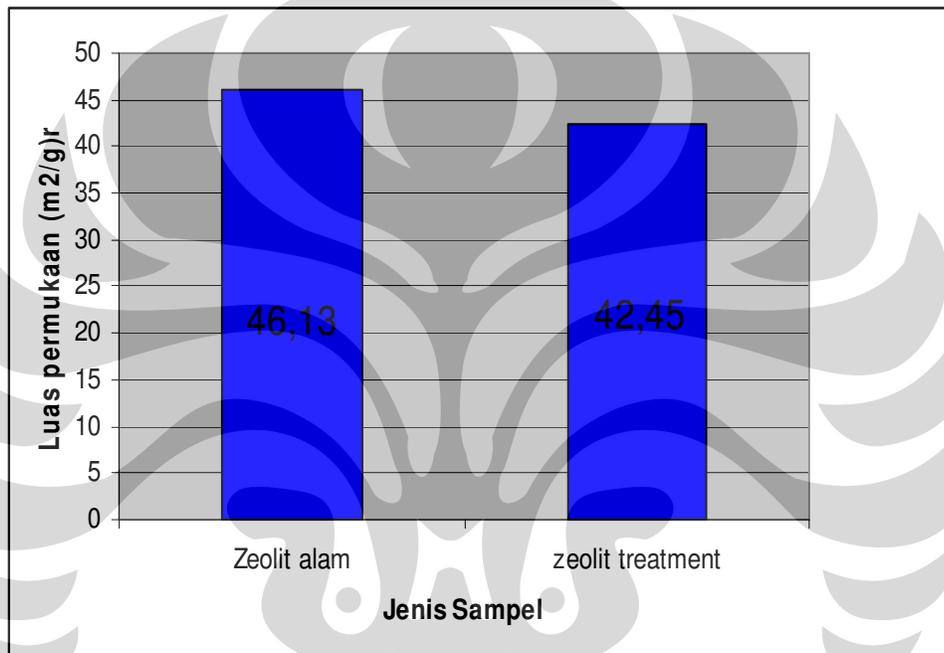


Gambar 4.2 tahap dealuminasi dengan larutan HCl 6M

4.2 Karakterisasi zeolit

A. Karakterisasi luas permukaan

Uji analisis dengan menggunakan BET Autosorb dilakukan untuk mengetahui luas permukaan dari zeolit yang akan digunakan untuk mengadsorpsi gas CO. Hasil dari uji BET Autosorb yang telah dilakukan memberikan data tentang luas permukaan zeolit yang dapat dilihat pada grafik dibawah ini.

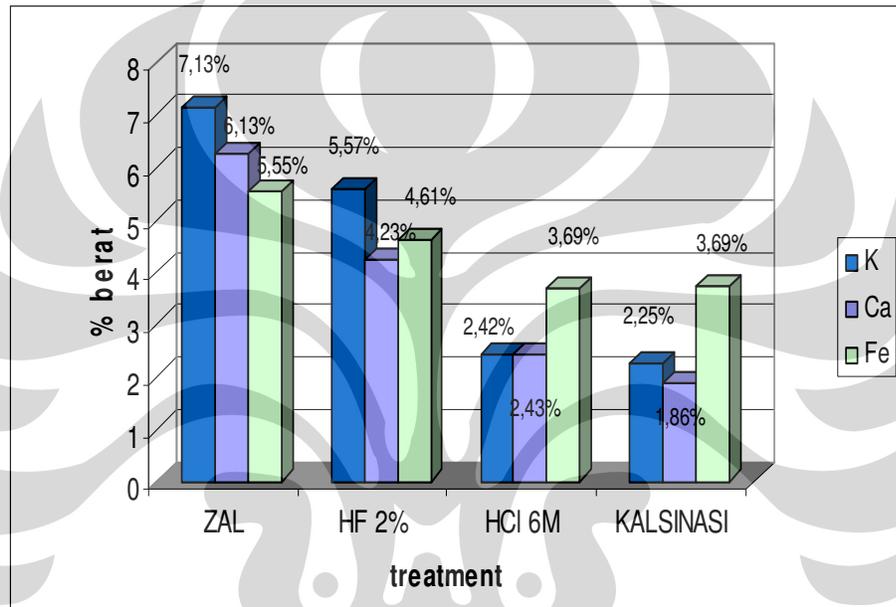


Gambar 4.3. Pengaruh Aktivasi Pada Luas Permukaan Zeolit Alam Lampung

Dari gambar di atas terlihat bahwa zeolit alam memiliki luas permukaan lebih besar dibandingkan dengan zeolit alam yang telah dilakukan aktivasi, hal ini mengindikasikan bahwa proses aktivasi yang dilakukan diperkirakan merusak struktur alumina dan silika dari zeolit yang dapat memperkecil luas permukaannya. Penyebabnya adalah, pada dealuminasi menggunakan asam kuat HF bertujuan untuk menghilangkan alumina dalam zeolit tetapi penggunaan asam kuat ini telah merusak struktur amorf zeolit sehingga mengurangi luas permukaan zeolit. Selain itu suhu kalsinasi yang tinggi (500°C) juga membuat luas permukaan zeolit semakin kecil, karena kalsinasi ditujukan untuk mendapatkan

kristalinitas yang baik. Semakin tinggi suhu kalsinasi, semakin baik kristalnya, semakin besar pula ukurannya dengan kata lain menurunkan luas permukaan efektifnya. Kebalikannya, suhu kalsinasi yang tidak terlampaui tinggi memang masih berpotensi membentuk amorf bukan kristal, tapi ukurannya dimungkinkan lebih kecil. Oleh sebab itu perlu diketahui suhu kalsinasi optimumnya

B. Karakterisasi logam pengotor

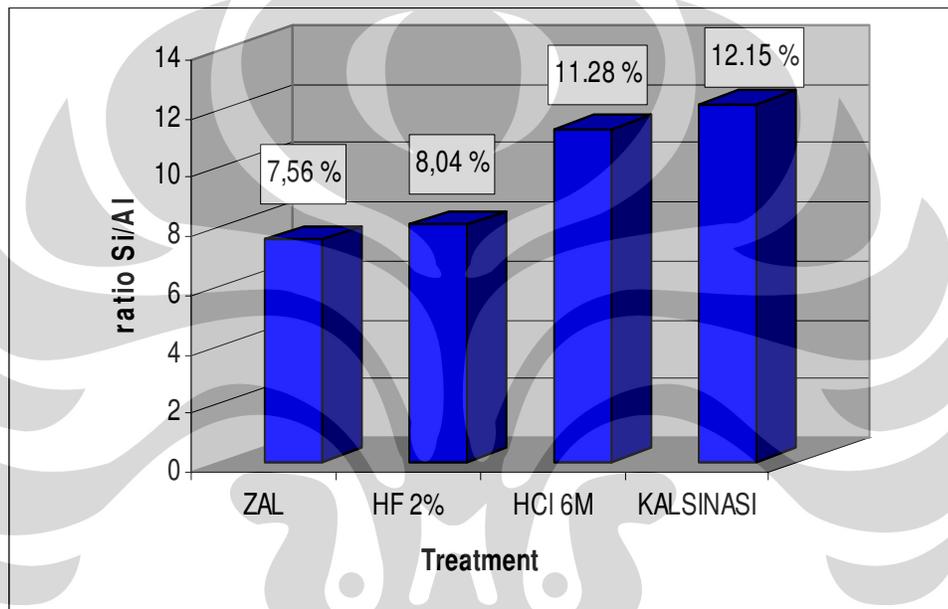


Gambar 4.4. Pengaruh aktivasi terhadap kadar pengotor pada zeolit alam lampung

Hasil karakterisasi XRF menunjukkan bahwa zeolit alam yang belum ditreatment memiliki kadar pengotor yang masih tinggi. Sebagian besar logam pengotor tersebut antara lain logam K, Ca, dan Fe. *Treatment* awal yang telah dilakukan mampu menurunkan kadar zat pengotor. Seperti pada tahap dealuminasi dengan perendaman HF 2% selama 10 menit mampu menurunkan kadar unsur K dari 7,13 % menjadi 5,57%, kadar unsur Ca dari 6,13% menjadi 4,23%, dan unsur Fe dari 5,55% menjadi 4,61%. Sedangkan pada tahap perendaman HCl selama 30 menit pada suhu 90o C mampu menurunkan kadar

unsur K dari 5,57% menjadi 2,42%, unsur Ca dari 4,23% menjadi 2,43% dan unsur Fe dari 4,61 menjadi 3,69%. Sedangkan pada proses kalsinasi pada temperature 500° C tidak memberikan perubahan yang signifikan karena pada proses kalsinasi hanya menguapkan air dan senyawa organik serta menghidrolisis logam aluminium (Setyawan 2001).

C. Karakterisasi rasio Si / Al



Gambar 4.5 Pengaruh aktivasi terhadap kadar Si / Al pada zeolit

Dari hasil karakterisasi XRF dapat diperoleh ratio Si/Al. Ratio Si/Al meningkat setelah dilakukan treatment, pada perendaman dengan menggunakan larutan HF 2% hanya mampu menaikkan rasio Si/AL sebesar 0,48% hal ini mungkin disebabkan waktu pengadukan yang singkat selama 10 menit sehingga sedikit sekali Al yang larut dalam HF. Namun pada perendaman HCl 6M selama 30 menit dapat menaikkan rasio Si/Al dari 7,56% menjadi 11,28%. Hal ini dikarenakan perendaman zeolit dalam larutan HCl yang relatif pekat dan cukup lama mampu melarutkan material pengotor di dalam zeolit, selain itu terjadi proses pelepasan Al dalam kerangka menjadi Al di luar kerangka sehingga rasio Si/Al menjadi meningkat. Dealuminasi zeolit dengan florin akan menghasilkan

$AlF_x(OH)_y$ dan dengan klorin akan menghasilkan $AlCl_x(OH)_y$. Keadaan lain yang menyebabkan rasio Si/Al meningkat adalah adanya uap air pada temperatur kalsinasi dalam zeolit dan akan menghidrolisis atom aluminium dalam kerangka (*Al framework*) Adanya uap air pada temperatur kalsinasi, selain menghidrolisis Al dalam kerangka, juga mengakibatkan labilitas kerangka oksigen. Akibatnya atom Si berpindah ke tempat kosong yang ditinggalkan Al. Sebagai konsekuensinya ukuran unit selnya akan menyusut. Penyusutan tersebut mengakibatkan meningkatnya rasio Si/Al dan mengecilnya ukuran pori

4.3 Uji Adsorpsi Gas CO

Pengujian zeolit dilakukan untuk melihat kemampuan zeolit dalam mengadsorpsi gas CO. Uji adsorpsi zeolit dilakukan pada temperatur $25^{\circ}C$, dengan dosis zeolit seberat 1gr. Dan laju alir yang tetap sebesar 100ml/menit. Materi seberat 1gr diisikan ke dalam kolom adsorpsi dan wol keramik dimasukkan di bagian atas dan bawah dari materinya untuk memastikan pengemasan yang baik. Materi tersebut diberi perlakuan awal pada $200^{\circ}C$. Materinya kemudian didinginkan sesuai dengan temperatur adsorpsi yang telah ditentukan sebelumnya. Aliran gas umpan dengan berbagai variasi konsentrasi dalam kesetimbangan, dilewatkan melewati materi didalam *Atmospheric Fixed Bed Reactor* dan keluaran dianalisis secara berkelanjutan. Laju alir gas umpan adalah 100 ml/min.



Gambar 4.6 *Atmospheric Fixed Bed Reactor*

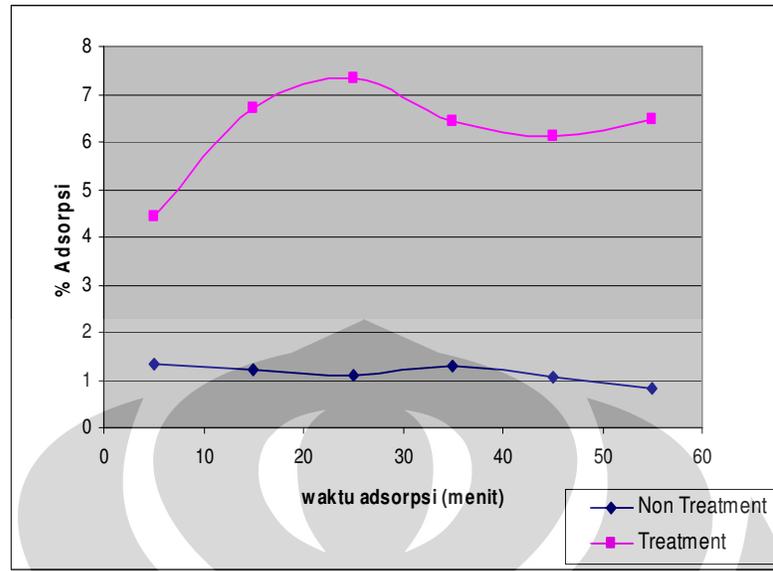
Gas keluaran dianalisis menggunakan detektor konduktivitas panas-kromatografi gas (TCD-GC) dengan kolom karbon aktif dan injektor sample yang dikontrol secara pneumatic. Percobaan dilakukan selama 1jam Percobaan ini dilakukan untuk uji masing-masing komponen *feed gas* yaitu gas CO, serta uji campuran gas CO sehingga didapatkan efesiensi penyerapan gas CO. Efesiensi penyerapan yaitu selisih konsentrasi awal dan akhir gas CO dibandingkan dengan konsentrasi awal gas CO.



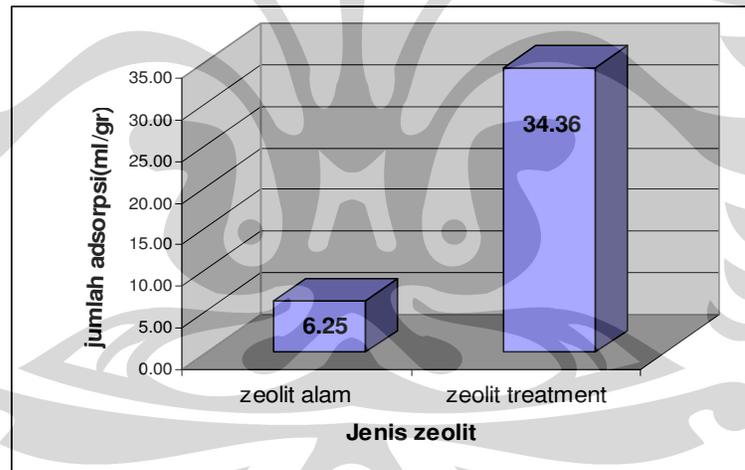
Gambar 4.7 TCD GC

4.3.1 Uji adsorpsi CO oleh zeolit sebelum dan sesudah treatment

Pada uji adsorpsi ini dilakukan untuk membandingkan kemampuan zeolit alam dan zeolit yang sudah dilakukan treatment, untuk mengadsorpsi gas CO. Sehingga dapat diketahui sejauh mana pengaruh treatment pada zeolit untuk mengadsorpsi gas CO. Adapun ukuran partikel zeolit sebelum dan sesudah dilakukan treatment yaitu 50μ dengan laju alir gas CO awal sebesar 10%. Pada uji adsorpsi ini terjadi adsorpsi kimia dimana CO akan terperangkap dalam pori pori zeolit dan berikatan dengan inti aktif zeolit.



Gambar 4.8 Efisiensi adsorpsi CO setelah dan sebelum treatment



Gambar 4.9 Kapasitas penyerapan zeolit pada gas CO selama 55 menit

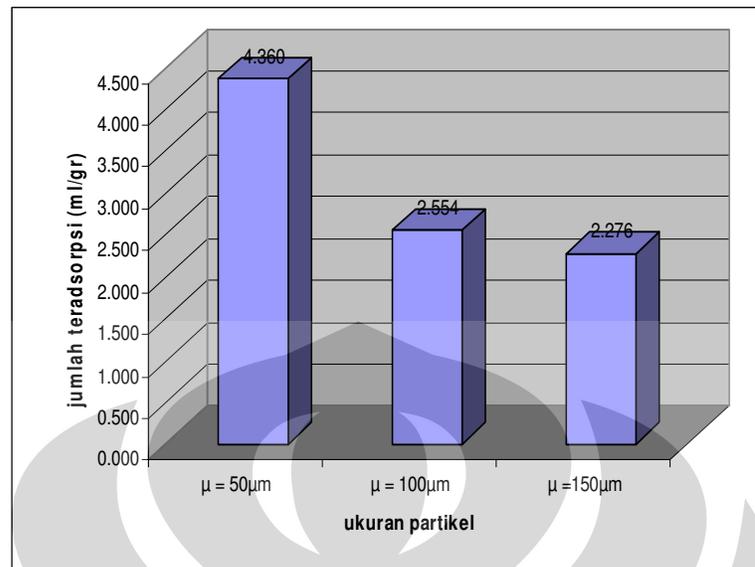
Dari gambar di atas dapat kita lihat bahwa treatment berpengaruh cukup signifikan pada proses adsorpsi gas CO. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan 4.9 dimana pada proses adsorpsi CO oleh zeolit alam sebelum treatment selama 55 menit hanya mampu menyisihkan gas CO rata rata sebesar 1,14%, maka selama 55 menit mampu menyerap 6,25ml gas CO, sedangkan zeolit alam yang telah dilakukan treatment dapat mengadsorpsi gas CO rata rata sebesar 6,25%.

Maka selama 55 menit mampu menyerap sebanyak 34,36 ml gas CO. Zeolit yang telah dilakukan treatment memiliki daya adsorpsi yang lebih baik dibandingkan yang belum dilakukan treatment. Hal ini dikarenakan pada zeolit yang telah di treatment terjadi pelepasan zat zat pengotor di dalam pori pori zeolit sehingga pori pori yang semula berisi zat pengotor dapat mengadsorpsi gas CO. Proses dealuminasi berupa perendaman zeolit dalam larutan HF 2% dan HCl yang relatif pekat dapat melarutkan logam logam pengotor pada zeolit, selain itu juga menyebabkan terlepasnya aluminium dalam kerangka menjadi aluminium di luar kerangka sehingga rasio Si/Al meningkat.

Makin rendahnya rasio Si/Al dalam kerangka zeolit (makin banyak aluminium) maka dalam zeolit tersebut timbul gradien medan elektrostatis yang makin besar sehingga molekul-molekul polar akan berinteraksi lebih kuat dengan medan elektronik itu daripada molekul-molekul non polar . Bila rasio Si/Al meningkat maka kerapatan kation dan kekuatan medan elektrostatis menurun dan afinitas dari permukaan zeolit bagi adsorbat non polar meningkat sehingga zeolit cenderung memilih molekul-molekul non-polar untuk diadsorpsi

4.3.2 Pengaruh ukuran partikel dengan laju alir gas CO sebesar 1%

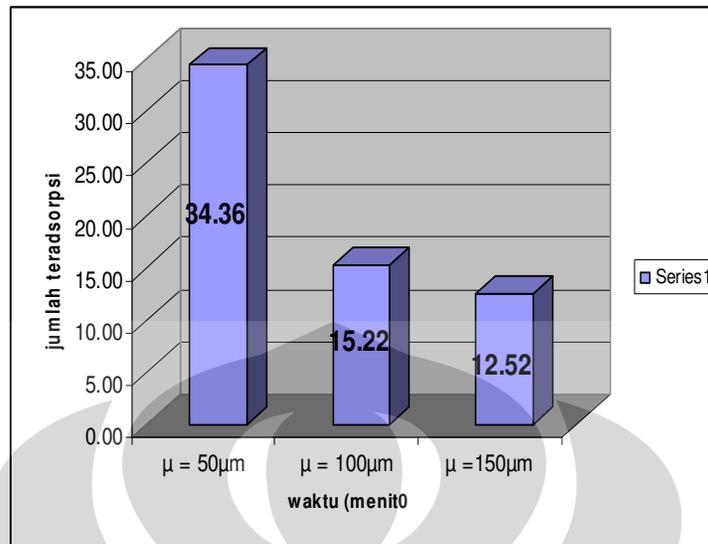
Pada percobaan ini laju alir gas CO adalah 1% dengan total aliran 100ml/menit. Terlihat dalam gambar 4.10 dibawah ini menunjukkan pengaruh ukuran partikel terhadap penyerapan gas CO. Zeolit dengan ukuran 50 μ m mempunyai kemampuan menyerap gas CO relatif lebih banyak dibandingkan dengan zeolit ukuran 100 μ m dan 150 μ m. Dan dalam gambar 4.10 menunjukkan penyerapan zeolit pada gas CO selama 55 menit, laju penyerapan rata-rata untuk zeolit 50 μ m adalah 7,93% maka selama 55 menit mampu menyerap 4,36 ml CO



Gambar 4.10 kapasitas penyerapan zeolit pada gas CO selama 55 menit ((konsentrasi CO 1%)

4.3.3 Pengaruh ukuran partikel dengan laju alir gas CO sebesar 10%

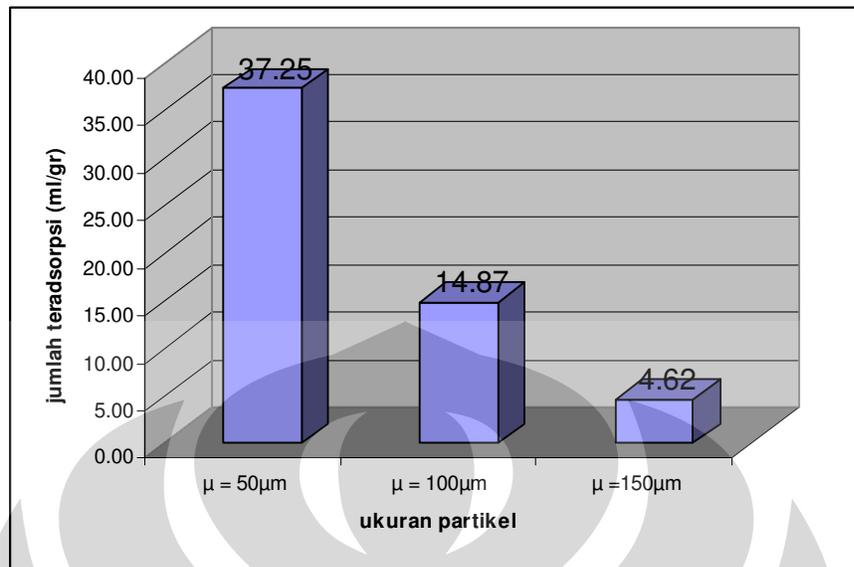
Pada percobaan ini laju alir gas CO adalah 10% dengan laju alir total 100 ml/menit. Terlihat pada gambar 4.11 dibawah ini menunjukkan pengaruh ukuran partikel terhadap penyerapan gas CO dengan laju alir 10 ml/menit dan kapasitas penyerapan zeolit terhadap gas CO. Zeolit dengan ukuran 50μm mempunyai kemampuan menyerap gas CO relatif lebih banyak dibandingkan dengan zeolit ukuran 100 μm dan 150 μm. Fenomena yang terjadi hampir sama dengan menggunakan laju alir 1% CO. Dimana zeolit ukuran 50μm mempunyai kemampuan menyerap CO lebih banyak dibandingkan ukuran partikel yang lainnya. Daya serap total selama 55 menit prose penyerapan gas CO masing-masing zeolit 50μm, 100 μm dan 150 μm adalah 34,36ml, 15,22ml, dan 12,52ml



Gambar 4.11 kapasitas penyerapan zeolit pada gas CO selama 55 menit (konsentrasi CO 10%)

4.3.4 Pengaruh ukuran partikel dengan laju alir gas CO sebesar 17%

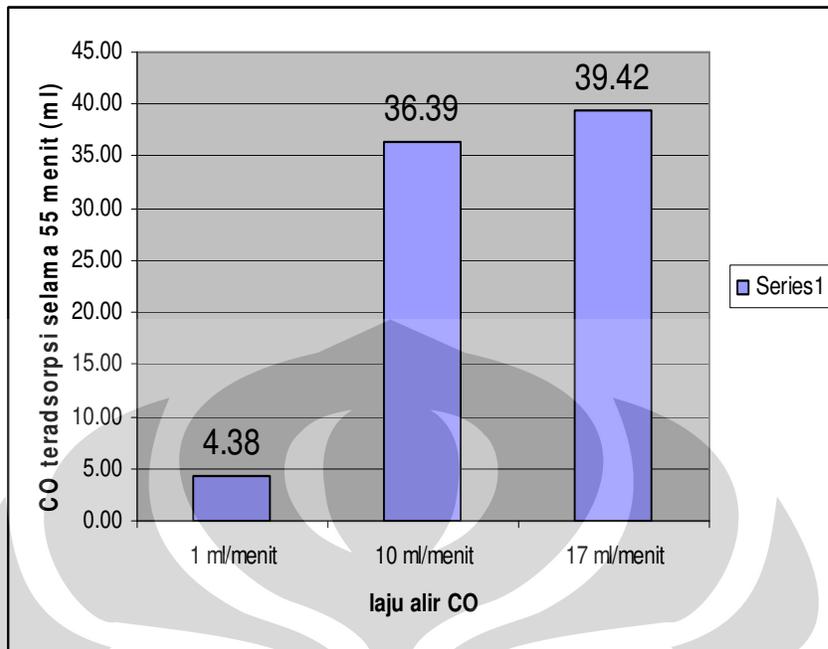
Pada percobaan ini laju alir gas Co adalah 17%, dengan total laju alir 100 ml/menit. Terlihat pada gambar 4.12 di bawah ini menunjukkan pengaruh ukuran partikel terhadap gas CO dengan laju alir 17ml/menit dan kapasitas penyerapan zeolit. Zeolit dengan ukuran 50μm mempunyai kemampuan menyerap gas CO relatif lebih banyak dibandingkan dengan zeolit ukuran 100 μm dan 150 μm. Fenomena yang terjadi hampir sama dengan menggunakan laju alir 1% CO dan 10% CO, yang menunjukkan zeolit ukuran 50μm mempunyai kemampuan menyerap CO lebih banyak dibandingkan ukuran partikel yang lainnya. Daya serap total selama 55 menit prose penyerapan gas CO masing-masing zeolit 50μm, 100 μm dan 150 μm adalah 34,36ml, 15,22ml, dan 12,52ml atau setara dengan $1,4 \cdot 10^{-3}$ mol, $0,62 \cdot 10^{-3}$ mol, dan $0,51 \cdot 10^{-3}$ mol Hal ini dikarenakan ukuran partikel yang lebih kecil memiliki luas kontak yang lebih besar, sehingga dapat mengadsorpsi CO lebih banyak dibandingkan dengan ukuran partikel yang lebih besar. Karena laju adsorpsi sebanding dengan luas kontak adsorben semakin besar luas kontak adsorben maka laju adsorpsi juga akan semakin besar.



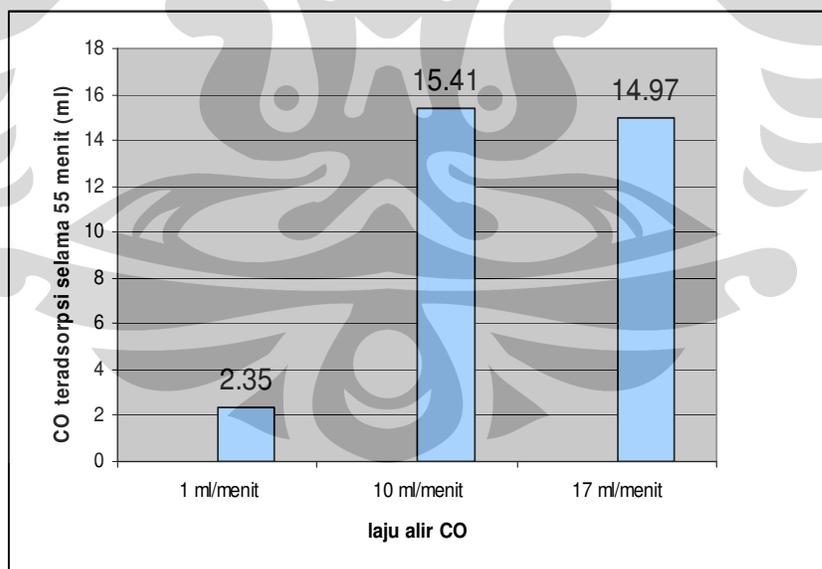
Gambar 4.12 kapasitas penyerapan zeolit pada gas CO selama 55 menit
(konsentrasi CO 17%)

4.3.4 Pengaruh laju alir

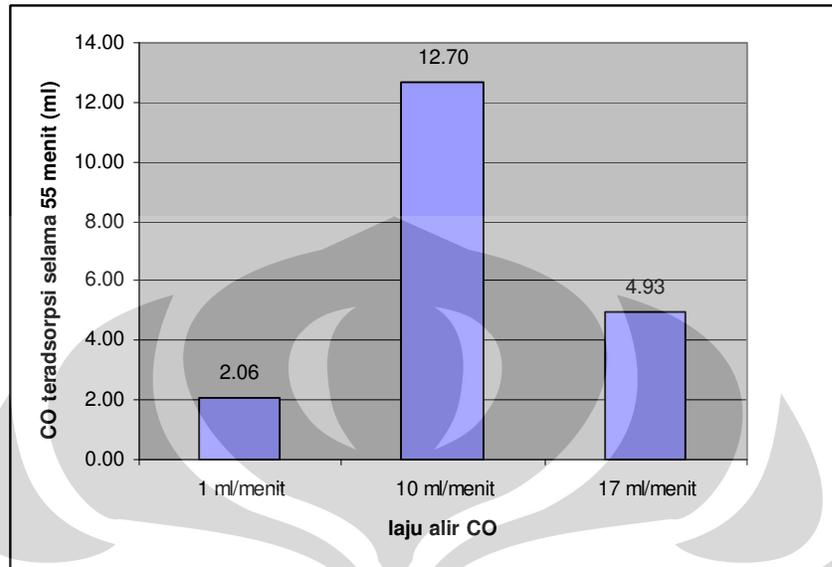
Pada pembahasan berikut ini adalah untuk melihat pengaruh laju alir (komposisi) terhadap daya serap zeolit pada gas CO. Pada gambar 4.13, 4.14, dan 4.15 di bawah ini menunjukkan bahwa ukuran partikel 50μ memiliki daya serap lebih tinggi untuk laju alir manapun. Semakin meningkatnya laju alir semakin meningkat juga umpan yang masuk, maka akan meningkatkan kapasitas penyerapan zeolit, karena dengan semakin besarnya laju alir memperbanyak kontak gas CO dengan partikel zeolit sehingga kapasitas gas CO yang teradsorpsi lebih besar



Gambar 4.13 kapasitas penyerapan zeolit pada gas CO selama 55 menit
(ukuran partikel 50 μ m)



Gambar 4.14 kapasitas penyerapan zeolit pada gas CO selama 55 menit
(ukuran partikel 100 μ m)



Gambar 4.15 kapasitas penyerapan zeolit pada gas CO selama 55 menit
(ukuran partikel 150 μ m)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

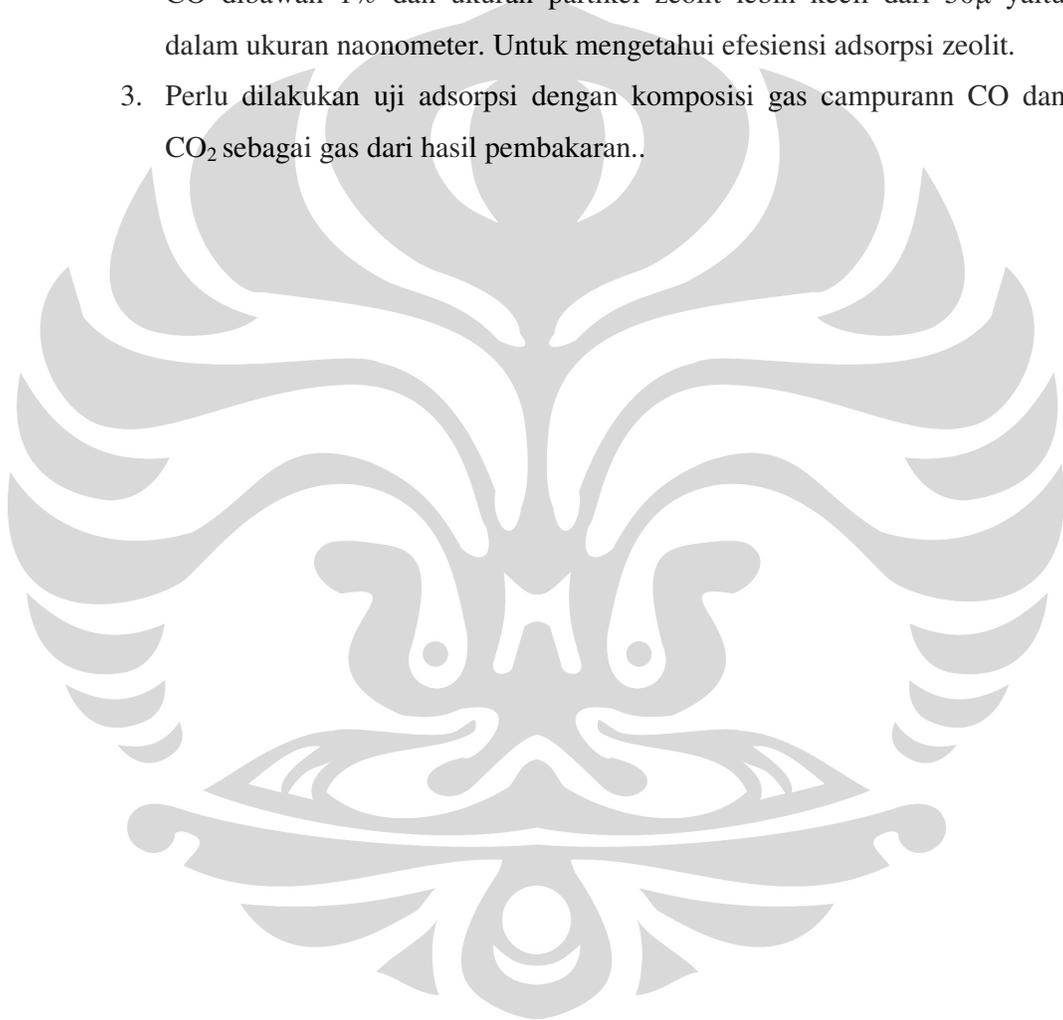
Kesimpulan yang bisa diambil dari penelitian ini adalah :

1. Hasil karakterisasi dengan menggunakan BET yaitu Zeolit alam sebesar 46,13 m²/gr. Zeolit setelah dilakukan treatment sebesar 46,25 m²/gr.
2. Aktivasi zeolit alam dapat meningkatkan rasio Si / Al, dari 7,56 menjadi 12,15.
3. Aktivasi zeolit mampu meningkatkan efisiensi adsorpsi dalam mengadsorpsi gas CO dari 1,14% menjadi 6,25%. pada konsentrasi awal CO 10% dan ukuran partikel 50 μ
4. Ukuran partikel mempunyai pengaruh terhadap daya serap zeolit pada gas CO, ukuran partikel 50 μ m mempunyai daya serap lebih banyak dibandingkan partikel zeolit untuk ukuran 100 μ m dan 150 μ m
5. Laju alir gas CO mempunyai pengaruh yang signifikan pada daya serap zeolit terhadap gas CO, semakin kecil laju alir presentase penyerapan meningkat. Tetapi jumlah gas CO yang paling banyak terserap diperoleh pada laju alir 17% dengan ukuran partikel 50 μ m
6. Pada uji adsorpsi gas CO diperoleh nilai efisiensi tertinggi pada ukuran partikel zeolit 50 μ m dengan efisiensi adsorpsi sebesar 9,73 %.

5.2 SARAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, hal yang dapat disarankan untuk memperoleh hasil yang lebih baik yaitu

1. Perlu dilakukan penambahan metode dalam perlakuan awal dari zeolit pada proses adsorpsi untuk meningkatkan efisiensi penyerapan gas CO.
2. Perlu dilakukan pengujian adsorpsi gas CO dengan konsentrasi awal gas CO dibawah 1% dan ukuran partikel zeolit lebih kecil dari 50 μ yaitu dalam ukuran nanometer. Untuk mengetahui efisiensi adsorpsi zeolit.
3. Perlu dilakukan uji adsorpsi dengan komposisi gas campuran CO dan CO₂ sebagai gas dari hasil pembakaran..



DAFTAR PUSTAKA

- Bird, Tony. (1987). *Kimia Fisika untuk Universitas*. Jakarta: Gramedia.
- Dennis, Jerry (1997) *Eliminasi Sox dengan CuO / Zeolit Alam: Preparasi CuO / Zeolit alam dengan metode Presipitasi dan karakterisasinya*. . Skripsi Departemen Teknik Gas dan petrokimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia
- Hull T. Richard and Keith T. Paul (2007). "Bench-scale assesment of combustion toxicity- Acritical analysis of current protocols", Elsevier
- Jadhav, P.D., S.S Rayalu, S. Devota. (2007). "CO₂ emission and its mitigation by adsorption on zeolites and activated carbon," *Current Science*, Vol 92, No. 6.
- Jauhari, Ahmad. *Carbon Dioksida Bersifat Racun Merabolis*. <http://enviroreview.blogspot.com/>. 7 September (2008).
- Las, DR Thamzil. *Potensi Zeolit untuk Mengolah Industri dan Radioaktif*. www.batan.go.id. 28 September 2008. (diakses tanggal 23 Februari 2009)
- Maron and Lando. (1983). *Fundamental of Physical Chemistry*. New York: Macmillan Publishing.
- Riberio, et al. (1984). *Zeolit Crystalization From High Silica mono or Bicationic Alkali Gels In Presence Inbesence*
- Rodiana, Herry. (2007). *Potensi dan Pemanfaatan zeolit di Propinsi Jawa Barat dan Banten*. Jawa Barat
- Scott, Kathleen, Prabir (2003). *HandBook Zeolit Science And Tecnology*
- Suharti, Ade. (1995). *Penggunaan Asam Florida pada Aktivasi Zeolit Klinoptilolit Untuk Besaran Luas Permukaan, Distribusi Pori, dan Struktur Kristal*. Tugas Akhir Teknik Gas dan Petrokimia FTUI Depok.
- Sutrisno. "Perbedaan Karbon Dioksida dan Karbon Monoksida". www.chem-is-try.org. 10 Mei 2009. (diakses tanggal 24 september 2009)

- Wang, Wei, Zhang He Ping dan Wan Yu Tian. (2007). *“Experimental Study on CO₂/CO of Typical Lining Materials in Full-Scale Fire Test”*. Chinese Science Bulletin, Springer-Verlag.
- Wiradini, Gitandra, dkk. (2007). *Pembuatan Adsorben dari Zeolit Alam dengan Karakteristik Adsorption Properties untuk Kemurnian Bioetanol*. Teknik Industri ITB, Bandung.
- Xie, Youchang, Jiaping Zhang, Jianguo Qiu, dan Ge Yang. (1996). *“Zeolites Modified by CuCl for Separating CO from Gas Mixtures Containing CO₂”*. Netherland: Kluwer Academic Publisher.
- Xu, Yang, Jian Hua Zhu, Li Li Ma, An Ji, Yi Lun Wei, dan Xi Yong Shang. (2003). *“Removing Nitrosamines from Mainstream Smoke of cigarettes by Zeolites”*. Elsevier Science Inc.
- Yadav R, R.G. Maghirang, L.E., Erickson, B. Kakumanu, S.G., Castro, (2007). *“Laboratory Evaluation of the Effectiveness of Nanostructured and Conventional particles in Clearing Smoke in Enclosed Space”*, Elsevier.
- Ying H.Z, Liu Q.F, Li Y.G, Li Wang L., Xiong X.C, (2008). *“Selection of Adsorbent for in_situ Coupling Technology and Adsorptive Desulfurization and bidesulfurization”*, Science in China Press.
- Anonim. *Karbon Dioksida*. <http://www.wikipedia.org>. 26 Januari 2009. (diakses tanggal 27 Februari 2009)
- Anonim. *Karbon Monoksida*. <http://www.wikipedia.org>. 2 Februari 2009 (diakses tanggal 27 Februari 2009)
- Anonim. *Karbon Dioksida*. www.anekagas.com. 2008. (diakses tanggal 15 Maret 2009)
- Anonim. *Zeolit*. www.tasikmalayakab.go.id. 21 Juli 2008. (diakses tanggal 29 Juni 2009)
- Anonim. *Pembentukan Zeolit*. www.tekmira.esdm.go.id. 2008. (diakses tanggal 29 juni 2009)

LAMPIRAN

Adsorpsi gas CO tanpa treatment

t menit	Konsentrasi CO		
	50 μ	100 μ	150 μ
0	10.1225	10.1089	10.0934
5	9.9875	10.0257	10.0811
15	9.9979	9.8425	9.9919
25	10.0109	10.0875	10.0633
35	9.9904	10.0539	10.0433
45	10.0165	10.0524	10.048
55	10.0411	10.0877	10.0395

t menit	persen adsorpsi CO		
	50 μ	100 μ	150 μ
0	0	0	0
5	1.33366	0.82304	0.12186
15	1.23092	2.63530	1.00561
25	1.10249	0.21169	0.29821
35	1.30501	0.54408	0.49636
45	1.04717	0.55891	0.44980
55	0.80415	0.20972	0.53401

Kondisi: P = 1 atm
T = 25oC
Laju alir = 100ml / menit

Adsorpsi gas CO pada konsentrasi awal 1%

t	konsentrasi CO (%)		
	$\mu = 50\mu$	$\mu = 100\mu$	$\mu = 150\mu$
0	1.0042	1.0864	1.0506
15	0.9963	1.082	1.0437
25	0.8883	1.02	1.0019
35	0.9274	1.0427	1.0017
45	0.9505	1.0741	1.0014
55	0.8852	1.0612	1.0013
65	0.8999	1.0218	0.9901
75	0.8564	1.0185	1.0374
85	0.8712	1.0393	1.0203
95	0.8614	1.0327	1.0143

t	persen adsorpsi CO (%)		
	$\mu = 50\mu$	$\mu = 100\mu$	$\mu = 150\mu$
0	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.7867	0.4050	0.6568
15	11.5415	6.1119	4.6354
25	7.6479	4.0225	4.6545
35	5.3475	1.1322	4.6830
45	11.8502	2.3196	4.6926
55	10.3864	5.9462	5.7586
65	14.7182	6.2500	1.2564
75	13.2444	4.3354	2.8841
85	14.2203	4.9429	3.4552
95	12.6568	7.1981	3.1791

Kondisi: P = 1 atm
 T = 25oC
 Laju alir = 100ml / menit

Adsorpsi gas CO pada konsentrasi awal 10%

t menit	Konsentrasi CO		
	50 μ	100 μ	150 μ
0	10.5902	10.1191	10.1444
5	10.1210	9.9242	9.9959
15	9.8806	9.9454	9.9843
25	9.8129	9.8313	9.9202
35	9.9079	9.8519	9.8745
45	9.9423	9.7406	9.805
55	9.9068	9.7406	9.9015
65	9.8422	9.8271	9.9033
75	9.8883	9.7504	9.8757
85	9.9780	9.8633	9.8999
95	10.0016	9.8648	9.8656

t menit	persen penurunan CO		
	50 μ	100 μ	150 μ
0	0	0	0
5	4.431	1.926	1.464
15	6.701	1.717	1.578
25	7.340	2.844	2.210
35	6.443	2.641	2.661
45	6.118	3.740	3.346
55	6.453	3.740	2.394
65	7.063	2.886	2.377
75	6.628	3.644	2.649
85	5.781	2.528	2.410
95	5.558	2.513	2.748

Kondisi: P = 1 atm
 T = 25oC
 Laju alir = 100ml / menit

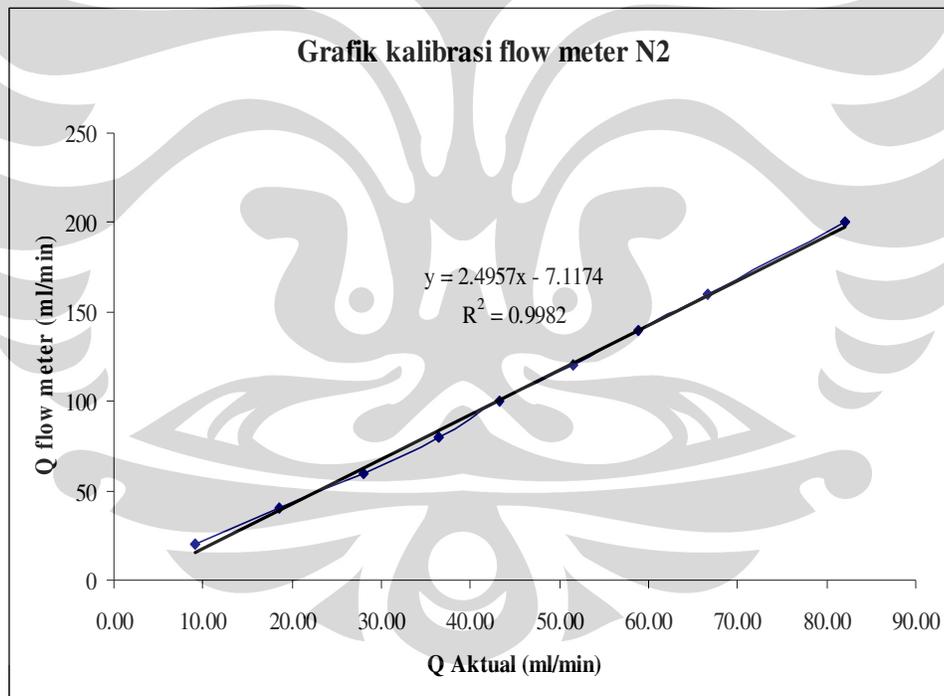
Adsorpsi gas CO pada konsentrasi awal 17%

t	konsentrasi CO (%)		
	$\mu = 50\mu$	$\mu = 100\mu$	$\mu = 150\mu$
0	17.99	16.3654	16.574
5	17.7566	16.0334	16.4462
15	17.4114	16.084	16.5036
25	17.2632	16.1119	16.4963
35	17.2304	16.1116	16.4843
45	17.2276	16.1095	16.4843
55	17.2339	16.1084	16.4916
65	17.2811	16.2241	16.5032
75	17.5413	16.2716	16.5234

t	Persen penurunan CO (%)		
	$\mu = 50\mu$	$\mu = 100\mu$	$\mu = 150\mu$
0	0	0	0
5	1.2974	2.0287	0.7711
15	3.2162	1.7195	0.4248
25	4.0400	1.5490	0.4688
35	4.2223	1.5508	0.5412
45	4.2379	1.5637	0.5412
55	4.2029	1.5704	0.4972
65	3.9405	0.8634	0.4272
75	2.4942	0.5732	0.3053

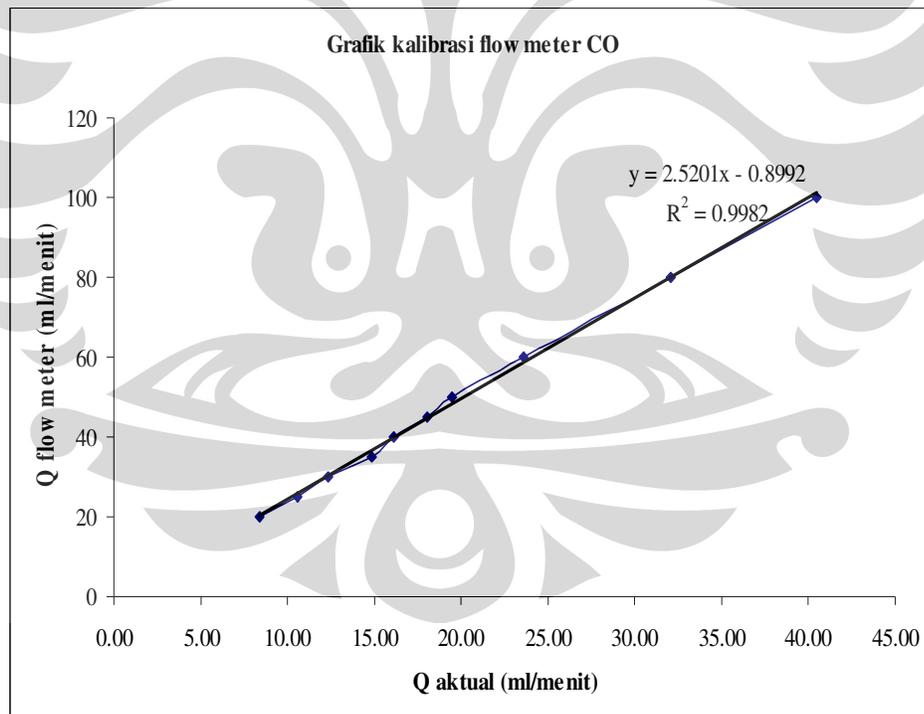
Kalibrasi flow meter N₂

volume	t1	t2	t3	t rata-rata	Q real (ml/menit)	Q Flow meter (ml/menit)
5	32.39	33.15	33.07	32.87	9.13	20
5	15.92	16.23	16.36	16.17	18.55	40
10	21.57	21.39	21.43	21.46	27.95	60
10	16.59	16.41	16.36	16.45	36.47	80
10	13.8	14.01	13.86	13.89	43.20	100
10	11.65	11.58	11.73	11.65	51.49	120
15	15.41	15.29	15.21	15.30	58.81	140
15	13.57	13.44	13.52	13.51	66.62	160
15	10.94	10.96	10.99	10.96	82.09	200



Kalibrasi flow meter N₂

volume	t1	t2	t3	t rata-rata	Q real (ml/menit)	Q Flow meter (ml/menit)
5	35.46	36.09	35.77	35.77	8.39	20
5	28.43	28.51	27.95	28.30	10.60	25
5	24.3	24.01	24.49	24.27	12.36	30
5	20.15	20.18	20.27	20.20	14.85	35
5	18.5	18.31	18.9	18.57	16.16	40
5	16.83	16.51	16.46	16.60	18.07	45
5	15.54	15.41	15.31	15.42	19.46	50
5	12.68	12.82	12.71	12.74	23.55	60
5	9.35	9.33	9.38	9.35	32.07	80
10	14.94	14.87	14.63	14.81	40.50	100



KOMPOSISI ZEOLIT ALAM

	chem formula	weight(%)	mole(%)
1	Al	9.2428	10.393
2	Si	69.8951	75.5038
3	K	7.1359	5.5369
4	Ca	6.2663	4.7435
5	Ti	0.6695	0.424
6	Fe	5.547	3.0135
7	Ni	0.5488	0.2836
8	Pb	0.6947	0.1017

	chem formula	weight(%)	mole(%)
1	Al ₂ O ₃	10.8787	6.9242
2	SiO ₂	79.1623	85.5043
3	K ₂ O	3.3049	2.2768
4	CaO	3.1903	3.692
5	TiO ₂	0.3865	0.3139
6	Fe ₂ O ₃	2.6244	1.0665
7	NiO	0.2179	0.1893
8	Pb ₂ O ₃	0.2351	0.033

KOMPOSISI ZEOLIT SETELAH PERENDAMAN HF 2%

	chem formula	weight(%)	mole(%)
1	Al ₂ O ₃	10.8724	6.8641
2	SiO ₂	82.1814	88.0455
3	K ₂ O	2.4265	1.6581
4	CaO	2.0426	2.3446
5	TiO ₂	0.1608	0.1296
6	MnO ₂	0.0646	0.0478
7	Fe ₂ O ₃	2.0889	0.842
8	BaO	0.1628	0.0684

	chem formula	weight(%)	mole(%)
1	Al	9.37	10.2973
2	Si	75.3469	79.5487
3	K	5.5744	4.2273
4	Ca	4.2307	3.13
5	Ti	0.2909	0.1801
6	Mn	0.1275	0.0688
7	Fe	4.6197	2.4528
8	Ba	0.4399	0.095

KOMPOSISI ZEOLIT SETELAH PERENDAMAN HCl 6M

	chem formula	weight(%)	mole(%)
1	Al ₂ O ₃	8.4417	5.2247
2	SiO ₂	87.6906	92.1
3	K ₂ O	0.9649	0.6464
4	CaO	1.0989	1.2366
5	TiO ₂	0.1949	0.1539
6	Fe ₂ O ₃	1.5871	0.6272
7	ZrO ₂	0.0219	0.0112

	chem formula	weight(%)	mole(%)
1	Al	7.4116	7.9644
2	Si	83.6216	86.3254
3	K	2.4184	1.7933
4	Ca	2.4329	1.7593
5	Ti	0.7337	0.2256
6	Fe	3.6856	1.9135
7	Zr	0.0585	0.0186

KOMPOSISI ZEOLIT SETELAH KALSINASI

	chem formula	weight(%)	mole(%)
1	Al ₂ O ₃	7.9215	4.891
2	SiO ₂	88.5732	92.8038
3	K ₂ O	0.89	0.5947
4	CaO	0.832	0.934
5	TiO ₂	0.1865	0.1469
6	Fe ₂ O ₃	1.5969	0.6295

	chem formula	weight(%)	mole(%)
1	Al	6.978	7.4809
2	Si	84.8247	87.3638
3	K	2.2548	1.668
4	Ca	1.8577	1.3407
5	Ti	0.3583	0.2163
6	Fe	3.7267	1.9303