



UNIVERSITAS INDONESIA

**UJI KAPASITAS ADSORPSI GAS KARBON MONOKSIDA
(CO) MENGGUNAKAN OKSIDA LOGAM DAN KARBON
AKTIF**

SKRIPSI

**DEBIE ARI KESNAWATY
0606076242**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**UJI KAPASITAS ADSORPSI GAS KARBON MONOKSIDA
(CO) MENGGUNAKAN OKSIDA LOGAM DAN KARBON
AKTIF**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
sarjana**

DEBIE ARI KESNAWATY

0606076242

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Debie Ari Kesnawaty
NPM : 0606076242
Tanda Tangan :
Tanggal :24 Juni 2010



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Debie Ari Kesnawaty
NPM : 0606076242
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Uji Kapasitas Adsorpsi Gas Karbon monoksida
(CO) Menggunakan Oksida Logam dan Karbon
Aktif

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 1 : Ir. Sutrasno Kartohardjono, MSc., PhD. (.....)
Penguji 2 : Ir. Eva F Karamah, MT. (.....)

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 24 Juni 2010

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah Subhana wa Ta'ala, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulis skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, tidak mudah menyelesaikannya. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ir. Yuliusman, M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
2. Prof. Dr. Ir. Widodo W.P., DEA selaku ketua Departemen Teknik Kimia FTUI;
3. Ibunda tercinta yang telah memberikan dukungan moril maupun materil;
4. Sahabat-sahabat Teknik tercinta, Siti rahma, Sefni yenti, Adi Hersuni, Farhanah, Witta Kartika, Siti Fauziah, Rahmawati, Dewi Anggraini, dll yang telah memberikan dukungan yang sangat berarti.
5. Kang Jajat dan Mang Ijal selaku teknisi laboratorium yang telah membantu saya secara teknis,

Akhir kata, saya berharap semoga semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan kedepannya.

Depok, Juni 2010

Penulis

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

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

Nama : Debie Ari Kesnawaty
NPM : 0606076242
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:

“Uji Kapasitas Adsorpsi Gas Karbon Monoksida (CO) Menggunakan Oksida Logam dan Karbon Aktif”

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 tanpa meminta izin dari 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 : 24 Juni 2010

Yang menyatakan :

(Debie Ari Kesnawaty)

ABSTRAK

Nama : Debie Ari Kesnawaty
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Uji Kapasitas Adsorpsi Gas Karbon Monoksida (CO)
Menggunakan Oksida Logam dan Karbon Aktif

Kasus kebakaran sebagai penghasil gas karbon monoksida (CO) yang tinggi masih menjadi salah satu permasalahan yang harus diselesaikan, mengingat seringkali terjadi peristiwa kebakaran. Jika terjadi kebakaran, potensi kematian akibat keracunan gas CO akan semakin meningkat. Oleh karena itu, diperlukan suatu usaha untuk mengurangi kadar CO, salah satunya adalah dengan metode adsorpsi menggunakan oksida logam berupa TiO_2 , MgO , CuO , zeolit alam, zeolit sintesis, dan karbon aktif. Konsentrasi gas CO yang dapat terserap oleh berbagai adsorben dianalisis menggunakan *Gas Chromatography*. Dari hasil penelitian diketahui bahwa tiga adsorben dengan kapasitas adsorpsi terbesar yakni karbon aktif: $115,623 \text{ ml/g} = 4,702 \text{ mmol/g}$; TiO_2 : $94,709 \text{ ml/g} = 3,847 \text{ mmol/g}$; MgO : $80,116 \text{ ml/g} = 3,252 \text{ mmol/g}$.

Kata Kunci:

Adsorpsi, gas, karbon monoksida, adsorben, oksida logam, karbon aktif.

ABSTRACT

Name : Debie Ari Kesnawaty
Major : Chemical Engineering
Title : Capacity Testing from Adsorption of Gas Carbon Monoxide (CO)
Using Metal Oxide and Activated Carbon.

Case of fire has a high rate of gas carbon monoxide production which have to be solved because of the high frequency of this incident. If it happens, the potential death from CO poisoning will increase. Therefore, it needed an effort to reduce levels of CO. One of them is the method of adsorption using metal oxides such as TiO₂, MgO, CuO, natural zeolite, synthetic zeolite, and activated carbon. CO gas concentration that can be absorbed by the various adsorbents were analyzed using Gas Chromatography. The survey results revealed that three of the adsorbent with the largest adsorption capacity of activated carbon: 115.623 ml/g = 4.702 mmol/g; TiO₂: 94.709 ml/g = 3.847 mmol/g; MgO: 80.116 ml/g = 3.252 mmol/g.

Keywords:

Adsorption, gas, carbon monoxide, the adsorbent, metal oxides, activated carbon.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
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
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
2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Karbon Monoksida (CO)	5
2.2 Adsorpsi	9
2.2.1 Definisi dan Sifat Adsorpsi	9
2.2.2 Adsorpsi Pack Bed (Unggun Tetap)	11
2.3 Oksida Logam	13
2.3.1 Titanium Dioksida (TiO ₂)	14
2.3.2 Magnesium Oksida (MgO)	16
2.3.3 Tembaga (II) Oksida (CuO)	17
2.4 Karbon Aktif	17
2.5 Zeolit	19
2.5.1 Struktur Zeolit	20
2.5.2 Sifat Zeolit	21
2.5.3 Pemanfaatan Zeolit	22
2.5.4 Jenis-jenis Zeolit	23
2.5.5 Zeolit Alam Lampung	23
2.5.6 Zeolit Sintetis	25
2.5.7 Metode Aktivasi Zeolit	26
2.6 Karakterisasi BET	28
3. METODE PENELITIAN	30
3.1 Diagram Penelitian	30
3.2 Alat dan Bahan	31
3.3 Prosedur Penelitian	31
3.3.1 Persiapan Awal	31
3.3.2 Preparasi Zeolit Alam	32
3.3.3 Penyaringan Adsorben	33

3.3.4 Skema Perancangan Alat	34
3.3.5 Uji Adsorpsi Gas CO dengan Variasi Laju Alir	35
3.3.6 Uji Adsorpsi Gas CO dengan Variasi Jumlah Adsorben di Kolom ...	35
3.3.7 Uji BET	36
3.3.8 Analisis Kapasitas Adsorpsi dengan Instrumen TCD-GC	36
3.4 Variabel Penelitian	36
3.4.1 Variabel Bebas	36
3.4.2 Variabel Terikat	37
3.5 Tahap Pengolahan Data	37
4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1 Preparasi Adsorben.....	39
4.2 Penyaringan Adsorben.....	40
4.3 Uji Adsorpsi gas CO.....	40
4.3.1 Uji Adsorpsi Gas CO dengan Variasi Laju Alir	42
4.3.2 Uji Adsorpsi Gas CO dengan Variasi Jumlah Adsorben di Kolom ...	46
4.3 Analisis BET	48
5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	50
DAFTAR PUSTAKA.....	52

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Adsorpsi <i>Packed Bed</i> (Unggun Tetap).....	12
Gambar 2.2 Kurva Terobos (<i>Breakthrough Curve</i>).....	12
Gambar 2.3 Struktur Stereotip <i>Clinoptilolite</i>	21
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	30
Gambar 3.2 Diagram Alir Tahap Preparasi Zeolit Alam.....	32
Gambar 3.3 Skema Perancangan Alat.....	34
Gambar 4.1 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi 6 Adsorben pada Laju Alir 10 ml/menit.....	43
Gambar 4.2 Pengaruh Waktu Terobos terhadap Kapasitas Adsorpsi Berbagai Adsorben.....	44
Gambar 4.3 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi 6 Adsorben pada Laju Alir 15 ml/menit.....	45
Gambar 4.4 Pengaruh Waktu Terobos terhadap Kapasitas Adsorpsi Berbagai Adsorben.....	45
Gambar 4.5 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi TiO_2 Pada Variasi Jumlah Dalam Kolom Adsorpsi.....	47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 ISO Classification of Fire Stage, Based on ISO 19706	8
Tabel 2.2 Komponen Beracun Utama Dalam Gas Pembakaran.....	9
Tabel 2.3 Perbandingan Sifat dari Berbagai Bentuk Kristal TiO ₂	16
Tabel 2.4 Komposisi Kimia Zeolit Alam Lampung	24
Tabel 4.1 Penurunan Massa Adsorben pada Suhu Tertentu.....	40
Tabel 4.2 Urutan Kapasitas Adsorpsi Terobosan pada Laju Alir Gas CO 10 ml/menit.....	44
Tabel 4.3 Urutan Kapasitas Adsorpsi Terobosan pada Laju Alir Gas CO 15 ml/menit.....	46
Tabel 4.4 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Terobosan TiO ₂ pada Variasi Jumlah Dalam Kolom	48
Tabel 4.5 Luas Permukaan dan Ukuran Pori Melalui Uji BET.....	48

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A	Kurva kalibrasi untuk <i>gas chromatography</i>	55
Lampiran B	Data percobaan.....	56
Lampiran C	Hasil Uji BET	64



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kasus kebakaran sebagai penghasil gas beracun masih menjadi salah satu permasalahan yang harus diselesaikan, 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, salah satunya adalah gas karbon monoksida yang biasa disebut 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 persen 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).

Oleh karena itu perlu dilakukan evakuasi para korban yang tersekap dalam ruang yang penuh asap kebakaran. Proses evakuasi tidak akan bisa dilakukan, jika kondisi pada lokasi kebakaran masih dipenuhi oleh asap dan gas beracun. Agar evakuasi berjalan lancar dan cepat menemukan korban yang tersekap, maka perlu dilakukan pengurangan tingkat racun dari gas produksi pembakaran akan mengurangi efek mematikan terhadap korban.

Gas CO merupakan salah satu gas yang dihasilkan dari peristiwa kebakaran. Gas CO adalah polutan (zat pencemar udara) yang sangat berbahaya karena karakteristik dari gas ini adalah 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 adsorben berupa oksida logam dan karbon aktif.

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian yang berkaitan dengan pengurangan dan penjernihan asap. Yadav, dkk (2007) menemukan bahwa oksida logam dapat digunakan untuk menjernihkan kabut asap buatan yang dibuat dari senyawa glikol. Kajian dilakukan dalam skala laboratorium, menguji efektivitas struktur nano dalam menjernihkan asap pada ruang tertutup dan membandingkan dengan material yang berukuran konvensional. Material yang diuji adalah TiO_2 , MgO , MgO plus, NaHCO_3 , Ca(OH)_2 . MgO menunjukkan hasil yang paling bagus.

Selain itu, penggunaan zeolit sebagai adsorben sudah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya. 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, karena zeolit dapat menyerap molekul-molekul gas seperti CO , CO_2 , H_2S dan lainnya. 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. (Herry, 2007)

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 beberapa material terhadap salah satu gas beracun yang dihasilkan dari peristiwa kebakaran yakni gas karbon monoksida (CO).

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan diteliti adalah bagaimana gas CO yang merupakan gas beracun yang dihasilkan pada peristiwa kebakaran dapat diminimalisasi keberadaanya dengan cara diadsorpsi menggunakan oksida logam dan karbon aktif.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengadsorpsi gas CO yang merupakan gas beracun hasil pembakaran pada kasus kebakaran menggunakan oksida logam dan karbon aktif
2. Mengetahui dan membandingkan kapasitas adsorpsi dari adsorben yang diujikan terhadap gas CO

1.4 Batasan Masalah

1. Adsorben yang digunakan adalah oksida logam berupa TiO_2 , MgO , CuO , zeolit alam, zeolit sintesis, dan karbon aktif
2. Gas yang diadsorpsi adalah gas karbon monoksida (CO)

1.5 Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tinjauan literatur mengenai gas karbon monoksida (CO); teori adsorpsi; oksida logam seperti TiO_2 , MgO , CuO ; karbon aktif; zeolit.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Berisi diagram alir penelitian, peralatan, bahan, dan prosedur yang digunakan dalam penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi perumusan hasil penelitian dan analisis yang berkaitan dengan kapasitas adsorpsi gas CO dari setiap material adsorben yang diujikan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan dari hasil penelitian serta saran untuk penelitian selanjutnya.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida (CO) adalah polutan (zat pencemar udara) yang sangat berbahaya. CO sulit dikenali karena merupakan suatu komponen yang tidak berwarna, tidak berbau dan tidak mempunyai rasa. Manusia sering terkena bahaya CO tanpa menyadarinya. CO yang terdapat di alam terbentuk dari salah satu diantara tiga proses berikut:

- Pembakaran tidak sempurna terhadap karbon atau komponen yang mengandung karbon.
- Reaksi antara karbon dioksida (CO₂) dan komponen yang mengandung karbon pada suhu tinggi.
- Pada suhu tinggi, CO₂ terurai menjadi CO dan O.

Oksidasi tidak sempurna terhadap karbon atau komponen yang mengandung karbon terjadi jika jumlah oksigen yang tersedia kurang dari jumlah yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna di mana dihasilkan CO₂. Pembentukan CO hanya terjadi jika reaktan yang ada terdiri dari karbon dan oksigen murni. Jika yang terjadi adalah pembakaran komponen yang mengandung karbon di udara, prosesnya lebih kompleks dan terdiri dari beberapa tahap reaksi.

Sebagian besar pembebasan CO ke atmosfer sebagai akibat aktivitas manusia, misalnya dari transportasi, pembakaran minyak, gas, arang atau kayu, proses industri, pembuangan limbah padat, dan sumber lain termasuk kebakaran. Transportasi menghasilkan CO paling banyak di antara sumber CO lainnya, terutama dari kendaraan yang menggunakan bensin sebagai bahan bakar.

Polutan CO yang terhirup manusia pada konsentrasi tinggi dapat menyebabkan kematian. CO sangat berbahaya karena pada konsentrasi relatif rendah (<100 ppm) juga dapat menimbulkan gangguan kesehatan. Konsentrasi CO di udara pada umumnya kurang dari 100 ppm. Bila gas CO terhisap ke dalam paru-paru maka akan ikut peredaran darah dan akan menghalangi masuknya oksigen yang dibutuhkan oleh tubuh. Hal ini terjadi karena CO bersifat racun

metabolis yang ikut bereaksi secara metabolis dengan darah. Seperti oksigen, gas CO juga mudah bereaksi dengan hemoglobin darah.

Ikatan CO dengan hemoglobin darah (karboksihemoglobin-CO₂Hb) lebih stabil dari pada ikatan oksigen dengan hemoglobin darah (oksihemoglobin-O₂Hb). Kestabilan CO₂Hb sekitar 140 kali kestabilan O₂Hb, hal ini menyebabkan Hb darah menjadi lebih mudah menangkap gas CO dan menyebabkan fungsi vital darah sebagai pengangkut oksigen terganggu.

Hb darah dalam keadaan normal berfungsi sebagai pembawa oksigen (O₂) dalam bentuk oksihemoglobin (O₂Hb) dari paru-paru untuk dibagikan kepada sel-sel tubuh yang memerlukannya. Selain itu, Hb darah juga berfungsi mengambil gas CO₂ hasil pembakaran di dalam sel tubuh dalam bentuk karbodioksihemoglobin (CO₂Hb) untuk dibuang keluar melalui paru-paru.

Pengaruh beracun CO terhadap tubuh manusia terutama disebabkan oleh reaksi antara CO dengan Hb di dalam darah. Dengan adanya CO menyebabkan Hb dapat membentuk karboksihemoglobin (CO₂Hb). Jika reaksi ini terjadi maka kemampuan darah untuk mentranspor oksigen menjadi berkurang. (herry rodiana, 2007)

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 µg/Nm³ udara dengan rata-rata waktu pengukuran 24 jam. Konsentrasi CO sampai dengan 100 ppm dianggap aman bila waktu kontak hanya sebentar. Jika CO sebanyak 30 ppm dihisap oleh manusia selama delapan jam akan menimbulkan rasa pusing dan mual. Konsentrasi CO sebanyak 1000 ppm dan waktu kontak selama satu jam menyebabkan pusing dan kulit berubah menjadi kemerah-merahan. Selanjutnya,

untuk waktu kontak 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.

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 di dalam 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 CO₂/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 fasa 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 berventilasi baik tetapi lebih rendah dibandingkan yield pada kondisi tak berventilasi.
4. O₂ yang kurang, (seperti pembakaran *tak berventilasi*, fluks panas radiant yang besar membakar bahan bakar).

ISO 9706 mengidentifikasi jumlah tingkatan pembakaran yang berbeda akan memberikan perbandingan volume produk CO dan CO₂ berbeda, dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 : ISO Klasifikasi Tingkatan Kebakaran Berdasarkan ISO 19706

Tingkatan Kebakaran	Panas (kW m ⁻²)	Suhu Maks. (oC)	Bahan Bakar	Asap	Oksigen (%)	Rasio Ekuivalen	VC O/V CO ₂	Efisiensi Pembakaran (%)
					Masuk	Keluar		
Tanpa Nyala								
1a. Pemendaman Berkelanjutan		450-800	25-85	20	0-20	-	0,1-1	50-90
1b. Radiasi Oksidasi Eksternal		300-600		20	20	<1		
1c. Radiasi Eksternal Anaerob		100-500		0	0	>>1		
2. Nyala dengan Ventilasi Baik	0-60	350-650	50-500	20	0-20	<1	<0,05	>95
Nyala Tanpa Ventilasi	0-30		50-500	15-20	5-10	>1	0,2-0,4	70-80
3a. Ventilasi rendah, Ruang Api		300-600						
3b. Melewati Nyala	50-150	350-650	600	<15	<5	>1	0,1-0,4	70-90

(Hull, 2006)

Selain gas CO, masih ada beberapa senyawa gas buang pembakaran yang bersifat racun, dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut ini.

Tabel 2.2 Komponen Beracun Utama Dalam Gas Pembakaran

Yield yang terlepas dari ventilasi kebakaran	Yield meningkat dengan ventilasi	Yield berkurang dengan ventilasi
HF (2900 ; 500ppm)	CO ₂ (tidak beracun secara khusus, tetapi mengusung O ₂ dan meningkatkan laju pernafasan)	CO (5.700 ppm)
HCl (3800 ; 1.000 ppm)	NO ₂ (250 ; 170 ppm)	HCN (165 ppm)
HBr (3800 ; 1.000 ppm)	SO ₂ (1400 ; 150 ppm)	Hidrokarbon alifatik dan aromatik, PAH

(Hull, 2006)

2.2 Adsorpsi

Istilah adsorpsi biasa digunakan untuk menggambarkan keberadaan suatu bahan tertentu (cairan atau padatan) dengan konsentrasi yang lebih tinggi pada permukaannya dari pada di dalam medium fasa ruahnya. Secara singkat, adsorpsi menunjukkan kelebihan konsentrasi pada permukaan.

2.2.1 Definisi dan Sifat Adsorpsi

Proses adsorpsi adalah peristiwa tertariknya suatu molekul tertentu dari fluida (cair atau gas) pada permukaan zat padat (adsorben) (Maron Lando, 1988). Hal ini terjadi karena adanya ketidakseimbangan gaya-gaya molekul pada zat padat, yang cenderung menarik molekul lain yang bersentuhan pada permukaannya. Zat yang terserap pada permukaan padatan disebut fasa teradsorpsi (adsorbat) sedangkan zat yang menarik disebut adsorben.

Langkah-langkah dapat diringkas:

- larutan berdifusi melalui fluida ke area dekat permukaan partikel padat
- partikel terlarut berdifusi ke dalam pori-pori partikel
- larutan berdifusi ke dinding pori
- adsorpsi zat terlarut pada permukaan dinding pori

Pertukaran ion adalah proses yang serupa, namun dalam kasus ini membuat ion kompleks dengan padat, bukan menyerap. Ketika *bed* mendekati jenuh, alirannya

berhenti dan pemakaian ulang *bed* menyebabkan desorpsi. Adsorbat dengan demikian dapat dipulihkan dan digunakan kembali adsorben.

Berdasarkan interaksi molekulnya, adsorpsi dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia. Adsorpsi fisika terjadi jika molekul yang diserap hanya sebatas diserap di permukaan saja tanpa terjadi reaksi antara molekul adsorbat dengan adsorben. Pada adsorpsi fisika, molekul hanya terikat lemah karena adanya gaya van der waal dan gaya elektrostatik antara molekul-molekul adsorbat dan atom-atom yang menyusun permukaan adsorben. 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 ($\text{adhesi} > \text{kohesi}$). 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 pada adsorpsi kimia terjadi reaksi antar molekul adsorbat dengan adsorben sehingga ikatan yang terbentuk cenderung lebih kuat. Proses adsorpsi kimia bersifat tidak reversibel dan terjadi pada suhu tinggi (Maron Lando, 1988).

Adsorpsi gas biasa menggunakan zat padat. Gas terdiri atas molekul-molekul yang bergerak bebas ke segala arah dan saling bertabrakan. Setiap kali bertabrakan, molekul-molekul tersebut mengalami perubahan kecepatan dan arah pergerakan. Dalam pergerakannya, molekul-molekul gas mungkin pula bertabrakan dengan permukaan suatu padatan. Pada saat bertabrakan dengan permukaan padatan, ada dua kemungkinan yang akan dialami oleh molekul gas. Pertama, molekul gas tersebut akan dipantulkan secara elastis dengan sudut refleksi sama dengan sudut datang. Kemungkinan kedua, molekul gas tersebut akan melekat beberapa saat sebelum kembali terlepas, sehingga konsentrasi gas pada permukaan padatan menjadi lebih besar daripada konsentrasi gas di udara.

Adsorpsi gas oleh zat padat ditandai oleh fakta:

- Adsorpsi bersifat selektif
- Adsorpsi terjadi sangat cepat
- Jumlah gas yang diserap tergantung temperatur
- Adsorpsi tergantung dari luas permukaan adsorben

- Adsorpsi tergantung jenis adsorben dan pembuatan adsorben
- Jumlah gas yang diadsorpsi per satuan berat adsorben tergantung tekanan parsial gas, makin besar tekanan makin banyak pula gas yang diserap

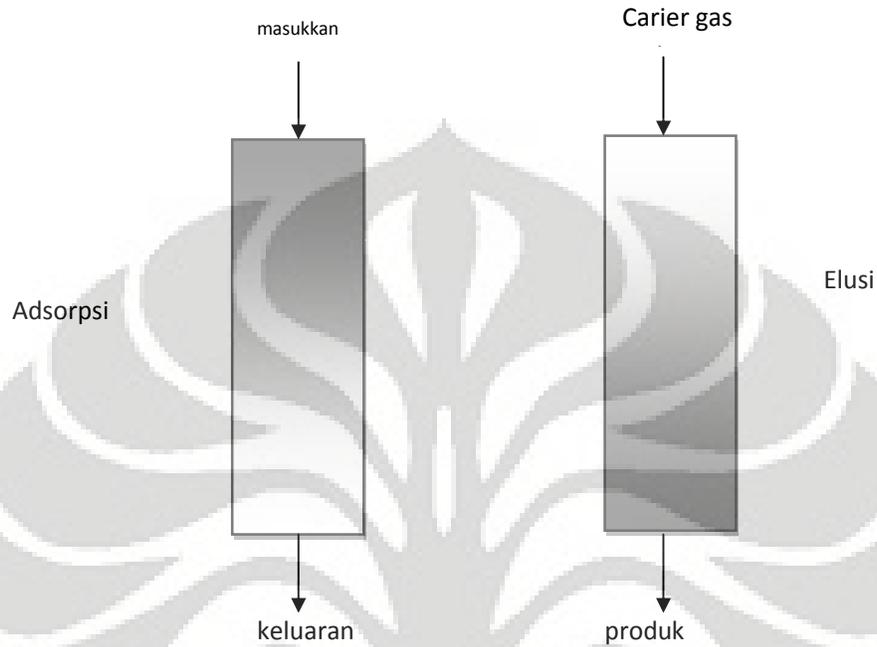
2.2.2 Adsorpsi *Pack Bed* (Unggun Tetap)

Adsorben dapat dimasukkan dalam kolom berbentuk silinder atau tabung dalam skala kecil, dan masukkan (*feed*) dilewatkan disepanjang kolom tersebut untuk terjadinya peristiwa adsorpsi. Ini menjadi metode yang paling sering ditemui, baik di laboratorium maupun dalam pemisahan skala industri. Masukkan tersebut dilewatkan melalui kolom, baik oleh aliran gravitasi atau dengan menggunakan pompa. Aliran keluaran *packed bed* dimonitor untuk konsentrasi zat terlarut. Pada awalnya, sebagian besar zat terlarut dalam masukkan terserap, sehingga konsentrasi zat terlarut dalam aliran keluar rendah. Sebagai adsorpsi yang kontinyu, konsentrasi aliran keluar meningkat, perlahan pada awalnya dan selanjutnya semakin cepat. Proses adsorpsi dilakukan sampai konsentrasi zat terlarut dalam aliran keluar mencapai tingkat tertentu dapat diterima. Penambahan umpan ke *packed bed* dilanjutkan dan proses yang disebut elusi memperoleh ikatan terlarut.

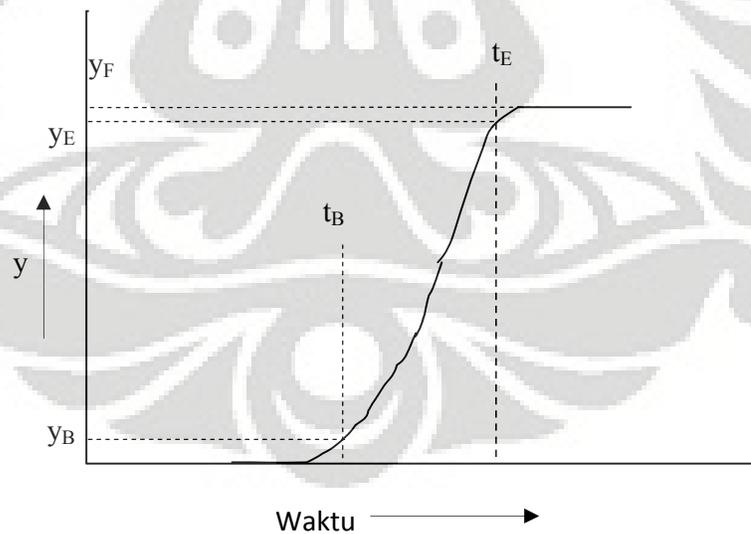
Sebuah plot konsentrasi zat terlarut dalam aliran keluar dengan waktu disebut kurva terobosan (lihat Gambar 2.2). Kurva terobosan menyediakan cara sederhana untuk menganalisis kinerja *packed bed*. Sifat kurva terobosan menghasilkan informasi penting tentang perpanjangan adsorpsi, efisiensi dan pemanfaatan kolom. Hal ini juga memberikan pedoman yang sangat berguna untuk operasi dan desain *packed bed*. Secara umum, ketajaman kurva terobosan yang terbesar adalah efisiensi pemanfaatan *bed*. Dua karakteristik konsentrasi aliran keluar yang dipilih untuk analisis terobosan adalah:

1. Konsentrasi terobosan y_B yang merupakan konsentrasi tertinggi yang dapat diabaikan (biasanya 1-5% dari konsentrasi masukkan)
2. Konsentrasi kelelahan y_E yang mewakili konsentrasi sesuai dengan total kejenuhan *bed* (misalnya 95-99% dari konsentrasi masukkan)

Waktu di mana y_B dicapai disebut waktu terobosan, t_B , sementara waktu di mana y_E dicapai disebut waktu kelelahan, t_E . Berikut adalah gambaran proses adsorpsi yang biasa terjadi serta kurva terobosan yang terbentuk dari proses adsorpsi:



Gambar 2.1 Adsorpsi *Packed Bed* (Unggun Tetap)



Gambar 2.2 Kurva Terobos (*Breakthrough Curve*)

2.3 Oksida Logam

Oksida-oksida natrium, magnesium, dan aluminium terdiri dari struktur raksasa yang mengandung ion-ion logam dan ion-ion oksida. Magnesium oksida memiliki struktur seperti NaCl. Dua yang lainnya memiliki struktur yang lebih rumit.

Terdapat gaya tarik-menarik yang kuat antara ion-ion pada masing-masing oksida dan gaya tarik menarik ini membutuhkan energi yang besar untuk diputuskan. Oleh karena itulah oksida-oksida ini memiliki titik leleh dan titik didih yang tinggi.

Oksida logam transisi dan campurannya serta logam mulia diketahui berfungsi sebagai bahan katalis untuk mempercepat reaksi oksidasi karbon monoksida (Bielanski, 1991). Oksida logam lebih banyak digunakan sebagai bahan untuk katalis karena ketersediannya besar di alam, murah serta waktu hidupnya lama walaupun aktivitasnya lebih rendah dibandingkan bahan logam mulia (Rosyidah, 1998).

Oksida logam transisi memiliki karakter yang dapat diaplikasikan sebagai katalis, khususnya katalis reaksi oksidasi karena oksida logam memiliki orbital d pada ion logamnya yang masih terisi sebagian. Adanya orbital d yang masih kekurangan elektron tersebut dapat menangkap elektron dari reaktan dan membentuk ikatan yang kuat, sehingga dapat mengaktifkan spesies yang bereaksi (Prakash's, 1997). Oksida logam dengan karakter-karakter demikian yang paling aktif yaitu diantaranya oksida V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni dan Cu (Dowden, 1970).

Oksida logam yang biasa digunakan untuk *catalytic converter* diantaranya adalah oksida tembaga CuO dan oksida kobalt CoO. Tembaga sebagai katalis digunakan secara luas karena memiliki aktivitas dan selektivitas yang tinggi untuk reaksi oksidasi reduksi. Tingkat oksidasi tembaga berubah secara termodinamik antara CuO, Cu₂O dan Cu. Perbedaan dalam adsorpsi oksigen oleh spesies pada tingkat oksidasi tersebut merupakan penyebab tingginya aktivitas dan selektivitas katalis tembaga (Nagase, dkk, 1999).

2.3.1 Titanium Dioksida (TiO₂)

Titanium dioksida, juga dikenal sebagai titanium (IV) oksida merupakan kejadian alami oksidasi dari titanium, dengan rumus kimia TiO₂. Titanium dioksida merupakan padatan berwarna putih, tidak larut dalam HCl, HNO₃, dan aquaregia tetapi larut dalam asam sulfat pekat membentuk titaniumsulfat (Ti(SO₄)). Titanium (Ti) adalah unsur logam transisi, dapat membentuk ion titanium (III), Ti³⁺ dan titanium (IV), Ti⁴⁺. Kation Ti³⁺ dalam air kurang stabil dan mudah mengalami oksidasi menjadi Ti⁴⁺. Secara alami, terjadinya oksidasi dapat dibuat dan berfungsi sebagai sumber untuk komersial titanium. Titanium dioksida digunakan sebagai pigmen putih yang paling luas karena kecerahan dan indeks bias sangat tinggi ($n = 2,7$). Ketika disimpan sebagai film tipis, indeks bias dan warna menjadikannya sebuah optik lapisan reflektif yang sangat baik untuk cermin dielektrik dan beberapa batu permata.

TiO₂ juga merupakan *opacifier* yang efektif dalam bentuk bubuk, di mana digunakan sebagai pigmen untuk memberikan keputihan dan kegelapan untuk produk-produk seperti cat, pelapis, plastik, kertas, tinta, makanan, obat-obatan serta sebagian pasta gigi. Titanium dioksida, terutama dalam bentuk anatase, adalah fotokatalis di bawah cahaya sinar ultraviolet (UV). Baru-baru ini telah ditemukan bahwa titanium dioksida, ketika disatukan dengan ion nitrogen atau diolah dengan oksida logam seperti trioksida tungsten juga merupakan fotokatalis. Kekuatan potensi oksidatif dari lubang positif mengoksidasi air untuk membuat hidroksil radikal. Hal ini juga dapat mengoksidasi oksigen atau bahan organik secara langsung.

Titanium dioksida kemudian ditambahkan ke cat, semen, jendela, ubin, atau produk lain untuk mensterilkan, menghilangkan bau dan sifat *anti-fouling* dan digunakan sebagai katalis hidrolisis. Titanium dioksida memiliki potensi untuk digunakan dalam produksi energi, sebagai fotokatalis, karena dapat:

- melakukan hidrolisis, yaitu memecah air menjadi hidrogen dan oksigen. Efisiensi dari proses ini dapat sangat ditingkatkan dengan *doping* oksida dengan karbon.
- Titanium dioksida juga dapat menghasilkan listrik ketika dalam bentuk nanopartikel. Penelitian menunjukkan bahwa dengan menggunakan

nanopartikel untuk membentuk piksel layar, mereka menghasilkan listrik ketika transparan dan di bawah pengaruh cahaya. Jika dikenakan listrik di sisi lain, menghitamkan nanopartikel, membentuk karakteristik dasar dari sebuah layar LCD.

Terdapat fenomena untuk titanium dioksida yang dilapisi kaca dan terkena cahaya matahari. Hal ini dikembangkan menjadi pembersih kaca dan pelapis *anti-fogging*. TiO_2 dimasukkan ke dalam bahan bangunan luar ruangan, seperti batu paving blok noxer atau cat, secara substansial dapat mengurangi konsentrasi polusi udara seperti senyawa organik yang mudah menguap dan oksida nitrogen.

TiO_2 menawarkan potensi besar sebagai teknologi industri untuk detoksifikasi atau pemulihan dari limbah disebabkan oleh beberapa faktor:

- Proses ini terjadi di bawah kondisi kamar sangat lambat; langsung terkena sinar UV
- Fotokatalis ini murah dan memiliki kelenturan tinggi.
- TiO_2 dapat didukung pada substrat reaktor yang cocok.

TiO_2 termasuk salah satu jenis oksida logam yang merupakan katalis semikonduktor pada proses fotokatalisis. Diantara sekian banyak jenis semikonduktor, hingga saat ini TiO_2 memegang peranan utama dalam proses-proses fotokatalisis karena berbagai kelebihan sifat-sifat kimia fisiknya seperti aktivitas fotokatalisisnya yang tinggi, stabil, dan tidak beracun. Secara komersil, TiO_2 juga memiliki kelebihan dibandingkan dengan fotokatalis lainnya karena mudah didapat dan diproduksi dalam jumlah besar. Hal ini dapat dibandingkan dengan oksida logam lainnya seperti ZnO yang aktivitasnya berkurang seiring berjalannya waktu karena mengalami proses korosi, CdS yang beracun, ataupun Fe_2O_3 yang daya oksidasinya lemah.

Terdapat beberapa kelebihan TiO_2 dibandingkan bahan semikonduktor lainnya yaitu :

- Secara umum memiliki aktivitas fotokatalisis yang lebih tinggi daripada fotokatalis lain seperti ZnO , CdS , WO_3 , dan SnO_2 .
- Tidak beracun dan tidak larut dalam kondisi eksperimen.
- Bersifat inert dalam reaksi.
- Mempunyai sifat stabil terhadap cahaya (fotostabil).

- Mampu menyerap dengan baik cahaya ultraviolet.
- Memiliki kemampuan oksidasi yang tinggi, termasuk zat organik yang sulit terurai sekalipun seperti haloaromatik, polimer, herbisida, dan pestisida.
- Relatif murah jika digunakan dalam jumlah besar.

Ada tiga jenis struktur kristal TiO_2 yaitu *anatase*, *rutile*, dan *brookite*. Kristal-kristal ini terkadang memiliki pengotor seperti besi, kromium, ataupun vanadium dalam jumlah yang kecil (Othmer, 1997). Perbedaan diantara ketiga bentuk kristal dari TiO_2 dapat dilihat pada Tabel 2.1. Anatase merupakan bentuk alotrofik yang paling aktif dibandingkan bentuk lainnya. Secara termodinamika, bentuk anatase lebih stabil dan pembentukannya secara kinetik lebih baik pada suhu rendah. Temperatur rendah ini dapat menjelaskan luas permukaan yang tinggi untuk adsorpsi dan untuk katalisis.

Tabel 2.3 Perbandingan Sifat dari Berbagai Bentuk Kristal TiO_2

Sifat	Anatase	Brookite	Rutile
Bentuk Kristal	Tetragonal	Orthorombik	Tetragonal
Band gap, eV	3.25	3.05	3.0
Banyaknya TiO_2/ unit sel	4	8	2
Volume per TiO_2, nm^3	0.03407	0.03211	0.03122
Massa jenis teoritis, kg/m^3	3895	4133	4250
Tingkat kekerasan, skala Moh	5.5 – 6	5.5 – 6	7 – 7.5

2.3.2 Magnesium Oksida (MgO)

Magnesium oksida adalah padatan putih mineral yang terjadi secara alami sebagai *periclase* dan merupakan sumber magnesium. Magnesium oksida memiliki rumus empiris MgO yang dibentuk oleh ikatan ion antara satu magnesium dan satu oksigen atom. Magnesium oksida higroskopis di alam dan penyimpanannya diusahakan jauh dari uap air. Magnesium hidroksida terbentuk

di dalam air ($\text{MgO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})_2$), tetapi dapat dibalik dengan memanaskan sehingga terpisah dari uap air. MgO merupakan penyerap kelembaban efisien digunakan oleh berbagai perpustakaan untuk melestarikan buku. MgO juga salah satu bahan baku pembuatan semen di proses pengeringan pabrik. Jika banyak MgO ditambahkan, semen dapat mengalami ekspansi. Magnesium oksida diperdagangkan secara komersial sebagai lapisan tahan panas. Jumlah pemanasan mengurangi reaktivitas dari magnesium oksida mencerminkan luas permukaan untuk massa dan densitas. Magnesium oksida merupakan masukkan utama bagi industri senyawa magnesium, refraktori, dan isolasi elemen dalam tanur listrik.

2.3.3 Tembaga (II) Oksida (CuO)

Sebagai mineral CuO dikenal sebagai tenorite. CuO merupakan padatan berwarna hitam dengan struktur ionik dan titik lebur 1200°C . CuO dapat terbentuk dengan memanaskan tembaga di udara:



CuO merupakan oksida dasar, sehingga larut dalam asam mineral seperti asam klorida, asam sulfat, atau asam nitrat. Biasa digunakan sebagai pigmen pada keramik untuk menghasilkan warna, aman sebagai penghilang bahan berbahaya seperti sianida, hidrokarbon, halogenasi hidrokarbon dan dioksin, melalui oksidasi.

2.4 Karbon Aktif

Karbon aktif yang merupakan adsorben adalah suatu padatan berpori, yang sebagian besar terdiri dari unsur karbon bebas dan masing-masing berikatan secara kovalen. Dengan demikian, permukaan karbon aktif bersifat nonpolar. Selain komposisi dan polaritas, struktur pori juga merupakan faktor yang penting diperhatikan. Struktur pori berhubungan dengan luas permukaan, semakin kecil pori-pori karbon aktif, mengakibatkan luas permukaan semakin besar. Dengan demikian kecepatan adsorpsi bertambah.

Karbon aktif terbuat dari hasil dekomposisi karbonasi kayu, yang diikuti aktivasi dengan steam atau karbon dioksida pada tekanan atmosfer dan temperatur $700^\circ - 1100^\circ\text{C}$. 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 gasolin 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.

Satu gram karbon aktif dapat memiliki luas permukaan lebih dari 500 m² - 1.500 m² sehingga sangat efektif dalam menangkap partikel-partikel yang sangat halus. Karbon aktif bersifat sangat aktif dan akan menyerap apa saja yang kontak dengan karbon tersebut. Di bawah mikroskop elektron, daerah tinggi permukaan-struktur dari karbon aktif yang terungkap partikel individual sangat rumit dan menampilkan berbagai jenis porositas. Mungkin ada daerah di mana permukaan datar grafit seperti materi berjalan sejajar satu sama lain, dipisahkan hanya oleh beberapa nanometer atau lebih. Mikropori ini memberikan kondisi yang luar biasa untuk terjadi adsorpsi, karena menyerap materi dan dapat berinteraksi dengan banyak permukaan secara simultan. Pengujian perilaku adsorpsi biasanya dilakukan dengan nitrogen gas di 77 K di bawah kondisi vakum.

Secara fisik, karbon aktif mengikat material dengan gaya Van der Waals atau dispersi gaya London. Karbon aktif tidak mengikat baik untuk bahan kimia

tertentu, termasuk alkohol, glikol, asam dan basa kuat, logam dan beberapa zat anorganik seperti lithium, natrium, besi, timah, arsenik, fluorin, dan asam borat. Karbon aktif dapat digunakan sebagai substrat untuk aplikasi dari berbagai bahan kimia untuk meningkatkan kapasitas daya serap untuk beberapa senyawa anorganik dan organik bermasalah seperti hidrogen sulfida (H_2S), amonia (NH_3), formaldehida ($HCOH$), dan merkuri (Hg). Sifat ini dikenal sebagai *chemisorption*. Hal yang paling sering ditemui dari *chemisorption* di industri, terjadi ketika sebuah solid katalis berinteraksi dengan bahan baku gas, reaktan. Adsorpsi reaktan ke permukaan katalis menciptakan ikatan kimia, mengubah kepadatan elektron di sekitar molekul pereaksi dan memungkinkan untuk mengalami reaksi yang biasanya tidak tersedia. Karbon aktif digunakan dalam pemurnian gas, pemurnian emas, ekstraksi logam, pemurnian air, obat-obatan, pengolahan limbah, saringan udara dalam masker gas dan masker filter, filter dalam kompresi udara dan aplikasi lainnya. Filter karbon aktif biasanya digunakan dalam pemurnian udara tekan dan gas untuk menghapus minyak uap, bau, dan hidrokarbon lainnya dari udara. Desain yang paling umum menggunakan 1 atau 2 tahap prinsip filtrasi karbon aktif yang tertanam di dalam media filter.

Karbon aktif bekerja dengan adsorpsi fisik. Banyaknya pori yang dimiliki membuatnya memiliki luas permukaan yang besar untuk mengumpulkan kontaminan. Adsorpsi terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi antara larutan dan pori karbon aktif, sehingga polutan akan berpindah dari larutan ke pori-pori karbon. Polutan pada air bisa teradsorpsi karena daya tarik dari karbon aktif lebih besar daripada gaya yang membuat polutan tersebut tetap berada pada larutan.

2.5 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.

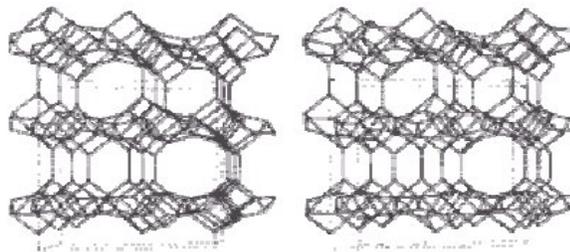
2.5.1 Struktur Zeolit

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 silikon 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. 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.

2.5.2 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 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.

2.5.3 Pemanfaatan Zeolit

Berdasarkan penelitian, kemampuan karbon aktif dan silika gel sebagai bahan penyerap ternyata tidak melebihi zeolit alam. Zeolit sintetik dapat lebih murni dan mempunyai kemampuan lebih luas dibandingkan dengan zeolit alam, terutama sebagai bahan katalis. Zeolit sintetik jauh lebih disukai dibandingkan dengan Zeolit Alam, disamping karena keaktifan, dan selektifannya 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. (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).

2.5.4 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

2.5.5 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	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

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 (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.

2.5.6 Zeolit Sintetis

Zeolit sintetis adalah suatu senyawa kimia yang mempunyai sifat fisik dan kimia yang sama dengan zeolit alam. Zeolit ini dibuat dari bahan lain dengan proses sintetis. Zeolit sintetis dibuat dengan rekayasa yang sedemikian rupa sehingga mendapatkan karakter yang sama dengan zeolit alam. Zeolit sintetis sangat bergantung pada jumlah Al dan Si, sehingga ada 3 kelompok zeolit sintetis:

- Zeolit sintetis dengan kadar Si rendah

Zeolit jenis ini banyak mengandung Al, berpori, mempunyai nilai ekonomi tinggi karena efektif untuk pemisahan dengan kapasitas besar. Volume porinya dapat mencapai $0,5 \text{ cm}^3$ tiap cm^3 volume zeolit.

- Zeolit sintetis dengan kadar Si sedang

Jenis zeolit modernit mempunyai perbandingan Si/Al = 5 sangat stabil, maka diusahakan membuat zeolit Y dengan perbandingan Si/Al = 1-3. Contoh zeolit sintetis jenis ini adalah zeolit omega.

- Zeolit sintetis dengan kadar Si tinggi

Zeolit jenis ini sangat higroskopis dan menyerap molekul non polar sehingga baik untuk digunakan sebagai katalisator asam untuk hidrokarbon. Zeolit jenis ini misalnya zeolit ZSM-5, ZSM-11, ZSM-21, ZSM-24.

Mineral zeolit sintetis yang dibuat tidak dapat persis sama dengan mineral zeolit alam, walaupun zeolit sintetis mempunyai sifat fisis yang jauh lebih baik. Beberapa ahli menamakan zeolit sintetis sama dengan nama mineral zeolit alam dengan menambahkan kata sintetis di belakangnya, dalam dunia perdagangan muncul nama zeolit sintetis seperti zeolit A, zeolit K-C dll. Zeolit sintetis terbentuk ketika gel yang ada terkristalisasi pada temperatur dari temperatur kamar sampai dengan 200°C pada tekanan atmosferik.

Zeolit sintetis memiliki sifat yang lebih baik dibanding dengan zeolit alam. Perbedaan terbesar antara zeolit sinteis dengan zeolit alam adalah:

- Zeolit sintetis dibuat dari bahan kima dan bahan-bahan alam yang kemudian diproses dari tubuh bijih alam.
- Zeolit sintetis memiliki perbandingan silika dan alumina yaitu 1:1 dan sedangkan pada zeolit alam hingga 5:1.
- Zeolit alam tidak terpisah dalam lingkungan asam seperti halnya zeolit sintetis.

2.5.7 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, pertukaran ion, 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 $AlF_x(OH)_y$ dan dengan klorin akan menghasilkan $AlCl_x(OH)_y$.

2. Pertukaran Ion

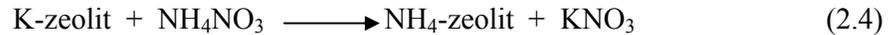
Pertukaran ion dalam zeolit adalah proses dimana kation yang ada dalam sistem pori intrakristalin ditutup dengan kation lain yang berasal dari larutan. Larutan zeolit akan mencapai kesetimbangan sesuai dengan persamaan berikut:

$$z_a B_z^z + z_b A_s^z = z_a B_s^z + z_b A_z^z \quad (2.3)$$

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 (2.5) merupakan hasil dari pertukaran ion, yaitu antara K-zeolit dengan larutan NH_4NO_3 , sedangkan persamaan (2.4) 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.

2.6 Karakterisasi BET

Karakterisasi BET bertujuan untuk melihat luas permukaan dari suatu material. Metode BET dipublikasikan oleh *Brunauer, Emmet dan Teller* pada tahun 1938 yang lebih dikenal dengan metode model adsorpsi fisika dari uap dalam padatan. Metode BET berdasarkan model yang sangat sederhana dan hanya menggambarkan sebagian kecil adsorpsi isothermal yang digunakan untuk menentukan luas permukaan spesifik dari padatan. Biasanya digunakan untuk padatan yang tidak berpori, macroporous dan mesoporous. Metode BET ini didasarkan pada penentuan volume molekul yang teradsorp secara fisika setebal satu lapis molekul (*monolayer*) pada permukaan padatan (V_m). Asumsi yang digunakan dalam teori BET adalah adsorpsi berlapis banyak (*multilayer*), V_m yang dihitung adalah jumlah volume lapisan terluar. Persamaan BET yang digunakan dapat dilihat di Persamaan (2.6) (Maron, 1990).

$$\frac{\left(\frac{P}{P_0}\right)}{V\left(1-\frac{P}{P_0}\right)} = \frac{1}{C.V_m} + \left[\frac{(C-1)}{C.V_m}\right]\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (2.6)$$

dimana,

P : tekanan gas saat adsorpsi

P₀ : tekanan jenuh adsorbat gas pada temperatur percobaan

V : volume gas yang diadsorp pada tekanan P

V_m : volume gas yang diadsorb untuk monolayer

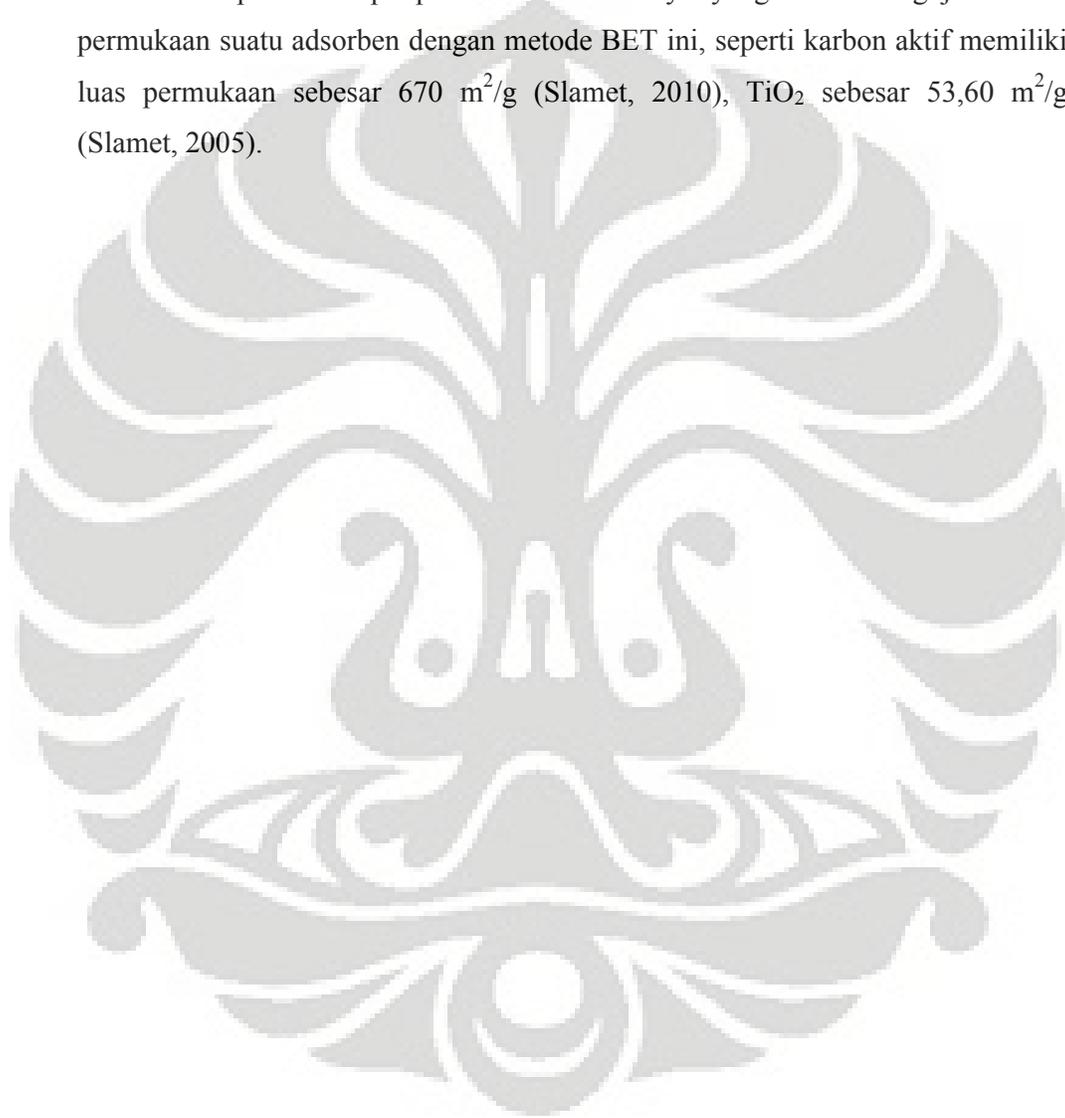
C : konstanta sebagai fungsi eksponensial dari panas adsorpsi dan panas pencairan, $C = \exp(Q_a - Q_p)/R$

Q_a : panas adsorpsi pada *layer* pertama

Q_b : panas pencairan gas pada *layer* yang lain

Pada prinsipnya persamaan BET yang digunakan dapat menggambarkan type-type adsorpsi isothermal yang dibatasi hanya pada luas permukaan. Metode BET dapat digunakan untuk gas yang mudah terkondensasi, tetapi umumnya digunakan gas dengan ukuran molekul kecil seperti nitrogen, gas krypton, argon ataupun karbondioksida dapat pula digunakan sebagai gas adsorbat.

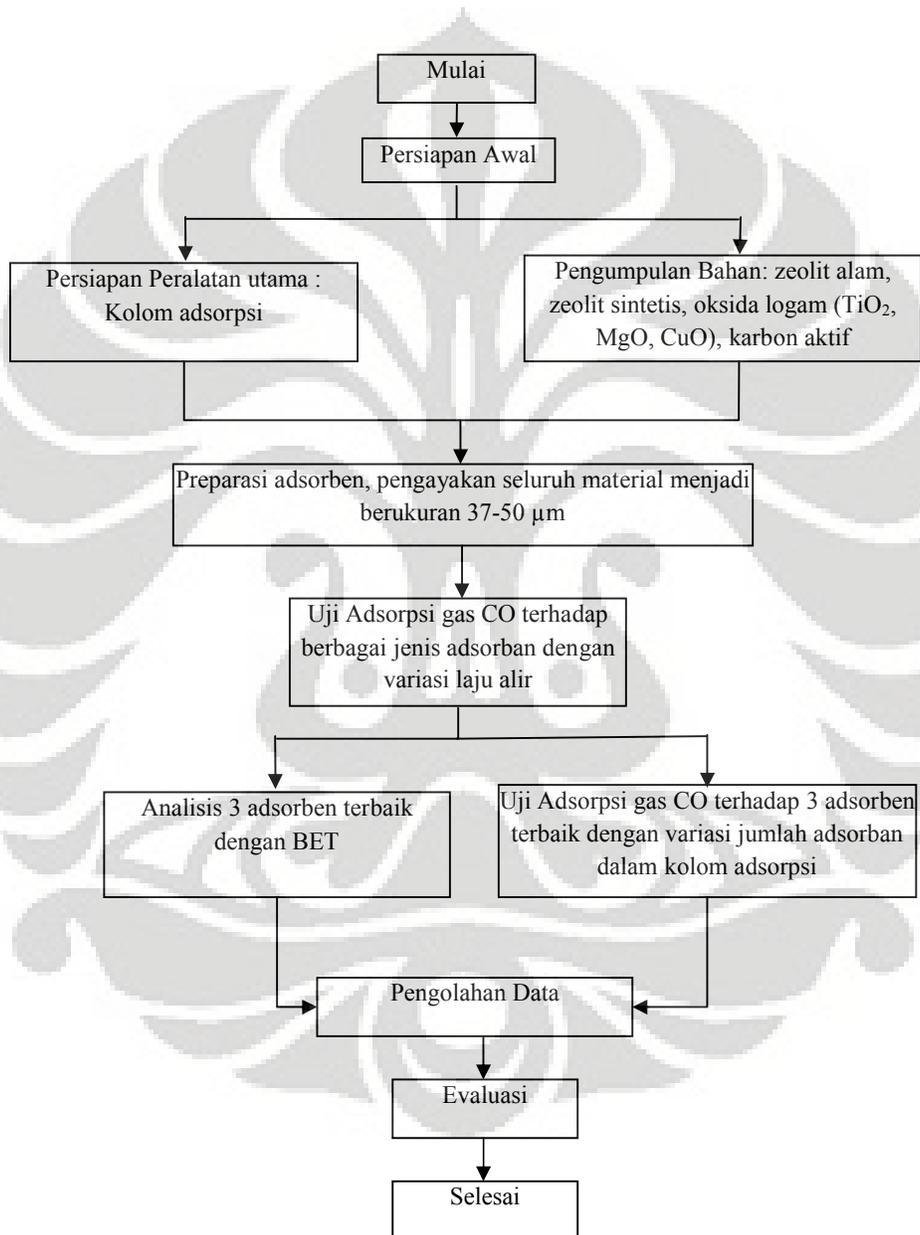
Terdapat beberapa penelitian sebelumnya yang telah mengujikan luas permukaan suatu adsorben dengan metode BET ini, seperti karbon aktif memiliki luas permukaan sebesar $670 \text{ m}^2/\text{g}$ (Slamet, 2010), TiO_2 sebesar $53,60 \text{ m}^2/\text{g}$ (Slamet, 2005).



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Penelitian

Berikut adalah diagram alir penelitian:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan selama penelitian adalah sebagai berikut:

- Beaker glass 250 mL, 500 mL dan 1000 mL
- Labu erlenmeyer
- Buret dan statip
- Gelas ukur
- Kaca arloji
- Corong
- Spatula
- Pipet tetes
- Stopwatch
- Pengaduk kaca
- Wadah plastik
- Saringan
- Termometer
- Cawan porselen
- Timbangan elektronik
- *Magnetic Stirrer*
- Oven
- Kolom adsorpsi
- Kawat
- GC TCD
- *Furnace Controllable*

Bahan yang digunakan selama penelitian adalah sebagai berikut:

- Gas karbon monoksida (CO)
- Larutan HF
- Larutan HCl
- Larutan NH_4Cl
- Aquadest
- Zeolit Alam Lampung
- Zeolit sintesis
- TiO_2
- MgO
- CuO
- Karbon aktif
- Wool keramik

3.3 Prosedur Penelitian

3.3.1 Persiapan Awal

Tahap persiapan awal terdiri dari persiapan alat utama berupa kolom adsorpsi dan adsorben yang akan digunakan dalam penelitian. Kolom adsorpsi yang digunakan berukuran diameter 9 mm dan tinggi 30 cm. Kolom adsorpsi ini tahan terhadap suhu tinggi. Material adsorben yang akan digunakan ada 6, yaitu zeolit alam, zeolit sintesis, TiO_2 , MgO, CuO, dan karbon aktif. Adsorben ini berupa bubuk padatan halus dengan ukuran partikel tertentu.

3.3.2 Preparasi Zeolit Alam

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 rasio Si/Al sehingga luas permukaan zeolit juga meningkat. Selain itu, dapat pula melarutkan senyawa-senyawa pengganggu yang ada dalam zeolit.

- Tahap pertukaran ion

Tahapan ini bertujuan untuk pembersihan pengotor dan penguat struktur kristal zeolit setelah tahap dealuminasi serta untuk mempermudah modifikasi zeolit yang akan digunakan sebagai adsorben.

- 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.

Berikut adalah diagram alir dari tahap preparasi zeolit:



Gambar 3.2 Diagram Alir Tahap Preparasi Zeolit Alam

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 20 menit.
- Sampel dicuci dengan air demin 2-3 kali.
- Zeolit kemudian diaduk dalam HCl 200 ml dengan kecepatan 450 RPM selama 30 menit.
- Zeolit dicuci dengan air demin sebanyak 2-3 kali dan dikeringkan.

3. Pertukaran Ion

- Zeolit hasil dealuminasi dipertukarkan ionnya dengan menggunakan NH_4Cl 2M sebanyak 200 ml selama 5 hari dengan diaduk selama 3 jam per hari dalam temperatur ruang.
- Sampel dicuci dengan air demin 2-3 kali dan disaring.
- Sampel kemudian dikeringkan di dalam oven pada temperatur 110°C selama 2 jam.

4. Kalsinasi zeolit

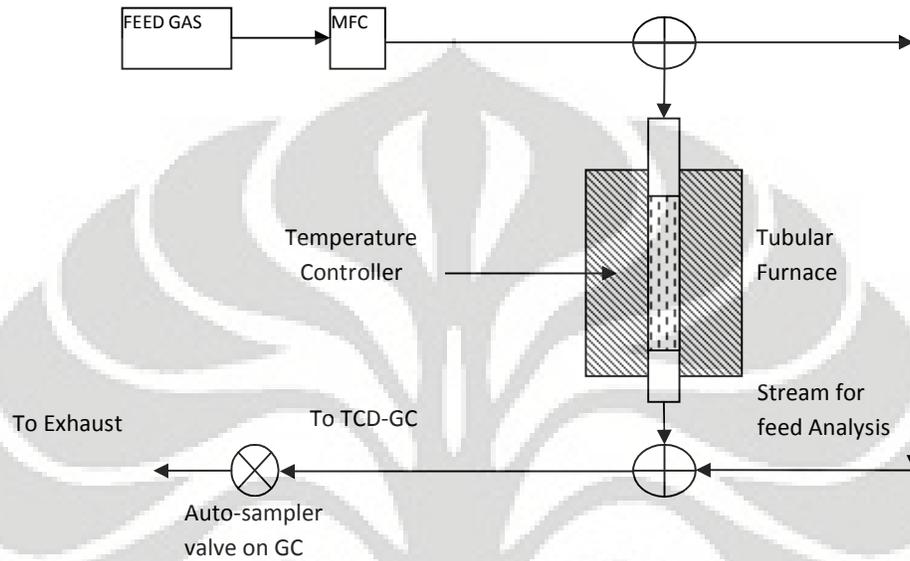
Mengkalsinasi zeolit tersebut dalam furnace pada temperatur 500°C selama 5 jam. Kalsinasi bertujuan untuk menguapkan kandungan air yang terperangkap dalam kristal zeolit.

3.3.3 Penyaringan Adsorben

Seluruh adsorben disaring agar ukuran partikelnya menjadi seragam yakni 37-50 μm atau setara dengan 400-270 mesh. Penyaringan ini dilakukan agar efektifitas daya serap dari keenam adsorben dapat dibandingkan.

3.3.4 Skema Perancangan Alat

Berikut ini adalah gambar skema rangkaian peralatan untuk uji adsorpsi gas CO terhadap enam buah adsorben yang telah disiapkan.



Gambar 3.3 Skema Perancangan Alat

Uji kinerja adsorpsi zeolit dilakukan menggunakan rangkaian alat pada **Gambar 3.3** di atas. Proses adsorpsi dilakukan secara kontinu selama waktu tertentu dimana konsentrasi gas keluar diharapkan tidak berubah dari gas masuk. Gas umpan yang diujikan adalah gas CO. Uji adsorpsi dilakukan dengan memvariasikan laju alir gas umpan, dan jumlah adsorben dalam kolom. Proses adsorpsi berlangsung secara kontinu, hasil adsorpsi sampel tercatat secara online pada GC.

Mula-mula feed gas berupa CO dilewatkan melalui kontroler laju alir massa (MFC). Adsorben diletakkan dalam kolom yang dipanaskan dengan menggunakan furnace tubular yang dilengkapi dengan kontroler PID temperatur. Aliran produk dilewatkan melalui katup sample auto ke kromatografi gas (GC).

3.3.5 Uji Adsorpsi Gas CO dengan Variasi Laju Alir

Terdapat beberapa tahapan yang harus dilakukan (Jadhav, P.D, 2007), diantaranya:

1. Adsorben diberi perlakuan awal dengan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 150°C selama 1 jam.
2. Masing-masing adsorben sebanyak 1 g diisikan ke dalam kolom adsorpsi dan wol keramik dimasukkan di bagian atas dan bawah dari adsorben untuk memastikan pengemasan yang baik.
3. Adsorben dipanaskan menggunakan tubular furnace selama 3 jam pada suhu 200°C.
4. Pada 1 jam terakhir pemanasan, gas He dialirkan pada adsorben dengan laju alir 10ml/min.
5. Adsorben kemudian didinginkan sesuai dengan temperature kamar.
6. Aliran gas umpan berupa CO dialirkan melewati adsorben dengan laju alir 10 ml/menit.
7. Gas keluaran dianalisis menggunakan detector konduktivitas panas-kromatografi gas (TCD-GC) dengan injektor sample yang dikontrol secara pneumatic. Percobaan dilanjutkan hingga konsentrasi aliran keluar gas umpan sama dengan aliran masuknya.

Setelah mendapatkan data kapasitas adsorpsi gas CO terhadap enam jenis adsorben pada laju alir 10 ml/menit, peneliti mengambil 3 adsorben yang memiliki kapasitas adsorpsi terbaik untuk dilakukan proses adsorpsi sama seperti di atas dengan laju alir yang berbeda yakni 15 ml/menit.

3.3.6 Uji Adsorpsi Gas CO dengan Variasi Jumlah Adsorben dalam Kolom

Secara umum, tahapan yang dilakukan masih sama dengan uji adsorpsi sebelumnya. Menguji kapasitas adsorpsi dari 3 adsorben terbaik dengan laju alir tetap yakni 10 ml/menit. Akan tetapi jumlah adsorben yang diujikan berbeda. Pada proses sebelumnya, adsorben yang dimasukkan ke dalam kolom adsorpsi hanya 1 g. Untuk tahap kali ini, jumlah adsorben yang dimasukkan ke dalam kolom adsorpsi bervariasi yakni 1 g, 2 g, 3 g. Sebelum dimasukkan ke dalam kolom adsorpsi, ada perlakuan tambahan yang dilakukan pada adsorben tersebut,

yakni di padatkan dengan dibuat pelet, lalu dihancurkan kembali dan disaring pada ukuran 125-250 μ m.

3.3.7 Uji BET

Uji BET dilakukan untuk mengetahui luas permukaan dan ukuran pori adsorben. Adsorben yang diujikan adalah tiga adsorben terbaik dari hasil uji adsorpsi gas CO dengan variasi laju alir 10 ml/min.

3.3.8 Analisis Kapasitas Adsorpsi dengan Instrumen TCD-GC

Analisis GC bertujuan untuk mengetahui konsentrasi gas CO sebelum dan setelah dilakukan proses adsorpsi dengan berbagai jenis adsorben. Instrumen yang dipakai adalah GC tipe Shimadzu 8A dengan detektor TCD-GC. Gas pembawanya adalah nitrogen dengan laju alir 66 mL/menit. Prosedur penggunaannya adalah sebagai berikut.

1. Menyalakan dan mengatur laju alir gas pembawa yang akan digunakan.
2. Menyalakan instrumen GC dengan memutar saklar ke posisi ON.
3. Menginjeksikan gas CO selama proses adsorpsi berlangsung, dilakukan setiap 5 menit hingga konsentrasi gas masukan sama dengan gas keluaran.
4. Mencatat hasil pembacaan berupa kromatogram yang dihasilkan, terutama kisaran waktu retensi setiap senyawa dan luas area di bawah puncak untuk setiap volume senyawa yang diinjeksikan.
5. Membuat kurva kalibrasi dengan luas area di bawah puncak pada sumbu y terhadap laju alir gas yang diinjeksikan pada sumbu x untuk setiap adsorben referensi yang dianalisis. Akan didapat persamaan garis lurus untuk setiap kurva kalibrasi.
6. Menganalisis kromatogram yang dihasilkan dan menghitung jumlah gas yg teradsorpsi berdasarkan kurva kalibrasi yang telah dibuat sebelumnya.

3.4 Variabel Penelitian

3.4.1 Variabel Bebas

- Laju Alir gas umpan : 10 ml/min, 15 ml/min.
- Jumlah Adsorben dalam kolom : 1 g, 2 g, 3 g.

3.4.2 Variabel Terikat

- Kapasitas adsorpsi dari ke-enam adsorben (yang diukur dengan membandingkan jumlah gas CO (konsentrasi) sebelum memasuki kolom adsorpsi dengan setelah melewatinya) dalam waktu dan temperatur tertentu.

3.5 Pengolahan Data

Dari hasil penelitian ini akan didapatkan data berupa banyaknya gas CO sebelum dan sesudah proses adsorpsi. Dari data tersebut dapat dihitung selisihnya yang merupakan banyaknya gas CO yang terserap dalam adsorben selama proses adsorpsi berlangsung.

Kapasitas adsorpsi gas CO oleh adsorben 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.

Berikut adalah metode perhitungan menggunakan persamaan:

Konsentrasi terobos dihitung 1-5% dari gas umpan.

$$= \text{---} \times \quad (3.1)$$

Keterangan:

y_B = Konsentrasi terobosan (*Break Through Concentration*) yakni konsentrasi tertinggi yang dapat diabaikan.

F = Laju Alir gas (ml/min)

Dari perhitungan di atas, akan di dapatkan nilai y_B yakni nilai C/C_0 pada sumbu y. Kemudian dari titik tersebut, dapat ditarik garis lurus mendatar sumbu x hingga mencapai kurva *breakthrough*, lalu ditarik garis vertikal untuk mendapatkan titik t_B , waktu terobos (*breakthrough time*).

Setelah waktu terobos diketahui, maka kapasitas adsorpsi penerobosan dapat ditentukan yakni sebagai berikut:

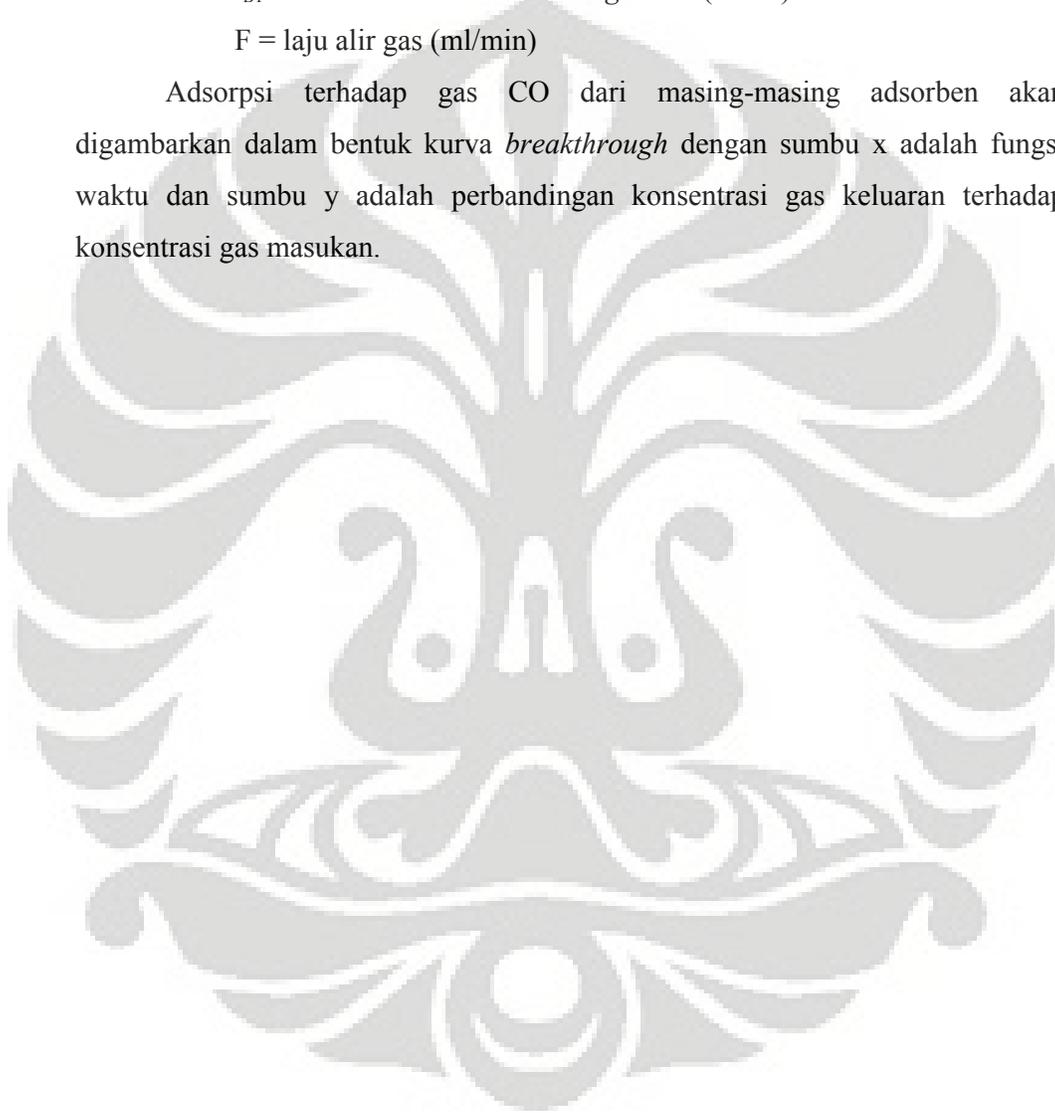
$$C = \frac{V}{F \times t_{BT}} \quad (3.2)$$

Keterangan : C = kapasitas adsorpsi penerobosan pada P 1 atm, T 27°C (ml/g)

t_{BT} = waktu terobos/*breakthrough time* (menit)

F = laju alir gas (ml/min)

Adsorpsi terhadap gas CO dari masing-masing adsorben akan digambarkan dalam bentuk kurva *breakthrough* dengan sumbu x adalah fungsi waktu dan sumbu y adalah perbandingan konsentrasi gas keluaran terhadap konsentrasi gas masukan.



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Preparasi Adsorben

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. Adapun hasil dari proses yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Dealuminasi menggunakan larutan HF 2% dan HCl 6M

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.

2. 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.

3. Kalsinasi

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

Dari hasil aktivasi zeolit ini, didapatkan hasil bahwa zeolit alam yang sebelumnya dilakukan *treatment* memiliki daya serap yang lebih besar dibandingkan zeolit alam yang tidak dilakukan *treatment*.

Selain aktivasi zeolit alam, dilakukan pula beberapa perlakuan untuk adsorben lain sebagai proses akitvasi. Dalam buku *Fundamental of Physical Chemistry, Maro dan Lando* menyatakan proses adsorpsi akan berlangsung lebih baik jika pada adsorben dilakukan aktivasi dengan memanaskannya pada suhu tinggi dan tekanan tertentu, baik dalam kondisi vakum atau pun tidak. Aktivasi ini dapat menghilangkan zat-zat dan pengotor untuk memperluas permukaan

adsorpsi. Untuk itu, perlakuan berupa pemanasan pada suhu 200°C selama 3 jam adalah bagian dari aktivasi adsorben yang akan diujikan untuk mengadsorpsi gas CO (Jadhav, 2007).

4.2 Penyaringan Adsorben

Perlu dilakukan proses penyaringan agar ukuran partikel adsorben menjadi seragam dan kapasitas adsorpsinya dapat dibandingkan satu sama lain dengan ukuran partikel yang seragam. Adsorben tersebut disaring menggunakan 2 ukuran saringan, yakni antara 37-50 μm . Digunakan saringan dengan ukuran partikel sekecil mungkin agar proses adsorpsi optimal. Berdasarkan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan, didapatkan bahwa semakin kecil ukuran partikel, maka proses adsorpsi semakin baik dan kapasitas penyerapan adsorpsi semakin besar. (Yudha, apriawan, 2009).

4.3 Uji Adsorpsi Gas CO

Awalnya adsorben dipanaskan dalam oven untuk mengeringkan dan menghilangkan kadar air di dalamnya. Diketahui bahwa titik didih air adalah 100 °C. Diharapkan setelah dipanaskan pada suhu diatas 100 °C, air yang ada di dalam adsorben telah teruapkan seluruhnya dan adsorben berada dalam kondisi kering.

Dilakukan perhitungan massa adsorben sebelum dan setelah dipanaskan, untuk mengetahui besarnya pengurangan massa tersebut. Adsorben dipanaskan selama 1 jam pada kondisi temperatur tertentu. Hasilnya adalah sebagai berikut:

Tabel 4.1 Penurunan Massa Adsorben pada Suhu Tertentu

Adsorben	Penurunan massa pada T tertentu (g)	
	T = 150°C	T = 200°C
TiO ₂	0,049	0,056
MgO	0,066	0,090
CuO	0,009	0,012
Karbon Aktif	0,328	0,328
ZAL	0,115	0,021
Z, Sintetis	0,031	0,035

Dari Tabel 4.1 terlihat bahwa terdapat pengurangan massa setelah adsorben dipanaskan selama 1 jam dalam oven. Perbedaan pengurangan massa pada suhu 150°C dan 200°C tidak terlihat signifikan. Oleh karena itu, untuk proses selanjutnya, dipilih pemanasan awal adsorben pada suhu 150°C selama 1 jam.

Masing-masing adsorben sebanyak 1 g (± 3 cm) diisikan ke dalam kolom adsorpsi dan wol keramik dimasukkan di bagian atas dan bawah dari adsorben untuk memastikan pengemasan yang baik. Penggunaan adsorben lebih dari 1 g di dalam kolom adsorpsi membuat *pressure drop* terlalu tinggi. Gas tersumbat oleh padatan yang terlalu banyak, sehingga tekanannya menurun dan gas terhambat untuk mengalir melewati adsorben tersebut.

Adsorben dipanaskan menggunakan *tubular furnace* selama 3 jam pada suhu 200°C. Hal ini dilakukan untuk memastikan tidak ada H₂O yang masih terikat dalam adsorben. Pada 1 jam terakhir pemanasan, gas Helium (He) dialirkan melewati adsorben dengan laju alir 10 ml/min (Jadhav, 2007). He diharapkan dapat membawa udara dan gas lain yang masih ada di dalam kolom adsorpsi dan pipa sepanjang peralatan adsorpsi.

Kemudian adsorben didinginkan kembali menjadi 27°C. Proses adsorpsi ini dilakukan pada $T = 27^\circ\text{C}$ dan $P = 1$ atm. Kondisi dibuat demikian karena proses adsorpsi tidak akan efektif pada kondisi suhu yang terlalu tinggi. Semakin rendah suhu dan mendekati suhu kamar, proses adsorpsi akan berlangsung optimal. (Jadhav, P.D, 2007). Adsorpsi yang terjadi dalam suhu rendah adalah adsorpsi fisika dimana adsorpsi ini terjadi disebabkan oleh gaya Van der Waals dan gaya elektrostatis antara molekul-molekul adsorbat dan atom-atom yang menyusun permukaan adsorben. 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 ($\text{adhesi} > \text{kohesi}$). 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.

Adsorpsi dilakukan pada kondisi tekanan cukup rendah (1atm) karena jika tekanan terlalu tinggi, perbedaan daya adsorpsi antar material semakin tidak

terlihat. Semakin meningkatnya temperatur, perbedaan adsorbat yang diserap akan semakin sedikit. (Jong Seok Lee, 2002)

Aliran gas umpan berupa CO dialirkan melewati adsorben dengan laju alir tertentu. Setelah itu gas keluaran dianalisis menggunakan detektor konduktivitas panas-kromatografi gas (TCD-GC) dengan injektor sampel yang dikontrol secara *pneumatic*. Percobaan dilanjutkan hingga konsentrasi aliran keluar gas umpan sama dengan aliran masuknya (hingga adsorben mengalami kejenuhan).

4.3.1 Uji Adsorpsi Gas CO dengan Variasi Laju Alir

Pada tahap ini, masing-masing dari 6 jenis adsorben sebanyak 1 g (\pm tinggi = 3 cm) dimasukkan ke dalam kolom adsorpsi, kemudian dialirkan gas CO dengan laju alir 10 ml/menit. Uji adsorpsi ini dilakukan untuk membandingkan kemampuan dan kapasitas adsorpsi dari 6 jenis adsorben yang ada. Pada uji adsorpsi ini, CO akan terperangkap dalam pori-pori adsorben dan berikatan dengan inti aktif masing-masing adsorben.

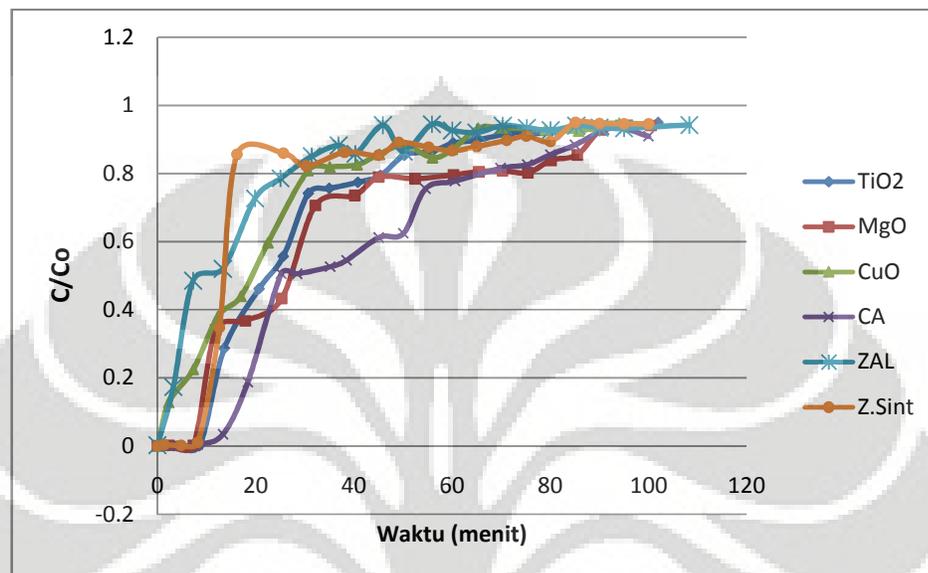
Kapasitas adsorpsi gas CO oleh adsorben ditentukan sebagai fungsi dari waktu. Penelitian adsorpsi dilakukan, dimana gas umpan berupa CO dilewatkan melalui adsorben dan waktu yang dibutuhkan sampai gas umpan terdeteksi di keluaran kolom adsorpsi dicatat.

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.

Adsorpsi terhadap gas CO dari masing-masing adsorben akan digambarkan dalam bentuk kurva *breakthrough* dengan sumbu x adalah fungsi waktu dan sumbu y adalah perbandingan konsentrasi gas keluaran terhadap konsentrasi gas masukan. Dari kurva *breaktrough* dapat terlihat kapasitas adsorpsi. Semakin besar waktu terobosan maka kapasitas adsorpsi juga akan semakin tinggi. Jika nilai perbandingan konsentrasi gas keluaran dan konsentrasi gas masukan semakin mendekati 1, hal ini menandakan adsorben mulai mengalami kejenuhan dan proses adsorpsi mulai tidak efektif. Jika kurva

breakthrough semakin bergeser ke kanan, menandakan proses adsorpsi semakin efektif, kapasitasnya akan semakin besar dan adsorben akan semakin lama mengalami tingkat kejenuhan.

Dari proses adsorpsi yang dilakukan, didapatkan hasil sebagai berikut:



Gambar 4.1 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi 6 Adsorben pada Laju Alir 10 ml/menit

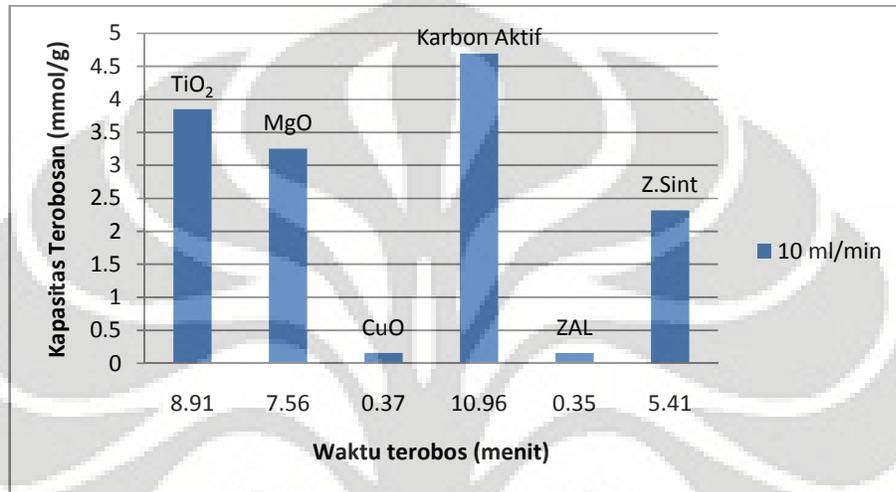
Berdasarkan perhitungan dan grafik pada Gambar 4.1, adsorben dengan kapasitas adsorpsi tertinggi akan memiliki waktu terobos yang paling lama. Hal ini ditandai dengan kurva *breakthrough* semakin berada di sebelah kanan karena waktu terobos yang semakin besar.

Diantara keenam adsorben yang diujikan, kapasitas adsorpsi tertinggi diraih oleh karbon aktif dengan waktu terobos paling lama yakni 10,961 menit dan kapasitas adsorpsi terobosan sebesar $15,623 \text{ ml/g} = 4,702 \text{ mmol/g}$.

Sifat adsorpsi karbon aktif tidak tetap karena dipengaruhi oleh struktur pori dan komposisi kimia. Komponen yang menentukan kekuatan adsorpsi permukaan karbon aktif adalah penyebaran komponen dari gaya Van der Waals, terutama gaya dispersi London. Adsorpsi dan difusi molekul melalui pori ke permukaan karbon merupakan tahap yang cepat. Karbon aktif bekerja dengan adsorpsi fisik. Banyaknya pori yang dimiliki membuatnya memiliki luas permukaan yang besar untuk mengumpulkan kontaminan. Adsorpsi terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi antara polutan dan pori karbon aktif, sehingga

polutan akan berpindah dari larutan ke pori-pori karbon. Polutan dapat teradsorpsi karena daya tarik dari karbon aktif lebih besar daripada gaya yang membuat polutan tersebut tetap berada pada larutan.

Jika kapasitas adsorpsi digambarkan dalam bentuk diagram seperti pada gambar di bawah ini, maka akan terlihat pula bahwa semakin lama waktu terobos, maka kapasitas adsorpsi terobosan juga akan semakin besar.



Gambar 4.2 Pengaruh Waktu Terobos terhadap Kapasitas Adsorpsi Berbagai Adsorben

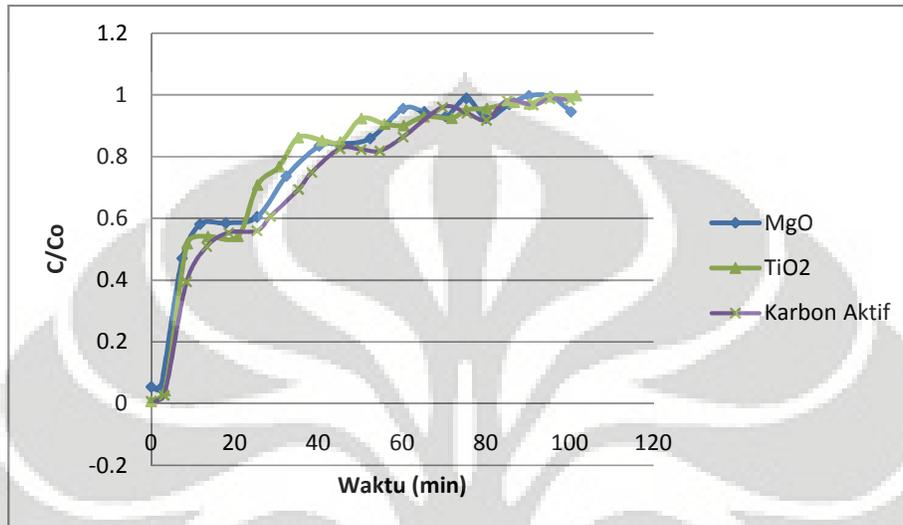
Berikut ini adalah tabel urutan kapasitas adsorpsi terobosan pada laju alir gas CO 10 ml/min dari tertinggi hingga terendah:

Tabel 4.2 Urutan Kapasitas Adsorpsi Terobosan pada Laju Alir Gas CO 10 ml/menit

Urutan ke	Adsorben	Waktu terobos (menit)	Kapasitas Adsorpsi (mmol/g)	Kapasitas Adsorpsi (1 atm, 27°C, ml/g)
1	Karbon Aktif	10,961	4,702	115,623
2	TiO ₂	8,906	3,847	94,709
3	MgO	7,563	3,252	80,116
4	Zeolit Sint,	5,409	2,320	57,055
5	CuO	0,375	0,161	3,951
6	ZAL	0,355	0,153	3,758

Setelah mendapatkan data kapasitas adsorpsi gas CO terhadap enam jenis adsorben pada laju alir 10 ml/menit, diambil 3 adsorben yang memiliki kapasitas

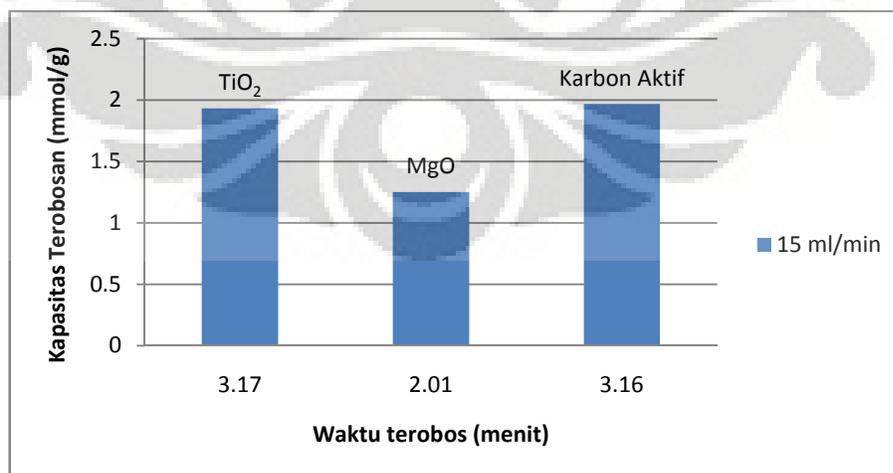
adsorpsi terbaik untuk dilakukan proses adsorpsi sama seperti di atas dengan laju alir yang berbeda yakni 15 ml/menit. Tiga adsorben terbaik diantaranya karbon aktif, TiO_2 , dan MgO . Berikut adalah hasil proses adsorpsi dengan laju alir 15 ml/menit:



Gambar 4.3 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi 6 Adsorben pada Laju Alir 15 ml/menit

Dari grafik pada gambar 4.1 dan 4.3 terlihat bahwa waktu terobos pada laju alir gas yang lebih besar (15 ml/min) nilainya lebih kecil dibandingkan waktu terobos pada laju alir 10 ml/min.

Jika kapasitas adsorpsi digambarkan dalam bentuk diagram seperti pada gambar di bawah ini, maka akan terlihat pula bahwa semakin lama waktu terobos, maka kapasitas adsorpsi terobosan juga akan semakin besar.



Gambar 4.4 Pengaruh Waktu Terobos terhadap Kapasitas Adsorpsi Berbagai Adsorben

Berikut ini adalah tabel urutan kapasitas adsorpsi terobosan pada laju alir gas CO 15 ml/min dari tertinggi hingga terendah:

Tabel 4.3 Urutan Kapasitas Adsorpsi Terobosan pada Laju Alir Gas CO 15 ml/menit

Urutan ke	Adsorben	Waktu terobos (menit)	Kapasitas Adsorpsi (mmol/g)	Kapasitas Adsorpsi (1 atm, 27°C, ml/g)
1	Karbon Aktif	3,157	1,970	48,493
2	TiO ₂	3,174	1,933	47,581
3	MgO	2,011	1,253	30,858

Dari percobaan dengan menggunakan variasi laju alir, 3 adsorben terbaik berdasarkan data eksperimen adalah TiO₂, Karbon Aktif dan MgO. Variasi laju alir tidak menunjukkan perbedaan adsorben terbaik dalam hal kapasitas adsorpsi. Perbedaan laju alir hanya mengindikasikan bahwa dengan semakin besarnya laju alir gas, maka kurva *breakthrough* akan semakin bergeser ke kiri, dan ini menunjukkan waktu terobos akan semakin singkat. Dengan singkatnya waktu terobos, maka nilai kapasitas adsorpsi juga akan semakin kecil. Hal ini disebabkan semakin besar laju alir gas, waktu tinggal gas di dalam kolom adsorpsi akan semakin sebentar sehingga semakin rendah efisiensinya. Gas juga akan semakin cepat terdeteksi di aliran keluaran kolom. Dari kurva *breakthrough* juga terlihat bahwa semakin ke kiri menandakan tingkat kejenuhan adsorben terhadap gas yang diadsorpsi akan semakin besar dengan bertambah besarnya laju alir gas.

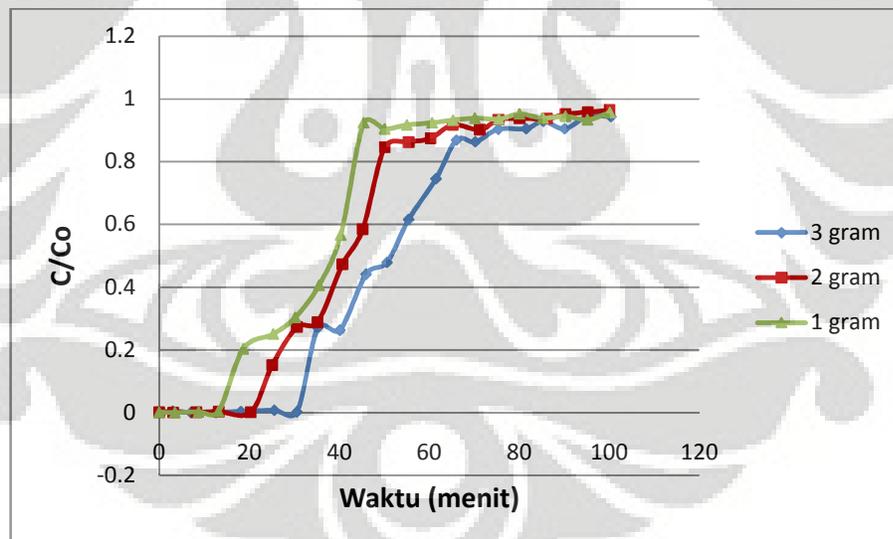
4.3.2 Uji Adsorpsi Gas CO dengan Variasi Jumlah Adsorben dalam Kolom

Untuk melihat efektifitas daya serap adsorben terhadap gas CO, akan dilakukan eksperimen dengan memvariasikan jumlah adsorben dalam kolom adsorben. Diambil tiga variasi jumlah adsorben, yakni 1 g, 2 g, 3 g. Adsorben yang diujikan hanya salah satu dari adsorben terbaik di eksperimen sebelumnya yakni TiO₂. Awalnya, dengan kondisi adsorben yang sama pada tahap uji adsorpsi sebelumnya, adsorben dalam jumlah lebih dari 1 g di dalam kolom adsorpsi menyebabkan *pressure drop* terlalu tinggi. Gas tersumbat oleh padatan yang terlalu banyak, sehingga tekanannya menurun dan gas tidak dapat mengalir

melewati adsorben tersebut. Untuk itu, diberikan perlakuan terhadap adsorben, agar dengan jumlah adsorben lebih dari 1 g di dalam kolom adsorpsi dapat terjadi proses adsorpsi dan fenomenanya dapat teramati.

Adsorben dibuat menjadi pelet dengan menggunakan tekanan sebesar 2 ton. Setelah dibuat pelet dengan ukuran tertentu, adsorben tersebut dihancurkan menjadi ukuran yang lebih kecil kemudian di saring kembali dengan ukuran saringan 125-250 μm . Tujuan dari pembuatan pelet ini adalah agar adsorben tersebut menjadi lebih padat, sehingga jika sebanyak 3 g adsorben tersebut diletakkan dalam kolom adsorpsi lalu dialirkan gas CO, tidak terjadi *pressure drop* yang terlalu tinggi sehingga gas CO dapat mengalir dan terjadilah proses adsorpsi yang kapasitasnya dapat diamati. Dengan perlakuan ini, tinggi adsorben di dalam kolom adsorpsi berbeda dari sebelumnya. Adsorben dengan berat 1 g memiliki tinggi 1,75 cm, 2 g memiliki tinggi 3,5 cm, dan 3 g memiliki tinggi 5 cm.

Berikut ini adalah kurva perbandingan kapasitas adsorpsi dengan variasi jumlah adsorben di dalam kolom:



Gambar 4.5 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi TiO_2 Pada Variasi Jumlah Dalam Kolom Adsorpsi

Berikut ini adalah tabel perbandingan kapasitas adsorpsi terobosan TiO_2 pada variasi jumlah adsorben di dalam kolom adsorpsi:

Tabel 4.4 Perbandingan Kapasitas Adsorpsi Terobosan TiO₂ pada Variasi Jumlah Dalam Kolom

Jumlah adsorben	Waktu terobos (menit)	Kapasitas Adsorpsi (mmol/g)	Kapasitas Adsorpsi (1 atm, 27°C, ml/g)
3 g	30,916	13,086	325,205
2 g	20,971	8,934	220,366
1 g	13,634	5,835	143,512

Jika dibandingkan, kapasitas adsorpsi dari variasi jumlah adsorben dalam kolom adsorpsi, terlihat bahwa semakin banyak jumlah adsorben yang ada di kolom adsorpsi dan semakin besar zona adsorpsi, kurva *breakthrough* akan semakin bergeser ke kanan, Hal ini menandakan maka waktu terobos akan semakin panjang dan kapasitas adsorpsi terobosan semakin besar. Dengan semakin banyaknya jumlah adsorben di dalam kolom maka penyerapan gas akan semakin besar.

4.3.3 Analisis BET

Luas permukaan 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 C. Dari uji BET didapatkan data luas permukaan dan ukuran pori dari 3 adsorben terbaik yang telah diujikan, yakni sebagai berikut :

Tabel 4.5 Luas Permukaan dan Ukuran Pori Melalui Uji BET

adsorben	Luas Permukaan (m ² /g)	Ukuran pori (°)
Karbon Aktif	758,1	66,9
TiO ₂	90,06	108,7
MgO	22,16	113

Dari Tabel 4.5 diatas, dapat dibandingkan nilai luas permukaan dan ukuran pori dari tiga adsorben yang diujikan. Berdasarkan luas permukaan, karbon aktif

memiliki luas permukaan paling besar dibandingkan MgO dan TiO₂. Hal ini sesuai dengan kapasitas adsorpsi dari karbon aktif dimana karbon aktif menempati urutan tertinggi dibandingkan dengan TiO₂ dan MgO. 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 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, dapat dilihat pada Tabel 4.5. Hal ini memperlihatkan bahwa proses adsorpsi dalam penelitian ini dapat berlangsung.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

1. Adsorpsi karbon aktif terhadap gas CO pada laju alir gas CO sebesar 10 ml/menit dengan waktu terobos sebesar 10,961 menit dan kapasitas adsorpsi sebesar $115,623 \text{ ml/g} = 4,702 \text{ mmol/g}$ merupakan adsorben terbaik yang dapat digunakan untuk mengadsorp gas CO pada suhu 27°C dan tekanan 1 atm dibandingkan oksida logam seperti TiO_2 , MgO , CuO , Zeolit Alam dan Zeolit Sintetis.
2. Penambahan nilai laju alir dalam proses adsorpsi membuat waktu tinggal gas dalam kolom semakin cepat, kurva *breakthrough* semakin bergeser ke kiri, dan ini menandakan waktu terobos serta kapasitas adsorpsi terobosan semakin kecil.
3. Semakin besar jumlah adsorben di dalam kolom adsorpsi akan semakin meningkatkan kapasitas adsorpsi, hal ini ditandai dengan waktu terobos yang semakin panjang dengan bertambahnya jumlah adsorban di dalam kolom.
4. Seiring dengan bertambahnya waktu, proses penyerapan gas semakin berkurang, hal ini disebabkan oleh adsorben yang semakin lama mengalami kejenuhan, hingga pada waktu tertentu tidak dapat lagi mengadsorp gas yang dilewatkan.
5. Berdasarkan luas permukaan dari hasil uji BET, terlihat bahwa karbon aktif dengan luas permukaan terbesar yakni $758,1 \text{ m}^2/\text{g}$ memiliki kapasitas adsorpsi paling besar.

5.2 SARAN

1. Dalam proses adsorpsi, gas yang dialirkan tidak hanya gas murni, akan tetapi perbandingan antara gas utama dan gas *carier* (pembawaan), agar laju alir gas utama dapat di set sekecil mungkin.

2. Gas yang dialirkan sebaiknya menggunakan gas asli yang berasal dari proses pembakaran (bukan gas murni) agar hasil lebih akurat dan dapat diaplikasikan pada kasus kebakaran yang sesungguhnya.



DAFTAR PUSTAKA

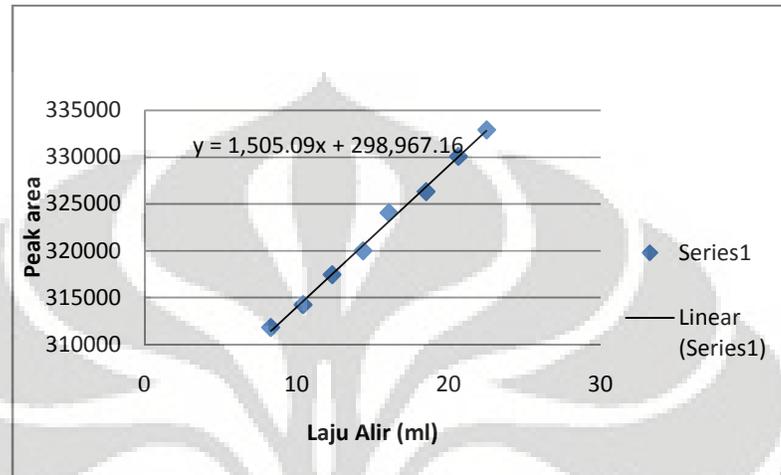
- Apriawan. 2009. Adsorpsi Gas CO pada Kasus Kebakaran Menggunakan Zeolit Alam Teraktifasi. Skripsi. Depok: Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Basuki, Tri Kris, dkk. 2008. Penurunan Konsentrasi CO dan NO₂ pada Emisi Gas Buang Menggunakan Arang Tempurung Kelapa yang Disisipi TiO₂. Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir. Yogyakarta.
- Bird, Tony. 1987. *Kimia Fisika untuk Universitas*. Jakarta: Gramedia.
- Eddy, Hery Rodiana. *Potensi dan Pemanfaatan Zeolit di Provinsi Jawa Barat dan Banten*. <http://www.dim.esdm.go.id>. 3 agustus 2007 (diakses tanggal 27 Februari 2009)
- Gosh,R. 2005. *Adsorption*. Mc. Master.
- 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.
- Jadhav, P.D., et al. 2007. *Monoethanol Amine Modified Zeolite 13X for CO₂ Adsorption at Different Temperatures*. National Environmental Engineering Research Institute, India. Energy and Fuels, 21, 3555-3559.
- Jauhari, Ahmad. *Carbon Diokida Bersifat Racun Merabolis*. <http://enviroreview.blogspot.com/>. 7 September 2008.
- John, Mc. Ketta. *Unit Operation Handbook*. Vol.1. New York: Marcel Dekker Inc.
- Kananpanah, Somayeh, et al. 2009. *Breakthrough Curve Studies of Purolite A-400 in An Adsorption Column*. Iran: Chemical Engineering Department, Tehran University. Petroleum & Coal 51, 189-192.
- Las, DR Thamzil. *Potensi Zeolit untuk Mengolah Industri dan Radioaktif*. www.batan.go.id. 28 September 2008. (diakses tanggal 27 Februari 2009)
- Lee, Jong-Seok, et al. 2002. *Adsorption Equilibria of CO₂ on Zeolite 13X and Zeolite X/A activated Carbon Composite*. Journal of Chemical and Engineering Data, 47, 1237-1242.

- Maron and Lando. 1983. *Fundamental of Physical Chemistry*. New York: Macmillan Publishing.
- Othmer. *Encyclopedia of Chemical Technology*. 4th ed. Willey interscience (1994).
- Prihatama, Yuda. 2009. Preparasi Zeolit Alam Lampung dengan Metode Dealuminasi dan Kalsinasi untuk Adsorpsi Gas CO. Skripsi. Depok: Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Siriwardane, Ranjani V, et al. 2002. *Adsorption of CO₂, N₂, and O₂ on natural Zeolites*. Energy and Fuels 17, 571-576.
- 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 Juni 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*. Tugas Akhir. 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. Microporous and Mesoporous Materials, 60, 125–138.
- Yadav R, R.G. Maghirang, L.E., Erickson, B. Kakumanu, S.G., Castro, 2008. *Laboratory Evaluation of the Effectiveness of Nanostructured and Conventional particles in Clearing Smoke in Enclosed Space*. Fire Safety Journal, 43, 36–41.

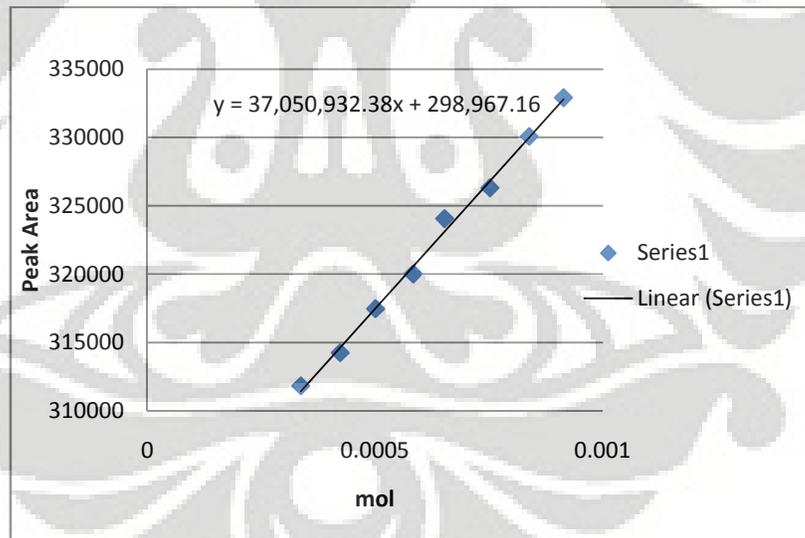
- Ying H.Z, Liu Q.F, Li Y.G, Li Wang L., Xiong X.C, 2008. *Selection of Adsorbent for in_situ Coupling Technology and Adsorptive Desulfurization and bidesulfurization*. Science in China Press.
- Anonim. *Karbon Dioksida*. <http://www.wikipedia.org>. 26 Januari 2009. (diakses tanggal 27 Februari 2009)
- Anonim. *Karbon Monoksida*. <http://www.wikipedia.org>. 23 Februari 2009 (diakses tanggal 27 Februari 2009)
- Anonim. *Karbon Dioksida*. www.anekagas.com. 2008. (diakses tanggal 27 Februari 2009)
- Anonim. *Zeolit*. www.tasikmalayakab.go.id. 21 Juli 2008. (diakses tanggal 27 Februari 2009)
- Anonim. *Pembentukan Zeolit*. www.tekmira.esdm.go.id. 2008. (diakses tanggal 27 Februari 2009)
- Anonim. *Karakterisasi Zeolit Alam Lampung*. Laboratorium Pertamina Pulogadung.

LAMPIRAN A
KURVA KALIBRASI UNTUK GAS CROMATOGRAPHY

1. Kurva kalibrasi gas CO tanpa adsorben dalam satuan laju alir ml/min



2. Kurva kalibrasi gas CO tanpa adsorben dalam satuan laju alir mmol/min



LAMPIRAN B
DATA PERCOBAAN

1. TiO₂ yang dialirkan gas CO dengan laju 10 ml/min

menit ke	t buble	Q aktual	Q (mmol)	peak area	flow gas keluaran GC (mmol)	flow gas teradsorpsi (mmol)	C/Co
0	28.53	10.515	0.4271521	298970	7.66512E-05	0.427075495	0.00017945
3.43	28.42	10.555	0.4288054	298975	0.000211601	0.428593844	0.00049347
8.54	28.88	10.387	0.4219754	298982	0.00040053	0.421574912	0.00094918
13.59	28.21	10.6345	0.4319975	303546	0.123582315	0.30841523	0.2860718
20.71	28.21	10.6345	0.4319975	306354	0.199369882	0.232627663	0.46150698
25.62	28.32	10.5932	0.4303196	307843	0.239557804	0.190761784	0.55669742
30.74	28.44	10.5485	0.4285039	310740	0.317747469	0.110756425	0.74152761
35.02	28.52	10.5189	0.4273019	310932	0.322929525	0.104372394	0.75574087
40.8	28.39	10.5671	0.4292586	311270	0.332052103	0.097206465	0.77354799
45.4	28.72	10.4457	0.4243263	311450	0.33691028	0.087415999	0.79398872
50.32	28.62	10.4822	0.4258089	312429	0.363333367	0.062475534	0.853278
55.95	28.54	10.5116	0.4270025	312645	0.369163179	0.057839299	0.86454575
60.21	28.52	10.5189	0.4273019	313038	0.3797702	0.047531719	0.88876315
65.08	28.54	10.5116	0.4270025	313166	0.383224904	0.043777575	0.897477
71.96	28.55	10.5079	0.4268529	313499	0.392212532	0.034640384	0.91884703
75.22	28.44	10.5485	0.4285039	313521	0.392806309	0.035697585	0.91669251
80.13	28.55	10.5079	0.4268529	313532	0.393103198	0.033749718	0.92093361
86.96	28.54	10.5116	0.4270025	313765	0.399391838	0.02761064	0.93533845
90.5	28.52	10.5189	0.4273019	313762	0.399310869	0.027991051	0.93449351
95.38	28.44	10.5485	0.4285039	313823	0.400957251	0.027546643	0.93571437
101.96	28.62	10.4822	0.4258089	313932	0.403899147	0.021909753	0.94854557

2. MgO yang dialirkan gas CO dengan laju 10 ml/min

menit ke	t buble	Q aktual	Q (mmol)	peak area	flow gas keluaran GC (mmol)	flow gas teradsorpsi (mmol)	C/Co
0	28.34	10.5857	0.4300159	298991	0.000643439	0.429372466	0.00149631
2.3	28.34	10.5857	0.4300159	299002	0.000940327	0.429075578	0.00218673
7.3	28.45	10.5448	0.4283533	298998	0.000832368	0.42752091	0.00194318
11.86	28.32	10.5932	0.4303196	304409	0.146874576	0.283445012	0.34131511
17.91	28.32	10.5932	0.4303196	304827	0.158156344	0.272163245	0.36753229
25.3	28.33	10.5895	0.4301677	305873	0.186387752	0.243779941	0.43329091
32.17	28.34	10.5857	0.4300159	310212	0.303496816	0.126519089	0.70578044
40.2	28.35	10.582	0.4298642	310682	0.316182057	0.113682167	0.73553936

45.05	28.44	10.5485	0.4285039	311497	0.338178804	0.09032509	0.78920824
52.47	28.52	10.5189	0.4273019	311382	0.335074968	0.092226951	0.78416444
60.3	28.35	10.582	0.4298642	311640	0.342038356	0.087825868	0.79568928
65.47	28.34	10.5857	0.4300159	311790	0.346086837	0.083929068	0.80482334
70.26	28.45	10.5448	0.4283533	311796	0.346248776	0.082104501	0.80832526
75.42	28.45	10.5448	0.4283533	311689	0.34336086	0.084992418	0.80158336
80.09	28.52	10.5189	0.4273019	312235	0.358097331	0.069204588	0.83804288
85.47	28.44	10.5485	0.4285039	312534	0.366167303	0.06233659	0.85452503
90.4	28.35	10.582	0.4298642	313753	0.39906796	0.030796264	0.92835816
95.61	28.35	10.582	0.4298642	313955	0.404519915	0.025344309	0.94104113
100.47	28.34	10.5857	0.4300159	313952	0.404438945	0.02557696	0.9405209

3. CuO yang dialirkan gas CO dengan laju 10 ml/min

menit ke	t buble	Qaktual	Q (mmol)	peak area	flow gas keluaran GC (mmol)	flow gas teradsorpsi (mmol)	C/Co
0	28.33	10.5895	0.4301677	298978	0.00029257	0.429875123	0.00068013
2.3	28.44	10.5485	0.4285039	301000	0.054866096	0.373637798	0.12804107
7.3	28.32	10.5932	0.4303196	302560	0.096970299	0.333349289	0.22534484
12.3	28.29	10.6045	0.4307759	305036	0.163797227	0.266978691	0.38023766
17	28.4	10.5634	0.4291074	305954	0.188573932	0.240533489	0.43945624
22.5	28.33	10.5895	0.4301677	308473	0.256561425	0.173606268	0.59642188
30.65	28.4	10.5634	0.4291074	311823	0.346977503	0.082129918	0.8086029
35.11	28.52	10.5189	0.4273019	311934	0.349973379	0.07732854	0.81903067
40.65	28.43	10.5522	0.4286546	312073	0.353724971	0.074929645	0.82519809
45.2	28.44	10.5485	0.4285039	312566	0.367030979	0.061472914	0.85654059
50.16	28.44	10.5485	0.4285039	312982	0.378258767	0.050245127	0.88274289
56.02	28.33	10.5895	0.4301677	312457	0.364089083	0.06607861	0.84638872
60.04	28.29	10.6045	0.4307759	312866	0.375127942	0.055647977	0.8708192
65.3	28.43	10.5522	0.4286546	313781	0.399823676	0.02883094	0.93274086
70.26	28.44	10.5485	0.4285039	313788	0.400012606	0.028491288	0.93350985
79.02	28.52	10.5189	0.4273019	313654	0.396395962	0.030905957	0.92767185
85.8	28.4	10.5634	0.4291074	313666	0.396719841	0.03238758	0.92452338
89.02	28.43	10.5522	0.4286546	313865	0.402090826	0.02656379	0.93802985
90.12	28.4	10.5634	0.4291074	314011	0.406031347	0.023076073	0.94622309
94.05	28.52	10.5189	0.4273019	313968	0.404870783	0.022431137	0.94750518
100	28.43	10.5522	0.4286546	313977	0.405113692	0.023540925	0.94508184

4. Karbon aktif yang dialirkan gas CO dengan laju 10 ml/min

menit ke	t bubble	Qaktual	Q (mmol)	peak area	flow gas keluaran GC (mmol)	flow gas teradsorpsi (mmol)	C/Co
0	28.35	10.582	0.4298642	298969	4.96614E-05	0.429814562	0.00011553
3.03	28.33	10.5895	0.4301677	298975	0.000211601	0.429956092	0.0004919
8.23	28.35	10.582	0.4298642	299051	0.002262831	0.427601393	0.00526406
13.34	28.33	10.5895	0.4301677	299533	0.01527195	0.414895743	0.03550232
18.38	28.44	10.5485	0.4285039	301946	0.080398517	0.348105377	0.1876261
25.2	28.35	10.582	0.4298642	307024	0.217453097	0.212411127	0.50586461
28.45	28.45	10.5448	0.4283533	306990	0.216535441	0.211817836	0.50550668
35.18	28.35	10.582	0.4298642	307346	0.226143837	0.203720387	0.52608201
38.53	28.51	10.5226	0.4274518	307608	0.233215184	0.194236614	0.54559411
45.08	28.45	10.5448	0.4283533	308675	0.262013379	0.166339898	0.61167591
50.11	28.51	10.5226	0.4274518	308856	0.266898547	0.160553251	0.62439449
54.57	28.43	10.5522	0.4286546	310954	0.323523302	0.105131314	0.75474121
60.6	28.51	10.5226	0.4274518	311277	0.332241032	0.095210766	0.77725964
69.87	28.44	10.5485	0.4285039	311906	0.349217663	0.079286231	0.81496964
75.3	28.45	10.5448	0.4283533	312068	0.353590022	0.074763255	0.82546356
80	28.33	10.5895	0.4301677	312592	0.367732716	0.062434977	0.85485898
85	28.45	10.5448	0.4283533	312989	0.378447696	0.049905581	0.88349434
91	28.43	10.5522	0.4286546	313696	0.397529537	0.031125079	0.92738891
95	28.45	10.5448	0.4283533	313743	0.398798061	0.029555216	0.93100271
100	28.33	10.5895	0.4301677	313442	0.390674109	0.039493584	0.90819026

5. Zeolit alam yang dialirkan gas CO dengan laju 10 ml/min

menit ke	t bubble	Qaktual	Q (mmol)	peak area	flow gas keluaran GC (mmol)	flow gas teradsorpsi (mmol)	C/Co
0	28.32	10.5932	0.4303196	299011	0.001183236	0.429136352	0.00274967
3.22	28.34	10.5857	0.4300159	301721	0.074325795	0.35569011	0.17284429
7.24	28.34	10.5857	0.4300159	306697	0.208627408	0.221388496	0.48516207
13.31	28.32	10.5932	0.4303196	307261	0.223849697	0.206469891	0.52019407
19.86	28.43	10.5522	0.4286546	310512	0.311593778	0.117060838	0.72691105
25.05	28.44	10.5485	0.4285039	311438	0.336586401	0.091917492	0.78549205
31.41	28.45	10.5448	0.4283533	312462	0.364224033	0.064129245	0.85028889
36.87	28.45	10.5448	0.4283533	312966	0.377826929	0.050526348	0.88204515
40.3	28.51	10.5226	0.4274518	312554	0.366707101	0.060744696	0.85789112
45.88	28.34	10.5857	0.4300159	313966	0.404816803	0.025199102	0.94139961
50.08	28.51	10.5226	0.4274518	312657	0.369487058	0.057964739	0.86439468
55.88	28.43	10.5522	0.4286546	313966	0.404816803	0.023837813	0.94438923
60	28.51	10.5226	0.4274518	313638	0.395964124	0.031487673	0.92633632

65	28.44	10.5485	0.4285039	313577	0.394317742	0.034186152	0.92021974
70.29	28.44	10.5485	0.4285039	313893	0.402846542	0.025657352	0.94012341
75.21	28.51	10.5226	0.4274518	313764	0.399364849	0.028086949	0.93429213
80.04	28.45	10.5448	0.4283533	313673	0.39690877	0.031444507	0.92659212
85.29	28.34	10.5857	0.4300159	313943	0.404196036	0.025819869	0.93995601
90.03	28.34	10.5857	0.4300159	313855	0.401820927	0.028194978	0.93443271
95	28.51	10.5226	0.4274518	313729	0.398420203	0.029031594	0.93208218
108.29	28.45	10.5448	0.4283533	313924	0.403683228	0.024670049	0.94240724

6. Zeolit sintetis yang dialirkan gas CO dengan laju 10 ml/min

menit ke	t bubble	Qaktual	Q (mmol)	peak area	flow gas keluaran GC (mmol)	flow gas teradsorpsi (mmol)	C/Co
0	28.34	10.5857	0.4300159	298972	0.000130631	0.429885274	0.00030378
1.39	28.52	10.5189	0.4273019	299021	0.001453135	0.425848785	0.00340072
4.8	28.46	10.5411	0.4282028	299001	0.000913337	0.427289429	0.00213296
8.23	28.44	10.5485	0.4285039	299139	0.00463794	0.423865954	0.01082357
12.6	28.39	10.5671	0.4292586	304502	0.149384635	0.279873933	0.34800618
16.19	28.43	10.5522	0.4286546	312561	0.36689603	0.061758586	0.8559246
25.67	28.42	10.5559	0.4288054	312620	0.368488433	0.060317012	0.85933711
30.3	28.51	10.5226	0.4274518	311988	0.351430832	0.076020965	0.82215313
38.12	28.5	10.5263	0.4276018	312629	0.368731341	0.058870439	0.86232415
45.05	28.34	10.5857	0.4300159	312566	0.367030979	0.062984925	0.85352885
49.12	28.52	10.5189	0.4273019	313072	0.380687856	0.046614064	0.89091071
55.2	28.43	10.5522	0.4286546	312893	0.375856668	0.052797948	0.8768287
60	28.39	10.5671	0.4292586	312754	0.372105076	0.057153492	0.86685533
65	28.43	10.5522	0.4286546	312934	0.376963253	0.051691363	0.87941023
71.12	28.34	10.5857	0.4300159	313262	0.385815932	0.044199973	0.89721317
75.13	28.39	10.5671	0.4292586	313434	0.39045819	0.038800378	0.90961071
80	28.34	10.5857	0.4300159	313211	0.384439448	0.045576457	0.89401216
85.12	28.51	10.5226	0.4274518	314010	0.406004358	0.02144744	0.94982489
90	28.44	10.5485	0.4285039	313998	0.405680479	0.022823415	0.94673697
95	28.39	10.5671	0.4292586	314004	0.405842418	0.02341615	0.94544978
100	28.43	10.5522	0.4286546	313976	0.405086702	0.023567914	0.94501887

7. TiO₂ yang dialirkan gas CO dengan laju 15 ml/min

menit ke	t buble	Qaktual	Q(mmol)	peak area	flow gas keluaran GC (mmol)	flow gas teradsorpsi (mmol)	C/Co
0	19.53	15.36098	0.623996	299124	0.004233092	0.619763362	0.00678384
3.3	19.52	15.36885	0.624316	299934	0.02609489	0.598221234	0.041797559
8.6	20.01	14.9925	0.609028	310653	0.31539935	0.293628673	0.517873297
13.55	19.58	15.32176	0.622403	311443	0.336721351	0.285681649	0.541002133
20.7	19.5	15.38462	0.624956	311512	0.338583652	0.286372796	0.541771595
25.42	20.02	14.98501	0.608724	314943	0.43118591	0.177537903	0.708344081
30.56	19.4	15.46392	0.628178	316832	0.482169782	0.146008091	0.767568873
35.1	19.49	15.39251	0.625277	318932	0.538848518	0.086428585	0.861775547
40.8	19.55	15.34527	0.623358	318664	0.531615232	0.091742863	0.852824783
45.2	19.55	15.34527	0.623358	318543	0.528349457	0.095008637	0.847585781
50.21	19.49	15.39251	0.625277	320355	0.577255109	0.048021995	0.92319886
55.75	19.5	15.38462	0.624956	319943	0.566135281	0.058821168	0.905879573
60.3	19.49	15.39251	0.625277	319832	0.563139405	0.062137699	0.900623742
65.1	19.5	15.38462	0.624956	320488	0.580844762	0.044111686	0.929416383
71.83	19.55	15.34527	0.623358	320322	0.576364443	0.046993651	0.92461211
75.2	19.52	15.36885	0.624316	320986	0.594285719	0.030030405	0.95189872
80.17	19.55	15.34527	0.623358	321044	0.595851132	0.027506962	0.955872936
86.68	19.58	15.32176	0.622403	321478	0.607564737	0.014838263	0.976159718
90.3	19.55	15.34527	0.623358	321396	0.605351568	0.018006527	0.971113672
95.27	19.52	15.36885	0.624316	321975	0.620978705	0.003337419	0.99465428
101.54	19.52	15.36885	0.624316	322045	0.622867996	0.001448128	0.997680457

8. MgO yang dialirkan gas CO dengan laju 15 ml/min

menit ke	t buble	Qaktual	Q(mmol)	peak area	flow gas keluaran GC (mmol)	flow gas teradsorpsi (mmol)	C/Co
0	19.28	15.56017	0.632088	300224	0.033921953	0.598165741	0.05366653
2.23	19.5	15.38462	0.624956	300102	0.030629189	0.59432726	0.049010117
7.4	19.55	15.34527	0.623358	309823	0.292997755	0.330360339	0.470031203
11.66	19.53	15.36098	0.623996	312392	0.362334741	0.261661712	0.58066795
17.82	19.58	15.32176	0.622403	312443	0.363711225	0.258691775	0.584366118
25.31	19.53	15.36098	0.623996	312932	0.376909273	0.24708718	0.604024704
32.27	19.53	15.36098	0.623996	315988	0.459390329	0.164606125	0.736206634
40.13	19.48	15.40041	0.625598	318299	0.521763928	0.10383416	0.834024173
45.4	19.48	15.40041	0.625598	318442	0.52562348	0.099974608	0.840193553
52.33	19.58	15.32176	0.622403	318763	0.534287229	0.088115771	0.8584265
60.2	19.55	15.34527	0.623358	321021	0.595230365	0.028127729	0.954877093
65.21	19.58	15.32176	0.622403	320743	0.58772718	0.03467582	0.94428719

70.3	19.53	15.36098	0.623996	320445	0.579684197	0.044312256	0.928986365
75.3	19.51	15.37673	0.624636	321843	0.617416041	0.007220081	0.988441141
80	19.53	15.36098	0.623996	320328	0.576526382	0.047470072	0.923925735
85.52	19.52	15.36885	0.624316	321378	0.60486575	0.019450374	0.968845312
90.24	19.53	15.36098	0.623996	322019	0.622166259	0.001830195	0.997066979
95.45	19.58	15.32176	0.622403	321883	0.618495636	0.003907364	0.993722132
100.3	19.58	15.32176	0.622403	320754	0.588024069	0.034378932	0.944764194

9. Karbon aktif yang dialirkan gas CO dengan laju 15 ml/min

menit ke	t buble	Qaktual	Q (mmol)	peak area	flow gas keluaran GC (mmol)	flow gas teradsorpsi (mmol)	C/Co
0	19.53	15.36098	0.623996	299132	0.004449011	0.619547443	0.007129866
3.1	19.53	15.36098	0.623996	299598	0.017026292	0.606970162	0.02728588
8.44	19.53	15.36098	0.623996	308089	0.246197313	0.377799141	0.394549218
13.27	19.58	15.32176	0.622403	310692	0.316451955	0.305951045	0.508435781
18.48	19.58	15.32176	0.622403	311723	0.344278516	0.278124485	0.553144049
25.3	19.55	15.34527	0.623358	311892	0.348839804	0.27451829	0.55961382
28.5	19.53	15.36098	0.623996	312978	0.378150808	0.245845646	0.606014354
35.21	19.52	15.36885	0.624316	315022	0.43331811	0.190998014	0.694068427
38.4	19.58	15.32176	0.622403	316234	0.466029838	0.156373163	0.748758983
45.1	19.55	15.34527	0.623358	318038	0.51471957	0.108638524	0.825720521
50.2	19.55	15.34527	0.623358	317964	0.51272232	0.110635774	0.822516503
54.6	19.53	15.36098	0.623996	317889	0.510698079	0.113298375	0.81843106
60.2	19.53	15.36098	0.623996	318921	0.538551629	0.085444825	0.863068413
69.6	19.58	15.32176	0.622403	321093	0.597173636	0.025229364	0.959464584
75.4	19.58	15.32176	0.622403	320653	0.585298091	0.037104909	0.940384431
80.1	19.52	15.36885	0.624316	320192	0.572855759	0.051460365	0.917573225
85.04	19.52	15.36885	0.624316	321673	0.612827763	0.011488361	0.981598487
91.3	19.55	15.34527	0.623358	321302	0.60281452	0.020543575	0.967043703
95.22	19.58	15.32176	0.622403	321732	0.614420165	0.007982835	0.98717417
100	19.58	15.32176	0.622403	321632	0.611721178	0.010681822	0.982837772

10. TiO₂ sebanyak 1 g yang dialirkan CO dengan laju 10 ml/min

menit ke	t buble	Qaktual	Q (mmol)	peak area	flow gas keluaran GC (mmol)	flow gas teradsorpsi (mmol)	C/Co
0	28.54	10.51156	0.427002479	298988	0.000562469	0.42644001	0.0013172
3.5	28.52	10.51893	0.427301919	298974	0.000184611	0.427117309	0.000432
8.75	28.55	10.50788	0.426852916	299007	0.001075277	0.425777639	0.0025191

13.16	28.54	10.51156	0.427002479	299034	0.001804003	0.425198476	0.0042248
18.66	28.5	10.52632	0.42760178	302187	0.086903076	0.340698704	0.2032337
25.34	28.52	10.51893	0.427301919	302936	0.107118492	0.320183428	0.2506857
30.21	28.49	10.53001	0.427751869	303782	0.129951925	0.297799943	0.3038021
35.5	28.55	10.50788	0.426852916	305389	0.173324653	0.253528263	0.4060524
40.3	28.54	10.51156	0.427002479	307921	0.241663014	0.185339464	0.5659523
45.4	28.5	10.52632	0.42760178	313599	0.394911519	0.032690261	0.9235498
50.07	28.52	10.51893	0.427301919	313281	0.386328739	0.04097318	0.9041119
55	28.55	10.50788	0.426852916	313463	0.391240896	0.035612019	0.9165707
60.6	28.52	10.51893	0.427301919	313592	0.39472259	0.032579329	0.9237557
65.23	28.54	10.51156	0.427002479	313710	0.397907395	0.029095083	0.931862
70.09	28.52	10.51893	0.427301919	313825	0.401011231	0.026290689	0.9384728
75.41	28.54	10.51156	0.427002479	313766	0.399418828	0.02758365	0.9354017
80	28.55	10.50788	0.426852916	314021	0.406301246	0.020551669	0.951853
85.21	28.5	10.52632	0.42760178	313834	0.40125414	0.026347641	0.9383828
90.22	28.52	10.51893	0.427301919	313922	0.403629249	0.023672671	0.9445997
95.1	28.54	10.51156	0.427002479	313732	0.398501173	0.028501306	0.9332526
100.06	28.55	10.50788	0.426852916	314092	0.408217527	0.018635388	0.9563424

11. TiO₂ sebanyak 2 g yang dialirkan CO dengan laju 10 ml/min

menit ke	t buble	Qaktual	Q (mmol)	peak area	flow gas keluaran GC (mmol)	flow gas teradsorpsi (mmol)	C/Co
0	28.54	10.51156	0.42700248	298982	0.00040053	0.426601949	0.000938
3.1	28.55	10.50788	0.42685292	298978	0.00029257	0.426560345	0.000685
8.26	28.52	10.51893	0.42730192	298981	0.00037354	0.42692838	0.000874
13.22	28.54	10.51156	0.42700248	299012	0.001210226	0.425792253	0.002834
20.32	28.56	10.5042	0.42670346	298981	0.00037354	0.426329918	0.000875
25.11	28.55	10.50788	0.42685292	301361	0.06460944	0.362243475	0.151362
30.6	28.54	10.51156	0.42700248	303289	0.116645917	0.310356561	0.273174
35.15	28.5	10.52632	0.42760178	303527	0.123069507	0.304532273	0.287813
40.7	28.52	10.51893	0.42730192	306442	0.20174499	0.225556929	0.472137
45.2	28.54	10.51156	0.42700248	308213	0.249544057	0.177458421	0.584409
50.09	28.55	10.50788	0.42685292	312344	0.361039227	0.065813688	0.845816
55.38	28.5	10.52632	0.42760178	312632	0.368812311	0.058789469	0.862514
60.26	28.49	10.53001	0.42775187	312821	0.373913397	0.053838472	0.874136

65.17	28.52	10.51893	0.42730192	313488	0.391915643	0.035386276	0.917187
71.2	28.52	10.51893	0.42730192	313245	0.385357104	0.041944816	0.901838
75.32	28.55	10.50788	0.42685292	313732	0.398501173	0.028351743	0.93358
80.05	28.5	10.52632	0.42760178	313821	0.400903271	0.026698509	0.937562
86.12	28.54	10.51156	0.42700248	313792	0.400120565	0.026881914	0.937045
90.23	28.55	10.50788	0.42685292	314015	0.406139307	0.020713609	0.951474
95.17	28.54	10.51156	0.42700248	314122	0.409027224	0.017975255	0.957904
100	28.52	10.51893	0.42730192	314231	0.41196912	0.0153328	0.964117

12. TiO₂ sebanyak 3 g yang dialirkan gas CO dengan laju 10 ml/min

menit ke	t buble	Qaktual	Q (mmol)	peak area	flow gas keluaran GC (mmol)	flow gas teradsorpsi (mmol)	C/Co
0	28.54	10.51156	0.427002479	298968	2.26715E-05	0.426979807	5.30945E-05
3	28.54	10.51156	0.427002479	299042	0.002019922	0.424982557	0.004730469
7.05	28.52	10.51893	0.427301919	298972	0.000130631	0.427171288	0.000305711
12.6	28.55	10.50788	0.426852916	298981	0.00037354	0.426479376	0.000875102
18.15	28.5	10.52632	0.42760178	299025	0.001561094	0.426040686	0.003650813
25.58	28.54	10.51156	0.427002479	299083	0.003126507	0.423875972	0.007321988
30.59	28.32	10.59322	0.430319588	299006	0.001048287	0.429271302	0.002436066
35.21	28.52	10.51893	0.427301919	303250	0.115593312	0.311708607	0.270519057
40.11	28.52	10.51893	0.427301919	303125	0.112219578	0.315082341	0.262623623
45.94	28.55	10.50788	0.426852916	305944	0.188304033	0.238548883	0.441145009
50.6	28.5	10.52632	0.42760178	306556	0.204821836	0.222779944	0.479001364
55.4	28.5	10.52632	0.42760178	308723	0.263308893	0.164292887	0.615780629
61.47	28.54	10.51156	0.427002479	310764	0.318395226	0.108607252	0.745651939
66.01	28.52	10.51893	0.427301919	312722	0.3712414	0.05606052	0.868803492
70.2	28.55	10.50788	0.426852916	312621	0.368515422	0.058337493	0.863331159
75.3	28.5	10.52632	0.42760178	313283	0.386382719	0.041219061	0.903604093
81.47	28.53	10.51525	0.427152147	313292	0.386625628	0.040526519	0.905123926
85.28	28.54	10.51156	0.427002479	313667	0.396746831	0.030255648	0.929144093
90.02	28.55	10.50788	0.426852916	313281	0.386328739	0.040524176	0.905062904
95.21	28.52	10.51893	0.427301919	313921	0.403602259	0.023699661	0.944536499
100.32	28.54	10.51156	0.427002479	313892	0.402819552	0.024182926	0.943365841

13. Fdfd

LAMPIRAN C
HASIL UJI BET

















