



UNIVERSITAS INDONESIA

**ADSORPSI GAS KARBON MONOKSIDA (CO) DAN
PENJERNIHAN ASAP KEBAKARAN MENGGUNAKAN
ZEOLIT ALAM LAMPUNG TERMODIFIKASI TiO₂**

SKRIPSI

**REZA SURAPUTRA
0806368156**

**FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA
DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**ADSORPSI GAS KARBON MONOKSIDA (CO) DAN
PENJERNIHAN ASAP KEBAKARAN MENGGUNAKAN
ZEOLIT ALAM LAMPUNG TERMODIFIKASI TiO₂**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
gelar Sarjana Teknik**

REZA SURAPUTRA

0806368156

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA

DEPARTEMEN TEKNIK KIMIA

DEPOK

JUNI 2011

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Reza Suraputra

NPM : 0806368156

Tanda tangan :

Tanggal : Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Reza Suraputra
NPM : 0806368156
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Adsorpsi Gas Karbon Monoksida (CO) dan
Penjernihan Asap Kebakaran Menggunakan Zeolit
Alam Lampung Termodifikasi TiO₂

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, MEng

(.....)

Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA

(.....)

Penguji 2 : Prof. Ir. Sutrasno Kartohardjono, MSc, PhD

(.....)

Penguji 3 : Ir. Setiadi, MEng

(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : Juni 2011

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah Subhana wa Ta'ala, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai 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 Wahyu Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia.
- 3) Ayah dan Ibu tercinta atas ketulusan cinta, kasih sayang, perhatian, bantuan, doa, dan dukungan yang selalu diberikan.
- 4) Bapak Ir. Dijan Supramono, M.Sc yang telah memberikan izin untuk menggunakan alat CO *analyzer*.
- 5) Seluruh dosen Departemen Teknik Kimia UI yang telah mengajar dan memberi ilmu pengetahuan dan wawasan di bidang ilmu teknik kimia.
- 6) Bapak Prof. Ir. Yulianto Sulisty Nugroho, M.Sc, Ph.D dari Departemen Teknik Mesin UI yang telah berkenan memberikan pinjaman opasitimeter untuk digunakan dalam penelitian ini.
- 7) Rekan-rekan di Balai Penelitian Bioteknologi Perkebunan Indonesia, Ibu Ida, Ibu Euis, Hariyana, Jumino, atas kebaikannya memberikan izin penulis untuk melakukan penelitian.
- 8) Milasari Herdiana Putri yang selalu memberikan *support* pada penulis, Gondang yang selalu membantu dalam penelitian ini, Sukma sebagai teman seperjuangan penelitian.
- 9) Teman-teman Ekstensi Teknik Kimia 2008 atas persahabatan dan dukungan selama kuliah dan penelitian.

- 10) Mang Ijal, Kang Jajat, dan teknisi laboran lainnya yang telah banyak membantu proses penelitian di laboratorium RPKA.
- 11) Mas Taufik atas bantuannya dalam mencari literatur di perpustakaan serta Mas Sriyono yang telah membantu dalam administrasi perkuliahan.
- 12) Cahyo dan Fakhurrozi (Teknik Mesin 2007) yang telah memperkenalkan alat opasitimeter pada penulis dan yang rela direpotkan pagi dan malam untuk membantu pengoperasian alat opasitimeter.

Akhir kata, saya berharap Allah Subhana wa Ta'ala berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tulisan ini bermanfaat bagi pembaca dan memberikan manfaat bagi dunia pendidikan dan ilmu pengetahuan.

Depok, Juni 2011

Penulis

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

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

Nama : Reza Suraputra
NPM : 0806368156
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

Adsorpsi Gas Karbon Monoksida (CO) dan Penjernihan Asap Kebakaran Menggunakan Zeolit Alam Lampung Termodifikasi TiO₂.

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 memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : Juni 2011

Yang menyatakan

(Reza Suraputra)

ABSTRAK

Nama : Reza Suraputra
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Adsorpsi Gas Karbon Monoksida (CO) dan Penjernihan Asap Kebakaran Menggunakan Zeolit Alam Lampung Termodifikasi TiO₂

Kebakaran merupakan salah satu penghasil gas karbon monoksida (CO) terbesar di udara. Menurut *National Bureau of Standard USA*, penyebab korban jiwa terbesar pada kebakaran adalah menghirup asap hasil kebakaran (*smoke inhalation*) sebesar 74%, tersengat panas sebesar 18%, dan penyebab lain sebesar 8%. Penelitian ini dilakukan untuk mengurangi kadar CO dan menjernihkan asap kebakaran menggunakan zeolit alam Lampung termodifikasi TiO₂. Hasil uji XRF menunjukkan rasio Si/Al meningkat dari 5,02 menjadi 13,29 setelah aktivasi, sedangkan hasil uji BET menunjukkan luas permukaan meningkat dari 33,85 m²/g menjadi 37,75 m²/g untuk zeolit alam Lampung 400 mesh, 40,06 m²/g untuk zeolit alam Lampung 400 nm, dan 44,41 m²/g untuk zeolit alam Lampung termodifikasi TiO₂. Zeolit alam Lampung termodifikasi TiO₂ ukuran 400 nm dengan massa 3 gram memiliki kapasitas adsorpsi CO paling tinggi (3,67 %) dan rasio t₁₀ penjernihan asap paling baik yaitu 0,45, 0,45, dan 0,48.

Kata Kunci:

Kebakaran, zeolit alam Lampung, TiO₂, adsorpsi karbon monoksida, penjernihan asap.

ABSTRACT

Name : Reza Suraputra
Study Program : Chemical Engineering
Title : Adsorption of Carbon Monoxide (CO) gas and Clearing
Fire Smoke Using Lampung Natural Zeolite Modified
TiO₂

Fire is one of the biggest producer carbon monoxide (CO) gas in the air. According to the *National Bureau of Standard* USA, the largest cause of fatalities in fire is smoke inhalation 74 %, heat stock of 18 %, and other cause 8 %. The research was done to reduce CO levels and smoke clearing fire using Lampung natural zeolite modified TiO₂. XRF test results showed the ratio of Si/Al increases from 5,02 to 13,29 after activation, while test results showed the BET surface area increased from 33,85 m²/g to 37,75 m²/g for Lampung natural zeolite 400 mesh, 40,06 m²/g for Lampung natural zeolite 400 nm, and 44,41 m²/g for Lampung natural zeolite modified TiO₂. Lampung natural zeolite modified TiO₂ 400 nm size with a mass 3 grams having the highest CO adsorption capacity (3,67 %) and the best ratio t₁₀ smoke purification that has a value of 0.45, 0.45, dan 0.48.

Key Word :

Fires, Lampung natural zeolite, TiO₂, carbon monoxide adsorption, smoke clearing.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Penulisan	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Kebakaran	6
2.2 Asap.....	7
2.2.1 Produksi dan Sifat Asap.....	7
2.2.2 Komposisi Asap.....	9
2.2.2.1 Karbon Monoksida (CO).....	10
2.2.2.2 Karbon Dioksida (CO ₂).....	13
2.2.2.3 Oksida Nitrogen (NO _x).....	13
2.2.2.4 Oksida Sulfur (SO _x).....	14
2.2.2.5 Zat Partikulat.....	14
2.2.3 Toksisitas Asap.....	14
2.2.4 Penjernihan Asap.....	16

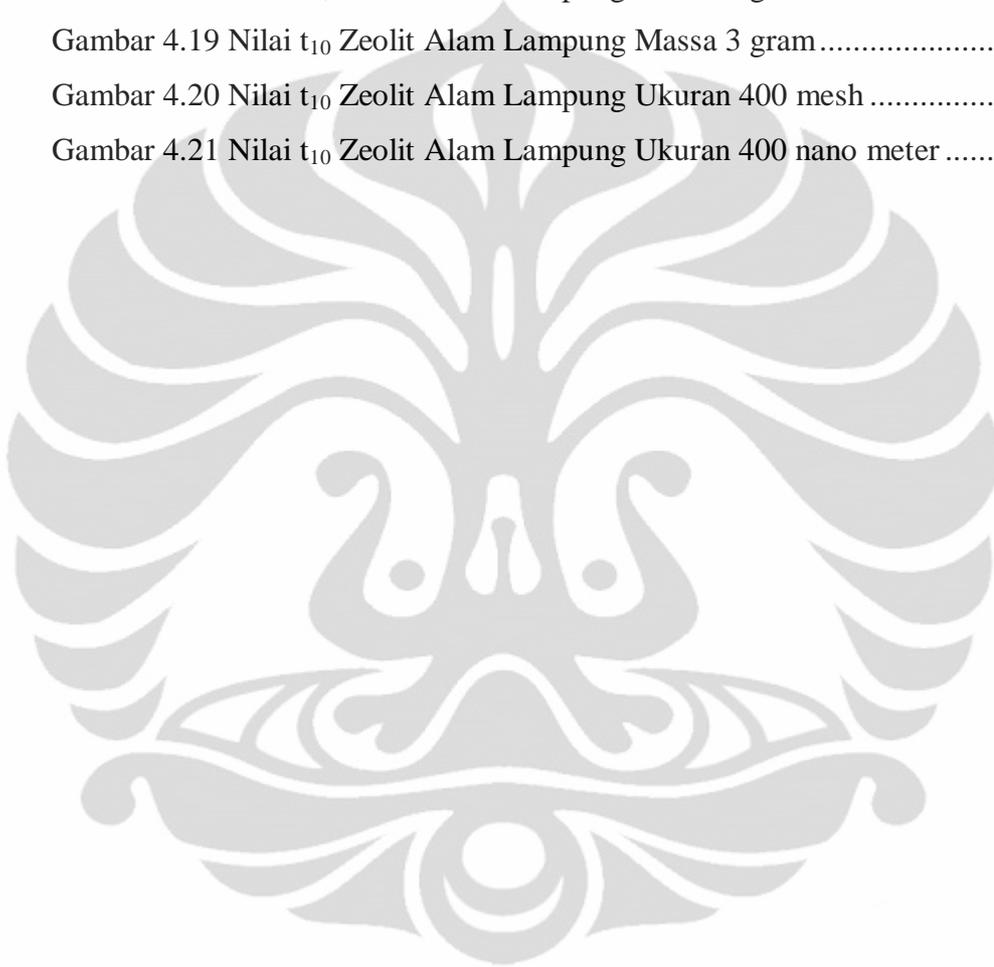
2.3 Opasitas	18
2.4 Adsorpsi.....	20
2.4.1 Jenis-Jenis Adsorpsi.....	20
2.4.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi.....	21
2.4.3 Kesetimbangan Adsorpsi	23
2.4.4 Model-Model Adsorpsi.....	23
2.5 Adsorben.....	25
2.5.1 Zeolit.....	26
2.5.2 Struktur Zeolit	27
2.5.3 Sifat Zeolit.....	28
2.5.4 Zeolit Alam Lampung.....	29
2.5.5 Aktivasi Zeolit.....	30
2.6 TiO ₂	31
2.7 Modifikasi Zeolit Alam Lampung dengan TiO ₂	32
BAB 3 METODE PENELITIAN	34
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	34
3.1.1 Modifikasi Zeolit Alam Lampung dengan TiO ₂	35
3.2 Peralatan Penelitian	36
3.2.1 Pembuatan Zeolit Alam Lampung Termodifikasi TiO ₂	36
3.2.2 Karakterisasi Zeolit Alam Lampung Termodifikasi TiO ₂	36
3.2.3 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran.....	37
3.3 Bahan-Bahan Penelitian	38
3.3.1 Preparasi dan Aktivasi Zeolit Alam Lampung	38
3.3.2 Preparasi dan Modifikasi Zeolit Alam Lampung TiO ₂	38
3.3.3 Uji adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran.....	39
3.3.4 Variabel dalam Penelitian	39
3.4 Prosedur Penelitian.....	39
3.4.1 Prosedur Aktivasi dan Modifikasi Adsorben	39
3.4.2 Karakterisasi Zeolit Alam Lampung Termodifikasi TiO ₂	41
3.4.2.1 Luas Permukaan Zeolit Alam Lampung	41
3.4.2.2 Rasio Si Terhadap Al	41
3.4.3 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran.....	42

3.5 Data Penelitian	43
3.6 Pengolahan Data.....	44
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	45
4.1 Aktivasi Zeolit Alam Lampung.....	45
4.2 Karakterisasi Zeolit Alam Lampung	46
4.2.1 Rasio Si Terhadap Al.....	46
4.2.2 Komposisi Pengotor.....	48
4.2.3 Luas Permukaan Zeolit Alam Lampung	50
4.3 Modifikasi Zeolit Alam Lampung dengan TiO ₂	51
4.4 Pembuatan Ruang Uji	51
4.5 Pembuatan Asap Kebakaran	52
4.6 Kalibrasi Opasitimeter	53
4.7 Uji adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran.....	54
4.7.1 Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Tanpa Adsorben.....	55
4.7.2 Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap dengan Zeolit Alam Lampung Tanpa TiO ₂	57
4.7.3 Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap dengan Zeolit Alam Lampung Termodifikasi TiO ₂	61
4.7.4 Pengaruh Ukuran Partikel dan Massa	63
4.7.4.1 Pengaruh Ukuran Partikel.....	63
4.7.4.2 Pengaruh Massa	66
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	71
5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran	72
DAFTAR PUSTAKA	73
LAMPIRAN	75

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Fungsi Respon Detektor, R(d), Terhadap Ukuran Partikel untuk Detektor S-2 (Penyebaran Ringan) dan R-2 (Ionisasi).....	9
Gambar 2.2 Persentase Opasitas Asap Ringelmann.....	19
Gambar 2.3 Tetrahedral Alumina dan Silika (TO ₄) pada Struktur Zeolit	27
Gambar 2.4 Proses Pelepasan Al dalam Rangka Menjadi Al diluar Rangka .	31
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	34
Gambar 3.2 Diagram Alir Preparasi Adsorben Zeolit Alam Lampung Termodifikasi TiO ₂	35
Gambar 3.3 Skema Ruang Uji.....	38
Gambar 4.1 Perendaman Zeolit Alam Lampung dalam Larutan HF 1 % dan HCl 6 M	46
Gambar 4.2 Rasio Si/Al pada Tiap Tahap Aktivasi Zeolit Alam Lampung ...	47
Gambar 4.3 Penurunan Oksida Pengotor pada Tiap Tahap Aktivasi.....	49
Gambar 4.4 Perbandingan Luas Permukaan Zeolit Alam Lampung.....	50
Gambar 4.5 Ruang Uji Adsorpsi Gas CO	52
Gambar 4.6 Wadah Pembakaran.....	52
Gambar 4.7 Skema <i>Light Source</i>	53
Gambar 4.8 Skema <i>Light Receiver</i>	53
Gambar 4.9 <i>Light Measurement System for Testing Smoke Development</i>	54
Gambar 4.10 Ruang Uji Penuh Asap	55
Gambar 4.11 Pengukuran Opasitas.....	56
Gambar 4.12 Pengukuran Konsentrasi CO dengan <i>CO Analyzer</i>	56
Gambar 4.13 Rasio Konsentrasi CO Tiap Menit dengan Konsentrasi Awal ...	57
Gambar 4.14 Zeolit Alam Lampung Sebelum Adsorpsi CO dan Penjernihan Asap.....	58
Gambar 4.15 Zeolit Alam Lampung Setelah Adsorpsi CO dan Penjernihan	

Asap.....	58
Gambar 4.16 Persen Adsorpsi CO Ukuran dan Variasi Massa Zeolit Alam Lampung Aktif	59
Gambar 4.17 Persen Adsorpsi CO Ukuran dan Variasi Massa Zeolit Alam Lampung Termodifikasi TiO ₂	61
Gambar 4.18 Nilai t ₁₀ Zeolit Alam Lampung Massa 1 gram.....	64
Gambar 4.19 Nilai t ₁₀ Zeolit Alam Lampung Massa 3 gram.....	66
Gambar 4.20 Nilai t ₁₀ Zeolit Alam Lampung Ukuran 400 mesh	68
Gambar 4.21 Nilai t ₁₀ Zeolit Alam Lampung Ukuran 400 nano meter	69



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Gas Beracun yang Terbawa Bersama Asap Kebakaran	10
Tabel 2.2 Sifat-Sifat Gas Karbon Monoksida	12
Tabel 2.3 Konsentrasi dan Indikasi Paparan Gas Karbon Monoksida	12
Tabel 2.4 Toksisitas Beberapa Senyawa Kimia	15
Tabel 2.5 Efektivitas Beberapa Adsorben dalam Penjernihan Asap	18
Tabel 2.6 Perbandingan Bilangan Ringelmann, Opasitas, dan Fraksi Cahaya yang Dapat Ditransmisikan	19
Tabel 2.7 Komposisi Kimia Zeolit Alam Lampung	29
Tabel 2.8 Perbandingan Sifat dari Berbagai Bentuk Kristal TiO_2	32
Tabel 4.1 Rasio Si Terhadap Al Tiap Tahap Aktivasi Zeolit Alam Lampung.	47
Tabel 4.2 Komposisi Oksida Pengotor dalam Zeolit Alam Lampung.....	49
Tabel 4.3 Komposisi Kimia Zeolit Alam Lampung Termodifikasi TiO_2	53
Tabel 4.4 Penurunan Konsentrasi CO dan Pencapaian Nilai t_{10} pada Asap Kebakaran Tanpa Adsorben	56
Tabel 4.5 Perbandingan Nilai t_{10} Tiap Ukuran dan Variasi Massa Zeolit Alam Lampung Tanpa TiO_2	59
Tabel 4.6 Perbandingan Nilai t_{10} Tiap Ukuran dan Variasi Massa Zeolit Alam Lampung Termodifikasi TiO_2	62

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Rasio Si Terhadap Al Tiap Tahap Aktivasi.....	75
Lampiran 2. Rasio Si Terhadap Al dan Kandungan TiO ₂ Zeolit Alam Lampung Temodifikasi TiO ₂	77
Lampiran 3. Uji Adsorpsi CO dan Penjernihan Asap Kebakaran Tanpa Adsorben.....	78
Lampiran 4. Persen Adsorpsi CO dan Nilai t ₁₀ Zeolit Alam Lampung Tanpa TiO ₂	79
Lampiran 5. Persen Adsorpsi CO dan Nilai t ₁₀ Zeolit Alam Lampung Termodifikasi TiO ₂	83
Lampiran 6. Luas Permukaan Zeolit Alam Lampung Murni.....	87
Lampiran 7. Luas Permukaan Zeolit Alam Lampung Aktivasi 400 mesh.....	88
Lampiran 8. Luas Permukaan Zeolit Alam Lampung Aktivasi 400 nano meter	89
Lampiran 9. Luas Permukaan Zeolit Alam Lampung Termodifikasi TiO ₂ 400 nano meter.....	90

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebakaran merupakan suatu kejadian yang sangat merugikan masyarakat baik dalam segi korban jiwa maupun harta benda yang tidak ternilai harganya. Definisi kebakaran menurut Kementerian Tenaga Kerja adalah suatu reaksi oksidasi isotermis yang berlangsung dengan cepat dari suatu bahan bakar disertai dengan timbulnya api atau penyalaan. Statistik kebakaran di daerah DKI Jakarta dari tahun 1998 sampai 2007 memperlihatkan bahwa 30 % nyawa korban kebakaran tidak dapat terselamatkan (Masyarakat Profesi Proteksi Kebakaran Indonesia).

Korban yang tewas pada kebakaran bukan hanya disebabkan oleh luka bakar, tetapi juga disebabkan oleh gas beracun yang keluar bersama asap kebakaran. Menurut *National Bureau of Standard USA*, penyebab korban jiwa terbesar pada kebakaran adalah menghirup asap hasil kebakaran (*smoke inhalation*) sebesar 74%, tersengat panas sebesar 18%, dan penyebab lain sebesar 8%.

Secara umum, asap yang dihasilkan dari kebakaran terdiri dari partikulat mikro, bahan yang tidak habis terbakar, uap air, karbon monoksida (CO), serta gas-gas toksik dan korosif. Menurut Butler, 2004, karbon monoksida merupakan gas yang banyak dihasilkan pada waktu terjadi kebakaran, walaupun tidak dijelaskan secara kuantitatif. Gas CO akan bereaksi dengan haemoglobin membentuk karboksi haemoglobin yang menyebabkan respirasi intraseluler menjadi kurang efektif.

Kota besar seperti DKI Jakarta memiliki banyak gedung berkapasitas besar yang diperuntukkan sebagai tempat kerja, tempat tinggal, tempat perbelanjaan, dan hiburan. Ketika salah satu gedung tersebut terbakar, korban akan sulit mencari jalan keluar karena terhalang dan terperangkap asap. Akibatnya korban akan terpapar asap lebih lama beserta senyawa beracun yang terkandung di dalamnya. Oleh karena itu, perlu dilakukan suatu usaha untuk mengurangi korban

jiwa karena keracunan asap kebakaran. Salah satunya adalah dengan melakukan proses evakuasi, yaitu memindahkan korban yang terjebak dalam ruang penuh asap ke lokasi yang lebih aman. Proses evakuasi ini tidak akan bisa dilakukan jika kondisi lokasi kebakaran masih penuh oleh asap. Agar evakuasi berjalan lancar, asap yang memenuhi lokasi perlu dijernihkan (diserap atau diadsorpsi) terlebih dahulu dan dikurangi kandungan CO-nya.

Belum banyak peneliti yang melakukan penelitian untuk menjernihkan asap dan menurunkan kandungan CO sekaligus. Yadav, dkk (2007) menemukan bahwa oksida logam dapat digunakan untuk menjernihkan kabut asap buatan yang dibuat dari senyawa glikol. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium, membandingkan efektivitas material berukuran nano dengan material berukuran konvensional dalam menjernihkan asap pada ruang tertutup. Material yang diuji adalah TiO_2 , MgO , Na MgO plus, NaHCO_3 , Ca(OH)_2 . Dari penelitian tersebut Na MgO plus menunjukkan efektivitas penjernihan asap glikol yang paling baik. Mulukutla, dkk (2007) mengeluarkan paten penjernihan asap. Penelitian dilakukan dalam ruang tertutup dan bahan bakar yang digunakan adalah kertas, diesel, *jet mill*, dan glikol. Sedangkan adsorben yang dipakai adalah logam berukuran nano, yaitu oksida logam dan hidroksida logam. Hasilnya menunjukkan bahwa TiO_2 dan MgO merupakan adsorben yang paling efektif untuk menjernihkan asap. Sementara untuk penurunan konsentrasi CO pernah dilakukan sebelumnya oleh Kris Tri Basuki dkk (2008). Kris Tri Basuki dkk melakukan penelitian penurunan konsentrasi gas CO dan NO_2 pada emisi gas buang menggunakan arang tempurung kelapa yang disisipi TiO_2 , penelitian ini ternyata dapat menurunkan konsentrasi gas CO dan NO_2 sebesar 91,50 % dan 95,40 % dibandingkan arang tempurung kelapa tanpa penyisipan TiO_2 yang dapat menurunkan konsentrasi gas CO dan NO sebesar 83,10 % dan 93,60 %.

Pada penelitian ini adsorben yang digunakan adalah zeolit alam Lampung yang dimodifikasi dengan TiO_2 . Proses modifikasi ini dilakukan untuk menambah pusat aktif pada zeolit alam Lampung dan memperluas permukaan sehingga memiliki kapasitas adsorpsi CO dan penjernihan asap yang besar. Zeolit alam Lampung digunakan sebagai penyangga karena struktur kristalnya berpori, memiliki luas permukaan yang cukup besar, memiliki stabilitas termal yang

tinggi, dan harganya murah (Handoko, 2002). TiO_2 yang digunakan adalah TiO_2 komersial Degussa P-25, TiO_2 digunakan karena tidak memiliki sifat racun, stabil terhadap cahaya, memiliki kestabilan kimia, dan ketahanan korosi yang baik dalam semua kondisi reaksi.

Dengan adanya penelitian ini, diharapkan ruang uji beserta adsorben yang telah dibuat dapat dikembangkan dan diuji lebih lanjut sehingga kelak dapat diaplikasikan di masyarakat untuk adsorpsi gas CO dan penjernihan asap kebakaran.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dipelajari dan dianalisis adalah bagaimana melakukan preparasi dan aktivasi zeolit alam Lampung, memodifikasi zeolit alam Lampung dengan TiO_2 untuk mendapatkan adsorben yang memiliki kapasitas adsorpsi gas CO yang tinggi dan mampu menjernihkan asap kebakaran serta menguji efektivitas ruang uji asap kebakaran dalam suatu model ruangan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan adsorben zeolit alam Lampung termodifikasi TiO_2 yang memiliki kapasitas adsorpsi gas CO yang tinggi dan mampu menjernihkan asap kebakaran.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini menggunakan adsorben yang merupakan modifikasi zeolit alam Lampung dengan TiO_2 .
2. Material zeolit alam Lampung yang digunakan diperoleh dari LIPI Lampung.
3. Material TiO_2 yang digunakan adalah TiO_2 komersial Degussa P-25.
4. Uji adsorpsi zeolit alam Lampung termodifikasi TiO_2 dilakukan dalam ruang uji berukuran 40 cm x 40 cm x 120 cm.

5. Pengukuran gas CO dilakukan menggunakan alat *CO analyzer* yang terdapat di Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
6. Pengukuran opasitas dilakukan dengan alat *Light Measurement System for Testing Smoke Development (DIN 50055)* yang terdapat di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
7. Material yang digunakan sebagai asap pembakaran adalah material yang biasanya terdapat pada gedung atau ruangan yaitu serbuk kayu, kertas, dan kabel.
8. Proses aktivasi zeolit alam menggunakan metode peneliti terdahulu (Wega Trisunaryanti, 2005).
9. Proses modifikasi zeolit alam dengan TiO_2 menggunakan metode peneliti terdahulu (Muhammad Arif Alfat, 2009).

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 pembakaran, asap, komposisi asap, toksisitas asap, penjernihan asap, opasitas, adsorpsi, adsorben, zeolit alam Lampung, dan TiO_2 .

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 dan penjernihan asap kebakaran dari adsorben zeolit alam Lampung termodifikasi TiO_2 .

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan dari hasil penelitian serta saran untuk penelitian selanjutnya.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kebakaran

Kebakaran adalah reaksi kimia kompleks eksotermik antara bahan bakar (biasanya hidrokarbon) dengan suatu pengoksidasi yang menghasilkan panas, cahaya, asap, dan gas. Kebakaran dikatakan sempurna apabila campuran bahan bakar dan oksigen yang berasal dari udara memiliki perbandingan yang tepat secara stoikiometri sehingga tidak diperoleh sisa. Bila oksigen terlalu banyak, disebut dengan campuran “lean” (kurus), sebaliknya bila bahan bakarnya yang terlalu banyak (tidak cukup oksigen), disebut dengan campuran “rich” (kaya). Secara umum, stoikiometri kebakaran sempurna hidrokarbon dengan oksigen dapat dilihat pada Persamaan 2.1.



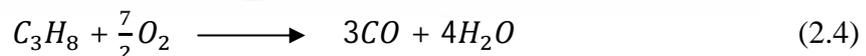
Berikut ini adalah contoh kebakaran sempurna metana



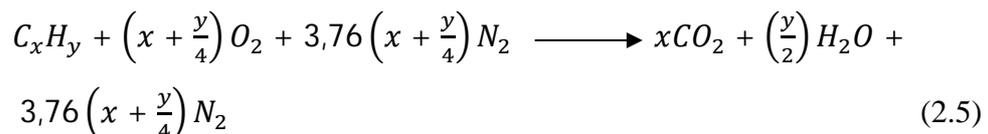
Sedangkan reaksi kebakaran tidak sempurna hidrokarbon dengan oksigen dapat dilihat pada Persamaan 2.3:



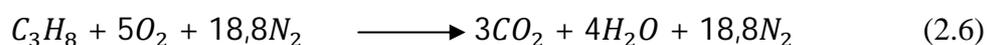
Berikut ini adalah contoh reaksi kebakaran tidak sempurna antara propana dengan oksigen:



Jika menggunakan udara kering untuk membakar bahan bakar, maka kebakaran sempurna dapat dilihat seperti pada Persamaan 2.5.



Berikut ini adalah contoh reaksi kebakaran tidak sempurna antara propana dengan udara kering:



2.2 Asap

Menurut *National Fire Protection Association* (NFPA) No. 92A tahun 1996, asap adalah gas-gas serta partikel padat dan cair yang berterbangan yang timbul pada waktu suatu bahan mengalami proses kebakaran bersama dengan sejumlah udara yang terperangkap atau tercampur di dalamnya. Sedangkan menurut Michael Lipsett dan Barbara Materna dalam bukunya yang berjudul “*Wildfire Smoke, A Guide for Public Health Officials*”, asap adalah campuran kompleks gas CO, CO₂, NO, uap air, material partikulat, hidrokarbon dan bahan organik kimia lainnya serta sejumlah mineral. Asap ini diemisikan ketika suatu material terbakar. Gas yang terdapat di atas api umumnya dibagi ke dalam tiga kelompok (Apriawan, 2009):

1. Uap dan gas panas yang dihasilkan oleh material yang terbakar
2. Dekomposisi dan kondensasi material yang tidak terbakar
3. Sejumlah udara yang dipanaskan oleh api dan terbawa bersama asap yang terbang

2.2.1 Produksi dan Sifat Asap

Menurut George W. Mulholland dalam bukunya yang berjudul “*Smoke Production and Properties*”, efek produksi asap kebakaran tergantung pada jumlah asap yang dihasilkan dan sifat asap. Densitas dan toksisitas asap yang diproduksi bergantung pada bahan yang terbakar, tetapi volume total asap yang diproduksi akan tergantung pada ukuran api dan tempat kebakaran terjadi. Asap dapat menjadi sangat pekat dan pada beberapa kasus akan menjadi panas dan mengandung produk beracun yang membahayakan kehidupan.

Asap hasil kebakaran mengandung gas-gas beracun yang memiliki toksisitas berbeda dan bersifat mematikan. Semua material yang mudah terbakar (*combustable*) bila terbakar akan melepaskan gas CO. Oleh karena itu dalam asap kebakaran akan mengandung unsur gas CO dalam jumlah yang besar. Namun selain gas CO, terdapat pula gas-gas beracun lainnya sebagai hasil proses kebakaran.

Sifat asap yang paling utama adalah kepudaran cahaya (*light extinction*), visibilitas, dan deteksi.

a. Kepudaran cahaya (*Light extinction*)

Dasar pengukuran kepudaran cahaya adalah Hukum Bouguer, yang berhubungan dengan intensitas (I_D^λ), panjang gelombang cahaya monokromatis (λ), dan transmisi cahaya (I_λ) yang ditransmisikan sepanjang lintasan asap (L).

$$\frac{I_\lambda}{I_\lambda^0} = e^{-KL} \quad (2.7)$$

dimana K adalah koefisien kepudaran cahaya. Ketika Persamaan 2.7 dinyatakan dalam nilai 10 , maka:

$$\frac{I_\lambda}{I_\lambda^0} = 10^{-DL} \quad (2.8)$$

Nilai D didefinisikan sebagai nilai densitas optik per meter ($D = K/2.3$). Koefisien kepudaran K , dapat dinyatakan sebagai produk koefisien kepudaran per satuan massa, K_m , dan konsentrasi asap aerosol, m .

$$K = K_m m \quad (2.9)$$

Koefisien kepudaran spesifik, K_m , tergantung dari distribusi ukuran dan sifat optik asap dengan hubungan:

$$K_m = \frac{3}{2\rho m} \int_{d_{min}}^{d_{max}} \frac{1}{d} \frac{\delta m}{\delta d} Q_{ext} \left(\frac{d}{\lambda}, n_r \right) \delta d \quad (2.10)$$

Dimana $\delta m/\delta d$ adalah distribusi ukuran massa, Q_{ext} adalah efisiensi kepudaran partikel, d/λ adalah fungsi rasio diameter partikel dengan panjang gelombang cahaya, n_r adalah indeks bias partikel, dan ρ adalah densitas partikel.

b. Visibilitas

Visibilitas tanda keluar, pintu, dan jendela merupakan hal penting dalam kebakaran. Untuk melihat objek diperlukan tingkat kontras tertentu antara objek dengan latar belakang (*background*). Untuk objek terisolasi, kontras (C) dapat didefinisikan sebagai:

$$C = \frac{B}{B_0} - 1 \quad (2.11)$$

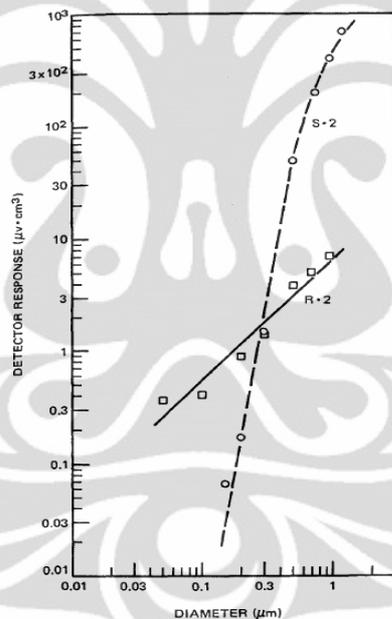
Dimana B adalah tingkat keterangan objek, B_0 adalah latar belakang (*background*) objek. Sebagian besar pengukuran visibilitas asap dilakukan dengan mengukur jarak objek namun saat ini lebih banyak digunakan pengukuran aktual kontras (C) menggunakan fotometer. Visibilitas tergantung pada banyak faktor diantaranya penyebaran dan koefisien adsorpsi asap, tanda emisi atau pantulan cahaya, panjang gelombang cahaya, dan keakuratan visual masing-masing individu.

c. Deteksi

Output elektrik detektor P dari suatu penyebaran ringan atau ionisasi dapat direpresentasikan sebagai integral produk dari fungsi distribusi ukuran dan respon dasar detektor, $R(d)$.

$$P = \int_{d_{min}}^{d_{max}} R(d) \frac{\delta N}{\delta d} \delta d \quad (2.12)$$

Fungsi respon untuk dua detektor asap diplot pada Gambar 2.1. Pada garis R-2 detektor lebih sensitif untuk tipe asap ionisasi, yaitu partikel yang memiliki ukuran lebih kecil dari $0,3 \mu\text{m}$, sedangkan pada gambar S-2 detektor lebih sensitif untuk asap penyebaran ringan yaitu partikel asap yang memiliki ukuran lebih besar dari $0,3 \mu\text{m}$.



Gambar 2.1 Fungsi respon detektor, $R(d)$, terhadap ukuran partikel untuk detektor S-2 (penyebaran ringan) dan R-2 (ionisasi)

2.2.2 Komposisi Asap

Asap hasil kebakaran mengandung senyawa beracun. Tabel 2.1 menunjukkan beberapa senyawa beracun yang terbawa bersama asap kebakaran. Semua gas dalam Tabel 2.1 merupakan gas yang menyebabkan iritasi, kecuali HCN yang menyebabkan sulit untuk bernafas secara spontan dan teratur. Gas CO

dan CO₂ tidak dimasukkan dalam tabel karena konsentrasi gas ini jauh melebihi konsentrasi massa uap (Kathryn M. dkk, 2004).

Tabel 2.1. Gas beracun yang terbawa bersama asap kebakaran

<i>Toxic Gas</i>	<i>Potential Sources</i>	<i>Sublethal Effects</i>
	Cellulosic materials, e.g., wood, cotton, paper; polystyrenes,	
Acrolein (CH ₂ -CHCHO)	ABS	A
Toluene diisocyanate (TDI)	Flexible polyurethane foams	A
Formaldehyde (HCHO)	POM, polypropylenes	B
Hydrogen cyanide (HCN)	Nitrogen-containing materials, e.g., wool, silk, PAN, ABS, acrylic fibers, nylons, urea/formaldehyde, melamine, polyurethanes, polyacrylamide	C
Nitrogen dioxide (NO ₂)	Nitrogen-containing materials	B
Hydrogen chloride (HCl)	PVC and chlorinated additives	B, D
Hydrogen fluoride (HF)	PTFE, other fluorinated compounds and additives	B
Hydrogen bromide (HBr)	Brominated compounds and additives	B, D
Sulfur dioxide (SO ₂)	Sulfur-containing materials, e.g., wool, vulcanized rubbers, poly(phenylene sulfide)	B
Hydrogen sulfide (H ₂ S)	Sulfur-containing materials	C
Ammonia (NH ₃)	Nitrogen-containing materials	C
Styrene (C ₈ H ₈)	Polystyrenes, ABS	C
Toluene (C ₇ H ₈)	Polystyrenes, PVC, polyurethane foams	D
Benzene (C ₆ H ₆)	Polystyrenes, PVC, polyesters, nylons	C

Sublethal effects: A, dibawah 10⁻⁵ fraksi volum; B, 10⁻⁵ sampai 10⁻⁴ fraksi volum; C, 10⁻⁴ sampai 10⁻³ fraksi volum; D, 10⁻³ to 10⁻² fraksi volum. (C.J. Hilado, 1982)

2.2.2.1 Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa. Karena sifat tersebut, gas yang memiliki diameter 0,113 nm ini sangat sulit deteksi keberadaannya. Gas CO memiliki densitas yang lebih rendah dari udara dan sulit larut dalam air. Menurut Fardiaz, 1992, dalam bukunya yang berjudul “Polusi Air dan Udara”, keberadaan gas CO di alam dapat terbentuk secara alamiah ataupun buatan (antropogenik). Secara alamiah, gas CO dengan jumlah relatif sedikit dapat terbentuk dari hasil kegiatan gunung berapi dan proses

biologi. Sedangkan secara buatan (antropogenik), gas CO dapat dihasilkan dari salah satu proses berikut:

1. Kebakaran tidak sempurna terhadap karbon atau komponen yang mengandung karbon.
2. Reaksi antara karbon dioksida dan komponen yang mengandung karbon pada suhu tinggi.
3. Hasil penguraian karbon dioksida pada suhu tinggi.

Gas CO dikenal sebagai polutan yang sangat berbahaya bagi manusia sehingga kandungannya dalam udara perlu dikurangi. Gas CO sangat berbahaya karena pada konsentrasi relatif rendah (<100 ppm) dapat menimbulkan gangguan kesehatan. Gas CO jika terhisap ke dalam paru-paru maka akan ikut peredaran darah dan 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 haemoglobin darah. Ikatan CO dengan haemoglobin darah (karboksihaemoglobin-CO₂Hb) lebih stabil dibandingkan ikatan O₂ dengan haemoglobin darah (oksihaemoglobin-O₂Hb). Kestabilan CO₂Hb sekitar 200 kali kestabilan O₂Hb (Goldstein, 2008), hal ini menyebabkan haemoglobin darah lebih mudah menangkap gas CO dibandingkan O₂ dan menyebabkan fungsi vital darah sebagai pengangkut oksigen terganggu. Reaksi antara CO dan O₂ dengan haemoglobin dapat dilihat pada reaksi berikut:



Apabila hal ini terjadi maka akan berakibat fatal pada tubuh manusia. Pertama, O₂ akan kalah bersaing dengan CO saat berikatan dengan molekul haemoglobin sehingga kadar O₂ dalam darah akan berkurang. Kedua, gas CO akan menghambat oksidasi sitokrom. Hal ini menyebabkan respirasi intraseluler menjadi kurang efektif. Terakhir, gas CO dapat berikatan secara langsung dengan sel otot jantung dan tulang. Efek paling serius adalah terjadi keracunan secara langsung terhadap sel-sel tersebut dan menyebabkan gangguan pada sistem saraf (DR.P.V.Chadha, *Karbon Monoksida, Ilmu Forensik dan Toksikologi*, 1995).

Batas pemaparan gas CO yang diperbolehkan oleh OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*) adalah 35 ppm untuk waktu 8 jam/hari kerja, sedangkan yang diperbolehkan oleh ACGIH TLV-TW (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists Threshold Limit Value*) adalah 25 ppm untuk 8 jam/hari kerja.

Tabel 2.2. Sifat-sifat gas karbon monoksida

Sifat	Keterangan
Rumus molekul	CO
Wujud	Gas tidak berwarna dan tidak berbau
Berat molekul	28,0101 g/mol
Titik beku	-205 °C
Titik didih	-192 °C
Densitas	0,789 g/cm ³ , <i>liquid</i> 1,250 g/L pada 0 °C, 1 atm, 1,145 g/L pada 25 °C, 1 atm
Kelarutan dalam air	0,0026 g/100 mL (20 °C)

Tabel 2.3. Konsentrasi dan indikasi paparan gas karbon monoksida (Mark Goldstein, 2008)

Konsentrasi CO (ppm)	Tingkat COHb (%)	Indikasi
35	<10	Sakit kepala dan pusing selama 6 sampai 8 jam waktu pemaparan konstan
100	>10	Sedikit sakit kepala dalam 2 sampai 3 jam
200	20	Sedikit sakit kepala dalam 2 sampai 3 jam dan hilang kesadaran
800	30	Pusing, mual, hilang kesadaran dalam 45 menit dan mati rasa dalam 2 jam
1600	40	Sakit kepala, kontraksi jantung cepat, pusing dan mual dalam 20 menit; meninggal kurang dari 20 jam

Tabel 2.3. Konsentrasi dan indikasi paparan gas karbon monoksida (Mark Goldstein, 2008) (Lanjutan)

Konsentrasi CO (ppm)	Tingkat COHb (%)	Indikasi
3200	50	Sakit kepala, pusing, dan mual dalam 5 hingga 10 menit; meninggal dalam 30 menit
6400	60	Sakit kepala dan pusing dalam 1 hingga 2 menit, hilang kesadaran, pernapasan terhenti dan meninggal dalam 20 menit
12800	>70	Meninggal dalam waktu kurang dari 3 menit

2.2.2.2 Karbon Dioksida

Gas CO₂ memiliki diameter 0,116 nm. Paparan yang berkepanjangan terhadap konsentrasi CO₂ dapat menyebabkan asidosis dan efek merugikan pada metabolisme kalsium fosfor yang menyebabkan peningkatan endapan kalsium pada jaringan lunak. Karbon dioksida beracun terhadap jantung dan menyebabkan menurunnya gaya kontraktil. Pada konsentrasi 3% di udara, CO₂ bersifat narkotik ringan, menyebabkan peningkatan tekanan darah dan denyut nadi, dan menyebabkan penurunan daya dengar. Pada konsentrasi 5% menyebabkan stimulasi pusat pernapasan, pusing-pusing, kebingungan, dan kesulitan pernapasan yang diikuti sakit kepala dan sesak napas. Pada konsentrasi 8% menyebabkan sakit kepala, keringatan, penglihatan buram, tremor, dan kehilangan kesadaran setelah paparan selama lima sampai sepuluh menit. (Davidson, 2003)

2.2.2.3 Oksida Nitrogen (NO_x)

Bagian dari oksida nitrogen yang menjadi polutan adalah, nitrogen monoksida (NO), nitrogen dioksida (NO₂), dinitrogen trioksida (N₂O₃), nitrogen tetraoksida (N₂O₄) dan nitrogen pentaoksida (N₂O₅). Gas NO_x yang dapat menyebabkan efek kesehatan kurang baik adalah NO₂ yang secara kimiawi

bersifat reaktif (Wei Yang dan Stanley T. Omaye, 2008). Gas yang berwarna coklat kemerahan ini memiliki bau yang menyengat dan polutan udara yang terkenal. Paparan jangka panjang terhadap NO_2 dengan kadar $40 - 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dapat menyebabkan efek kesehatan yang merugikan.

2.2.2.4 Oksida Sulfur (SO_x)

Bagian dari oksida sulfur yang berbahaya adalah sulfur dioksida (SO_2). Gas ini memiliki karakteristik tidak berwarna, tetapi berbau dan larut dalam air membentuk asam. Efek negatif terhadap kesehatan akibat terpapar gas ini adalah masalah pernafasan, perubahan ketahanan paru-paru, memperburuk penyakit pernafasan dan kardiovaskuler. Seseorang dengan penyakit asma dan penyakit jantung atau paru-paru kronis sangat sensitif terhadap gas ini.

2.2.2.5 Zat Partikulat

Zat partikulat adalah zat padat atau cair yang halus dan tersuspensi di udara, misalnya embun, debu, asap, jelaga, uap, dan kabut. Paparan partikulat di udara dapat mengganggu kesehatan paru-paru dan jantung (Dominici, 2006).

2.2.3 Toksisitas Asap

Menurut Vytienis Babrauskas, 1997, gas CO merupakan gas paling penting yang perlu dipelajari dalam api kebakaran, karena toksisitas gas CO ini setengah dari masalah toksisitas api, walaupun masih ada gas lain yang jumlahnya signifikan dalam toksisitas api. Perbedaan material akan menghasilkan produk kebakaran yang berbeda pula. Sebagai contoh, material polimer tanpa atom klorin tidak akan menghasilkan hidrogen klorida dalam asapnya. Tabel 2.4 menunjukkan toksisitas sebagai variabel fisik LC_{50} dan merupakan skala kebalikan. Angka yang lebih kecil menunjukkan toksisitas yang lebih besar.

Tabel 2.4. Toksisitas beberapa senyawa kimia

Gas	LC ₅₀ untuk pria dewasa (ppmv) 5 min	LC ₅₀ untuk pria dewasa (ppmv) 30 min	Keterangan data (spesies, menit) h=orang dewasa; r=tikus besar; m=tikus kecil; p=primata; EC= konsentrasi untuk efek yang timbul; LC0=konsentrasi yang pertama kali timbul ketika diobservasi.
Karbon dioksida	-	>150000	[1]LC(r,30)=470,000
Asetaldehida	-	20000	[2]LC(m,240)=1500 LCo(r,240)=4000 LC(ham,240)=17,000[3] LC(r,30)=20,000 LC(r,240)=16000
Hidrogen khlorida	16000	3700	[6]r,p[7]LC(r,5)=40,989
Karbon monoksida	-	3000	[1]LC(r,30)=4600 [8]LC(h,30) 3000
Nitrogen oksida	10000	2500	[3] 1/5 sebagai racun NO ₂ LC(ch.1)15,000
Karbonil sulfida	-	2000	[2]LCo(var.,3590)=10001400
Hidrogen sulfida	-	2000	[2]LC(m,60)=673 Lco(h,30)=600 Lco(orang dewasa,5)=800 [8]LC(h,30)2000
Hidrogen flourida	10000	2000	[2]LC(gpg,15)=4327 LC(p,60)=1774 LCo(h,30)=50 LC(m,60)=456 LCr(r,60)=1276[7] LC(r,5)=18,200[8] LC(gpg,2)=300 LC(m,5)=6247 LC(r,5)=18,200
Akronitril	-	2000	[2]LC(gpg,240)=576 LC(r,240)=500
Karbonil fluorida	-	750	[3]LC(r,60)=360
Akrolein	750	300	[2]LC(m,360)=66 LCo(p,10)=153 [9]LC(p,5) 505 to 1025
Formaldehida	-	250	[2]LCo(r,240)=250[8] LC(r,30)=250 LC(r,240)=830(??)
Sulfur dioksida	500	-	[3]LC(cat,480)=700 LC(m,120)=700 [2] LCo(m,300)=6000[8] LC(var.,5) 600 to 800

Tabel 2.4. Toksisitas beberapa senyawa kimia (Lanjutan)

Gas	LC ₅₀ untuk pria dewasa (ppmv) 5 min	LC ₅₀ untuk pria dewasa (ppmv) 30 min	Keterangan data (spesies, menit) h=orang dewasa; r=tikus besar; m=tikus kecil; p=primata; EC= konsentrasi untuk efek yang timbul; LC0=konsentrasi yang pertama kali timbul ketika diobservasi.
Hidrogen sianida	280	135	[10] LCr(r,5)=570 LCr(r,30)=110 [7] LC(r,5)=503 LC(m,5)=323 [8]LC(h,30)=135 LC(h,5)280
Akrolein	750	300	[2]LC(m,360)=66 LCo(p,10)=153 [9]LC(p,5) 505 to 1025
Formaldehida	-	250	[2]LCo(r,240)=250[8] LC(r,30)=250 LC(r,240)=830(??) [3]LC(cat,480)=700 LC(m,120)=700
Sulfur dioksida	500	-	[2] LCo(m,300)=6000[8] LC(var.,5) 600 to 800
Hidrogen sianida	280	135	[10] LCr(r,5)=570 LCr(r,30)=110 [7] LC(r,5)=503 LC(m,5)=323 [8]LC(h,30)=135 LC(h,5)280

LC₅₀ adalah sejumlah massa dalam volume 1 m³ yang menyebabkan 50 % kematian populasi. Untuk zat dengan komposisi yang telah diketahui (misalnya zat murni), LC₅₀ biasanya diekspresikan dalam satuan ppmv, yang berarti 1 bagian gas dalam 1 juta bagian udara (“v” menunjukkan bagian yang dimaksud adalah volume bukan berat).

2.2.4 Penjernihan Asap

Asap terdiri dari partikel-partikel halus, baik padat maupun cair, yang terbang di udara. Partikel tersebut tersebar dan menyerap gelombang elektromagnetik yang berbeda. Asap, seperti aerosol lain, merupakan partikel yang tidak stabil, maksudnya adalah konsentrasi dan komposisinya berubah

terhadap waktu. Perubahan tersebut dapat dihasilkan dari gaya luar, baik proses kimia maupun fisika. Proses tersebut yaitu koagulasi, kondensasi, evaporasi, adsorpsi, absorpsi, dan reaksi kimia. Dengan memakai satu atau kombinasi dari proses tersebut, penjernihan asap dapat ditingkatkan. Berdasarkan proses-proses tersebut, prinsip penjernihan asap dapat dikategorikan menjadi (Yadav et. al., 2006):

- Meningkatkan koagulasi dengan memakai partikel penyerap, muatan elektrostatik atau gelombang suara
- Meningkatkan kondensasi dengan memakai inti higroskopis
- Meningkatkan evaporasi melalui pemanasan
- Menipiskan asap dengan mencampurnya dengan air

Salah satu cara yang mudah untuk mengukur apakah suatu adsorben efektif menjernihkan asap adalah dengan merasioakan waktu yang diperlukan asap untuk jernih memakai adsorben dan jernih secara alami dengan tingkat kejernihan tertentu. Tingkat kejernihan ini diukur dengan mentransmisikan cahaya. Nilai rasio biasanya di bawah 1. Semakin kecil rasio, semakin efektif adsorben dalam menyerap asap. Jika sama dengan 1, adsorben tidak memberikan dampak sama sekali. Jika lebih besar 1, adsorben malah ikut membuat gelap ruangan.

Yadav et. al., 2007, melakukan evaluasi potensi partikel nano dalam penjernihan asap di ruang tertutup. Penelitian dilakukan memakai ruangan berukuran 2,4 m x 2,4 m x 3,6 m yang berisi generator asap, filter, dan transmissometer. Sebagai simulasi asap digunakan aerosol glikol. Adsorben yang digunakan ada dua jenis: partikel nano (NA TiO₂, NA MgO, NA MgO plus, NA Al₂O₃, dan NA Al₂O₃ plus) dan bubuk biasa (NaHCO₃, CaCO₃, Ca(OH)₂, dan TiO₂). NA adalah singkatan dari NanoActiveTM, sebuah merek dagang. Mula-mula ruang dipenuhi asap sampai opasitas 100% (transmisi cahaya 0%). Lalu diukur waktu sampai transmisi cahaya sebesar 10% dan 20% tercapai secara alami akibat gaya gravitasi dan evaporasi. Transmisi 10% dan 20% dipakai karena manusia dapat melihat melewati asap pada transmisi cahaya sebesar itu. Dengan cara yang sama, berikutnya digunakan adsorben dengan cara disemprotkan. Hasilnya menunjukkan bahwa NA MgO plus memiliki rasio terkecil, yaitu 0,1 pada transmisi cahaya 10% ($t^*_{10} = 0,1$). Artinya, asap dapat jernih 10 kali lebih

cepat dengan memakai adsorben ini. Tabel 2.4 menunjukkan keefektifan beberapa adsorben dalam menjernihkan asap. Dengan prinsip yang hampir sama, paten penjernihan asap telah dikeluarkan oleh Mulukutla, dkk, 2007. Seperti yang telah disinggung di bab sebelumnya bahwa NA TiO₂-07 dan NA MgO plus merupakan adsorben yang paling efektif untuk menjernihkan asap. Selain itu, diketahui bahwa semakin kecil ukuran partikel semakin baik kinerja oksida logam. Jumlah adsorben yang disemprotkan juga ikut mempengaruhi efektifitas penjernihan.

Tabel 2.5. Efektivitas Beberapa Adsorben dalam Penjernihan Asap (Yadav et. al., 2007)

Material	Massa	Efektifitas	
		t* ₁₀	t* ₂₀
NaHCO ₂	25	0,42	0,39
	50		
	100		
NA MgO	40	0,38	0,44
	100		
NA TiO ₂	40	0,76	0,94
	100		
Ca(OH) ₂	40	0,24	0,23
	50		
	100		
NA MgO plus	60	0,10	0,11

2.3 Opasitas

Opasitas merupakan derajat ketidaktebusan permukaan benda terhadap cahaya (kegelapan). Pada banyak kasus, opasitas diartikan sebagai pengukuran seberapa banyak radiasi elektromagnet, yaitu sinar, yang dapat melewati sistem yang tersusun dari molekul gas, atom, ion, dan kumpulan debu (Jonathan, 2002). Opasitas dapat memberi informasi jenis material apa yang ada dan berapa banyak kemungkinan kandungan material itu. Opasitas dinyatakan dalam persen dengan rentang 0 sampai 100. Sebagai contoh, jika suatu keadaan

dikatakan memiliki opasitas 25%, hal ini berarti debu, jelaga, atau asap hanya menahan 25% cahaya yang lewat dan meneruskan 75% sisanya (Jennifer et. al., 2007). Untuk keadaan yang benar-benar gelap opasitas diberi persentase 100 dan keadaan jernih diberi persentase 0. Gambar 2.2 merupakan persentase opasitas Asap Ringelmann, yaitu gambar yang menunjukkan opasitas (kejernihan) suatu benda. Tabel 2.6 menunjukkan perbandingan antara Bilangan Ringelmann, opasitas, dan fraksi cahaya yang dapat ditransmisikan. Bilangan Ringelmann merupakan suatu bilangan yang sering digunakan untuk mendeskripsikan asap yang berwarna hitam.



Gambar 2.2. Persentase opasitas asap Ringelmann

Tabel 2.6. Perbandingan Bilangan Ringelmann, opasitas, dan fraksi cahaya yang dapat ditransmisikan (Ensor, et. al., 1971)

Fraksi Transmisi Cahaya	Bilangan Ringelmann	Opasitas
1,0	0	0%
0,8	1	20%
0,6	2	40%
0,4	3	60%
0,2	4	80%
0	5	100%

2.4 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan proses dimana komponen tertentu dari fasa fluida berpindah ke permukaan zat padat yang digunakan sebagai material berpori (adsorben). Secara umum, partikel-partikel kecil zat penyerap ditempatkan di dalam suatu hamparan tetap (*fixed bed*), kemudian fluida dialirkan melalui hamparan tersebut sampai adsorben mendekati jenuh dan penyerapan yang diinginkan tidak lagi berlangsung (McCabe, dkk., 1999).

Molekul-molekul zat padat mempunyai gaya dalam keadaan tidak seimbang. Ketidakseimbangan gaya tersebut menyebabkan zat padat cenderung menarik zat-zat lain atau gas yang bersentuhan pada permukaannya. Fenomena konsentrasi zat yang terdapat pada permukaan padatan disebut fasa teradsorb atau adsorbat, sedangkan zat yang akan menyerap atau menariknya disebut adsorben.

Proses adsorpsi pada suatu adsorben umumnya terjadi pada pori-pori kecilnya (mikropori). Sementara itu, pori-pori besarnya (makropori) hanya berperan sebagai tempat transfer adsorbat dari permukaan luar ke mikropori. Daya serap adsorben terhadap gas bergantung pada jenis adsorbat, karakteristik adsorben, temperatur, dan tekanan.

2.4.1 Jenis-jenis Adsorpsi

Berdasarkan interaksi molekular antara permukaan adsorben dengan adsorbat, adsorpsi dibagi menjadi dua, yaitu:

a. Adsorpsi fisika

Adsorpsi fisika adalah adsorpsi yang terjadi karena adanya gaya Van Der Waals (gaya tarik menarik yang relatif lemah) antara adsorbat dengan permukaan adsorben. Adsorpsi ini terjadi apabila suatu adsorbat dialirkan pada permukaan adsorben yang bersih. Pada adsorpsi fisika, adsorbat tidak terikat kuat pada permukaan adsorben sehingga adsorbat dapat bergerak dari suatu bagian permukaan ke permukaan lainnya, dan permukaan yang ditinggalkan oleh adsorbat dapat digantikan oleh adsorbat yang lainnya. Adsorpsi fisika adalah suatu peristiwa yang reversibel sehingga jika kondisi operasinya diubah akan membentuk kesetimbangan baru. Proses adsorpsi disertai dengan pengeluaran panas sesuai dengan prinsip Le Chatelier. Panas yang terjadi atau dikeluarkan

pada peristiwa adsorpsi disebut panas adsorpsi. Panas adsorpsi fisika umumnya rendah (5-10 kkal/gmol) dan terjadi pada temperatur rendah yaitu di bawah temperatur didih adsorbat. Hal ini yang menyebabkan kesetimbangan dari proses adsorpsi fisika reversibel dan berlangsung sangat cepat. Proses adsorpsi fisika terjadi tanpa memerlukan energi aktivasi, sehingga proses tersebut membentuk lapisan jamak (*multilayer*) pada permukaan adsorben. Ikatan yang terbentuk dalam adsorpsi fisika dapat diputuskan dengan mudah, yaitu dengan cara *degassing* atau pemanasan pada temperatur 150-200 °C selama 2-3 jam.

b. Adsorpsi Kimia

Adsorpsi kimia adalah adsorpsi yang terjadi karena terbentuknya ikatan kovalen dan ion antara molekul adsorbat dengan adsorben. Ikatan yang terbentuk merupakan ikatan yang kuat sehingga lapisan yang terbentuk adalah lapisan *monolayer*. Pada adsorpsi kimia, hal yang paling penting adalah spesifikasi dan kepastian pembentukan *monolayer*. Pendekatannya adalah dengan menentukan kondisi reaksi sehingga hanya adsorpsi kimia yang terjadi dan hanya terbentuk *monolayer*. Adsorpsi kimia bersifat tidak reversibel dan umumnya terjadi pada temperatur tinggi di atas temperatur kritis adsorbat sehingga panas adsorpsi yang dilepaskan juga tinggi (10-100 kkal/gmol). Sedangkan untuk dapat terjadinya peristiwa desorpsi dibutuhkan energi lebih tinggi untuk memutuskan ikatan yang terjadi antara adsorben dan adsorbat. Adsorben yang mengadsorpsi secara kimia pada umumnya sulit diregenerasi.

2.4.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi

Jumlah fluida yang teradsorpsi pada permukaan adsorben dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu:

1. Karakteristik adsorben

a. Luas permukaan dan volume pori adsorben

Jumlah molekul adsorbat yang teradsorpsi meningkat dengan bertambahnya luas permukaan dan volume pori adsorben. Dalam proses adsorpsi seringkali adsorben diberikan perlakuan awal untuk meningkatkan luas permukaannya karena luas permukaan adsorben

merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi proses adsorpsi.

b. Kemurnian adsorben

Adanya pengotor pada permukaan adsorben dapat menghalangi adsorbat untuk masuk ke dalam pori adsorben dan berinteraksi dengan adsorben. Oleh karena itu, pada umumnya kemurnian adsorben berbanding lurus dengan kemampuannya dalam mengadsorpsi adsorbat.

2. Jenis adsorbat

a. Kepolaran adsorbat

Dengan diameter yang sama, molekul polar lebih kuat diadsorpsi daripada molekul yang kurang polar. Molekul yang lebih polar dapat menggantikan molekul kurang polar yang telah diadsorpsi lebih dahulu.

b. Ukuran molekul adsorbat

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

3. Temperatur

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

4. Tekanan adsorbat

Pada adsorpsi fisika banyaknya zat yang diadsorpsi akan bertambah dengan menaikkan tekanan adsorbat. Sebaliknya pada adsorpsi kimia, peningkatan tekanan adsorbat justru mengurangi jumlah zat yang diadsorpsi.

5. Pusat aktif

Pada permukaan yang beragam, hanya sebagian permukaan yang mempunyai daya serap. Sehingga hanya beberapa jenis zat yang dapat diserap

oleh bagian permukaan yang aktif, yang disebut sebagai pusat aktif (*active center*).

2.4.3 Keseimbangan Adsorpsi

Pada saat fluida yang mengandung adsorbat dikontakkan dengan adsorben padatan, molekul adsorbat berpindah dari fluida ke padatan sampai konsentrasi adsorbat di aliran fluida berada dalam keadaan setimbang dengan adsorbat yang teradsorp dalam adsorben padatan. Data keseimbangan adsorpsi yang dihasilkan pada temperatur adalah konstan dan biasa disebut adsorpsi isotermis. Adsorpsi isotermis adalah hubungan antara jumlah zat yang diadsorpsi dengan keseimbangan tekanan pada suhu tetap. Persamaan matematika pertama untuk kondisi isothermal diberikan oleh Freundlich dan Küster, 1984, dan ini merupakan formula empiris murni untuk adsorbat fasa gas.

$$\frac{x}{m} = kP^n \quad (2.13)$$

- x = kuantitas adsorben
 m = massa adsorben
 P = tekanan adsorbat
 k dan n = konstanta empiris untuk setiap pasangan adsorbat-adsorben pada suhu tertentu

2.4.4 Model-model Adsorpsi

Model adsorpsi dibagi menjadi 2 yaitu:

a. Adsorpsi Isotermis Langmuir

Model adsorpsi Langmuir merupakan model yang paling sederhana dan paling banyak dipakai dalam adsorpsi isothermal. Isotermal Langmuir dikembangkan oleh Irving Langmuir pada tahun 1918. Pada awalnya, model adsorpsi ini dikembangkan untuk menjelaskan adsorpsi gas pada permukaan padat dari karbon aktif tetapi sekarang penggunaannya lebih luas untuk berbagai adsorben. Teori Langmuir menggambarkan adsorpsi *monolayer* pada permukaan ideal. Persamaan umum yang digunakan Langmuir (Yang, 1987) adalah.

$$\theta = \frac{\omega}{L} = \frac{BP}{1 + BP} \quad (2.14)$$

- ω = jumlah mol gas teradsorpsi per satuan massa adsorben
 θ = fraksi luas permukaan yang tertutup oleh lapisan *monolayer*
 B = konstanta adsorpsi Langmuir yang besarnya bergantung pada temperatur
 P = tekanan adsorpsi
 L = maksimum kapasitas adsorpsi pada model Langmuir dan Model BET

Pada tekanan rendah, persamaan isoterm dapat disederhanakan menjadi bentuk linier mengikuti Hukum Henry sebagai berikut :

$$\theta = BP \quad (2.15)$$

Parameter B dinamakan konstanta afinitas atau konstanta Langmuir. Parameter B mengukur seberapa besar molekul adsorbat yang terserap ke permukaan. Parameter B ini berhubungan dengan kalor adsorpsi (Q), dengan persamaan sebagai berikut:

$$B = \frac{\alpha}{\beta(2\pi mkT)^{1/2}} e^{Q/RT} \quad (2.16)$$

- α = koefisien *nonperfect sticking*
 $k_{d\infty}$ = koefisien kecepatan desorpsi pada temperatur tak terhingga

b. Model adsorpsi BET

Isotermal Brunauer-Emmet-Teller atau BET merupakan persamaan teoritik yang banyak diaplikasikan dalam kesetimbangan gas-padatan. Model ini merupakan lanjutan dari model isotermal Langmuir yang dikembangkan untuk menjelaskan adsorpsi *multilayer*. Pada lapisan pertama, kecepatan kondensasi (adsorpsi) bagian permukaan adsorben yang kosong sama dengan kecepatan evaporasi (desorpsi) bagian yang tertutupi oleh satu molekul adsorbat. Keseimbangan ini juga terjadi pada semua lapisan berikutnya. Asumsi penting pada model isotermal ini adalah bahwa panas adsorpsi diluar lapisan pertama adalah konstan dan sama dengan panas pencairan. Model persamaan isotermal dari BET dapat ditulis sebagai berikut (Yang, 1987):

$$\frac{\omega}{L} = \frac{CP}{(P_s - P) \left[1 + (C - 1) \left(\frac{P}{P_s} \right) \right]} \quad (2.17)$$

dimana:

- ω = jumlah mol gas teradsorpsi per satuan unit massa adsorben
- L = maksimum kapasitas adsorpsi pada model Langmuir dan Model BET
- P = tekanan gas saat teradsorpsi
- P_s = tekanan jenuh adsorbat gas hingga mencapai kapasitas maksimum adsorpsi
- C = parameter adsorpsi isoteremis model BET

2.5 Adsorben

Berdasarkan struktur penyusunnya, adsorben dapat digolongkan menjadi dua, yaitu adsorben tak berpori (*non porous adsorbent*) dan adsorben berpori (*porous adsorbent*).

1. Adsorben tak berpori

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

2. Adsorben berpori

Luas permukaan spesifik adsorben berpori berkisar antara $10-100 \text{ m}^2/\text{g}$. Biasanya digunakan sebagai penyangga katalis, dehidrator dan penyeleksi komponen, umumnya berbentuk granular. Beberapa jenis adsorben berpori yang terkenal adalah : silika gel, alumina, karbon aktif, zeolit (*molecular sieves*), dan *porous glasses*.

Kebanyakan adsorben pada industri termasuk salah satu dari tiga kelas di bawah ini:

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

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

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

Untuk mencapai kinerja diatas, adsorben harus memenuhi kriteria sebagai berikut:

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

2.5.1 Zeolit

Zeolit merupakan mineral yang terdiri dari kristal alumino-silikat terhidrasi yang mengandung kation alkali dan alkali tanah. Menurut ahli geokimia dan mineralogi, zeolit merupakan produk gunung berapi yang membeku menjadi batuan vulkanik, sedimen-sedimen dan batuan metamorfosa yang selanjutnya melalui proses pelapukan akibat pengaruh panas dan dingin yang terjadi di dalam tanah membentuk mineral-mineral zeolit. Zeolit terdapat di beberapa daerah di Indonesia yang diperkirakan mempunyai cadangan zeolit sangat besar dan berpotensi untuk dikembangkan, yaitu Jawa Barat dan Lampung. Secara umum zeolit memiliki formulasi sebagai berikut:

$$\frac{M_2}{nO} \cdot \{Al_2O_3 \cdot xSiO_2\} \cdot yH_2O$$

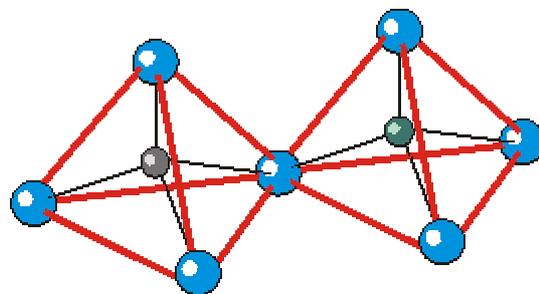
- M = kation alkali atau alkali tanah
 n = valensi logam alkali
 x = jumlah SiO₂ per molekul, nilainya berkisar 2-10
 y = jumlah anhidrat per molekul, nilainya berkisar 2-7

Zeolit terdiri dari 3 komponen utama yaitu: kation yang dipertukarkan, kerangka alumino silikat, dan fasa air. Ikatan antara Al-Si-O membentuk struktur kristal, sedangkan logam alkali merupakan sumber kation yang mudah dipertukarkan.

2.5.2 Struktur Zeolit

Zeolit adalah hasil pengkristalan alumino silikat, kristal yang terbentuk memiliki pori-pori yang seragam. Zeolit terdiri dari SiO₄ dan AlO₄ tetrahedral, dimana tiap tetrahedral tersusun oleh 4 anion oksigen yang menyebar mengelilingi suatu ion silikon dan ion aluminium. Atom oksigen memiliki muatan -2, sedangkan atom silikon memiliki muatan +4 yang akan berikatan membentuk silika tetrahedral yang tidak bermuatan (netral), sedangkan atom aluminium akan membentuk alumina tetrahedral dengan mengikat sisa muatan -1 dari tiap atom oksigen sehingga terjadi keseimbangan ion dan membentuk kristal yang mempunyai pori-pori dimensi molekular.

Struktur kristal zeolit dimana semua atom Si dan Al dalam bentuk tetrahedral (TO₄) disebut Unit Bangun Primer, zeolit hanya dapat diidentifikasi berdasarkan Unit Bangun Sekunder (UBS) sebagaimana terlihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.3. Tetrahedral alumina dan silika (TO₄) pada struktur zeolit

Rasio Si terhadap Al pada suatu zeolit tidak kurang dari 1. Komposisi adsorben akan mengalami transisi atom-atom aluminium secara sistematis dan kaya akan atom aluminium, sehingga memiliki afinitas tinggi terhadap air dan senyawa polar lainnya, sedangkan struktur mikropori silika seperti silikalit menyebabkan sifat hidrofobik dan menyerap n-parafin terhadap air. Transisi dari hidrofilik menjadi hidrofobik menyebabkan rasio Si terhadap Al memiliki nilai antara 8 hingga 10. Setiap adsorben zeolit memiliki jenis yang berbeda-beda tergantung pada struktur rangka, rasio Si terhadap Al, dan bentuk susunan kation, dengan perbedaan komposisi tersebut menyebabkan adsorben menjadi lebih selektif dalam pemilihan molekul yang akan dipisahkan.

2.5.3 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. Molekul H_2O seolah-olah mempunyai posisi yang spesifik dan dapat dikeluarkan secara reversibel. Sifat zeolit sebagai adsorben dan penyaring molekul dapat terjadi 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 molekular) karena zeolit memiliki pori-pori berukuran molekular sehingga mampu memisahkan 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. Karena 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 yang menyebabkan zeolit dimanfaatkan untuk proses pelunakkan air sadah.

Kemampuan zeolit sebagai katalis berkaitan dengan tersedianya pusat

aktif dalam saluran antar zeolit. Pusat aktif terbentuk karena adanya gugus fungsi asam tipe Bronsted maupun Lewis. Perbandingan kedua jenis asam ini tergantung pada proses aktivasi zeolit dan kondisi reaksi. Pusat aktif yang bersifat asam ini selanjutnya dapat mengikat molekul-molekul basa secara kimiawi. Sedangkan sifat zeolit sebagai penukar ion terjadi karena adanya kation logam alkali dan alkali tanah. Kation tersebut dapat bergerak bebas dalam rongga dan dapat dipertukarkan dengan kation logam lain dengan jumlah yang sama.

2.5.4 Zeolit Alam Lampung

Di Indonesia, zeolit ditemukan pada tahun 1985 oleh PPPTM Bandung. Zeolit tersebar di beberapa daerah di pulau Sumatera dan Jawa. Namun dari 46 lokasi zeolit, baru beberapa lokasi yang ditambang secara intensif antara lain di Bayah, Banten, Cikalong, Tasikmalaya, Cikembar, Sukabumi, Nanggung, Bogor dan Lampung. Pemanfaatan zeolit masih belum banyak diketahui secara luas, zeolit yang saat ini ada di pasaran masih dalam bentuk alam dan digunakan untuk pemupukan pada bidang pertanian.

Zeolit alam Lampung memiliki komposisi 78% klinoptilolit, analsim 14%, dan modernit 8%. Klinoptilolit memiliki rumus molekul $(\text{NaK})_6(\text{Al}_6\text{Si}_{30}\text{O}_{72}) \cdot 20\text{H}_2\text{O}$. Rumus molekul zeolit alam Lampung adalah $\text{Na}_{2,94}\text{K}_{1,35}\text{Ca}_{0,63}\text{Mg}_{0,21}\text{Al}_{6,25}\text{Si}_{29,74}\text{O}_{72} \cdot 24\text{H}_2\text{O}$.

Tabel 2.7 Komposisi Kimia Zeolit Alam Lampung

Senyawa	Persentase (%)
SiO ₂	72.6
Al ₂ O ₃	12.4
Fe ₂ O ₃	1.19
Na ₂ O	0.45
TiO ₂	0.16
MgO	1.15
K ₂ O	2.17
CaO	3.56
Lain-lain	6.32

Molekul-molekul dengan diameter tertentu dapat melewati dan menempati pori-pori dan rongga zeolit, molekul yang terlalu besar tidak dapat masuk. Jadi sebagai adsorben, zeolit mempunyai *sifat shape selectivity* (Matsuoka, 2003). Zeolit juga memiliki kemampuan untuk mengondensasi gas yang teradsorpsi. Kemampuan zeolit menyerap zat organik dan anorganik tergantung pada rasio Si/Al dalam zeolit. Semakin rendah rasio Si/Al maka zeolit akan cenderung memilih molekul-molekul polar (air dan amoniak) untuk diadsorpsi. Sebaliknya jika rasio Si/Al tinggi maka zeolit cenderung mengadsorpsi molekul-molekul non polar (Jansen 2004). Hal ini disebabkan karena dengan semakin rendahnya rasio Si/Al dalam zeolit maka zeolit tersebut akan timbul gradien medan elektronik yang makin besar sehingga molekul polar akan berinteraksi lebih kuat dengan medan elektronik itu daripada molekul non polar.

Pada umumnya zeolit 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.

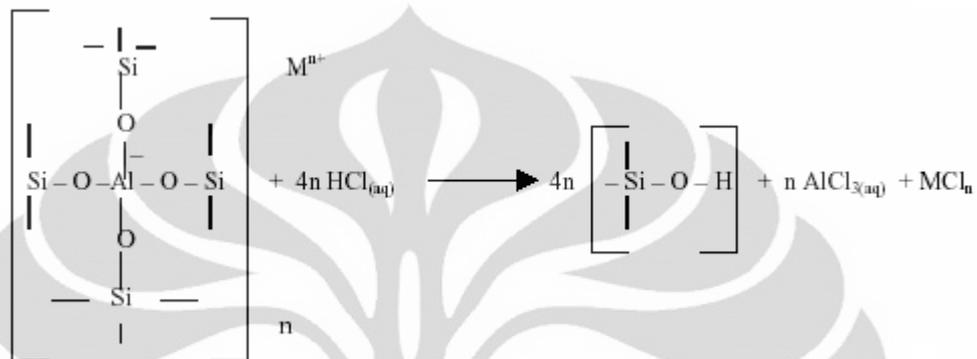
Pada penelitian ini adsorben yang digunakan adalah zeolit alam Lampung yang dimodifikasi dengan TiO_2 . Zeolit alam Lampung digunakan sebagai penyangga karena struktur kristalnya berpori, memiliki luas permukaan yang cukup besar, memiliki stabilitas termal yang tinggi, dan harganya murah (Handoko, 2002).

2.5.5 Aktivasi Zeolit

Aktivasi zeolit yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan metode dealuminasi. Prinsip dasar aktivasi zeolit dengan metode dealuminasi adalah dengan mengurangi kadar alumina dalam zeolit, sehingga rasio Si/Al dapat meningkat. Dengan meningkatkan rasio Si/Al, diharapkan kemampuan adsorpsi zeolit semakin meningkat. Dealuminasi akan meningkatkan stabilitas termal terutama pada suhu tinggi. Proses dealuminasi akan menyebabkan pergeseran

aluminium tertrahedral dari posisi rangka ke posisi non-rangka. Pada penelitian ini, proses dealuminasi akan dilakukan dengan perlakuan asam.

Perlakuan asam pada zeolit dilakukan dengan merendam zeolit dalam larutan HCl yang relatif pekat dan cukup lama sehingga jumlah Al dalam kerangka menjadi di luar kerangka. Peristiwa ini dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.4. Proses pelepasan Al dalam rangka menjadi Al diluar rangka (Handoko, 2002)

Proses dealuminasi, selain mengekstraksi Al dalam kerangka, juga mengakibatkan labilitas kerangka oksigen. Akibatnya atom Si berpindah ke tempat kosong yang ditinggalkan Al. Sebagai konsekuensinya ukuran unit sel-nya akan menyusut. Penyusutan tersebut mengakibatkan meningkatnya rasio Si/Al dan mengecilnya ukuran pori (Handoko, 2002).

2.6 TiO₂

TiO₂ termasuk salah satu jenis oksida logam yang merupakan semikonduktor. Diantara sekian banyak jenis semikonduktor, TiO₂ memegang peranan utama karena berbagai kelebihan sifat-sifat kimia fisiknya seperti struktur kristalnya berpori, memiliki luas permukaan yang cukup besar, memiliki stabilitas termal yang tinggi, dan tidak beracun. Secara komersil, TiO₂ juga memiliki kelebihan dibandingkan dengan semikonduktor 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 Fe₂O₃ yang daya oksidasinya lemah.

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). *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 menyebabkan luas permukaan yang tinggi untuk adsorpsi dan katalisis. Perbedaan diantara ketiga bentuk kristal dari TiO_2 dapat dilihat pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8. Perbandingan sifat dari berbagai bentuk kristal TiO_2 (Othmer, 1997)

Sifat	<i>Anatase</i>	<i>Brookite</i>	<i>Rutile</i>
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		7-7,5

2.7 Modifikasi Zeolit Alam Lampung dengan TiO_2

Sebagian besar semikonduktor yang digunakan sebagai katalis memiliki daya adsorpsi lemah. Untuk menutupi kekurangan tersebut, maka semikonduktor perlu dimodifikasi dengan suatu adsorben (Canela, 1999; El-Maazawi, 2000). Adsorben yang digunakan merupakan suatu media berpori sehingga ada kemungkinan katalis menempel di permukaan adsorben atau di dalam pori-pori adsorben. Katalis yang terdapat dalam pori maupun pada permukaan zeolit dapat aktif memicu reaksi katalitik sehingga dapat disimpulkan bahwa hal yang mempengaruhi keaktifan katalis adalah bagaimana dispersi katalis dalam adsorben penyangga dan bukan masalah letak katalis pada *support*. Makin tinggi dispersi atau penyebaran katalis yang memiliki struktur koordinat tetrahedral, maka makin aktif katalis tersebut. Untuk itu perlu dipilih metode preparasi yang memungkinkan dispersi katalis dengan baik pada adsorben (Slamet, 2007).

Secara umum, manfaat penggunaan adsorben sebagai penyangga katalis adalah (Torimoto, 1996; Matsuoka, 2003; Slamet, 2007):

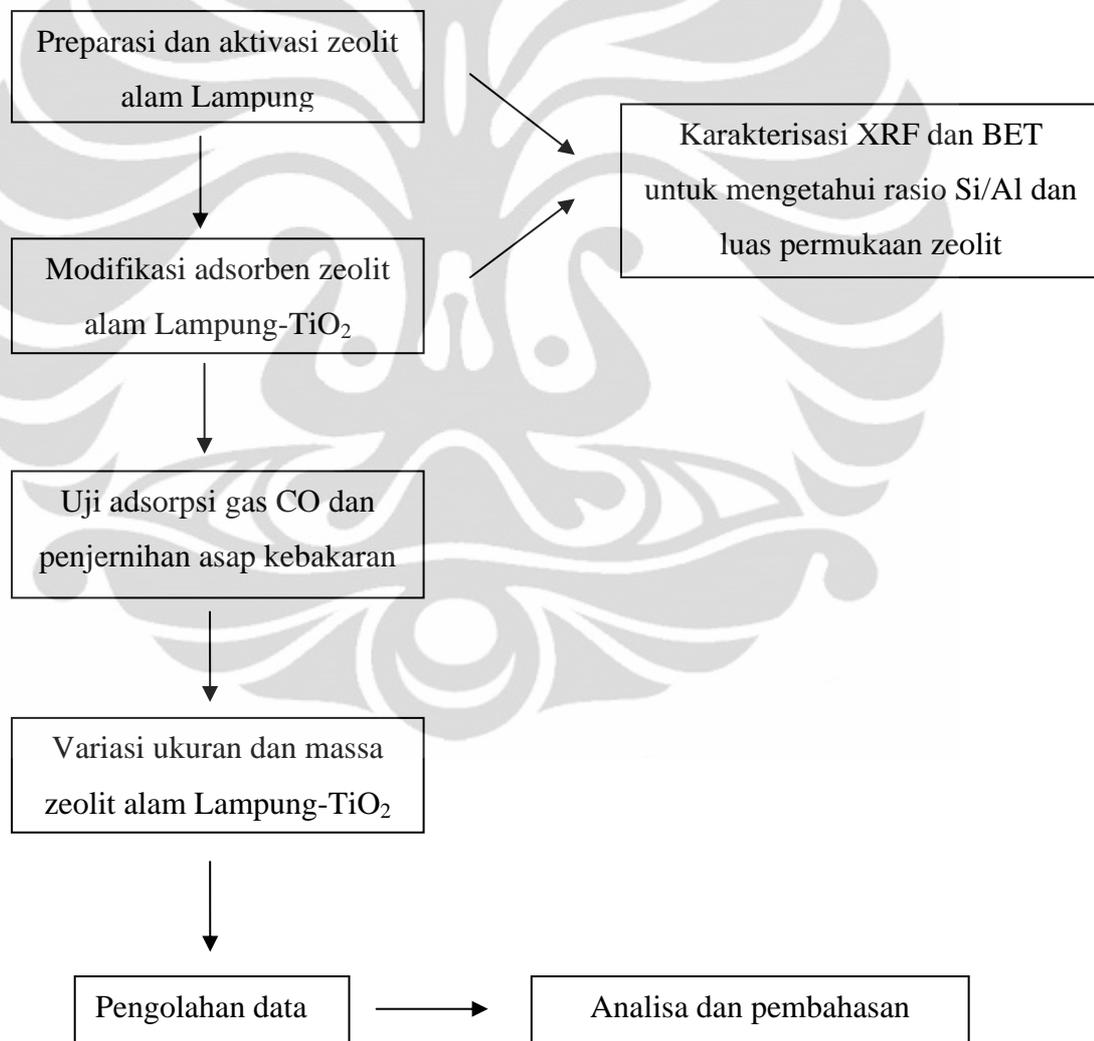
- Meningkatkan kemampuan adsorpsi katalis. Bila kemampuan adsorpsi meningkat maka kinetika katalitik juga akan meningkat karena katalis dapat langsung mengadsorpsi gas CO.
- Penggunaan zeolit alam Lampung dapat mendispersikan katalis TiO_2 sehingga luas permukaan katalis menjadi lebih besar dan katalis menjadi lebih aktif.

Kinerja katalis semikonduktor dan adsorben ditentukan oleh daya adsorpsi adsorben dan kemampuan difusi TiO_2 ke adsorben (Torimoto, 1996). Semakin tinggi daya adsorpsi adsorben, maka laju adsorpsi gas CO juga akan meningkat. Karena itu pemilihan adsorben harus dilakukan secermat mungkin untuk menghasilkan laju adsorpsi yang optimal. Kemampuan difusi adsorbat ke katalis juga turut berperan dalam menentukan laju adsorpsi. Bila kemampuan difusi adsorbat ke katalis baik, maka laju adsorpsi juga akan semakin tinggi.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

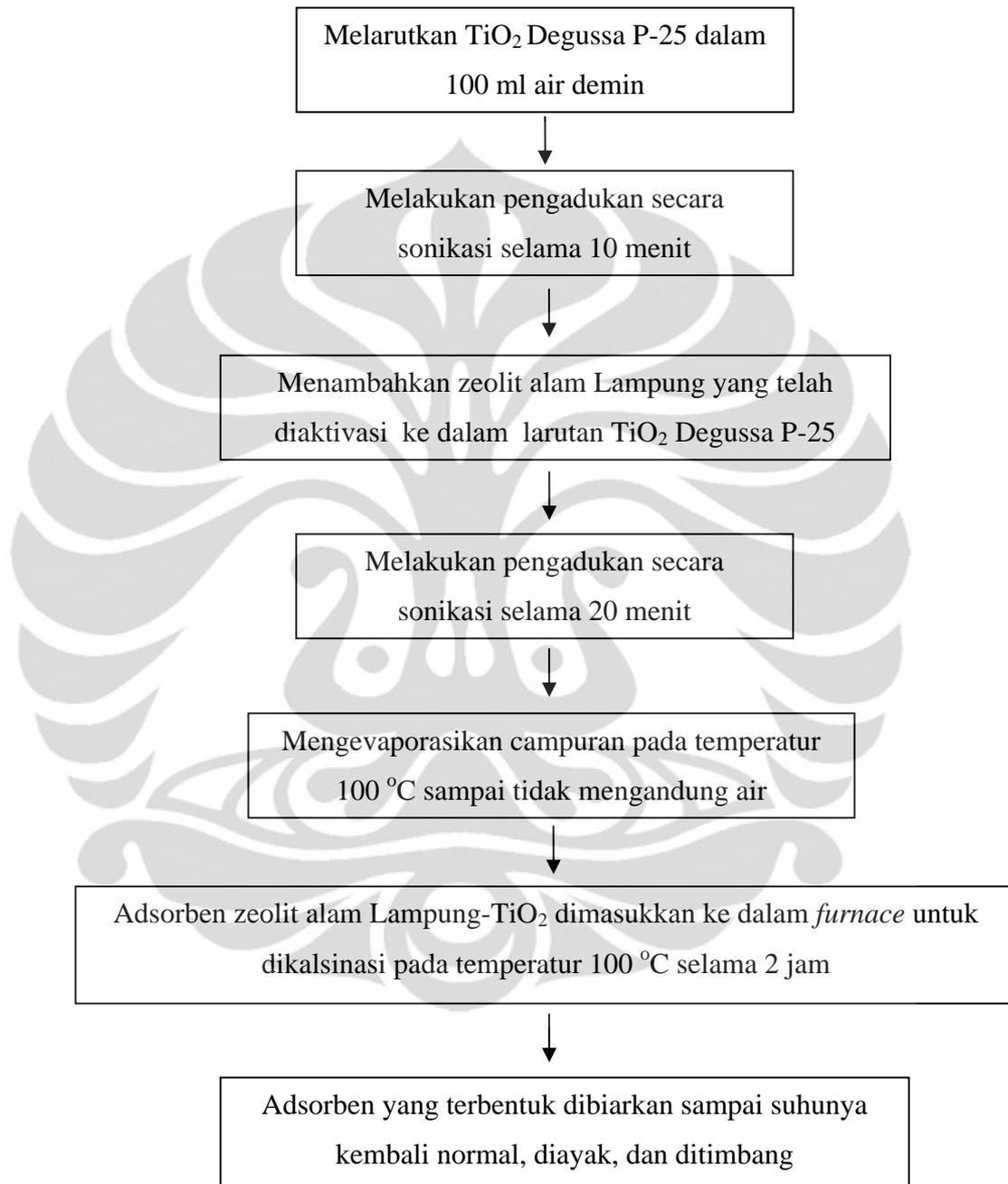
Penelitian dibagi menjadi lima tahap, yaitu tahap preparasi dan aktivasi zeolit alam Lampung, tahap modifikasi zeolit alam Lampung dengan TiO_2 , tahap pembuatan ruang uji, tahap adsorpsi gas CO, dan tahap penjernihan asap pembakaran. Diagram alir penelitian secara umum dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

3.1.1 Diagram Alir Modifikasi Zeolit Alam Lampung dengan TiO₂

Diagram alir preparasi adsorben ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 3.2 Diagram alir preparasi adsorben zeolit alam Lampung termodifikasi TiO₂

3.2 Peralatan Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini dikelompokkan menjadi alat untuk modifikasi zeolit alam Lampung dengan TiO_2 , alat untuk karakterisasi adsorben zeolit alam Lampung termodifikasi TiO_2 , dan alat untuk uji adsorpsi gas CO dan penjernihan asap pembakaran.

3.2.1 Pembuatan Zeolit Alam Lampung Termodifikasi TiO_2

Peralatan yang digunakan dalam preparasi adsorben zeolit alam Lampung termodifikasi TiO_2 adalah sebagai berikut:

1. Tumbukan dan mortar
2. *Beaker glass* 300 ml
3. Gelas ukur 100 ml
4. Kertas saring
5. Labu bulat dan *electromantel*
6. Kondensor
7. Labu erlenmeyer
8. *Ultrasonic processor*
9. *Atmospheric furnace*
10. Cawan evaporasi
11. Batang pengaduk
12. Kaca arloji
13. *Magnetic stirrer* dan *Hot plate*
14. Neraca digital
15. Spatula

3.2.2 Alat Karakterisasi Adsorben Zeolit Alam Lampung Termodifikasi TiO_2

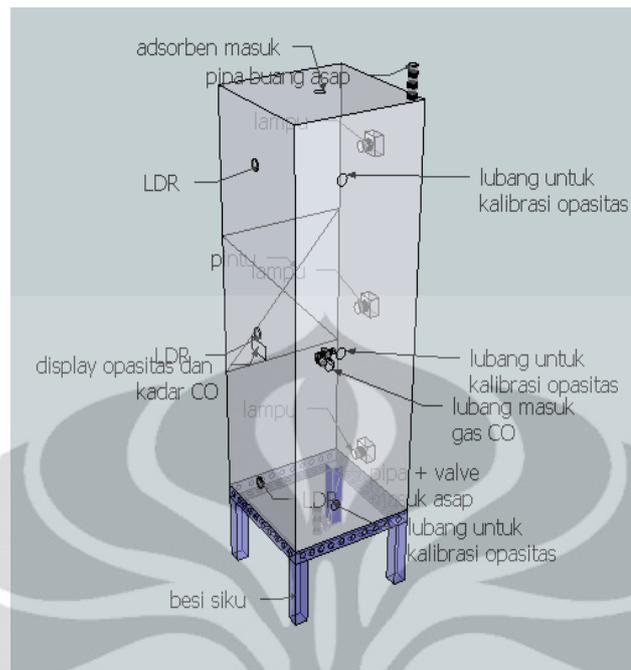
1. XRF tipe Panalytic Super Sharp Rh Tube (AXIOS 1) di Lab *Mining* PT. Intertek Services Indonesia.

2. BET *Autosorb-6* merk QUANTACHROME di Lab RPKA Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia dan BET Micromeritics Instrument tipe Gemini V2.00 di PT. Cimanggis Sakti Depok.

3.2.3 Alat Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran

1. Wadah dan ruang uji pembakaran
2. *Stopwatch*
3. *Sprayer* adsorben
4. Neraca digital
5. *CO analyzer*
6. Opasitimeter tipe *Light Measurement System for Testing Smoke Development* (DIN 50055)

Ruang uji kinerja adsorben zeolit alam Lampung termodifikasi TiO_2 memiliki ukuran 40 cm x 40 cm x 120 cm dengan bahan akrilik. Pada bagian tengah samping kiri ruang uji terdapat pintu berukuran 40 cm x 40 cm yang bisa dibuka untuk membersihkan dinding dan dasar akrilik dari sisa adsorben yang disemprotkan ke dalam ruang uji. Bagian atas ruang uji terdapat lubang untuk asap keluar dan lubang untuk menyemprotkan adsorben. Bagian bawah ruang uji terdapat lubang untuk memasukkan asap yang dihasilkan dari wadah pembakaran. Ruang uji dibuat kedap udara dan dilakukan uji kebocoran agar tidak ada asap yang keluar selama proses adsorpsi berlangsung.



Gambar 3.3. Skema Ruang Uji

3.3 Bahan-bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini meliputi bahan untuk preparasi dan aktivasi zeolit alam Lampung, bahan preparasi modifikasi zeolit alam Lampung TiO_2 , dan bahan uji adsorpsi gas CO dan penjernihan asap pembakaran.

3.3.1 Bahan Preparasi dan Aktivasi Zeolit Alam Lampung

Bahan-bahan yang digunakan untuk preparasi awal zeolit alam Lampung adalah:

1. Zeolit alam Lampung
2. HF 2% (Merck)
3. HCl 6M (Merck)
4. NH_4Cl 0,1 M (Merck)
5. Air demin

3.3.2 Bahan Preparasi dan modifikasi zeolit alam Lampung dengan TiO_2

Bahan-bahan yang digunakan dalam preparasi TiO_2 adalah sebagai berikut:

1. Serbuk TiO₂ komersial Degussa P-25 (79,23% anatase, 20,77% rutile)
2. Zeolit alam Lampung yang telah diaktivasi
3. Air demin

3.3.3 Bahan Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran

Bahan-bahan yang digunakan untuk uji adsorpsi gas CO dan penjernihan asap kebakaran adalah:

1. Adsorben zeolit alam Lampung aktif dan zeolit alam Lampung termodifikasi TiO₂
2. Serbuk kayu, kertas, dan potongan kabel
3. Minyak tanah
4. Lap
5. *Stopwatch*

3.3.4 Variabel dalam Penelitian

Variasi ini dilakukan untuk mendapatkan ukuran dan massa adsorben zeolit alam Lampung aktif dan zeolit alam Lampung termodifikasi TiO₂ yang optimum dalam proses adsorpsi gas CO dan proses penjernihan asap pembakaran. Variasi ini dilakukan dengan cara memvariasikan massa zeolit alam Lampung aktif dan zeolit alam Lampung termodifikasi TiO₂ yang disemprotkan pada asap kebakaran yaitu 1 g dan 3 g, dengan ukuran partikel 37 mikron meter dan 400 nano meter.

3.4 Prosedur Penelitian

Tahap persiapan awal terdiri dari persiapan ruang uji dan aktivasi zeolit alam Lampung serta modifikasi zeolit alam Lampung-TiO₂ yang akan digunakan untuk mengadsorpsi gas CO dan penjernihan asap pembakaran.

3.4.1 Prosedur Aktivasi dan Modifikasi Adsorben

Prosedur aktivasi dan modifikasi ini dilakukan dengan mengacu pada penelitian yang dilakukan sebelumnya. Preparasi adsorben zeolit alam Lampung termodifikasi TiO₂ terdiri dari dua aktivitas utama (Slamet, 2007), yaitu:

a. Aktivasi Zeolit Alam Lampung

Aktivasi dilakukan untuk meningkatkan rasio Si/Al dan luas permukaan zeolit. Aktivasi yang dilakukan adalah dealuminasi. Proses dealuminasi ini dilakukan dengan perlakuan asam dan pemanasan (Slamet, 2007).

- Aktivasi zeolit alam Lampung dengan perlakuan asam
 1. Menggerus dan mengayak zeolit alam Lampung hingga berukuran 37 μm dan 400 nm.
 2. Merendam 100 g zeolit dalam 200 ml larutan HF 1% selama 10 menit disertai dengan pengadukan menggunakan *magnetic stirrer*. Setelah itu zeolit dibilas dengan air demin dan disaring. Perendaman zeolit dalam larutan HF ini bertujuan untuk melarutkan oksida pengotor yang terdapat dalam zeolit.
 3. Merefluks zeolit dengan 200 ml larutan HCl 6 M pada temperatur 90 °C selama 30 menit. Zeolit ini kemudian dibilas dengan air demin dan disaring. Refluks zeolit dalam larutan HCl bertujuan agar aluminium dalam zeolit dapat terekstrak dan aluminium dalam kerangka menjadi aluminium luar kerangka sehingga rasio Si/Al meningkat.
 4. Merendam zeolit dalam 200 ml larutan NH_4Cl selama lima hari dengan pemanasan pada suhu 90 °C selama tiga jam per hari. Perendaman zeolit dalam NH_4Cl bertujuan untuk memperkuat struktur baru yang terbentuk karena proses dealuminasi oleh HCl.
- Aktivasi zeolit alam Lampung dengan pemanasan

Zeolit alam yang telah diberikan perlakuan asam, dimasukkan ke dalam *furnace* pada suhu 500 °C selama 5 jam sehingga diperoleh zeolit alam yang berwujud serbuk-serbuk kering.

b. Preparasi Adsorben Zeolit Alam Lampung termodifikasi TiO_2

1. Sejumlah TiO_2 Degussa P-25 dilarutkan dalam 100 ml air demin dan diaduk secara sonikasi selama 10 menit.

2. Larutan TiO_2 zeolit alam Lampung yang telah diaktivasi (perbandingan zeolit alam Lampung dengan TiO_2 Degussa P-25 adalah 80:20) dan dilanjutkan dengan sonikasi selama 20 menit.
3. Mengevaporasikan campuran zeolit alam Lampung- TiO_2 sampai tidak mengandung air.
4. Adsorben yang terbentuk kemudian dimasukkan ke dalam *furnace* untuk dikalsinasi pada temperatur $100\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam. Kalsinasi pada temperatur $100\text{ }^\circ\text{C}$ dilakukan untuk mendispersikan TiO_2 secara merata pada seluruh permukaan zeolit alam Lampung. Adsorben yang telah terbentuk dibiarkan sampai temperaturnya kembali normal, diayak kemudian ditimbang.

3.4.2 Karakterisasi Adsorben Zeolit Alam Lampung

Karakterisasi yang dilakukan adalah mengukur luas permukaan dan rasio Si/Al zeolit alam Lampung murni, zeolit alam Lampung aktif, dan zeolit alam Lampung termodifikasi TiO_2 .

3.4.2.1 Luas Permukaan Zeolit Alam Lampung

Karakterisasi ini dilakukan untuk menghitung luas permukaan zeolit alam Lampung murni, zeolit alam Lampung yang telah diaktivasi, dan zeolit alam Lampung yang telah dimodifikasi TiO_2 . Selain itu, karakterisasi BET ini penting untuk melihat pengaruh TiO_2 terhadap permukaan zeolit. Karakterisasi ini dilakukan dengan Autosorb-6 merk QUANTACROME yang ada di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Alam (RPKA) jurusan Teknik Kimia FTUI Depok dan BET Micromeritics Instrument tipe Gemini V2.00 di PT. Cimanggis Sakti Depok.

3.4.2.2 Rasio Si Terhadap Al

Karakterisasi XRF dilakukan untuk mengetahui komposisi zeolit, rasio Si/Al zeolit alam Lampung sebelum dan setelah aktivasi, dan kandungan TiO_2 dalam adsorben zeolit alam Lampung- TiO_2 yang telah dibuat.

Sampel yang akan dikarakterisasi XRF dihaluskan hingga berbentuk

serbuk. Sampel dimasukkan ke dalam oven untuk menghilangkan kandungan airnya. Selanjutnya sampel ditambahkan 8 gram flux (campuran Lithium Tetraborat dan Lithium Metaborat), dihomogenkan, dan ditambah beberapa tetes ammonium iodida 30 %. Cawan platina yang berisi sampel tersebut dilebur dalam *furnace* pada temperatur 1050 °C selama 20 menit. Kemudian sampel yang telah dilebur dicetak hingga membentuk lingkaran pelet tipis. Sampel yang telah berbentuk pelet tipis ini dimasukkan ke dalam alat XRF. Kemudian alat XRF akan mengirimkan sejumlah data ke dalam komputer yang menunjukkan komposisi sampel.

3.4.3 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran

Bahan yang akan dibakar (kertas, serbuk kayu, kabel, dan arang) ditimbang masing-masing 20 gram kemudian dibakar dalam wadah pembakaran. Jenis pembakaran yang dilakukan adalah *smoldering* yaitu terbentuk bara sehingga asap terbentuk. Uji adsorpsi gas CO dilakukan tanpa adsorben, dengan zeolit alam Lampung aktif, dan zeolit alam Lampung-TiO₂.

a. Uji Adsorpsi Tanpa adsorben

1. Membakar bahan dan memasukkan asapnya ke dalam ruang uji. Memompa asap sampai opasitas dalam ruang uji 0 atau asap jenuh dalam ruang uji.
2. Mencatat nilai opasitas dan konsentrasi CO awal.
3. Mencatat nilai opasitas tiap menit sampai didapat nilai t_{10} dan konsentrasi CO tiap menit selama 20 menit.

b. Uji Adsorpsi dengan Zeolit Alam Lampung aktif

1. Membakar bahan dan memasukkan asapnya ke dalam ruang uji. Memompa asap sampai opasitas dalam ruang uji atau asap jenuh dalam ruang uji.
2. Mencatat nilai opasitas dan konsentrasi CO awal.
3. Menyemprotkan adsorben zeolit alam Lampung aktif pada bagian atas ruang uji.
4. Mencatat nilai opasitas tiap menit sampai didapat nilai t_{10} dan konsentrasi CO tiap menit selama 20 menit.

5. Mengeluarkan asap dan membersihkan ruang uji.
6. Melakukan hal yang sama untuk variasi ukuran dan variasi massa adsorben.

c. Uji Adsorpsi dengan Zeolit Alam Lampung Termodifikasi TiO_2

1. Membakar bahan dan memasukkan asapnya ke dalam ruang uji. Memompa asap sampai opasitas dalam ruang uji atau asap jenuh dalam ruang uji.
2. Mencatat nilai opasitas dan kadar CO awal.
3. Menyemprotkan adsorben zeolit alam Lampung- TiO_2 pada bagian atas ruang uji.
4. Mencatat nilai opasitas tiap menit sampai didapat nilai t_{10} dan konsentrasi CO tiap menit selama 20 menit.
5. Mengeluarkan asap dan membersihkan ruang uji.
6. Melakukan hal yang sama untuk variasi ukuran dan variasi massa adsorben.

d. Prosedur Pembuatan Asap

1. Memasukkan bahan yang akan dibakar dengan jumlah sesuai *point* 3.4.4 ke dalam wadah pembakaran.
2. Membakar bahan selama 2 menit lalu menutup wadah pembakaran.
3. Memasukkan selang yang berada pada bagian atas wadah pembakaran ke dalam bagian samping ruang uji.
4. Memompa asap pembakaran selama 5 menit dan sampai opasitas dalam ruang uji 0 atau asap jenuh.
5. Menutup *valve* dan mengeluarkan selang dari ruang uji.

3.5 Data Penelitian

Data yang diperoleh adalah:

1. Data komposisi zeolit dan rasio Si/Al zeolit alam Lampung murni, zeolit alam Lampung yang telah diaktivasi, dan zeolit alam Lampung yang telah dimodifikasi TiO_2 dengan XRF.

2. Data luas permukaan zeolit alam Lampung murni, zeolit alam Lampung yang telah diaktivasi, dan zeolit alam Lampung yang telah dimodifikasi TiO₂ dengan BET.
3. Penurunan opasitas dan nilai t₁₀ tanpa adsorben, dengan zeolit alam Lampung aktif, dan zeolit alam Lampung termodifikasi TiO₂.
4. Penurunan konsentrasi CO dan % adsorpsi CO tanpa adsorben, dengan zeolit alam Lampung aktif, dan zeolit alam Lampung termodifikasi TiO₂.

3.6 Pengolahan Data

Banyaknya gas CO yang teradsorpsi dapat dihitung berdasarkan selisih konsentrasi gas CO awal dengan konsentrasi gas CO pada menit 20. Kapasitas adsorpsi ini merupakan fungsi dari waktu dan ketinggian ruangan.

$$\% \text{ Adsorpsi} = \frac{CO_0 - C_{20}}{CO_0} \times 100\% \quad (3.1)$$

CO₀ = konsentrasi gas CO awal (ppm)

C₂₀ = konsentrasi gas CO pada menit 20

Untuk efektivitas adsorben zeolit alam Lampung termodifikasi TiO₂ dalam menjernihkan asap kebakaran dilihat dari nilai rasio t₁₀, t₁₀ adalah waktu yang dibutuhkan untuk dapat membuat opasitas sepuluh kali lebih jernih dibandingkan kondisi awal (menit nol). Nilai rasio t₁₀ diperoleh dari perbandingan nilai kondisi t₁₀ tanpa adsorben dengan kondisi t₁₀ dengan adsorben.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia dan Laboratorium Analitik Balai Penelitian Bioteknologi Perkebunan Indonesia. Proses penelitian ini meliputi tahap aktivasi zeolit alam Lampung, tahap modifikasi zeolit alam Lampung dengan TiO_2 , tahap pembuatan ruang uji, tahap adsorpsi gas CO, dan tahap penjernihan asap kebakaran. Analisa kandungan silika dan alumunium menggunakan *X-Ray Florescence* (XRF) serta analisa luas permukaan menggunakan metode analisa BET.

4.1 Aktivasi Zeolit Alam Lampung

Pada penelitian ini dilakukan terlebih dahulu proses perlakuan awal pada zeolit alam Lampung yang disebut dengan proses aktivasi. Proses aktivasi ini berfungsi untuk meningkatkan daya serap (adsorpsi) zeolit alam Lampung.

Proses awal yang dilakukan pada aktivasi zeolit adalah proses pelarutan oksida pengotor dengan merendam zeolit alam Lampung dalam larutan HF 1 % selama 10 menit yang disertai dengan pengadukan, kemudian dilakukan proses dealuminasi atau proses pelarutan unsur alumunium dengan merefluks zeolit alam Lampung dalam larutan HCl 6 M selama 30 menit. Setelah proses dealuminasi, zeolit alam Lampung direndam dalam larutan NH_4Cl 0,1 M selama 5 hari yang disertai pengadukan selama 3 jam per hari untuk memperkuat struktur baru yang terbentuk. Pada akhir aktivasi, dilakukan proses kalsinasi pada temperatur 500 °C selama 5 jam yang bertujuan untuk menguapkan air yang terperangkap dalam kristal zeolit.

Zeolit alam Lampung yang digunakan sebagai adsorben dilakukan penggerusan dan pengayakan terlebih dahulu menjadi ukuran partikel 37 mikron (400 mesh) dan 400 nano meter. Dalam proses aktivasi terdapat beberapa perubahan yang dapat langsung diamati secara visual yaitu pada proses pelarutan oksida pengotor menggunakan larutan HF 1 %, pada proses ini timbul larutan

berwarna putih keruh dan endapan zeolit. Selanjutnya, proses dealuminasi menggunakan larutan HCl 6 M terjadi perubahan warna dari larutan putih keruh menjadi larutan berwarna kuning pekat. Sedangkan pada perendaman zeolit alam Lampung dengan larutan NH_4Cl 0,1 M, larutan yang awalnya bening menjadi larutan putih keabuan dan terjadi pengikisan sehingga zeolit menjadi lebih halus.



Gambar 4.1. Perendaman zeolit alam Lampung dalam larutan HF 1 % dan HCl 6 M

Pada proses kalsinasi terjadi perubahan warna dari serbuk putih kekuningan menjadi serbuk lebih putih bersih. Dalam proses ini terjadi pengurangan bobot zeolit yang menandakan adanya air dan senyawa organik yang teruapkan yang terdapat di dalam zeolit.

4.2 Karakterisasi Zeolit Alam Lampung

Karakterisasi zeolit alam Lampung meliputi pengukuran rasio Si/Al menggunakan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan pengukuran luas permukaan zeolit alam Lampung menggunakan metode BET.

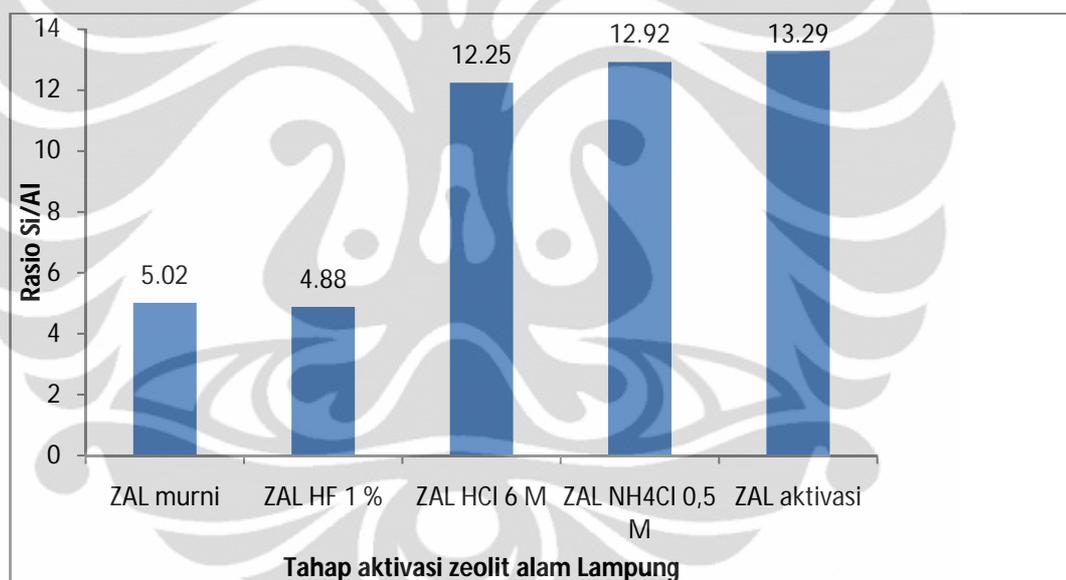
4.2.1 Rasio Si Terhadap Al

Rasio Si/Al yang terkandung dalam zeolit alam Lampung sangat mempengaruhi besarnya daya serap dan juga merupakan komponen utama pembentuk rangka (*framework*). Oleh karena itu, perlu dilakukan pengukuran

rasio Si/Al dalam zeolit alam Lampung tiap tahapan aktivasi dari awal hingga akhir. Tabel 4.1 menunjukkan nilai rasio Si/Al untuk tiap tahap aktivasi.

Tabel 4.1. Rasio Si/Al tiap tahap aktivasi zeolit alam Lampung

No	Tahap aktivasi	Silika (% wt)	Alumunium (% wt)	Si/Al
1	Zeolit alam Lampung asli	70,19	13,99	5,02
2	Zeolit dalam HF 1 %	69,11	14,15	4,88
3	Zeolit dalam HCl 6 M	82,51	6,74	12,25
4	Zeolit dalam NH ₄ Cl 0,5 M	88,49	6,85	12,92
5	Zeolit kalsinasi	84,52	6,36	13,30



Gambar 4.2. Rasio Si/Al pada tiap tahap aktivasi zeolit alam Lampung

Berdasarkan Gambar 4.2, rasio Si/Al pada tahap perendaman zeolit alam Lampung dengan larutan HF 1 % terjadi penurunan dari 5,02 menjadi 4,88, dan komposisi unsur alumunium terjadi peningkatan dari 13,99 (% wt) menjadi 14,15 (% wt). Hal ini terjadi karena larutan HF 1 % berfungsi untuk melarutkan oksida pengotor yang terdapat pada zeolit bukan sebagai pelarutan oksida logam.

Pada tahapan proses dealuminasi menggunakan larutan HCl 6 M terjadi peningkatan rasio Si/Al yang cukup besar yaitu 4,88 menjadi 12,25 dan terjadi penurunan komposisi unsur Alumunium dari 14,15 (% wt) menjadi 6,74

(%wt). Pada tahap dealuminasi, HCl 6 M berfungsi untuk melarutkan oksida logam (AlO_4)⁵⁻ dengan membuka pori-pori zeolit menjadi berukuran pori lebih besar sehingga oksida aluminium dari kerangka dalam kristal akan keluar dan mendorong oksida aluminium keluar dari struktur zeolit dan terlarut dalam larutan HCl 6 M.

Pada tahapan perendaman zeolit alam Lampung dengan larutan NH_4Cl 0,1 M terjadi peningkatan rasio Si/Al dari 12,25 menjadi 12,92 dan peningkatan komposisi unsur aluminium dari 6,74 (%wt) menjadi 6,85 (%wt). Tahap ini berfungsi untuk memperkuat struktur baru yang terbentuk dari proses dealuminasi.

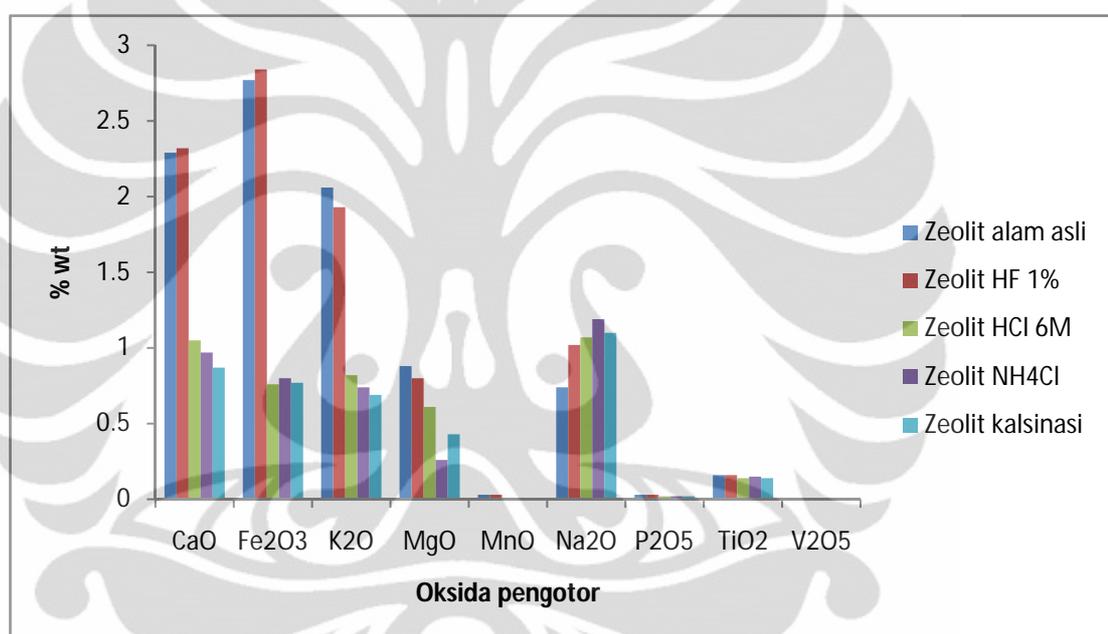
Pada tahapan proses kalsinasi pada temperatur 500 °C zeolit terjadi peningkatan rasio Si/Al dari 12,92 menjadi 13,30. Namun walaupun nilai rasio Si/Al terjadi peningkatan, komposisi unsur silika dan aluminium terjadi penurunan. Hal ini dapat terjadi karena pada saat proses kalsinasi oksida-oksida silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) mengendap pada bagian bawah dan melekat pada cawan penguapan sehingga komposisi oksida silika dan alumina menurun.

4.2.2 Komposisi Pengotor

Pada zeolit alam Lampung selain terdapat oksida silika dan alumina terdapat juga oksida-oksida unsur lain yang merupakan pengotor. Oksida tersebut memiliki komposisi yang kecil tetapi berlaku sebagai pengotor karena akan mengisi ruang hampa struktur dalam zeolit dan mengganggu zeolit untuk mengadsorpsi molekul. Komposisi oksida pengotor yang terkandung dalam zeolit alam Lampung dilakukan analisa menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Komposisi oksida pengotor dalam zeolit alam Lampung

Tahapan	CaO (% wt)	Fe ₂ O ₃ (% wt)	K ₂ O (% wt)	MgO (% wt)	MnO (% wt)	Na ₂ O (% wt)	P ₂ O ₅ (% wt)	TiO ₂ (% wt)	V ₂ O ₅ (% wt)
Zeolit alam Lampung asli	2,29	2,77	2,06	0,88	0,03	0,74	0,03	0,16	0,01
Zeolit dalam HF 1 %	2,32	2,84	1,93	0,80	0,03	1,02	0,03	0,16	0,01
Zeolit dalam HCl 6 M	1,05	0,76	0,82	0,61	0,00	1,07	0,02	0,14	0,01
Zeolit dalam NH ₄ Cl 0,5 M	0,97	0,80	0,74	0,26	0,00	1,19	0,02	0,15	0,01
Zeolit kalsinasi	0,87	0,77	0,69	0,43	0,00	1,10	0,02	0,14	0,01

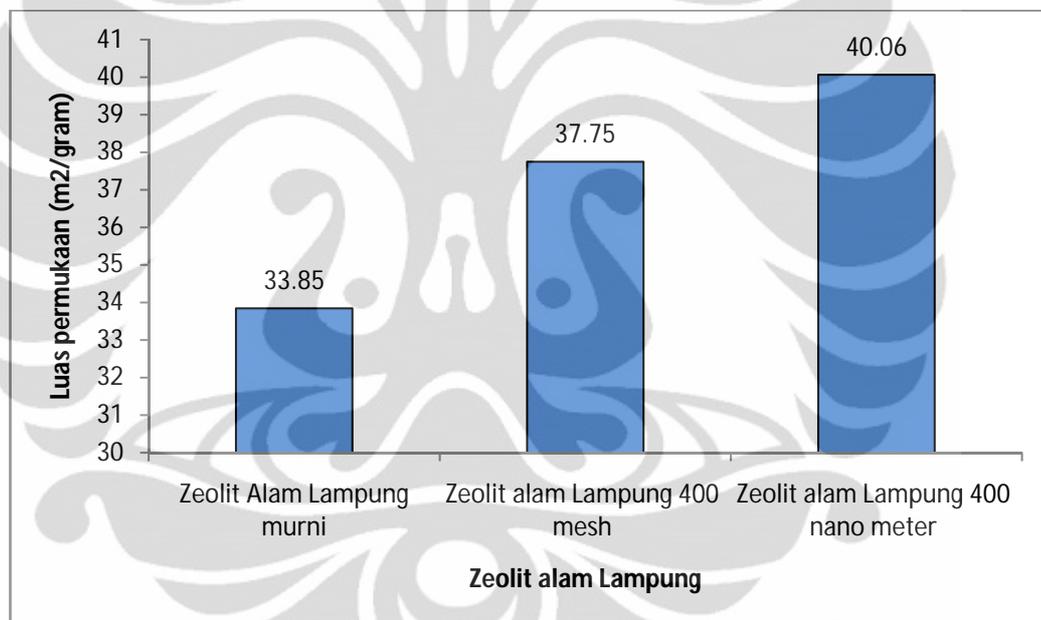
**Gambar 4.3.** Penurunan oksida pengotor pada tiap tahap aktivasi

Dari Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa terjadi penurunan konsentrasi oksida pengotor setelah dilakukan aktivasi, hal ini menunjukkan bahwa proses aktivasi dapat menghilangkan oksida pengotor yang berada pada zeolit alam Lampung. Oksida kalium (K₂O), oksida kalsium (CaO), dan oksida besi (Fe₂O₃) merupakan pengotor yang dapat menurunkan daya serap zeolit terhadap molekul organik, hal ini terjadi karena oksida logam tersebut akan menurunkan muatan listrik yang ditimbulkan oleh oksida aluminium sehingga dapat menyebabkan oksida silika sulit bersifat netral dan sulit menyerap organik. Setiap tahap aktivasi dapat

menurunkan kandungan oksida pengotor ini karena ikut terlarut dalam masing-masing tahapan proses.

4.2.3 Luas Permukaan Zeolit Alam Lampung

Luas permukaan zeolit alam Lampung mempengaruhi besarnya kemampuan daya serap. Untuk mengetahui luas permukaan zeolit dilakukan analisa metode BET yang meliputi zeolit alam Lampung murni, zeolit alam Lampung aktif, dan zeolit alam Lampung modifikasi TiO_2 . Setelah dilakukan analisa menggunakan metode BET maka didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Perbandingan luas permukaan zeolit alam Lampung

Pada Gambar 4.4 menunjukkan peningkatan luas permukaan zeolit alam Lampung murni dengan zeolit alam Lampung yang telah dilakukan aktivasi dari 33,85 m^2/gram menjadi 37,75 m^2/gram untuk zeolit alam Lampung 400 mesh dan 40,06 m^2/gram untuk zeolit alam Lampung 400 nano meter. Perendaman dalam larutan HF 1 % akan melarutkan oksida pengotor yang terdapat pada zeolit alam Lampung, perendaman dalam larutan NH_4Cl 0,1 M akan melarutkan oksida pengotor yang masih tertinggal pada proses dealuminasi melalui proses pertukaran ion sehingga dapat menjadikan ruang kosong dalam kristal-kristal. Proses kalsinasi pada temperatur 500 °C akan menguapkan molekul air yang terdapat

dalam kristal zeolit sehingga terbentuk suatu rongga dengan permukaan yang lebih besar. Namun dari hasil aktivasi yang didapat, luas permukaan zeolit alam Lampung murni dan zeolit alam Lampung aktivasi tidak menunjukkan peningkatan yang besar. Hal ini dapat terjadi karena karakteristik dari zeolit alam Lampung dan pengadukan yang kurang sempurna pada saat perendaman dalam larutan NH_4Cl 0,1 M.

4.3 Modifikasi Zeolit Alam Lampung dengan TiO_2

Zeolit alam Lampung yang telah diaktivasi dimodifikasi dengan TiO_2 Degussa P-25 dengan perbandingan 80:20 (Muhamad Gondang AK, 2011). TiO_2 dilarutkan dalam air demin dan dilakukan sonikasi. Sonikasi bertujuan untuk memecah partikel padatan menjadi lebih kecil dengan bantuan gelombang ultrasonik. Dari hasil analisa *X-Ray Fluorescence* (XRF) didapatkan kandungan TiO_2 untuk zeolit alam Lampung 400 mesh- TiO_2 dan zeolit alam Lampung 400 nm- TiO_2 adalah 19,14 % wt. Hasil ini menunjukkan bahwa proses modifikasi berlangsung baik karena mendekati nilai kandungan TiO_2 sebenarnya.

Tabel 4.3. Komposisi kimia zeolit alam Lampung termodifikasi TiO_2

Sampel	Al_2O_3 (% wt)	Fe_2O_3 (% wt)	K_2O (% wt)	MnO (% wt)	Na_2O (% wt)	SiO_2 (% wt)	TiO_2 (% wt)
Zeolit Lampung- TiO_2 400 mesh	3,12	0,81	0,41	0,02	0,59	74,76	19,14
Zeolit Lampung- TiO_2 400 nm	5,04	1,18	0,55	0,01	0,85	66,56	19,14

Dari komposisi tersebut diketahui nilai rasio Si/Al zeolit alam Lampung- TiO_2 400 mesh adalah 23,96 dan zeolit alam Lampung- TiO_2 400 nm adalah 13,21. Sementara untuk luas permukaan zeolit untuk zeolit alam Lampung aktif 400 nm dengan zeolit alam Lampung- TiO_2 terjadi peningkatan dari 40,064 m^2/gram menjadi 44,41 m^2/gram .

4.4 Pembuatan Ruang Uji

Ruang uji adsorpsi gas CO dibuat dari bahan akrilik dengan ukuran 40 cm x 40 cm x 120 cm. Ruang uji ini dilengkapi dengan 3 lubang di bagian

samping untuk memasukkan asap kebakaran dan 1 lubang di bagian atas untuk menyempatkan adsorben. Sisi bagian tengah pada samping kiri ruang uji terdapat pintu yang bisa dibuka untuk tujuan pembersihan dinding akrilik setiap kali pengambilan data. Pada bagian pintu terdapat lubang untuk memasukkan *probe CO analyzer*. Setiap bagian ruang uji harus kedap udara untuk menghindari terjadinya kebocoran asap kebakaran yang dapat menyebabkan uji adsorpsi dan penjernihan asap kebakaran menjadi tidak akurat. Ruang uji yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.5. Dari gambar tersebut dapat dikatakan bahwa ruang uji tidak bocor karena kandungan CO dalam ruang uji cenderung stabil.

4.5 Pembuatan Asap Kebakaran

Material yang digunakan sebagai bahan bakar asap kebakaran adalah material yang umumnya terdapat di dalam gedung atau ruangan. Pada penelitian ini bahan bakar yang digunakan adalah kertas, kabel, serbuk kayu, dan arang. Awalnya masing-masing material tersebut ditimbang sebanyak 20 gram kemudian ditambahkan 10 ml minyak tanah. Setelah itu campuran material dan bahan bakar dibakar selama 2 menit dan waktu pemompaan dari wadah kebakaran ke ruang uji selama 5 menit. Wadah kebakaran harus tertutup rapat untuk menghindari terjadinya kebocoran. Wadah kebakaran yang berisi material yang telah dibakar ditimbang untuk mengetahui jumlah material yang terbakar. Wadah kebakaran yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.6.



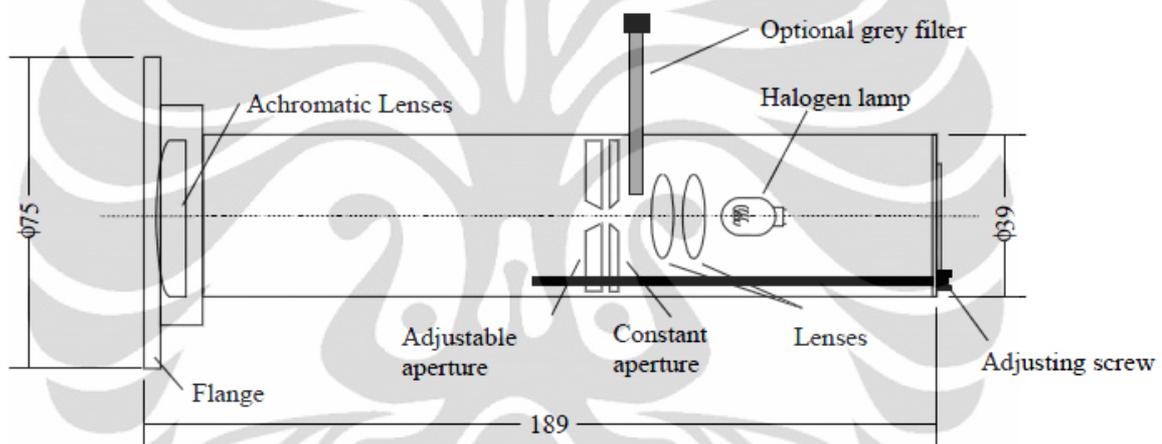
Gambar 4.5. Ruang uji adsorpsi gas CO



Gambar 4.6. Wadah kebakaran

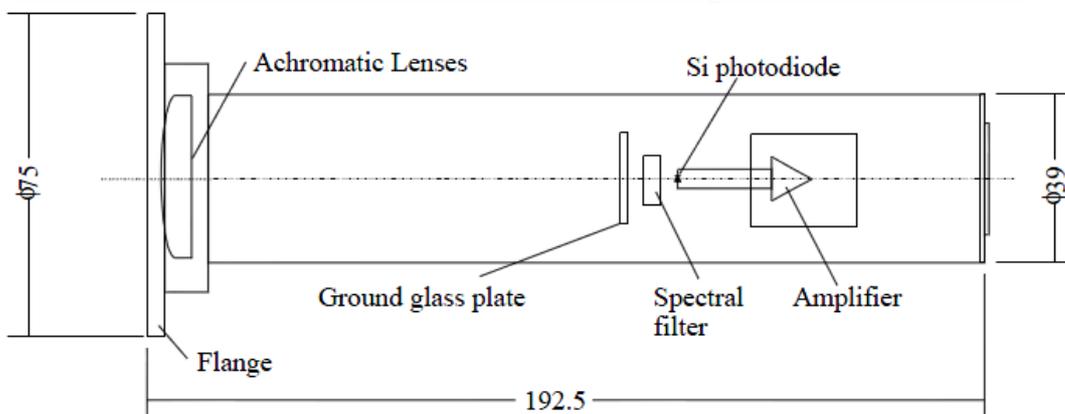
4.6 Kalibrasi Opasitimeter

Pada penelitian ini ada dua variabel yang dilakukan yaitu adsorpsi gas CO dan penjernihan asap kebakaran dengan adsorben zeolit alam Lampung aktif dan zeolit alam Lampung termodifikasi TiO_2 . Untuk penjernihan asap kebakaran diukur nilai opasitasnya menggunakan alat *Light Measurement System for Testing Smoke Development* (DIN 50055) yang terdapat di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Alat ini terdiri dari *Light source* dan *Light receiver*. *Light source* terdiri dari lampu halogen dan sistem lensa yang dapat menghasilkan sinar cahaya paralel dengan diameter 25 mm pada *emitter outlet*.



Gambar 4.7. Skema *light source*

Light receiver terdiri dari sistem lensa kromatis yang terletak pada kedalaman 80 mm dan sel fotoelektrik silikon yang terletak di depannya.



Gambar 4.8. Skema *light receiver*

Kalibrasi alat *Light Measurement System for Testing Smoke Development* (DIN 50055) dilakukan dengan cara mengukur opasitas ruang uji tanpa asap dan mengukur opasitas ruang uji yang berisi asap tebal tidak tembus cahaya. Opasitas ruang uji tanpa asap akan menunjukkan angka 100, artinya 100 % cahaya dari *light source* dapat diterima oleh *light receiver*. Apabila alat *Measurement System for Testing Smoke Development* (DIN 50055) tidak menunjukkan angka 100 maka ditepatkan dengan memutar tombol *span* sampai angka 100. Sebaliknya ruang uji yang berisi asap tebal tidak tembus cahaya memiliki nilai opasitas 0, artinya tidak ada cahaya yang ditangkap oleh *light receiver*. Apabila alat *Measurement System for Testing Smoke Development* (DIN 50055) tidak menunjukkan angka 0 maka ditepatkan dengan memutar tombol *zero* sampai angka 0.



Gambar 4.9. *Light Measurement System for Testing Smoke Development* (DIN 50055)

4.7 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran

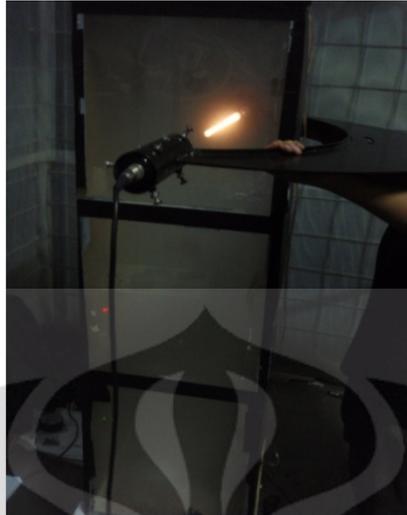
Uji Adsorpsi gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran dilakukan tanpa adsorben, dengan zeolit alam Lampung aktif, dan zeolit alam Lampung termodifikasi TiO_2 .

4.7.1 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran Tanpa Adsorben

Uji ini dilakukan untuk melihat perubahan opasitas asap dan penurunan konsentrasi gas CO tanpa penyemprotan adsorben. Uji ini juga berfungsi sebagai uji kebocoran dari ruang uji yang dibuat. Uji ini dilakukan dengan memasukkan asap hasil kebakaran material (*point* 4.4.1) ke dalam ruang uji kemudian diamati nilai opasitas dan nilai penurunan konsentrasi gas CO. Nilai opasitas diambil pada 3 titik pada ruang uji setiap menit sampai mencapai nilai t_{10} . Nilai t_{10} adalah waktu (menit) yang dibutuhkan untuk mencapai nilai opasitas 10. Nilai opasitas yang ditentukan adalah 10 karena aplikasi penelitian ini adalah untuk menjernihkan asap kebakaran, dengan nilai opasitas 10, asap yang memenuhi ruangan lebih jernih sehingga nantinya korban yang terperangkap dalam kebakaran dapat melihat jalan evakuasi untuk menyelamatkan diri. Sementara nilai penurunan konsentrasi gas CO diamati dengan CO *analyzer* setiap menit selama 20 menit. Dari percobaan didapatkan data bahwa nilai t_{10} untuk 3 titik sampel pada ruang uji adalah 29 menit untuk titik 1, 31 menit untuk titik 2, dan 31 menit untuk titik 3. Sedangkan untuk gas CO terjadi penurunan konsentrasi sebesar 3 ppm sampai menit 20.



Gambar 4.10. Ruang Uji Penuh Asap



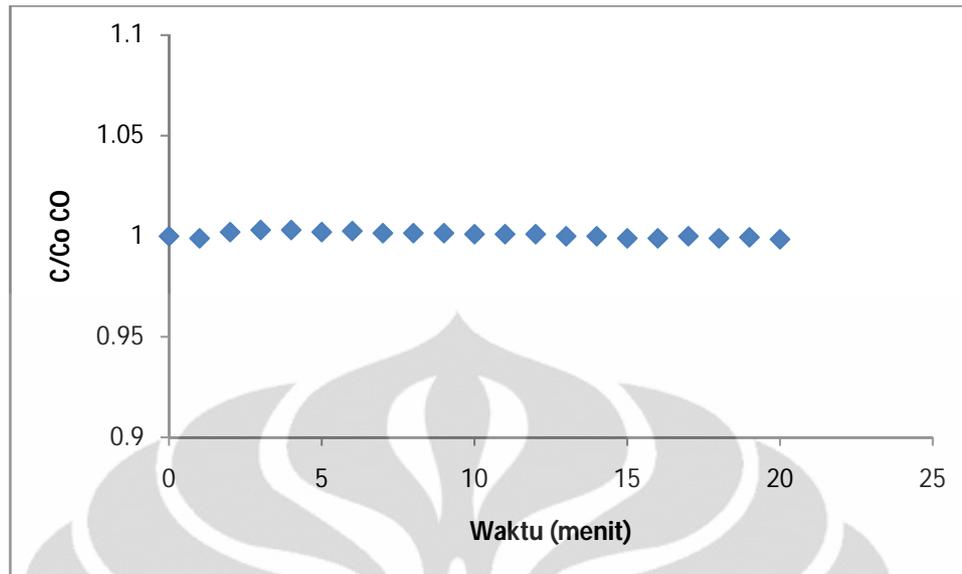
Gambar 4.11. Pengukuran opasitas dengan *Light Measurement System for Testing Smoke Development* (DIN 50055)



Gambar 4.12. Pengukuran konsentrasi CO dengan *CO analyzer*

Tabel 4.4. Penurunan konsentrasi CO dan pencapaian nilai t_{10} pada asap kebakaran tanpa adsorben

Parameter	Nilai
CO awal (ppm) menit 0	1956
CO akhir (ppm) menit 20	1953
t_{10} titik 1 (menit)	29
t_{10} titik 2 (menit)	31
t_{10} titik 3 (menit)	31



Gambar 4.13. Rasio konsentrasi CO tiap menit dengan konsentrasi CO awal

Gambar 4.13 menunjukkan rasio konsentrasi CO tiap menit dengan konsentrasi CO awal. Hasil tersebut menunjukkan bahwa ruang uji yang digunakan cukup baik, tidak terjadi kebocoran.

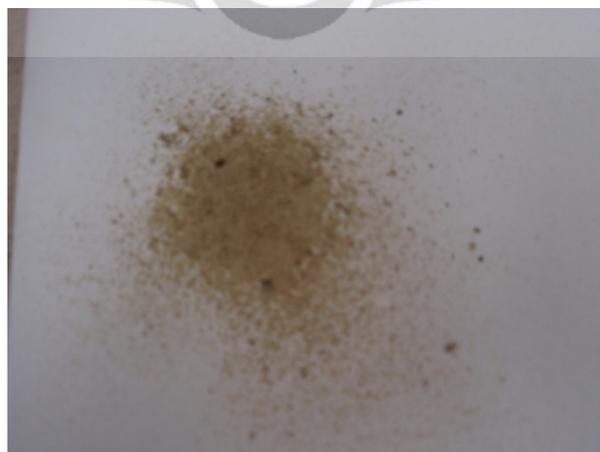
4.7.2 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran dengan Zeolit Alam Lampung Aktif tanpa TiO₂

Adsorpsi gas CO dan penjernihan asap kebakaran dilakukan dengan zeolit alam Lampung aktif ukuran 400 mesh dan 400 nano meter. Masing-masing ukuran dilakukan 2 variasi massa yaitu 1 gram dan 3 gram. Pada awalnya ruang uji dibersihkan dan dilakukan pengecekan kebocoran. Material yang dibakar yaitu kertas, kabel, sebuk kayu, dan arang ditimbang masing-masing 20 gram, kemudian ditambahkan 10 ml minyak tanah dalam wadah kebakaran (Gambar 4.6). Campuran diaduk hingga rata dan dibakar, waktu kebakaran adalah 2 menit. Setelah itu, asap hasil kebakaran dipompakan ke dalam ruang uji selama 5 menit atau hingga opasitasnya 0 dan membaca konsentrasi gas CO awal dengan CO *analyzer*. Menunggu hingga kandungan gas CO stabil (perubahan tidak terlalu besar). Setelah itu menyemprotkan adsorben zeolit alam Lampung aktif yang diuji melalui lubang yang terletak di bagian atas ruang uji. Kemudian diamati perubahan nilai opasitas setiap menit pada 3 titik yang terdapat pada ruang uji sampai didapat nilai t_{10} dan penurunan konsentrasi gas CO setiap menit selama 20

menit. Setelah itu dilakukan uji adsorpsi gas CO dan penjernihan asap kebakaran untuk ukuran dan variasi massa zeolit alam Lampung aktif lainnya. Setiap selesai pengujian, adsorben yang menempel dan sisa adsorben yang terdapat pada ruang uji harus dibersihkan karena dapat ikut mengadsorpsi gas CO dan asap sehingga tidak menunjukkan nilai adsorpsi dan opasitas yang sebenarnya. Apabila kaca akrilik ruang uji buram akibat asap kebakaran maka harus dibersihkan dahulu dengan alkohol atau aseton karena dapat mempengaruhi pembacaan opasitas. Gambar 4.14 dan 4.15 menunjukkan perubahan warna zeolit alam Lampung aktif sebelum dan setelah proses adsorpsi CO dan penjernihan asap. Perbandingan persen adsorpsi CO dan nilai t_{10} untuk tiap ukuran dan variasi massa zeolit alam Lampung aktif dapat dilihat pada Gambar 4.16 dan Tabel 4.5.

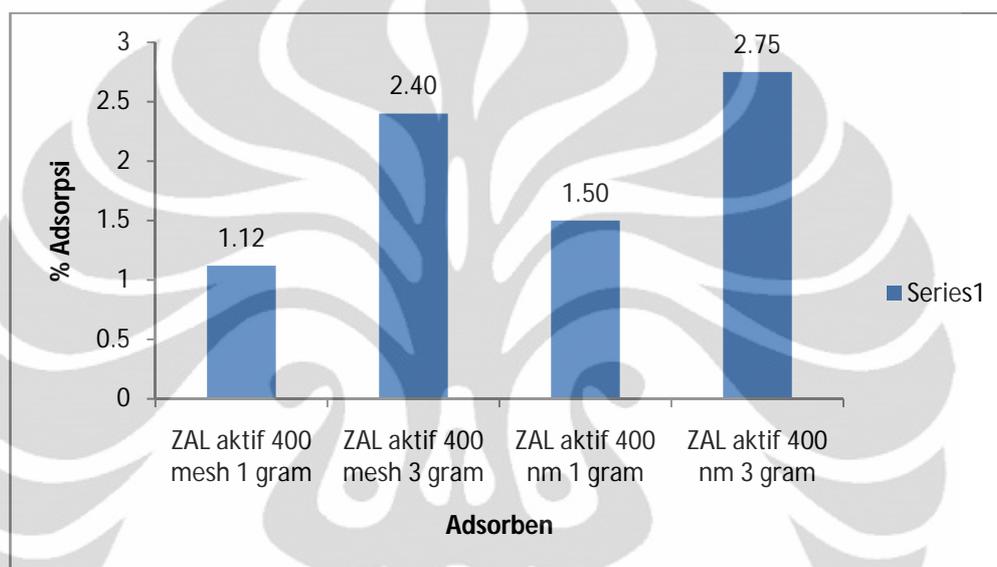


Gambar 4.14. Zeolit alam Lampung sebelum proses adsorpsi CO dan penjernihan asap



Gambar 4.15 Zeolit alam Lampung setelah proses adsorpsi CO dan penjernihan asap

Dari Gambar 4.14 dan 4.15 dapat dilihat terjadi perubahan warna zeolit alam Lampung aktif sebelum dan setelah proses adsorpsi CO dan penjernihan asap. Zeolit alam Lampung aktif sebelum proses adsorpsi CO dan penjernihan asap berwarna putih, sedangkan zeolit alam Lampung aktif setelah proses adsorpsi CO dan penjernihan asap berwarna kuning kecoklatan. Hal ini menunjukkan ada asap yang teradsorpsi oleh zeolit alam Lampung aktif



Gambar 4.16. Persen Adsorpsi CO untuk tiap ukuran dan variasi massa zeolit alam Lampung aktif

Tabel 4.5. Pebandingan nilai dan rasio t_{10} ukuran dan variasi massa zeolit alam Lampung aktif

Adsorben	t_{10} (menit)					
	Titik 1	Rasio	Titik 2	Rasio	Titik 3	Rasio
ZAL 400 mesh 1 gram	24	0,83	25	0,81	25	0,81
ZAL 400 mesh 3 gram	18	0,62	20	0,65	20	0,65
ZAL 400 nm 1 gram	20	0,69	22	0,71	21	0,68
ZAL 400 nm 3 gram	14	0,49	15	0,49	16	0,52

Berdasarkan Gambar 4.16 diketahui bahwa adsorben yang memiliki % adsorpsi CO paling besar adalah zeolit alam Lampung 400 nano meter 3 gram

(2,75), zeolit alam Lampung 400 mesh 3 gram (2,4), zeolit alam Lampung 400 nano meter 1 gram (1,5), dan zeolit alam Lampung 400 mesh 1 gram (1,12). Zeolit alam Lampung 400 nano meter 3 gram memiliki daya serap paling besar karena seperti dapat dilihat pada Gambar 4.4, zeolit alam Lampung 400 nano meter ($40,06 \text{ m}^2/\text{gram}$) memiliki luas permukaan yang lebih besar dibandingkan zeolit alam Lampung 400 mesh ($37,75 \text{ m}^2/\text{gram}$) walaupun memiliki nilai rasio Si/Al yang sama (13,30). Selain itu variasi massa adsorben mempengaruhi daya serap gas CO, hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.16 bahwa adsorben dengan massa 3 gram memiliki daya serap gas CO lebih besar dibandingkan adsorben dengan massa 1 gram untuk partikel yang sama. Berdasarkan Gambar 4.16 juga diketahui bahwa zeolit alam Lampung 400 mesh 3 gram memiliki % adsorpsi yang lebih besar dibandingkan zeolit alam Lampung 400 nano meter 1 gram. Hal ini menunjukkan bahwa massa adsorben lebih berpengaruh dalam proses adsorpsi CO dibandingkan ukuran adsorben.

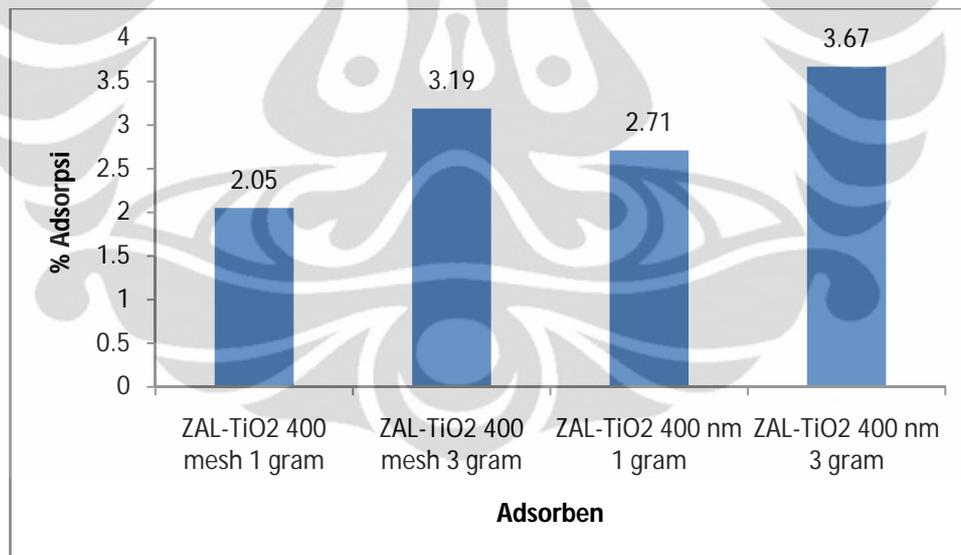
Berdasarkan Tabel 4.5 diketahui bahwa adsorben yang memiliki nilai t_{10} paling baik adalah zeolit alam Lampung 400 nano meter 3 gram, zeolit alam Lampung 400 mesh 3 gram, zeolit alam Lampung 400 nano meter 1 gram, dan zeolit alam Lampung 400 mesh 1 gram. Berdasarkan Tabel 4.10 juga diketahui bahwa titik 1 untuk tiap adsorben memiliki nilai t_{10} yang lebih kecil dibandingkan titik 2 dan titik 3. Nilai t_{10} yang kecil menunjukkan bahwa waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai opasitas 10 lebih singkat. Hal ini disebabkan karena asap dalam ruang uji akan bergerak memenuhi seluruh ruangan kemudian bertabrakan dan akibat adsorben yang disemprotkan akan menyerap asap sehingga turun ke bawah. Namun rasio t_{10} titik 1, titik 2, dan titik 3 antar zeolit alam Lampung tidak dapat dibandingkan, hal ini disebabkan karena nilai t_{10} untuk tiap titik pada asap tanpa adsorben berbeda (Tabel 4.9).

Apabila t_{10} antar titik memiliki nilai yang sama, maka rasio t_{10} yang paling baik adalah adsorben yang memiliki rasio t_{10} paling kecil. Rasio t_{10} diperoleh dengan cara membagi nilai t_{10} asap dengan adsorben dengan nilai t_{10} asap tanpa adsorben. Semakin kecil rasio t_{10} berarti proses penjernihan asap semakin baik karena waktu yang dibutuhkan lebih singkat. Apabila rasio t_{10} sama dengan 1 maka adsorben tidak memberikan pengaruh terhadap proses penjernihan

asap, sedangkan apabila nilai rasio t_{10} lebih dari 1 maka penambahan adsorben semakin menambah tebal asap.

4.7.3 Uji Adsorpsi Gas CO dan Penjernihan Asap Kebakaran dengan Zeolit Alam Lampung Aktif Termodifikasi TiO_2

Pada adsorpsi gas CO dan penjernihan asap kebakaran ini, zeolit alam Lampung yang digunakan adalah zeolit alam Lampung yang telah dimodifikasi TiO_2 . Adsorpsi gas CO dan penjernihan asap kebakaran dilakukan dengan zeolit alam Lampung- TiO_2 ukuran 400 mesh dan 400 nano meter dengan variasi massa 1 dan 3 gram. Penambahan TiO_2 ke dalam zeolit alam Lampung bertujuan untuk menambah luas permukaan dan pusat aktif zeolit alam Lampung sehingga memiliki daya serap CO yang lebih besar. Posedur adsorpsi yang dilakukan sama seperti pada *point* 4.5.2. Gambar 4.17 menunjukkan % adsorpsi CO untuk tiap ukuran dan variasi massa zeolit alam Lampung- TiO_2 .



Gambar 4.17. Persen Adsorpsi CO untuk tiap ukuran dan variasi massa zeolit alam Lampung Termodifikasi TiO_2

Berdasarkan Gambar 4.17 diketahui bahwa adsorben yang memiliki persen adsorpsi paling besar adalah zeolit alam Lampung- TiO_2 400 nano meter 3 gram (3,67), zeolit alam Lampung- TiO_2 400 mesh 3 gram (3,19), zeolit alam Lampung- TiO_2 400 nano meter 1 gram (2,71), dan zeolit alam Lampung- TiO_2 400 mesh 1 gram (2,05). Dari nilai tersebut menunjukkan hal yang sama seperti pada

proses adsorpsi CO dan penjernihan asap dengan zeolit alam Lampung tanpa TiO₂ bahwa semakin kecil ukuran adsorben untuk massa yang sama memiliki % adsorpsi CO yang lebih besar dan semakin besar massa adsorben walaupun ukurannya lebih besar akan memiliki % adsorpsi CO yang lebih besar. Seperti dapat dilihat pada Gambar 5.7, zeolit alam Lampung-TiO₂ 400 mesh 3 gram memiliki persen adsorpsi yang lebih besar dibandingkan zeolit alam Lampung-TiO₂ 400 nano meter 1 gram. Hal ini menunjukkan massa adsorben lebih berpengaruh dalam adsorpsi dibandingkan ukuran adsorben. Dengan membandingkan Gambar 4.16 dan Gambar 4.17 diketahui bahwa zeolit alam Lampung-TiO₂ memiliki persen adsorpsi lebih besar dibandingkan zeolit alam Lampung tanpa TiO₂. Hal ini menunjukkan bahwa TiO₂ dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi gas CO.

Tabel 4.6. Pebandingan nilai dan rasio t_{10} ukuran dan variasi massa zeolit alam Lampung Termodifikasi TiO₂

Adsorben	t_{10} (menit)					
	Titik 1	Rasio	Titik 2	Rasio	Titik 3	Rasio
ZAL-TiO ₂ 400 mesh 1 gram	19	0,65	20	0,65	21	0,68
ZAL-TiO ₂ 400 mesh 3 gram	15	0,52	16	0,52	17	0,55
ZAL-TiO ₂ 400 nm 1 gram	17	0,59	18	0,58	19	0,61
ZAL-TiO ₂ 400 nm 3 gram	13	0,45	14	0,45	15	0,48

Berdasarkan Tabel 4.6 diketahui bahwa adsorben yang memiliki nilai t_{10} paling baik adalah zeolit alam Lampung-TiO₂ 400 nano meter 3 gram, zeolit alam Lampung-TiO₂ 400 mesh 3 gram, zeolit alam Lampung-TiO₂ 400 nano meter 1 gram, dan zeolit alam Lampung-TiO₂ 400 mesh 1 gram.

Sama seperti penjernihan asap dengan zeolit alam Lampung tanpa TiO₂, penjernihan asap dengan zeolit alam Lampung-TiO₂ memiliki nilai t_{10} yang lebih baik pada titik 1 dibandingkan titik 2 dan titik 3. Dibandingkan dengan penjernihan asap dengan zeolit alam Lampung tanpa TiO₂, penjernihan asap dengan zeolit alam Lampung-TiO₂ lebih baik, hal ini dilihat dari nilai t_{10} yang

yang lebih singkat dan rasio t_{10} . Hal ini menunjukkan bahwa TiO_2 dapat mengadsorpsi asap pada proses penjernihan asap kebakaran.

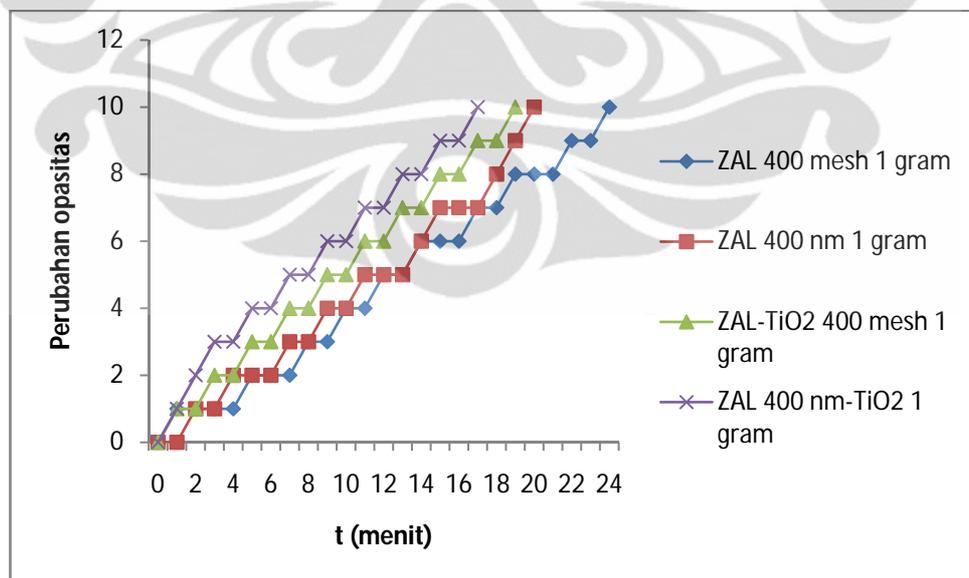
4.7.4 Pengaruh Ukuran Partikel dan Massa

Pada bagian penelitian ini akan dibandingkan daya serap zeolit alam Lampung dengan dan tanpa TiO_2 dalam menjernihkan asap berdasarkan ukuran partikel jika massa dibuat sama. Massa zeolit yang digunakan sebesar 1 dan 3 gram. Setiap massa divariasikan dengan ukuran partikel 400 mesh ($37 \mu\text{m}$) dan 400 nano meter.

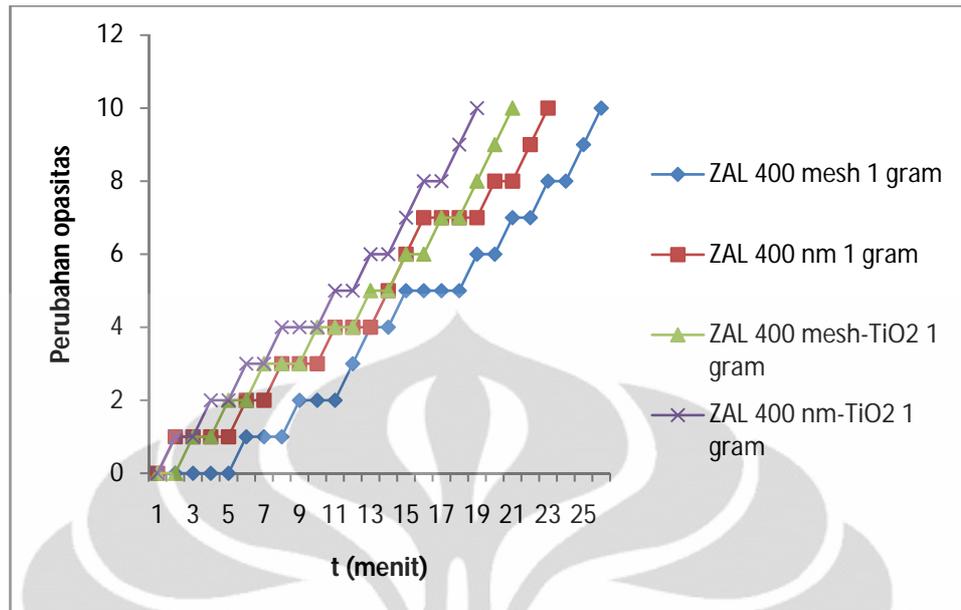
4.7.4.1 Pengaruh Ukuran Partikel

Pada bagian penelitian ini dibandingkan daya serap zeolit dalam menjernihkan asap berdasarkan ukuran partikel jika massa dibuat sama. Massa zeolit yang digunakan sebesar 1 dan 3 gram. Setiap massa divariasikan dengan ukuran partikel 400 mesh ($37 \mu\text{m}$) dan 400 nano meter. Berikut adalah hasil kejernihan asap pada massa 1 gr dan 3 gr.

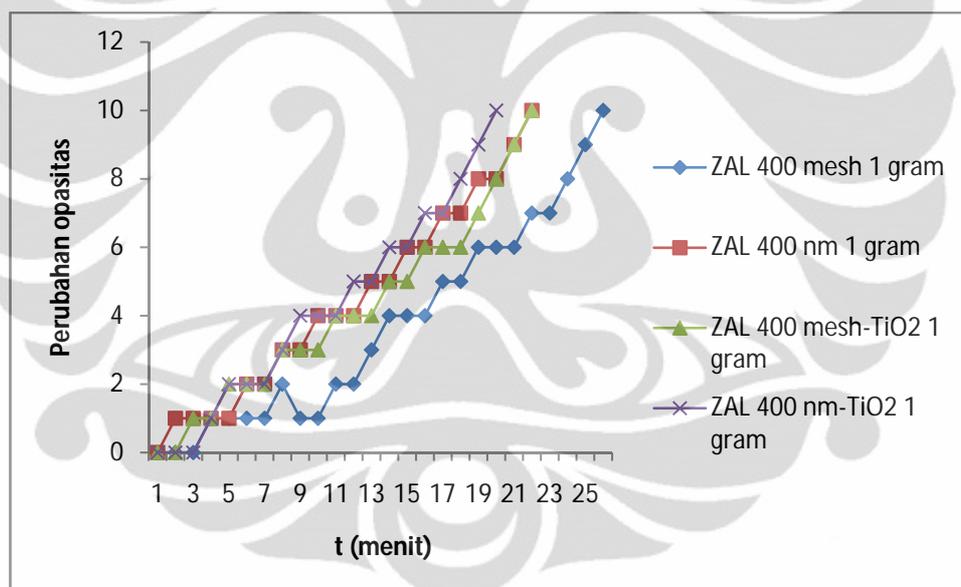
Nilai t_{10} zeolit alam Lampung aktif dan zeolit alam Lampung- TiO_2 massa 1 gram untuk titik 1, 2, dan 3.



(a)



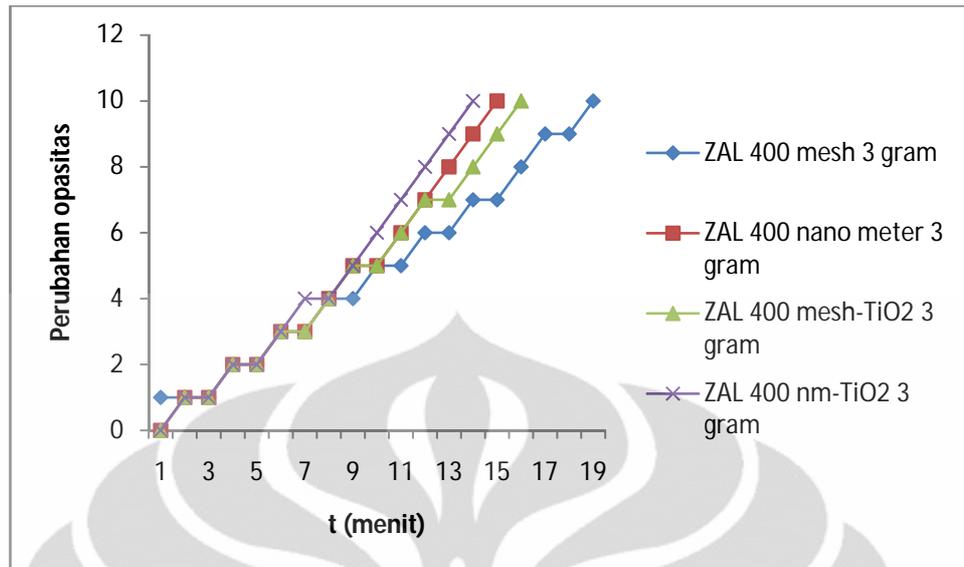
(b)



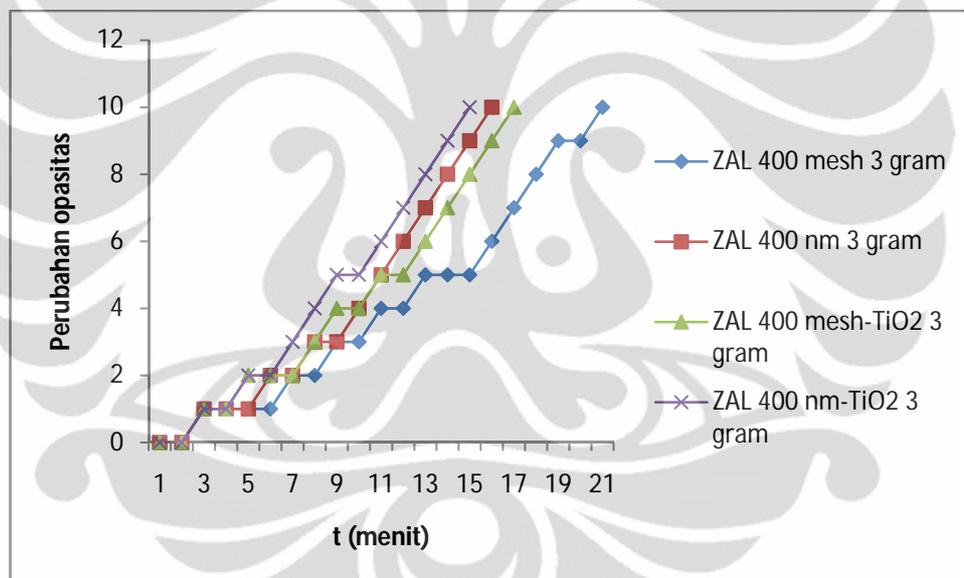
(c)

Gambar 4.18. Nilai t_{10} zeolit alam Lampung massa 1 gram pada titik 1 (a), titik 2 (b), dan titik 3 (c)

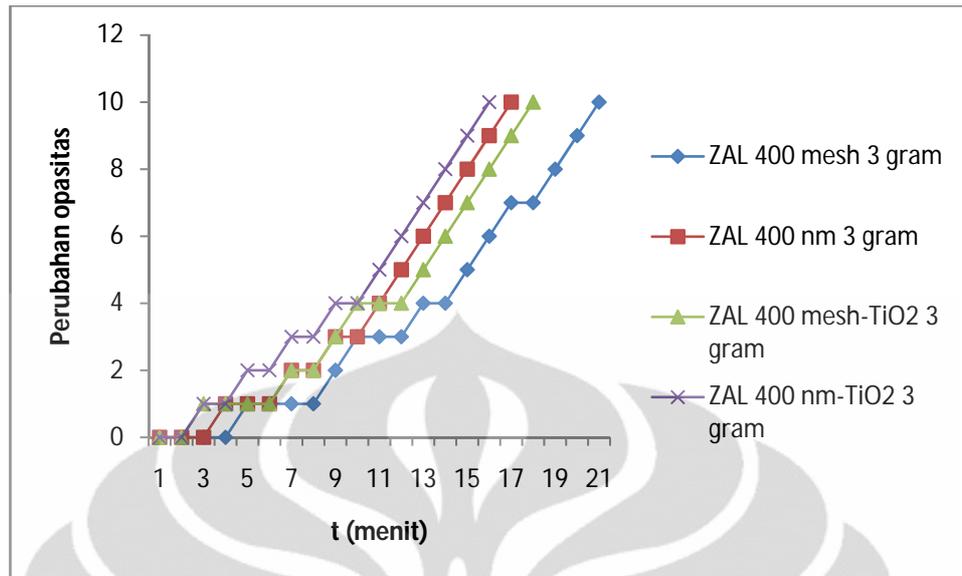
Nilai t_{10} zeolit alam Lampung aktif dan zeolit alam Lampung-TiO₂ massa 3 gram untuk titik 1, 2, dan 3.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.19. Nilai t_{10} zeolit alam Lampung massa 3 gram pada titik 1(a), titik 2(b), dan titik 3 (c)

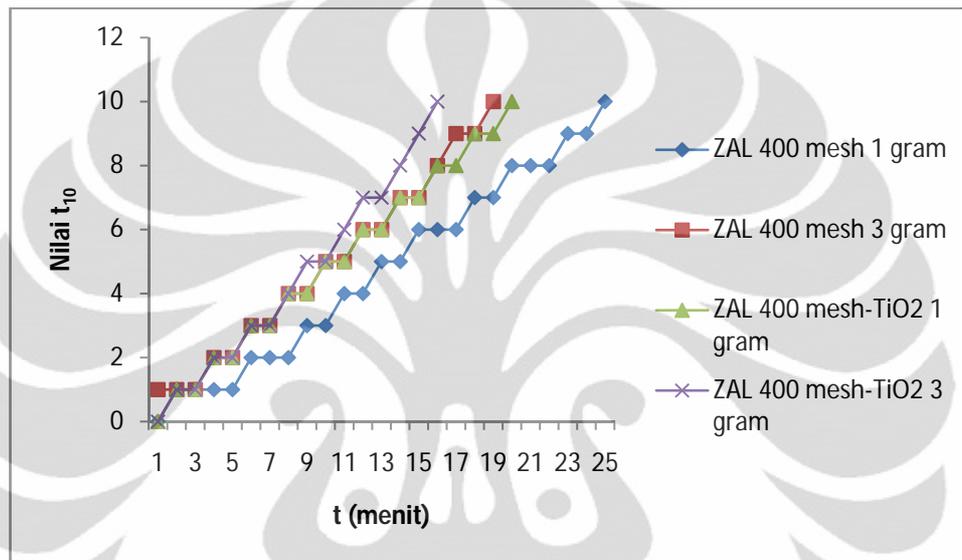
Berdasarkan Gambar 4.18 dan Gambar 4.19 dapat dilihat bahwa ukuran zeolit mempengaruhi waktu untuk mencapai tingkat kejernihan tertentu (t_{10}). Semakin kecil ukuran partikel zeolit, semakin baik dalam menjernihkan asap (lihat garis ungu dan merah pada grafik). Dengan massa yang sama, zeolit alam Lampung termodifikasi TiO₂ 400 nano meter lebih baik dalam menjernihkan asap. Hal ini disebabkan dengan ukuran yang lebih kecil maka luas permukaan zeolit akan menjadi lebih besar. Kontak dengan partikel asap juga menjadi lebih banyak, sehingga semakin banyak partikel asap yang diserap, akibatnya asap menjadi lebih cepat jernih. Namun dapat dilihat ukuran partikel yang hampir dua kali lebih kecil (400 nano meter dan 400 mesh/37 mikron) tidak membuat kejernihan menjadi meningkat dua kali lebih cepat. Hal ini disebabkan karena dua ukuran partikel tersebut memiliki nilai luas permukaan yang tidak jauh berbeda atau dapat juga terjadi karena proses penyemprotan adsorben yang kurang homogen sehingga penjernihan asap tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan.

4.7.4.2 Pengaruh Massa

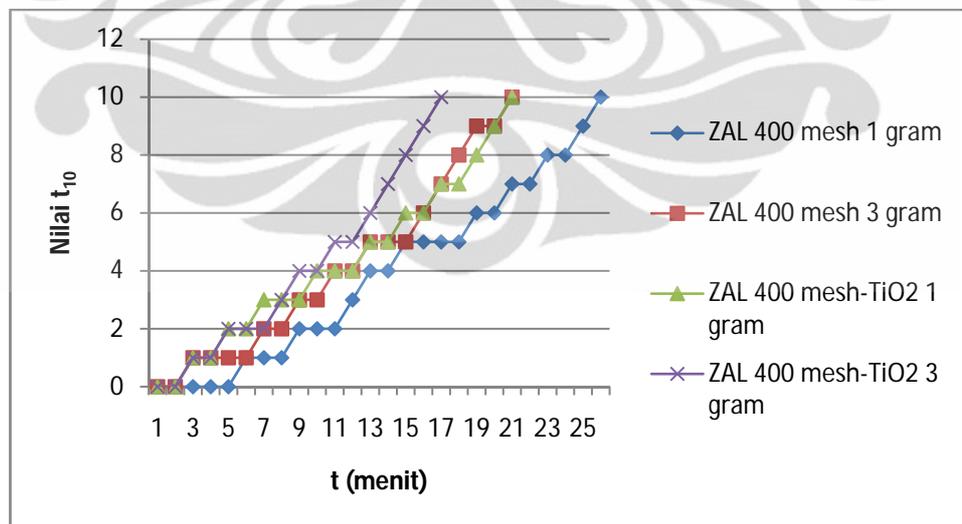
Pada bagian penelitian ini akan dibandingkan daya serap zeolit dalam menjernihkan asap berdasarkan massa jika ukuran partikel dibuat sama. Zeolit

yang digunakan berukuran 400 mesh (37 mikron) dan 400 nano meter. Setiap ukuran divariasikan dengan massa 1 gr dan 3 gr. Berikut adalah hasil kejernihan asap pada ukuran partikel 400 mesh (37 μm) dan 400 nano meter.

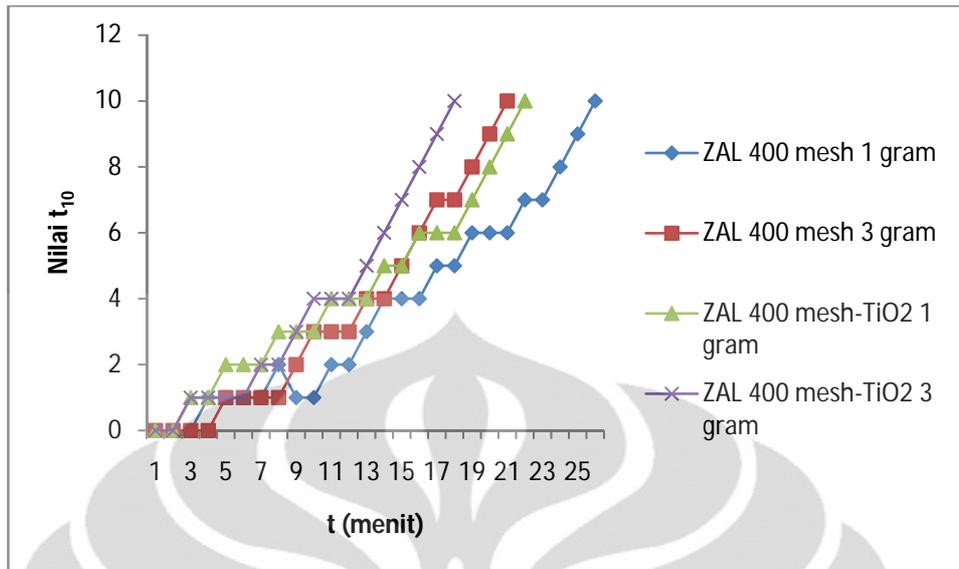
Nilai t_{10} zeolit alam Lampung aktif dan zeolit alam Lampung-TiO₂ ukuran 400 mesh untuk titik 1, 2, dan 3.



(a)



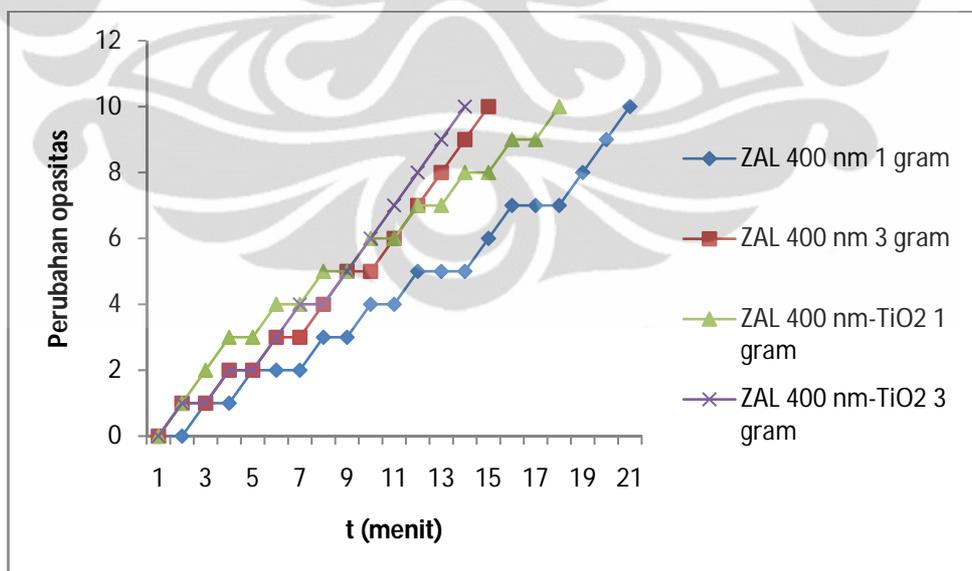
(b)



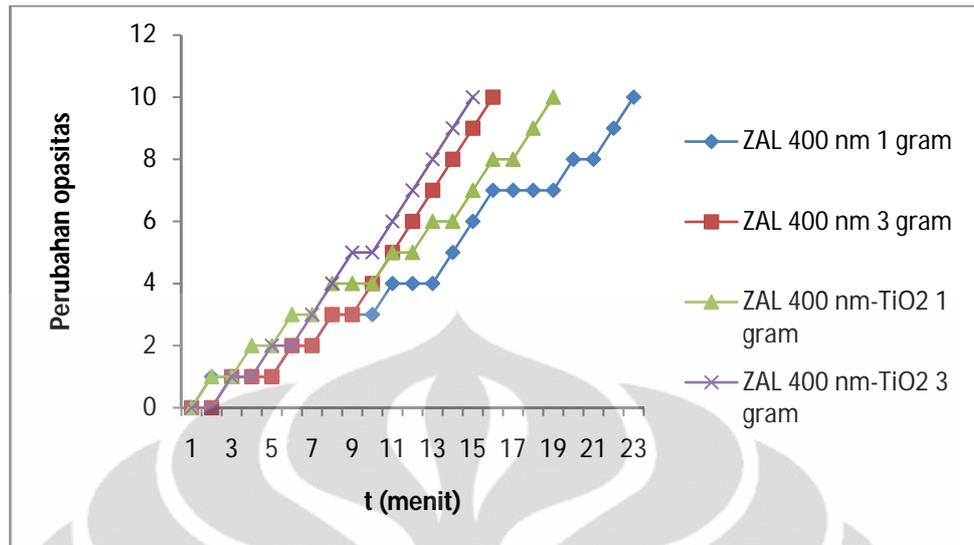
(c)

Gambar 4.20. Nilai t_{10} zeolit alam Lampung ukuran 400 mesh pada titik 1(a), titik 2 (b), dan titik 3 (b)

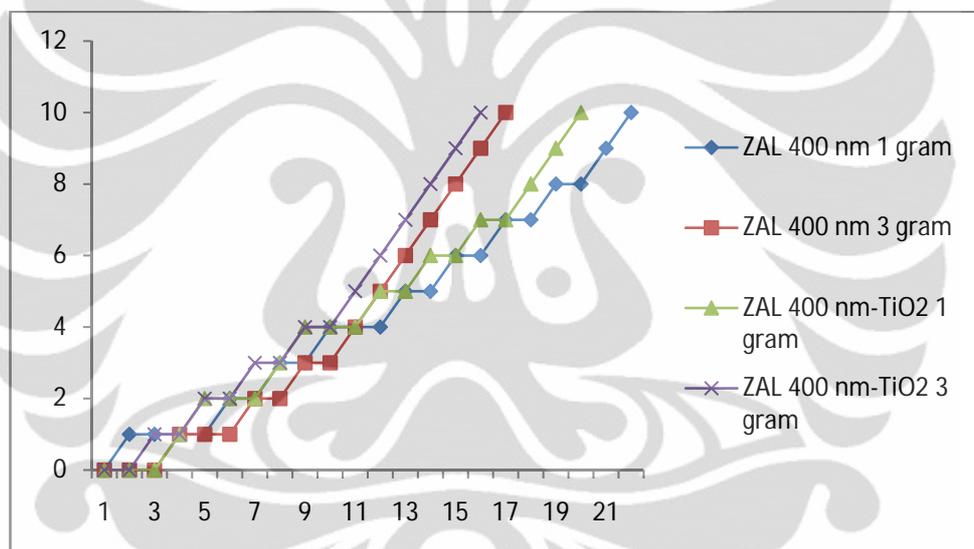
Nilai t_{10} zeolit alam Lampung aktif dan zeolit alam Lampung-TiO₂ ukuran 400 nano meter untuk titik1, 2, dan 3.



(a)



(b)

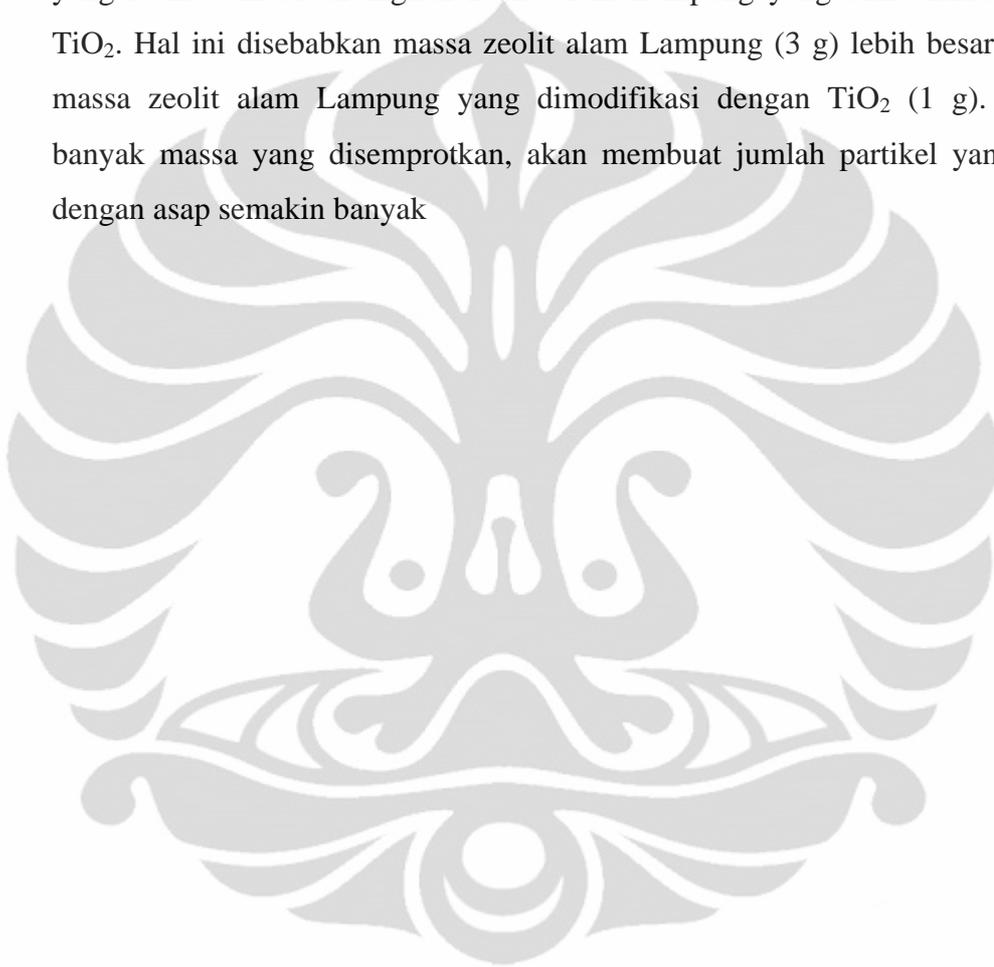


(c)

Gambar 4.21. Nilai t_{10} zeolit alam Lampung ukuran 400 nm pada titik 1 (a), titik 2 (b), dan titik 3 (c)

Berdasarkan Gambar 4.20 dan Gambar 4.21 dapat dilihat bahwa zeolit alam Lampung termodifikasi TiO_2 lebih baik dalam menjernihkan asap, ditandai dengan paling cepat mencapai nilai t_{10} (tingkat kejernihan 10%) ditunjukkan dengan garis warna ungu pada gambar. Hal ini dikarenakan pengotor pada zeolit aktivasi telah dibersihkan, sehingga luas permukaannya menjadi lebih besar jika dibandingkan zeolit murni (lihat subbab pembahasan luas permukaan zeolit). Karena luas permukaan yang lebih besar ini, daerah kontak antara zeolit dengan partikel asap semakin banyak yang membuat kemampuan zeolit dalam

mengadsorp partikel asap pada permukaan menjadi lebih besar. Asap pun semakin banyak yang diserap, sebagai akibatnya keadaan jernih pada asap semakin cepat diperoleh. Sedangkan semakin banyak massa yang disemprotkan, semakin cepat asap mencapai keadaan jernih (garis warna merah). Pada garis merah meskipun zeolit alam Lampung tidak dimodifikasi dengan TiO_2 tetapi memiliki nilai t_{10} yang lebih baik dibandingkan zeolit alam Lampung yang dimodifikasi dengan TiO_2 . Hal ini disebabkan massa zeolit alam Lampung (3 g) lebih besar daripada massa zeolit alam Lampung yang dimodifikasi dengan TiO_2 (1 g). Semakin banyak massa yang disemprotkan, akan membuat jumlah partikel yang kontak dengan asap semakin banyak



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

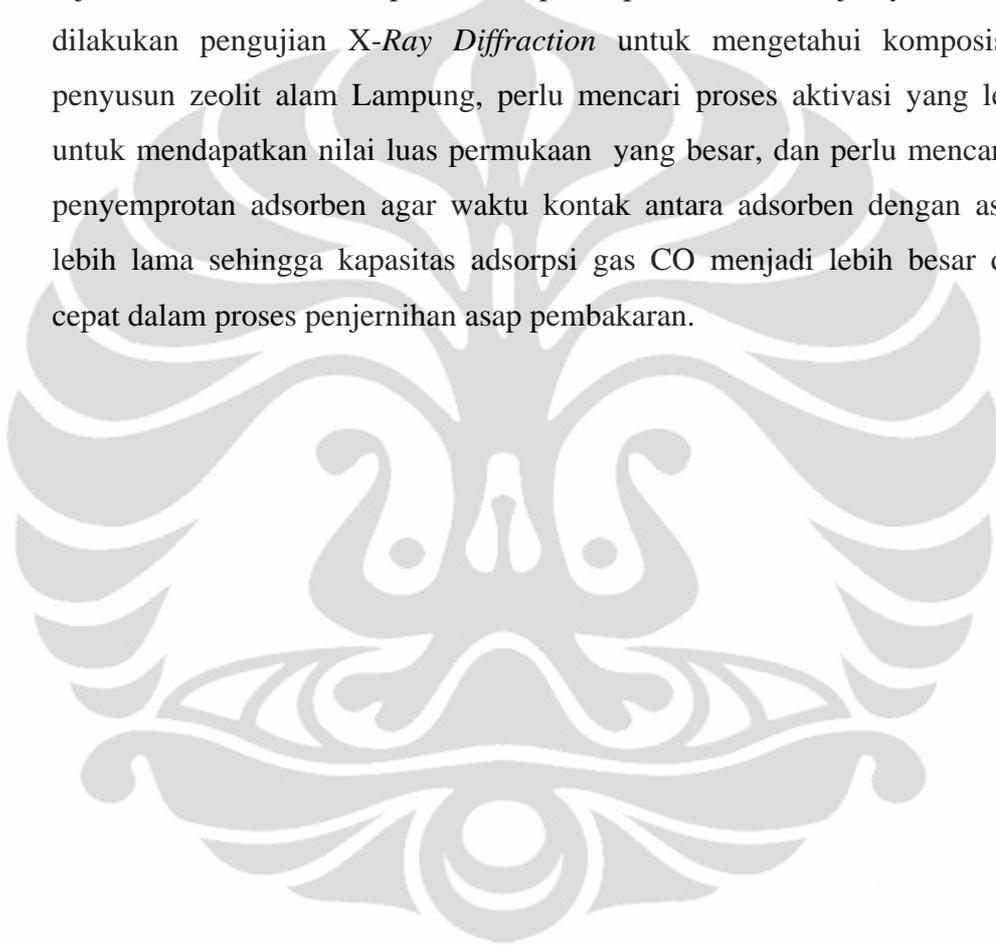
Dari penelitian yang telah dilakukan serta pembahasannya, maka disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil uji analisa *X-Ray Fluorescence*, rasio Si/Al mengalami peningkatan setelah dilakukan proses aktivasi dari 5,02 menjadi 13,29.
2. Nilai rasio Si/Al untuk zeolit alam Lampung 400 mesh termodifikasi TiO₂ dan zeolit alam Lampung 400 nano meter termodifikasi TiO₂ adalah 23,96 dan 13,21.
3. Hasil uji analisa metode BET, terjadi peningkatan luas permukaan pada zeolit alam yang telah dilakukan aktivasi. Zeolit alam sebelum preparasi memiliki luas permukaan 33,85 m²/g dan zeolit setelah aktivasi 37,75 m²/gram untuk zeolit alam Lampung 400 mesh, 40,06 m²/g untuk zeolit alam Lampung 400 nano meter, dan 44,41 m²/gram untuk zeolit alam Lampung termodifikasi TiO₂.
4. Kandungan TiO₂ hasil modifikasi diukur dengan *X-Ray Fluorescence* dan diperoleh nilai 19,14 % wt TiO₂.
5. Hasil uji adsorpsi Zeolit alam Lampung aktif dan zeolit alam Lampung termodifikasi TiO₂
 - a. Untuk zeolit alam Lampung aktif, adsorben yang memiliki % adsorpsi CO paling besar adalah zeolit alam Lampung 400 nano meter 3 gram (% adsorpsi 2,75) dan adsorben yang mencapai nilai t₁₀ paling cepat adalah zeolit alam Lampung 400 nano meter 3 gram dengan waktu 14 menit, 15 menit, 16 menit pada titik 1, titik 2, dan titik 3.
 - b. Untuk zeolit alam Lampung termodifikasi TiO₂, adsorben yang memiliki % adsorpsi CO paling besar adalah zeolit alam Lampung termodifikasi TiO₂ 400 nano meter 3 gram (3,67 %) dan adsorben yang mencapai nilai t₁₀ paling cepat adalah zeolit alam Lampung

termodifikasi TiO₂ 400 nano meter 3 gram dengan waktu 13 menit, 14 menit, 15 menit pada titik 1, titik 2, dan titik 3.

5.2 **Saran**

Bedasarkan pengalaman yang didapatkan dari lapangan, yang dapat dijadikan acuan untuk perbaikan pada penelitian selanjutnya adalah perlu dilakukan pengujian *X-Ray Diffraction* untuk mengetahui komposisi kristal penyusun zeolit alam Lampung, perlu mencari proses aktivasi yang lebih baik untuk mendapatkan nilai luas permukaan yang besar, dan perlu mencari metode penyemprotan adsorben agar waktu kontak antara adsorben dengan asap dapat lebih lama sehingga kapasitas adsorpsi gas CO menjadi lebih besar dan lebih cepat dalam proses penjernihan asap pembakaran.



DAFTAR PUSTAKA

- Apriawan. 2009. *Adsorpsi Gas CO pada Kasus Kebakaran Menggunakan Zeolit Alam Teraktivasi*. Skripsi. Depok: Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Babrauskas V. 1997. "Hazards from Toxicity in Fires: How Should Material Properties Be Taken into Account?", pp. 37-50 Proc. Fire Risk and Hazard Assessment-Research Application Symposium, National Fire Protection Research Foundation, Quincy, MA.
- Basuki, Tri Kris, dkk. 2008. *Penurunan Konsentrasi CO dan NO₂ pada Emisi Gas BUang Menggunakan Arang Tempurung Kelapa yang Disipi TiO₂*. Yogyakarta: Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir.
- Charles A. Wentz. 1998. *Safety, Health and Environmental Protection*. MGH.
- Dougal Dysdale. 1998. *An Introduction to Fire Dynamics 2nd Edition*. John Wiley and Sons.
- Debie Ari Kesnawaty. 2010. *Uji Kapasitas Adsorpsi Gas Karbon Monoksida (CO) Menggunakan Oksida Logam dan Karbon Aktif*. Skripsi. Depok: Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Eddy, Hery Rosdiana. 2007. *Potensi dan Pemanfaatan Zeolit di Provinsi Jawa Barat dan Banten*. <http://www.dim.esdm.go.id>. (diakses tanggal 20 Oktober 2010).
- George W Mulholland. *Smoke Production and Properties 2nd edition, chapter15, section 2*. National Bureau of Standards.
- Handoko, D. Setyawan. 2003. *Pengaruh Perlakuan Asam, Hidrotermal, dan Impregnasi Logam Kromium pada Zeolit Alam dalam Preparasi Katalis*. Jember: FMIPA UNEJ.
- Maron and Lando. 1983. *Fundamental of Physical Chemistry*. New York: Macmillan Publishing.
- McCabe, W., dkk. 2000. *Unit Operation of Chemical Engineering 6th edition*: McGraw Hill.
- Muhammad Arif Alfat. 2009. *Rekayasa Alat dan Uji Kinerja Katalis Komposit TiO₂-Adsorben Alam Untuk Degradasi Polutan Asap Rokok*. Skripsi. Depok: Departemen Teknik Kimia FTUI.

- Muhammad Gondang AK. 2010. *Proses Penjernihan Asap Kebakaran Menggunakan Zeolit Alam Lampung Termodifikasi dengan TiO₂ Melalui Metode Sol Gel*. Seminar. Depok: Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Mulukutla, R.S., Malchesky, S.P., Maghirang, R., Klahunde, J.S., Klahunde, K.J. and Koper, O. (2005). *Metal Oxide Nanoparticles for Smoke Clearing and Fire Suppression*. Manhattan: NanoScale Corporation.
- Othmer. 1994. *Encyclopedia of Chemical Technology*. 4th ed: Willey interscience
- Setyawan DP. Handoko. 2006. "Pengaruh Perlakuan Asam, Hydrothermal dan Impregnasi Logam Kromium pada Zeolit Alam dalam Preparasi Katalis", Universitas Jember.
- Siriwardane, Ranjani V, dkk. 2002. *Adsorption of CO₂, N₂, and O₂ on Natural Zeolites*. Energy and Fuels 17, 571-576.
- Slamet, Meta Ellyana, Setijo Bismo. *Modifikasi Zeolit Alam Lampung dengan Fotokatalisis TiO₂ Melalui Metode Sol Gel dan Aplikasinya Untuk Penyisihan Fenol*. Depok: Departemen Teknik Kimia FTUI.
- Srikandi Fardiaz. 1992. *Polusi Air dan Udara*. Yogyakarta; Penerbit Kansius.
- Wega Trisunaryanti, Endang Triwahyuni, Sri Sudiono. 2005. *Preparasi, Modifikasi dan Karakterisasi Katalis Ni-Mo/Zeolit Alam dan Mo-Ni/Zeolit Alam*. Jogjakarta; Departemen Kimia FMIPA UGM.
- Xie, Youcang, Jiaping Zhang, Jianguo Qiu, Ge Yang. 1996. *Zeolites Modified by CuCl for Separating CO from Gas Mixtures Containing CO₂*. Netherlands: Kluwe Academic Publisher.
- Yadav R., Maghirang, R.G., Erickson L.E., Kakumanu, B., and Castro, S.G.. (2007). *Laboratory Evaluation of the Effectiveness of Nanostructured and Conventional Particles in Clearing Smoke Spaces*. Elsevier, ScienceDirect Journals.
- Yuda Prihatama. 2009. *Preparasi Zeolit Alam Lampung dengan Metode Dealuminasi dan Kalsinasi untuk Adsorpsi Gas CO*. Skripsi. Depok: Departemen Teknik Kimia FTUI.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Rasio Si terhadap Al tiap tahap aktivasi

5/12/2011 17:28

Results quantitative

Sample name (1-50)	Al ₂ O ₃ (%) <i>d0.001</i> <i>u0.15</i>	CaO (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	MnO (%)	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	SiO ₂ (%) <i>d0.015</i>	TiO ₂ (%)	V ₂ O ₅ (%)	Cu (%)	Zn (%)	BaO (%)
VER_BLANK A	0.0029	0.01	-0.02	-0.01	0.00	0.04	0.01	0.01	0.00	-0.0070	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
VER_BLANK B	0.0479	0.01	-0.02	-0.02	0.00	0.05	0.00	-0.01	0.00	0.0816	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01
VER_BLANK C	0.0073	0.01	-0.01	-0.01	0.00	0.03	0.00	-0.01	0.00	0.0044	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01
VER_NILTRT 33 A	5.5237	0.02	2.65	60.76	0.00	6.52	1.05	-0.01	0.01	9.0251	0.04	0.03	0.01	0.04	-0.01
VER_NILTRT 33 B	5.5001	0.01	2.64	60.34	0.00	6.50	1.05	-0.03	0.01	8.9704	0.03	0.03	0.00	0.04	-0.01
VER_FE-01 A	6.7570	0.08	0.00	75.94	0.04	0.43	1.57	0.01	0.16	2.3645	0.22	0.01	0.22	0.09	0.04
VER_FE-01 B	6.8351	0.08	0.00	77.38	0.04	0.45	1.60	0.06	0.16	2.3881	0.23	0.01	0.23	0.09	0.05
VER_NCS DC73324 A	21.3952	0.19	0.00	8.20	1.73	0.37	0.20	0.21	0.07	57.4214	0.72	0.03	0.04	0.01	0.00
VER_NCS DC73324 B	21.5122	0.20	0.00	8.28	1.74	0.37	0.20	0.25	0.07	57.6064	0.73	0.03	0.04	0.01	0.00
VER_SARM 11 A	1.3943	0.03	0.06	93.51	0.16	0.05	0.02	-0.05	0.09	3.1278	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00
VER_SARM 11 B	1.4412	0.04	0.00	95.62	0.16	0.05	0.02	-0.02	0.09	3.1558	0.06	0.01	0.00	0.00	0.01
VER_ZRM 686-1 A	0.1251	0.01	0.02	100.06	0.00	0.04	0.30	0.02	0.02	0.0267	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
VER_ZRM 686-1 B	0.1253	0.01	0.02	100.11	0.00	0.05	0.30	-0.01	0.02	0.0415	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
VER_CECA 609-1 A	4.3635	9.29	0.00	43.32	0.21	3.29	0.59	0.15	1.40	17.0935	0.19	0.11	0.01	0.03	0.02
VER_CECA 609-1 B	4.3837	9.33	0.01	43.47	0.21	3.32	0.59	0.18	1.40	17.1709	0.19	0.11	0.01	0.03	0.02
VER_GBM 396-1 A	8.4431	4.25	0.12	12.95	0.98	4.60	0.16	1.10	0.08	56.5139	0.48	0.02	0.29	0.69	0.07
VER_GBM 396-1 B	8.4333	4.26	0.12	12.93	0.98	4.59	0.16	1.10	0.08	56.5026	0.48	0.02	0.29	0.69	0.06
VER_JSS 805-1 A	1.0328	0.03	0.00	97.81	0.01	0.06	0.32	0.16	0.09	0.5239	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00

VER_JSS 805-1 B	1.0219	0.03	0.00	97.52	0.01	0.07	0.32	0.03	0.09	0.5219	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00
VER_SARM 5 A	4.2028	2.51	3.48	12.55	0.09	25.25	0.22	0.40	0.02	51.0256	0.19	0.06	0.00	0.01	-0.00
VER_SARM 5 B	4.1984	2.52	3.46	12.62	0.09	25.29	0.22	0.44	0.02	51.2399	0.19	0.06	0.00	0.01	-0.01
VER_JMN-1 A	4.4372	2.94	-0.01	14.31	0.94	3.39	33.64	2.82	0.55	14.6624	1.05	0.08	1.14	0.11	0.19
VER_JMN-1 B	4.5514	2.99	0.00	14.54	0.96	3.45	34.08	2.90	0.55	14.8716	1.07	0.08	1.15	0.11	0.20
VER_SRM 1944 A	10.4082	1.58	0.03	5.14	2.01	2.14	0.07	2.64	0.37	63.4613	0.74	0.03	0.04	0.07	0.04
VER_SRM 1944 B	10.1572	1.59	0.03	4.99	1.98	2.06	0.07	2.56	0.36	64.7458	0.75	0.03	0.04	0.06	0.04
54820 F (zal I HF)	14.1499	2.32	-0.01	2.94	1.03	0.80	0.03	1.02	0.03	69.1049	0.16	0.01	0.00	0.00	0.05
54820 G (zal HCl)	6.7376	1.05	-0.01	0.76	0.82	0.61	0.00	1.07	0.02	82.5092	0.14	0.01	0.00	0.00	0.00
54820 H (zal NH4Cl)	6.8461	0.97	-0.01	0.80	0.74	0.26	0.00	1.19	0.02	88.4852	0.15	0.01	0.00	0.00	0.00
54820 I (zal blm diaktivasi)	13.9886	2.29	-0.01	2.77	2.06	0.88	0.03	0.74	0.03	70.1870	0.16	0.01	0.00	0.00	0.06
54820 J (zal aktivasi)	6.3580	0.87	-0.01	0.77	0.68	0.43	0.00	1.10	0.02	84.5192	0.14	0.01	0.00	0.00	-0.01
54820 REP A	12.5584	4.71	-0.01	1.68	2.85	0.78	0.03	0.83	0.03	64.8706	0.19	0.01	0.00	0.01	0.05
54820 REP H	6.7562	0.94	-0.01	0.82	0.73	0.25	0.00	1.15	0.02	87.8425	0.15	0.01	0.00	0.00	-0.01
BLANK	0.0029	0.01	-0.02	-0.01	0.00	0.04	0.01	0.01	0.00	-0.0070	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
SARM 5	4.1803	2.51	3.49	12.59	0.09	25.24	0.22	0.40	0.02	51.1040	0.19	0.06	0.00	0.01	-0.01
<i>exp value</i>	<i>4.1800</i>	<i>2.66</i>	<i>3.500</i>	<i>12.70</i>	<i>0.09</i>	<i>25.33</i>	<i>0.220</i>	<i>0.37</i>	<i>0.021</i>	<i>51.1000</i>	<i>0.20</i>	<i>0.041</i>			<i>0.005</i>
HIGH PURITY SILICA	0.0611	0.02	0.09	0.08	0.03	0.11	0.00	0.07	0.02	99.7053	0.02	0.01	0.00	0.00	-0.02
<i>exp value</i>	<i>0.0360</i>	<i>0.01</i>	<i>0.000</i>	<i>0.01</i>	<i>0.01</i>	<i>0.00</i>	<i>0.000</i>	<i>0.00</i>		<i>99.7800</i>	<i>0.02</i>				
SARM 1	12.0785	0.80	0.00	2.01	4.98	0.04	0.02	3.28	0.02	75.7289	0.07	0.01	0.00	0.00	0.01
<i>exp value</i>	<i>12.0800</i>	<i>0.78</i>	<i>0.002</i>	<i>2.00</i>	<i>4.99</i>	<i>0.06</i>	<i>0.021</i>	<i>3.36</i>		<i>75.7000</i>	<i>0.09</i>		<i>0.001</i>	<i>0.005</i>	

Lampiran 2. Rasio Si terhadap Al dan kandungan TiO₂ zeolit lampung termodifikasi TiO₂

XR20 LINO3 FLUX

75

Sample name (1-50)	Ni (%)	Co (%)	d0.025 d0.5									d0.035 d1						Total (%)
			Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Cr ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	MnO (%)	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	V ₂ O ₅ (%)	S (%)	As (%)	BaO (%)	
ZAL 80-150 MESH + TIO ₂	0.00	-0.02	5.45	0.76	-0.01	1.16	0.58	0.21	0.01	0.96	0.02	69.12	19.37	0.00	0.00	0.03	-0.38	98.07
ZAL 400 NM + TIO ₂	0.00	-0.02	5.04	0.69	-0.01	1.18	0.55	0.19	0.01	0.85	0.02	66.56	19.14	0.00	0.00	0.03	-0.38	94.62
ZAL 400 MESH + TIO ₂	0.00	-0.01	3.12	0.38	-0.02	0.81	0.41	0.18	0.02	0.59	0.02	74.76	19.14	0.00	0.01	0.03	-0.38	99.88
BLANK	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01	0.05	0.00	0.06	0.01	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.31
NIST 696	0.00	0.00	54.88	0.02	0.04	9.34	0.01	0.05	0.02	0.08	0.05	3.84	2.69	0.07	0.06	0.02	0.00	72.15
HIGH SILICA	0.01	0.00	0.01	0.02	-0.01	0.02	0.02	0.12	0.00	0.10	0.02	99.79	0.02	0.01	0.00	0.04	-0.04	101.15
BLANK	0.04	0.00	-0.02	0.01	-0.01	0.06	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	-0.01	-0.01	0.00	0.01	0.00	-0.01	0.17
SARM 5	0.06	0.01	4.13	2.51	3.45	12.45	0.09	25.17	0.22	0.43	0.02	50.37	0.19	0.06	0.01	0.02	-0.01	99.75

Lampiran 3. Uji adsorpsi CO dan penjernihan asap tanpa adsorben

t (menit)	Opasitas			[CO](ppm)	Rasio C/C ₀
	1	2	3		
0	0	0	0	1956	1,0000
1	0	0	0	1954	0,9990
2	0	0	0	1960	1,0020
3	0	0	0	1962	1,0031
4	0	0	0	1962	1,0031
5	1	0	1	1960	1,0020
6	1	1	1	1961	1,0026
7	1	1	1	1959	1,0015
8	1	1	1	1959	1,0015
9	1	1	1	1959	1,0015
10	2	2	2	1958	1,0010
11	2	2	2	1958	1,0010
12	2	2	2	1958	1,0010
13	3	2	3	1956	1,0000
14	3	3	3	1956	1,0000
15	3	3	3	1954	0,9990
16	4	3	4	1954	0,9990
17	4	4	4	1956	1,0000
18	5	4	5	1954	0,9990
19	5	4	5	1955	0,9995
20	6	5	5	1953	0,9985
21	6	5	6	3	Δ CO
22	6	6	6		
23	7	6	6		
24	7	6	7		
25	8	7	7		
26	8	8	8		
27	9	8	8		
28	9	8	8		
29	10	9	9		
30	10	9	9		
31	11	10	10		

Lampiran 4. Persen adsorpsi CO dan nilai t_{10} zeolit alam Lampung aktif

Zeolit alam Lampung 400 mesh 1 gram

t (menit)	Opasitas			[CO](ppm)	% adsorpsi
	titik1	titik2	titik3		
0	0	0	0	2865	
1	1	0	0	2846	
2	1	0	0	2843	
3	1	0	1	2845	
4	1	0	1	2841	
5	2	1	1	2843	
6	2	1	1	2844	
7	2	1	2	2842	
8	3	2	1	2844	
9	3	2	1	2838	
10	4	2	2	2843	1,12
11	4	3	2	2842	
12	5	4	3	2842	
13	5	4	4	2842	
14	6	5	4	2840	
15	6	5	4	2838	
16	6	5	5	2839	
17	7	5	5	2837	
18	7	6	6	2837	
19	8	6	6	2835	
20	8	7	6	2833	
21	8	7	7	32	Δ CO
22	9	8	7		
23	9	8	8		
24	10	9	9		
25	9	10	10		

Jumlah bahan bakar awal = 80 gram

Jumlah bahan bakar sisa = 57,12 gram

Zeolit alam Lampung 400 mesh 3 gram

t (menit)	Opasitas			[CO](ppm)	% adsorpsi
	titik1	titik2	titik3		
0	1	0	0	2204	
1	1	0	0	2188	
2	1	1	0	2183	
3	2	1	0	2182	
4	2	1	1	2171	
5	3	1	1	2176	
6	3	2	1	2170	
7	4	2	1	2175	
8	4	3	2	2173	
9	5	3	3	2162	
10	5	4	3	2171	2,40
11	6	4	3	2167	
12	6	5	4	2165	
13	7	5	4	2168	
14	7	5	5	2162	
15	8	6	6	2163	
16	9	7	7	2162	
17	9	8	7	2159	
18	10	9	8	2158	
19	11	9	9	2153	
20	12	10	10	2151	

53 Δ CO

Jumlah bahan bakar awal = 80 gram

Jumlah bahan bakar sisa = 68,20 gram

Zeolit alam Lampung 400 nm 1 gram

t (menit)	Opasitas			[CO](ppm)	% adsorpsi
	titik1	titik2	titik3		
0	0	0	0	3277	
1	0	1	1	3276	
2	1	1	1	3276	
3	1	1	1	3269	
4	2	1	1	3270	
5	2	2	2	3266	
6	2	2	2	3267	
7	3	3	3	3265	
8	3	3	3	3263	
9	4	3	4	3263	
10	4	4	4	3256	1,50
11	5	4	4	3255	
12	5	4	5	3253	
13	5	5	5	3254	
14	6	6	6	4350	
15	7	7	6	3247	
16	7	7	7	3246	
17	7	7	7	3243	
18	8	7	8	3239	
19	9	8	8	3238	
20	10	8	9	3228	
21	11	9	10	49	Δ CO
22	12	10	11		

Jumlah bahan bakar awal = 80 gram

Jumlah bahan bakar sisa = 50,20 gram

Zeolit alam Lampung 400 nm 3 gram

t (menit)	Opasitas			[CO](ppm)	% adsorpsi
	titik1	titik2	titik3		
0	0	0	0	2476	
1	1	0	0	2475	
2	1	1	0	2464	
3	2	1	1	2462	
4	2	1	1	2456	
5	3	2	1	2450	
6	3	2	2	2445	
7	4	3	2	2446	
8	5	3	3	2442	
9	5	4	3	2441	
10	6	5	4	2439	2,75
11	7	6	5	2435	
12	8	7	6	2433	
13	9	8	7	2430	
14	10	9	8	2431	
15	11	10	9	2426	
16	12	10	10	2422	
17				2419	
18				2415	
19				2413	
20				2408	

68

 Δ CO

Jumlah bahan bakar awal = 80 gram

Jumlah bahan bakar sisa = 60,20 gram

Lampiran 5. Persen adsorpsi CO dan nilai t_{10} zeolit alam Lampung termodifikasi TiO₂

Zeolit alam Lampung-TiO₂ 400 mesh 1 gram

t (menit)	Opasitas			[CO](ppm)	% adsorpsi
	titik1	titik2	titik3		
0	0	0	0	2785	
1	1	0	0	2781	
2	1	1	1	2778	
3	2	1	1	2775	
4	2	2	2	2772	
5	3	2	2	2773	
6	3	3	2	2771	
7	4	3	3	2768	
8	4	3	3	2764	
9	5	4	3	2761	
10	5	4	4	2760	2,05
11	6	4	4	2756	
12	6	5	4	2750	
13	7	5	5	2743	
14	7	6	5	2742	
15	8	6	6	2736	
16	8	7	6	2737	
17	9	7	6	2735	
18	9	8	7	2733	
19	10	9	8	2731	
20	11	10	9	2728	
21	11	11	10	57	Δ CO

Jumlah bahan bakar awal = 80 gram

Jumlah bahan bakar sisa = 55,91 gram

Zeolit alam Lampung-TiO₂ 400 mesh 3 gram

t (menit)	Opasitas			[CO](ppm)	% adsorpsi
	titik1	titik2	titik3		
0	0	0	0	2542	
1	1	0	0	2528	
2	1	1	1	2525	
3	2	1	1	2524	
4	2	2	1	2522	
5	3	2	1	2521	
6	3	2	2	2523	
7	4	3	2	2520	
8	5	4	3	2517	
9	5	4	4	2514	
10	6	5	4	2516	3,19
11	7	5	4	2512	
12	7	6	5	2508	
13	8	7	6	2502	
14	9	8	7	2498	
15	10	9	8	2493	
16	11	10	9	2484	
17	11	10	10	2475	
18	12	11	10	2469	
19	13	12	11	2466	
20	14	12	12	2461	

81

Δ CO

Jumlah bahan bakar awal = 80 gram

Jumlah bahan bakar sisa = 52,75 gram

Zeolit alam Lampung-TiO₂ 400 nm 1 gram

t (menit)	Opasitas			[CO](ppm)	% adsorpsi
	titik1	titik2	titik3		
0	0	0	0	2287	
1	1	1	0	2265	
2	2	1	0	2263	
3	3	2	1	2261	
4	3	2	2	2262	
5	4	3	2	2258	
6	4	3	2	2253	
7	5	4	3	2252	
8	5	4	4	2251	
9	6	4	4	2250	
10	6	5	4	2247	2,71
11	7	5	5	2245	
12	7	6	5	2241	
13	8	6	6	2237	
14	8	7	6	2234	
15	9	8	7	2232	
16	9	8	7	2228	
17	10	9	8	2229	
18	11	10	9	2227	
19	12	11	10	2226	
20	13	11	11	2225	
				62	Δ CO

Jumlah bahan bakar awal = 80 gram

Jumlah bahan bakar sisa = 58,91 gram

Zeolit alam Lampung-TiO₂ 400 nm 3 gram

t (menit)	Opasitas			[CO](ppm)	% adsorpsi
	titik1	titik2	titik3		
0	0	0	0	2372	
1	1	0	0	2337	
2	1	1	1	2319	
3	2	1	1	2316	
4	2	2	2	2317	
5	3	2	2	2316	
6	4	3	3	2315	
7	4	4	3	2312	
8	5	5	4	2311	
9	6	5	4	2310	
10	7	6	5	2308	3,67
11	8	7	6	2307	
12	9	8	7	2305	
13	10	9	8	2302	
14	11	10	9	2300	
15	11	10	10	2298	
16	12	11	10	2295	
17	12	11	11	2293	
18	13	12	11	2290	
19	14	12	11	2288	
20	15	13	12	2285	
				87	Δ CO

Jumlah bahan bakar awal = 80 gram

Jumlah bahan bakar sisa = 60,62 gram