



UNIVERSITAS INDONESIA

**MODIFIKASI ZEOLIT ALAM DENGAN TiO_2
UNTUK MEREDUKSI EMISI GAS BUANG
KENDARAAN BERMOTOR**

SKRIPSI

**RENDI AKBAR HASIBUAN
0806333455**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2012**



UNIVERSITAS INDONESIA

**MODIFIKASI ZEOLIT ALAM DENGAN TiO_2
UNTUK MEREDUKSI EMISI GAS BUANG
KENDARAAN BERMOTOR**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**RENDI AKBAR HASIBUAN
0806333455**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Rendi Akbar Hasibuan

NPM : 0806333455

Tanda tangan : 

Tanggal : 27 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Rendi Akbar Hasibuan
NPM : 0806333455
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Modifikasi Zeolit Alam dengan TiO_2 untuk
Mereduksi Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Yuliusman, M.Eng.
Penguji : Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA
Penguji : Prof. Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc, PhD
Penguji : Prof. Dr. Ir. Anondho Wijanarko, M.Eng

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 3 Juli 2012

KATA PENGANTAR

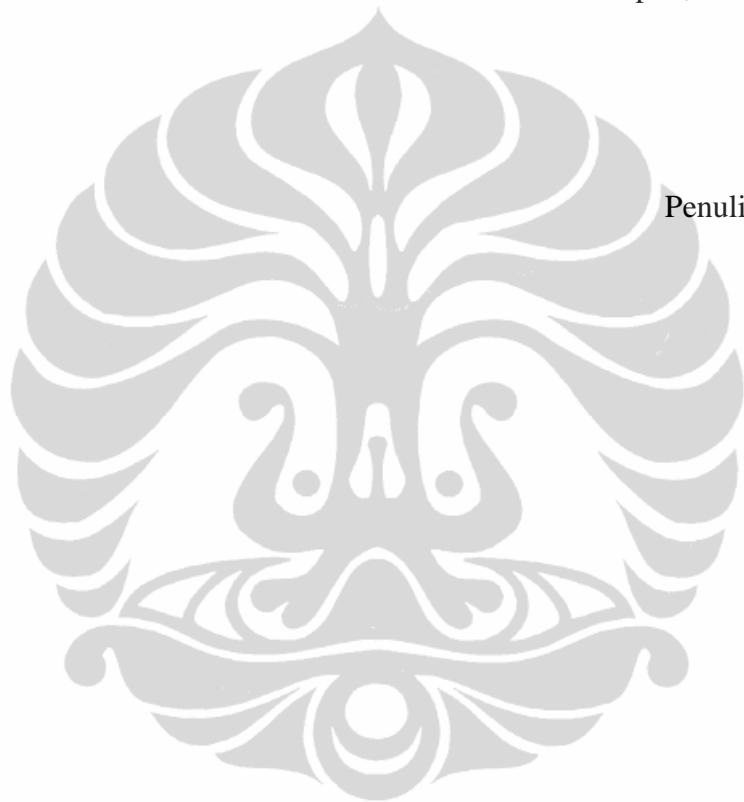
Puji syukur ke hadirat Allah S.W.T., atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Modifikasi Zeolit Alam dengan TiO₂ untuk Mereduksi Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor”** ini untuk memenuhi tugas skripsi, salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana Teknik Departemen Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Dalam penyusunan proposal ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ir. Yuliusman M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan seminar ini.
2. Dr. Ir. Nelson Saksono M.T., selaku dosen pembimbing akademik yang telah menyediakan waktu dan membantu kehidupan akademik perkuliahan selama ini.
3. Babe, Mama dan Kakak atas ketulusan cinta, kasih sayang, bantuan, doa dan dukungan yang selalu diberikan.
4. Jessyca yang selalu memberikan dukungan dan bantuan serta menyediakan waktunya untuk penulis.
5. Teman-teman seperjuangan penelitian, Andry Prasthio, Diana Agusta dan Mariatul Qibtiyah.
6. Arief, Dirga, Agas, Elvina, Ani, Mondy, Diana, Femmy, Sara, Sari, Glifanny, Yosmarina, Tias, Ayu, Haryo, Bramantyo, Adi “Jawa”, Gerry, Danny, Rezhi, Pindo, Victor, Fami dan teman-teman Teknik Kimia 2008 lainnya atas , persahabatan, bantuan, tawa, canda serta hiburan baik selama penulis mengerjakan skripsi maupun sejak awal kuliah.
7. Jessyca, Tommy, Monica, Hafiz, teman-teman seperantauan di UI dan teman-teman akselerasi SMAN 1 Padang 2008.
8. Mang Ijal, Mas Eko, Kang Jajat, Mas Taufik, dan Mas Heri yang telah banyak membantu proses penelitian.

9. Pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah ikhlas membantu penulis selama penyusunan proposal ini.

Penulis menyadari bahwa dalam makalah seminar ini masih terdapat banyak kekurangan. Untuk itu, saran dan kritik sangat penulis harapkan untuk memperbaiki penulisan di masa yang akan mendatang sehingga menjadi lebih baik.

Depok, Juni 2012



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

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

Nama : Rendi Akbar Hasibuan

NPM : 0806333455

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 :

Modifikasi Zeolit Alam dengan TiO_2 untuk Mereduksi Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, 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 : 27 Juni 2012

Yang menyatakan



Rendi Akbar Hasibuan

ABSTRAK

Nama : Rendi Akbar Hasibuan
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Modifikasi Zeolit Alam dengan TiO₂ untuk Mereduksi Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor

Pada penelitian ini dilakukan reduksi gas NO₂ dari kendaraan bermotor. Peningkatan jumlah kendaraan bermotor menimbulkan tingginya tingkat pencemaran udara terutama nitrogendioksida (NO₂). Untuk menanggulangnya dapat dilakukan pemasangan adsorben pada saluran gas buang kendaraan bermotor. Penelitian ini menggunakan zeolit alam yang termodifikasi TiO₂ sebagai adsorben. Zeolit terlebih dahulu diaktivasi dengan larutan HF 2 %, HCl 6M, NH₄Cl 0,1M, dikalsinasi, kemudian dilakukan modifikasi dengan TiO₂ melalui metode sol-gel. Pada penelitian ini, berbagai fenomena terkait adsorpsi NO₂ dijelaskan, seperti pengaruh konsentrasi awal gas, waktu kontak, *loading* TiO₂, dan aplikasi pada kendaraan bermotor. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan ZA/TiO₂-20% sebagai adsorben pada kendaraan bermotor mampu mengurangi emisi gas NO₂ sekitar 45-49%.

Kata Kunci: adsorpsi, NO₂, TiO₂, sol-gel, zeolit alam

ABSTRACT

Name : Rendi Akbar Hasibuan
Study Program : Chemical Engineering
Title : Modification of Natural Zeolite with TiO₂ to Reduce Motor Vehicle Exhaust Emissions

In this study carried out the reduction of NO₂ gas from motor vehicles. The increase number of motor vehicle produce high level of air poluting gas, particularly nitrogen dioxide (NO₂). Instalation of adsorbent at the exhaust line can overcome this problem. This study use natural zeolite modified with TiO₂ as adsorbent. Zeolite was activated with HF 1%, HCl 6M, and NH₄Cl 0,1M solution. Next, it was calcinated and modified with TiO₂ using sol-gel method. In this study, some phenomenons related with NO₂ adsorption is explained, such as influence of initial gas concentration, duration of contact, loading of TiO₂, and application at motor vehicle. The result of the study shows the use of ZA/TiO₂ as adsorbent at motor vehicle can reduce NO₂ gas emission about 45-49%.

Keywords: adsorption, natural zeolite, NO₂, TiO₂, sol-gel

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vii
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Udara dan Udara Tercemar	5
2.2 Pembakaran	7
2.3 Nitrogen Oksida (NO _x).....	8
2.4 Adsorpsi	9
2.5 Zeolit	12
2.5.1 Jenis Zeolit	15
2.5.2 Sumber Zeolit.....	16
2.5.3 Kegunaan Zeolit.....	17
2.5.4 Mekanisme Adsorpsi Oleh Zeolit Alam	18
2.6 TiO ₂	18
2.7 Preparasi Zeolit Alam Termodifikasi TiO ₂ dengan Metode Sol Gel	19
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	22
3.1 Diagram Alir Penelitian	22
3.2 Alat dan Bahan.....	23
3.2.1 Peralatan Penelitian	23
3.2.2 Bahan-bahan Penelitian	23
3.3 Variabel Dalam Penelitian	24
3.4 Prosedur Percobaan.....	24
3.4.1 Penghalusan dan Pengayakan	24
3.4.2 Aktivasi Zeolit	24
3.4.3 Pembuatan dan Pelapisan TiO ₂ pada Zeolit Alam	25
3.4.4 Karakterisasi Zeolit	26
3.4.4.1 Karakterisasi BET	26
3.4.4.2 Karakterisasi EDAX.....	26
3.4.5 Prosedur Kerja Percobaan Adsorpsi NO ₂ oleh Zeolit	26
3.4.5.1 Analisis Gas NO ₂ Metode Griess-Saltzman.....	28
3.4.5.2 Cara Perhitungan	29

3.4.5.3 Percobaan Adsorpsi Gas NO ₂ dari Emisi Kendaraan Bermotor ...	29
3.5 Perolehan dan Pengolahan Data.....	30
3.5.1 Perolehan Data	30
3.5.2 Pengolahan Data.....	31
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	32
4.1 Preparasi Zeolit Alam Bandung	32
4.1.1 Penghalusan dan Pengayakan	32
4.1.2 Aktivasi Zeolit Alam Bandung	32
4.1.3 Kalsinasi Zeolit Alam	33
4.2 Modifikasi Zeolit Alam dengan TiO ₂	33
4.3 Karakterisasi Zeolit	34
4.3.1 Karakterisasi EDAX.....	34
4.3.2 Karakterisasi BET	34
4.4 Hasil Percobaan Adsorpsi dan Model Isoterm Adsorpsi	35
4.4.1 Pengaruh Konsentrasi Awal Gas Terhadap Daya Adsorpsi Zeolit pada NO ₂	36
4.4.2 Pola Isoterm Adsorpsi dan Daya Adsorpsi Maksimum Zeolit Terhadap Gas NO ₂	36
4.4.3 Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Daya Adsorpsi Zeolit pada Gas NO ₂	40
4.5 Hasil Percobaan Adsorpsi NO ₂ dari Emisi Kendaraan Bermotor	42
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	44
5.1 Kesimpulan	44
5.2 Saran	44
DAFTAR PUSTAKA.....	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tetrahedral Alumina dan Silika pada Struktur Zeolit	13
Gambar 2.2 Struktur Zeolit	13
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	22
Gambar 3.2 Susunan Peralatan untuk Percobaan Adsorpsi Gas NO ₂	26
Gambar 3.3 Susunan Peralatan untuk Percobaan Adsorpsi dari Emisi Kendaraan Bermotor	30
Gambar 4.1 Proses Pembentukan TiO ₂ pada Zeolit.....	33
Gambar 4.2 Perbandingan Luas Permukaan Zeolit Alam Sebelum Diaktivasi dan Setelah Diaktivasi	35
Gambar 4.3 Perbandingan Daya Adsorpsi pada Zeolit Alam dengan Loading TiO ₂ 0%, 10%, 20% dan 30% dengan Variasi Konsentrasi Awal Gas NO ₂	36
Gambar 4.4 Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Jumlah NO ₂ Teradsorpsi pada Zeolit Tanpa Modifikasi.....	37
Gambar 4.5 Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Jumlah NO ₂ Teradsorpsi pada ZA/TiO ₂ -10%	38
Gambar 4.6 Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Jumlah NO ₂ Teradsorpsi pada ZA/TiO ₂ -20%	38
Gambar 4.7 Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Jumlah NO ₂ Teradsorpsi pada ZA/TiO ₂ -20%	38
Gambar 4.8 Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Jumlah Gas NO ₂ Teradsorpsi oleh Adsorben ZA/TiO ₂ -20%	41
Gambar 4.9 Jumlah NO ₂ Teradsorpsi (%) oleh ZA/TiO ₂ -20% pada Kendaraan Bermotor	42

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Udara Atmosfer pada Keadaan Standar.....	5
Tabel 2.2 Sumber dan Standar Kesehatan Emisi Gas Buang.....	6
Tabel 2.3 Perbandingan Sifat dari Berbagai Struktur Kristal TiO ₂	19
Tabel 3.1 Perbandingan Massa Zeolit dan Massa TiO ₂	25
Tabel 4.1 Hasil Karakterisasi EDAX.....	34
Tabel 4.2 Data Jumlah Gas NO ₂ yang Teradsorpsi pada Zeolit Alam dengan Variasi Loading TiO ₂ dengan Variasi Konsentrasi Awal Gas NO ₂	37
Tabel 4.3 Nilai Konstanta k dan 1/n untuk Masing-masing Adsorben	39



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Kualitas udara terutama di kota-kota besar seperti Jakarta saat ini sudah sangat tercemar oleh polutan dan telah mencapai ambang batas yang amat membahayakan kesehatan manusia dan juga merusak lingkungan hidup seperti berbagai jenis tanaman yang bisa mati akibat kadar gas buang yang mencemari udara semakin berat. Berdasarkan data yang dipublikasikan oleh Pemprov DKI Jakarta (2009), Jakarta menempati urutan ketiga sebagai kota dengan tingkat polusi udara tertinggi di dunia setelah Meksiko dan Thailand (Novalsyah, 2009) dan 70% polutan udara di kota Jakarta disumbangkan oleh sektor transportasi (Ubaidillah, 2009; Maragoya, 2010). Pencemaran tampaknya sudah tak dapat terelakkan lagi akibat terus membengkaknya jumlah kendaraan bermotor setiap tahunnya, di Jakarta saja jumlahnya mencapai 6,5 juta unit dengan tingkat pertumbuhan 10% per tahun (Hertanto, 2010).

Tingginya konsumsi bahan bakar fosil (hidrokarbon) sebagai bahan bakar kendaraan dan minimnya sumber energi alternatif merupakan penyebabnya. Secara teoritis, pembakaran hidrokarbon menggunakan oksigen akan menghasilkan karbon dioksida dan uap air. Namun, pada kenyataannya pembakaran hidrokarbon menghasilkan produk lain, diantaranya CO dan NO_x (Yusad, 2003).

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Kusminingrum (2007) di berbagai kota besar, diketahui kadar NO_x di udara adalah sebagai berikut : Bandung 0,063 ppm, Surabaya 0,017 ppm, Yogyakarta 0,054 ppm, dan Medan 0,067 ppm, dengan nilai ambang batas baku mutu udara ambien untuk NO_x adalah : 0,05 ppm sesuai Kep.02/MENKLH/1998. Gas CO, NO_x, HC dan CO₂ dari corong gas buang (muffler) selama ini diyakini sebagai penyebab berbagai penyakit. Misalnya, menurunnya daya tahan tubuh, bertambahnya penyakit menular, meningkatnya penyakit mata seperti katarak dan kebutaan, serta kanker kulit.

Untuk menanggulangi pencemaran udara yang kualitasnya kian menurun dan kita hirup setiap hari, pemerintah mengeluarkan peraturan baru sesuai ketentuan PBB untuk urusan “Lingkungan Hidup Yang Hijau” (*Green Environment*). Di Indonesia program ini mulai dilontarkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup sejak 1999 tetapi mendapatkan banyak kendala antara lain belum siapnya industri otomotif dan produsen BBM. Untuk mengatasi ketertinggalan tersebut Indonesia akan memberlakukan standar EURO 2, sesuai Keputusan Lingkungan Hidup No 141/2003 mulai 2005. Kemudian untuk menanggulangi bahaya penurunan kualitas lingkungan akibat proses pembakaran pada kendaraan bermotor, pengendalian gas-gas polutan dilakukan dengan salah satu cara diantaranya melalui penambahan katalis pada saluran gas buang kendaraan bermotor. Katalis ini merupakan suatu media pengurai CO dan NO_x hasil dari pembakaran dan diubah menjadi CO₂ dan N₂. Salah satu bahan yang dapat dimanfaatkan adalah batu zeolit yang dimodifikasi dengan TiO₂.

Penelitian mengenai adsorpsi gas CO dan NO_x menggunakan berbagai adsorben telah banyak dilakukan sebelumnya. Penggunaan zeolit alam sebagai adsorben untuk adsorpsi gas NO₂ telah dilakukan oleh Agustiar (2011) dan menunjukkan bahwa zeolit dapat mereduksi emisi gas buang secara signifikan. Penelitian lain mengenai adsorpsi gas CO dan NO_x menggunakan karbon aktif dan karbon aktif termodifikasi TiO₂ telah dilakukan oleh Basuki (2008) dan menunjukkan bahwa terjadi peningkatan efisiensi adsorpsi setelah dilakukan modifikasi dengan TiO₂ pada karbon aktif.

Pada penelitian ini akan digunakan zeolit alam sebagai media adsorpsi karena struktur kristalnya berpori, memiliki luas permukaan yang besar, stabilitas termal yang tinggi, tidak bersifat racun, dan efektif. Sedangkan katalis yang digunakan adalah TiO₂ karena mempunyai sifat tidak beracun, stabil terhadap cahaya, mudah didapat, serta mempunyai kestabilan kimia yang baik dalam semua kondisi reaksi. Zeolit alam ini akan dimodifikasi dengan TiO₂ melalui metode sol-gel, sehingga akan diperoleh katalis yang nantinya dapat diaplikasikan sebagai adsorben untuk penjernihan emisi gas buang kendaraan bermotor. Keuntungan metode sol-gel adalah materi yang terbentuk homogen dan memiliki kemurnian

yang tinggi, proses pembentukan struktur dapat diatur, kondisi sintesis dapat divariasikan serta dapat diaplikasikan untuk pembuatan katalis.

Dengan penambahan zeolit termodifikasi sebagai katalis pada saluran gas buang, diharapkan kadar gas buang kendaraan bermotor dapat direduksi, sehingga ketika dilepaskan ke udara kandungan NO₂ memenuhi standar aman bagi lingkungan yang sesuai dengan regulasi yang dikeluarkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dipelajari dalam penelitian ini adalah bagaimana mendapatkan komposisi zeolit alam dan TiO₂ yang paling efektif untuk mereduksi NO₂, berapa lama waktu yang dibutuhkan adsorben untuk mereduksi NO₂, dan bagaimana mengetahui pengaruh konsentrasi awal gas terhadap daya serap zeolit.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan *loading* TiO₂ pada zeolit yang paling efektif untuk mereduksi NO₂ dari emisi gas buang kendaraan bermotor.
2. Mengetahui laju degradasi gas NO₂ dari kendaraan bermotor pada zeolit.
3. Mengetahui pengaruh konsentrasi awal gas terhadap daya serap zeolit.
4. Mengetahui pengaruh aktivasi yang dilakukan terhadap zeolit dan pengaruh modifikasi zeolit alam dengan TiO₂.

1.4 Batasan Masalah

Batasan dari penelitian ini adalah:

1. Bahan yang digunakan sebagai adsorben adalah zeolit alam.
2. Gas yang diadsorpsi adalah gas NO₂
3. Zeolit dimodifikasi dengan katalis TiO₂.
4. Metode preparasi katalis yang akan digunakan adalah metode sol gel.
5. Kendaraan yang digunakan untuk uji pada kendaraan bermotor adalah sepeda motor.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam makalah seminar ini yaitu terdiri dari:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini mengandung gambaran umum permasalahan yang diangkat meliputi latar belakang penelitian, perumusan masalah yang dibahas, tujuan dilakukannya penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang teori-teori dan hasil studi penelitian terdahulu yang akan dijadikan sebagai landasan dan dasar acuan yang mendukung penelitian yang akan dilakukan.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini berisi tentang metode pelaksanaan penelitian, peralatan dan bahan yang digunakan dalam penelitian, prosedur penelitian, parameter penelitian, pengolahan dan analisis data, dan cara penyimpulan serta penafsiran hasil penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Terdiri dari acuan pustaka dan referensi baik dari literatur, jurnal ilmiah, maupun sumber lain yang digunakan sebagai rujukan dalam penulisan makalah seminar ini.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Udara dan Udara Tercemar

Udara merupakan campuran beberapa macam gas yang perbandingannya tidak tetap. Komposisi campuran gas tersebut tidak selalu konstan setiap saat. Komponen yang konsentrasinya paling bervariasi adalah air yang berupa uap air. Jumlah air di udara tergantung dari cuaca dan suhu. Udara disebut juga atmosfer yang mengelilingi bumi. Atmosfir merupakan campuran gas yang tidak bereaksi satu dengan yang lainnya (innert). Atmosfir terdiri dari selapis campuran gas, sehingga sering tidak tertangkap oleh indera manusia kecuali apabila berbentuk cairan (uap air) dan padatan (awan dan debu). Komposisi udara atmosfer dalam keadaan standar disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Komposisi Udara Atmosfer pada Keadaan Standar

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

(Lide, 1997)

Biasanya komposisi udara diperkirakan sebagai 79% N₂, dan 21% O₂, dengan berat molekul rata-rata udara adalah 28,97 g/mol.

Komposisi udara juga dapat berubah, terutama diakibatkan aktivitas manusia. Perubahan komposisi udara tentunya mengubah kualitas udara. Perubahan ini dapat berupa perubahan sifat fisis maupun sifat kimiawi. Perubahan

kimiawi dapat berupa pengurangan maupun penambahan komponen kimia yang terkandung didalam udara sehingga menyebabkan udara menjadi tercemar.

Udara tercemar adalah perbedaan komposisi udara aktual dengan kondisi udara normal dimana komposisi udara aktual tidak mendukung kehidupan manusia. Bahan atau zat pencemar udara sendiri dapat berbentuk gas dan partikel. Dalam bentuk gas, pencemar udara terbagi atas 4 golongan, yaitu golongan belerang (sulfur dioksida, hidrogen sulfida, sulfat aerosol), golongan nitrogen (dinitrogen oksida, nitrogen monoksida, amonia, dan nitrogen dioksida), golongan karbon (karbon dioksida, karbon monoksida, hidrokarbon), dan golongan gas yang berbahaya (benzene, vinil klorida, air raksa uap). Sementara itu, jenis pencemaran udara menurut tempat dan sumbernya dibedakan menjadi dua, yaitu pencemaran udara bebas dan pencemaran udara ruangan. Kategori pencemaran udara bebas meliputi secara alamiah (letusan gunung berapi, pembusukan, dan lain-lain) dan bersumber kegiatan manusia, misalnya berasal dari kegiatan industri, rumah tangga, asap kendaraan bermotor. Sedangkan pencemaran udara ruangan meliputi dari asap rokok, bau tidak sedap di ruangan (Sinaga, 2006).

Jenis parameter pencemar udara didasarkan pada baku mutu udara ambien menurut Peraturan Pemerintah Nomor 41 tahun 1999, yang meliputi : sulfur dioksida (SO₂), karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), ozon (O₃), hidrokarbon (HC), PM 10, partikel debu (PM 2,5), TSP (debu), timbal (Pb).

Tabel 2.2 Sumber dan Standar Kesehatan Emisi Gas Buang

Pencemar	Sumber	Standar Kesehatan
Karbon Monoksida (CO)	Buangan kendaraan bermotor, beberapa proses industri	10 mg/m ³ (9 ppm)
Sulfur Dioksida (SO ₂)	Panas dan fasilitas pembangkit listrik	80 µg/m ³ (0,03 ppm)
Partikulat <i>Matter</i>	Buangan kendaraan bermotor, beberapa proses industri	50 µg/m ³ selama 1 tahun, 150 µg/m ³
Nitrogen Dioksida (NO ₂)	Buangan kendaraan bermotor, panas dan fasilitas	100 pg/m ³ (0,05 ppm) selama 1 jam

Ozon (O ₃)	Terbentuk di atmosfer	235 μg/m ³ (0,12 ppm) selama 1 jam
------------------------	-----------------------	--

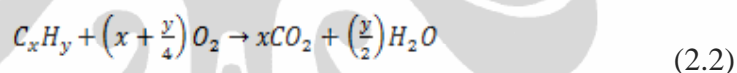
(BPLHD Jakarta, 2006)

2.2 Pembakaran

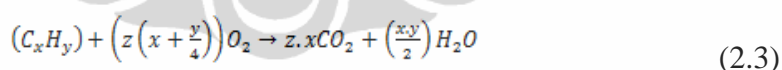
Pembakaran adalah reaksi kimia kompleks antara suatu bahan bakar dan suatu oksidan, disertai dengan produksi panas yang kadang disertai cahaya dalam bentuk pendar atau api. Dalam suatu reaksi pembakaran lengkap, suatu senyawa bereaksi dengan zat pengoksidasi, dan produknya adalah senyawa dari tiap elemen dalam bahan bakar dengan zat pengoksidasi. Contoh:



Banyak produk yang dibentuk dari pembakaran, namun produk yang diharapkan hanya CO₂, H₂O, dan N₂. Secara umum, rumus kimia untuk stoikiometri pembakaran sempurna dari hidrokarbon adalah sebagai berikut:



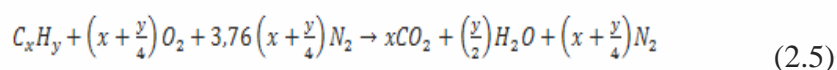
Namun dalam kenyataannya, tidak pernah terjadi proses pembakaran yang sempurna. Dalam pembakaran senyawa karbon (terutama hidrokarbon) akan ditemukan baik karbon yang tak terbakar maupun senyawa karbon (CO dan lainnya). Reaksi pembakaran tidak sempurna hidrokarbon dengan oksigen, secara umum dapat terlihat sebagai berikut:



Misalnya pada pembakaran tidak sempurna antara propane dengan oksigen:



Jika pembakaran dilakukan dengan menggunakan udara sebagai sumber oksigen, maka nitrogen juga ditambahkan ke persamaan meskipun tidak bereaksi untuk menampilkan komposisi dari gas buangnya:



Pada pembakaran dengan suhu tinggi seperti pembakaran internal pada kendaraan bermotor, dapat terjadi reaksi antara nitrogen dan oksigen dan

menghasilkan nitrogen oksida (NO_x). Reaksi tersebut muncul akibat adanya reaksi endotermik antara nitrogen dan oksigen pada nyala pembakaran yang menghasilkan nitrogen monoksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO_2).

2.3 Nitrogen Oksida (NO_x)

Nitrogen oksida (NO_x) adalah senyawa gas yang terdapat di udara bebas (atmosfir) yang sebagian besar terdiri atas nitrit oksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO_2) serta berbagai jenis oksida dalam jumlah yang lebih sedikit. Kedua macam gas tersebut mempunyai sifat yang sangat berbeda dan keduanya sangat berbahaya bagi kesehatan. Gas NO yang mencemari udara secara visual sulit diamati karena gas tersebut tidak berwarna dan tidak berbau. Sedangkan gas NO_2 bila mencemari udara mudah diamati dari baunya yang sangat menyengat dan warnanya merah kecoklatan.

Pembentukan NO dan NO_2 mencakup reaksi antara nitrogen dan oksigen di udara sehingga membentuk NO , kemudian reaksi selanjutnya antara NO dengan lebih banyak oksigen membentuk NO_2 . Persamaan reaksinya adalah sebagai berikut:



Nilai baku mutu dari NO_2 berdasarkan Peraturan Pemerintah RI No. 41 Tahun 1999 adalah $400 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ dalam waktu pengukuran 1 jam. Udara yang mengandung gas NO dalam batas normal relatif aman dan tidak berbahaya, kecuali bila gas NO yang tinggi dapat menyebabkan gangguan pada sistem saraf yang menyebabkan kejang-kejang. Bila keracunan ini terus berlanjut akan dapat menyebabkan kelumpuhan. Gas NO akan menjadi lebih berbahaya apabila gas itu teroksidasi oleh oksigen sehingga menjadi gas NO_2 karena sifat racun (toksisitas) gas NO_2 empat kali lebih kuat dari pada toksisitas gas NO . Organ tubuh yang paling peka terhadap pencemaran gas NO_2 adalah paru-paru. Paru-paru yang terkontaminasi oleh gas NO_2 akan membengkak sehingga penderita sulit bernafas yang dapat mengakibatkan kematiannya. Pencemaran udara oleh gas NO_2 juga dapat menyebabkan timbulnya Peroxy Acetil Nitrates yang disingkat dengan

PAN. PAN ini menyebabkan iritasi pada mata sehingga mata terasa pedih dan berair.

2.4 Adsorpsi

Adsorpsi merupakan suatu peristiwa fisik pada permukaan suatu bahan yang tergantung dari spesifik *affinity* (gaya gabung) antara adsorben dan zat yang diadsorpsi (Ketaren, 1986). Adsorpsi dapat diartikan juga sebagai peristiwa penjerapan pada permukaan suatu adsorben, misalnya adsorpsi zat padat terhadap gas atau zat cair. Zat yang teradsorpsi disebut sebagai adsorbat dan zat pengadsorpsi disebut adsorben (Kasmadi, 2002).

Peristiwa adsorpsi dapat terjadi pada adsorben yang pada umumnya beberapa zat padat. Adsorpsi oleh zat padat dibedakan menjadi dua, yaitu adsorpsi fisis (fisisorpsi) dan adsorpsi khemis (chemisorpsi). Adsorpsi fisik disebabkan oleh gaya *Van der Waals*. Pada adsorpsi fisik, molekul-molekul teradsorpsi pada permukaan dengan ikatan yang lemah. Adsorpsi fisik umumnya terjadi pada temperatur rendah dan dengan bertambahnya temperatur jumlah adsorpsi berkurang dengan mencolok (Adamson, 1990).

Antaraksi *Van der Waals* mempunyai jarak yang jauh, tetapi lemah, dan energi yang dilepaskan jika partikel terfisisorpsi mempunyai orde besaran yang sama dengan entalpi kondensasi. Entalpi fisisorpsi dapat diukur dengan mencatat kenaikan temperatur sampel dengan kapasitas kalor yang diketahui, dan nilai khasnya berada sekitar -20kJ/mol . Perubahan entalpi yang kecil ini tidak cukup untuk menghasilkan pemutusan ikatan, sehingga molekul yang terfisisorpsi tetap mempertahankan identitasnya, walaupun molekul itu dapat terdistorsi dengan adanya permukaan (Atkins, 1990).

Pada adsorpsi khemis, molekul-molekul yang teradsorpsi pada permukaan bereaksi secara kimia, sehingga terjadi pemutusan dan pembentukan ikatan (Adamson, 1990). Ikatan antara adsorben dan adsorbat dapat cukup kuat sehingga spesies aslinya tidak dapat ditemukan kembali. Adsorpsi ini bersifat *irreversibel* dan diperlukan energi yang besar untuk melepas adsorbat kembali dalam proses

adsorpsi. Pada peristiwa *chemisorpsi*, umumnya kapasitas adsorpsi akan bertambah dengan bertambahnya temperatur. Kenaikan temperatur yang cukup tinggi memungkinkan terjadinya perubahan adsorpsi fisis menjadi adsorpsi khemis (Triyanto, 2004).

Macam-macam isoterm adsorpsi, antara lain:

1. Isoterm Langmuir

Isoterm Langmuir merupakan isoterm paling sederhana yang didasarkan pada asumsi bahwa setiap tempat adsorpsi adalah ekivalen, dan kemampuan partikel untuk terkait di tempat itu, tidak bergantung pada ditempati atau tidaknya tempat yang berdekatan (Atkins, 1990). Persamaan isoterm adsorpsi Langmuir dapat diturunkan secara teoritis dengan menganggap terjadi kesetimbangan antara molekul zat yang diadsorpsi pada permukaan adsorben dengan molekul zat yang tidak teradsorpsi. Persamaan isoterm adsorpsi Langmuir dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\frac{C}{x/m} = \frac{1}{(x/m)_{\max}k} + \frac{1}{(x/m)_{\max}} C \quad (2.8)$$

Dimana C merupakan konsentrasi adsorbat dalam larutan, x/m adalah konsentrasi adsorbat yang terjerap per gram adsorben, k adalah konstanta yang berhubungan dengan afinitas adsorpsi dan $(x/m)_{\max}$ adalah kapasitas adsorpsi maksimum dari adsorben.

2. Isoterm BET

Dalam isoterm BET, volume total yang teradsorpsi sebanding dengan jumlah partikel teradsorpsi (Atkins, 1990).

3. Isoterm Freudlinch

Isoterm Freudlinch adalah satu dari beberapa persamaan awal yang diusulkan untuk menghubungkan jumlah bahan teradsorpsi terhadap konsentrasi bahan dalam larutan, yang dirumuskan dalam persamaan di bawah ini (Wahyuni, 2003).

$$m = k \cdot C^{1/n} \quad (2.9)$$

dimana:

m = massa zat teradsorpsi per satuan masa adsorben

C = konsentrasi larutan

k dan n adalah konstanta isotherm Freundlich

Karena molekul-molekul dalam zat padat tiap-tiap arah sama maka gaya tarik menarik antara suatu molekul dengan yang lain di sekelilingnya adalah seimbang. Sebab daya tarik yang satu akan dinetralkan oleh yang lain yang letaknya simetris atau dengan kata lain, resultan gayanya sama dengan nol. Lain halnya yang ada di permukaan, gaya-gaya tersebut tidak seimbang karena pada suatu arah di sekeliling tersebut tidak ada molekul lain yang menariknya. Akibatnya zat tersebut akan mempunyai sifat menarik molekul-molekul gas atau solute ke permukaannya. Fenomena inilah yang disebut adsorpsi.

Faktor yang mempengaruhi proses adsorpsi adalah (Anonim, 2009):

1. Jenis adsorben

Tiap adsorben mempunyai karakteristik tersendiri. Adsorben yang baik untuk mengadsorpsi zat yang satu, belum tentu baik untuk yang lain.

2. Macam zat yang diadsorpsi

Zat yang bersifat asam akan mudah diadsorpsi dengan adsorben basa, demikian pula sebaliknya karena asam dan basa akan saling tarik-menarik.

3. Konsentrasi masing-masing zat

Semakin tinggi konsentrasi, makin besar solute/adsorbat yang dapat teradsorpsi. Jika konsentrasi solute tinggi, kemungkinan adsorpsi bersentuhan dengan adsorben makin besar, dengan demikian solute yang teradsorpsi makin besar pula.

4. Luas permukaan

Semakin luas permukaan adsorben, makin besar kemampuan menarik adsorban.

5. Temperatur

Jika suhu dinaikkan maka molekul adsorben akan bergerak lebih cepat sehingga sulit menangkap dan mengadsorpsi molekul.

Untuk adsorben dengan luas permukaan dan berat tertentu, zat yang diadsorpsi tergantung pada konsentrasi solute di sekitar solvent. Makin tinggi konsentrasinya, makin besar pula zat yang diadsorpsi. Proses adsorpsi ada dalam

keadaan setimbang. Apabila kecepatan suatu zat ditambah atau dikurangi maka akan terjadi keadaan setimbang yang baru.

Syarat-syarat adsorben yang baik, antara lain:

1. Mempunyai daya serap yang besar
2. Berupa zat padat yang mempunyai luas permukaan yang besar
3. Tidak boleh larut dalam zat yang akan diadsorpsi
4. Tidak boleh mengadakan reaksi kimia dengan campuran yang akan dimurnikan
5. Dapat diregenerasi kembali dengan mudah
6. Tidak beracun

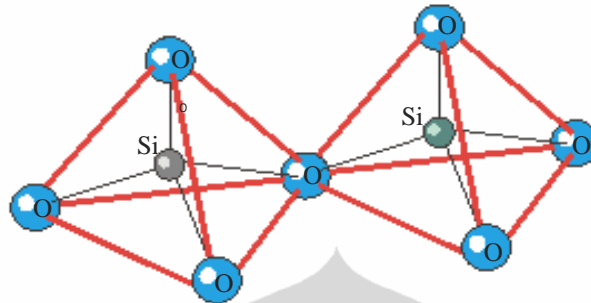
2.5 Zeolit Alam

Nama zeolit berasal dari kata “*zein*” yang berarti mendidih dan “*lithos*” yang artinya batuan, disebut demikian karena mineral ini mempunyai sifat mendidih atau mengembang apabila dipanaskan. Zeolit merupakan batuan atau mineral alam yang secara kimiawi termasuk golongan mineral silika dan dinyatakan sebagai alumina silika terhidrasi, berbentuk halus, dan merupakan hasil produk sekunder yang stabil pada kondisi permukaan karena berasal dari proses sedimentasi, pelapukan maupun aktivitas hidrotermal.

Mineral zeolit umumnya dikenal sebagai bahan alam dan umumnya dalam bentuk batuan *clinoptilolite*, *modernite*, *barrerite*, *chabazite*, *stilbite*, *analcime* dan *laumonlite*, sedangkan *offerite*, *paulingite*, dan *mazzite* hanya sedikit dan jarang dijumpai. Zeolit merupakan senyawa alumina silika (Si/Al) yang mempunyai pori dan luas permukaan yang relative besar, sehingga mempunyai sifat adsorpsi yang tinggi. Zeolit dengan kandungan Si yang tinggi seperti *clinoptilolite*, *modernite*, dan *ferrierite* dikelompokkan sebagai batuan *acidic* (Setyowati, 2002).

Zeolit alam terbentuk dari reaksi antara batuan tufa asam berbutir halus dan bersifat riolitik dengan air pori atau air meteorik. Zeolit merupakan kristal berongga yang terbentuk oleh jaringan silika alumina tetrahedral tiga dimensi dan mempunyai struktur yang relative teratur dengan rongga yang didalamnya terisi oleh logam alkali atau alkali tanah sebagai penyeimbang muatannya. Rongga-

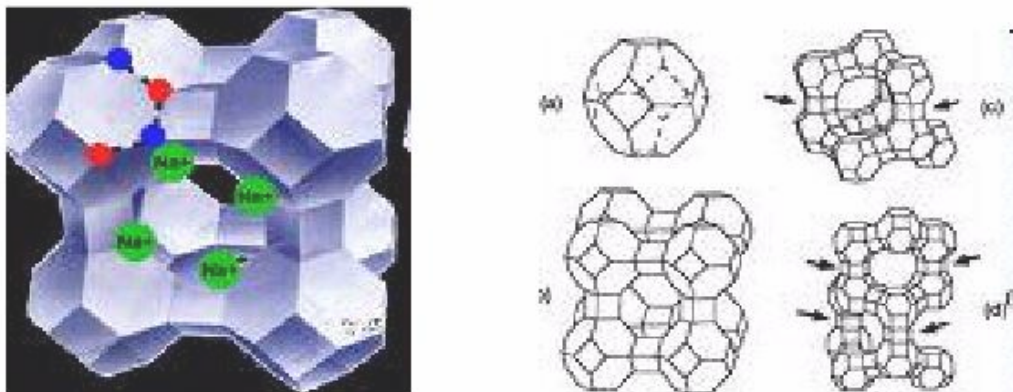
rongga tersebut merupakan suatu sistem saluran yang didalamnya terisi oleh molekul air (Ismaryata, 1999).



Gambar 2.1 Tetrahedral Alumina dan Silika pada Struktur Zeolit

(Las, 2004)

Kerangka dasar struktur zeolit terdiri dari unit-unit tetrahedral $(AlO_4)^{5-}$ dan $(SiO_4)^{4-}$ yang saling berhubungan melalui atom oksigen dan di dalam struktur tersebut Si^{4+} dapat diganti Al^{3+} dengan substitusi isoformik. Formula untuk satuan sel zeolit adalah $M_{x/n}\{(AlO_2)_x(SiO_2)_y\} \cdot z H_2O$, dimana M merupakan kation alkali/alkali tanah, n merupakan valensi logam alkali/alkali tanah, { } merupakan kerangka alumina, z merupakan jumlah molekul air yang terhidrat, serta z dan y merupakan jumlah tetrahedron per unit sel (Martin, 2000). Biasanya y/x bernilai 1-5, tetapi zeolit dengan silika tinggi harga y/x dibuat hingga 10-100 atau bahkan lebih tinggi (Flanigen, 1991).



Gambar 2.2 Struktur Zeolit

(CECA, 2008)

Karakteristik struktur zeolit antara lain:

1. Sangat berpori, karena kristal zeolit merupakan kerangka yang terbentuk dari jaring tetrahedral SiO_4 dan AlO_4 .
2. Pori-porinya berukuran molekul, karena pori zeolit terbentuk dari tumpukan cincin beranggotakan 6, 8, 10, atau 12 tetrahedral.
3. Dapat menukarkan kation, karena perbedaan muatan Al^{3+} dan Si^{4+} menjadikan atom Al dapat kerangka kristal bermuatan negatif dan membutuhkan kation penetral. Kation penetral yang buan menjadi bagian kerangka ini mudah diganti dengan kation lainnya.
4. Mudah dimodifikasi karena setiap tetrahedral dapat dikontakkan dengan bahan-bahan pemodifikasi.

Menurut Barrer (1982) dan Breck (1974), zeolit dikelompokkan menjadi 4 yaitu:

- a. Zeolit yang terbentuk pada suhu tinggi, dimana masing-masing temperatur tertentu akan terbentuk jenis zeolit tertentu pula.
- b. Zeolit yang terbentuk di dekat permukaan lingkungan sedimentasinya dengan perubahan kimia.
- c. Zeolit yang terbentuk pada suhu rendah pada lingkungan pengendapan laut.
- d. Zeolit yang terbentuk sebagai akibat dari terbentuknya “eraters” di lingkungan dasar laut yang menghasilkan fast hydrothermal zeolitization dari gelas vulkanik.

Kekuatan zeolit sebagai penjerap, katalis, dan penukar ion sangat tergantung dari perbandingan Al dan Si, sehingga dikelompokkan menjadi 3 (Sutarti, 1994):

1. Zeolit dengan kadar Si rendah

Zeolit jenis ini banyak mengandung Al, berpori, mempunyai nilai ekonomi yang tinggi karena efektif untuk pemisahan atau pemurnian dengan kapasitas besar. Volume porinya dapat mencapai $0,5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ volume zeolit. Kadar maksimum Al dicapai jika perbandingan Si/Al

mendekati 1 dan keadaan ini mengakibatkan daya penukaran ion maksimum.

2. Zeolit dengan kadar Si sedang

Kerangka tetrahedral Al dari zeolit tidak stabil terhadap pengaruh asam dan panas. Jenis zeolit modernit mempunyai perbandingan Si/Al = 5 sangat stabil

3. Zeolit dengan kadar Si tinggi

Zeolit ini mempunyai perbandingan Si/Al = 10-100 sehingga sifat permukaannya tidak dapat diperkirakan lebih awal. Semakin tinggi rasio Si/Al dari zeolit, maka kemampuan zeolit untuk menyerap molekul non-polar semakin tinggi sehingga baik digunakan sebagai katalisator asam untuk hidrokarbon

Di Indonesia, zeolit ditemukan pada tahun 1985 oleh PPTM Bandung dalam jumlah besar, diantaranya tersebar di beberapa daerah 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, yang pada saat ini zeolit di Indonesia dipasarkan masih dalam bentuk alami terutama pada pemupukan bidang pertanian.

2.5.1 Jenis Zeolit

- Modernite

Rasio Si/Al dari wujud natural dan sintetik zeolit modernit biasanya bernilai sekitar 5.0 tapi kandungan aluminium pada struktur penampang dapat dikurangi secara substansial menggunakan *leaching* asam tanpa kehilangan kristalinitasnya. Struktur saluran dari mordenit terbentuk dari cincin oksigen beranggotakan 12, memiliki diameter nominal bebas sekitar 6.7-7 Å. Namun mordenite alam bersifat seperti zeolit dengan pori kecil, dan bahkan molekul-molekul kecil seperti methane dan ethane teradsorpsi dengan sangat lambat. Hal ini terjadi karena saluran utama katalis tersumbat oleh material asing. Sieve ini dapat dibersihkan menggunakan *leaching* asam yang terkontrol yang terbukti membersihkan material dari saluran. Mordenite berpori besar juga

dapat disiapkan secara sintesis dimana saluran dapat dibebaskan dari sumbatan, dan memiliki sifat difusi yang diharapkan dari sieve bercincin 12.

Keberadaan sedikit material pengotor dalam kristal memiliki efek yang sangat besar pada kemampuan adsorpsi mordenit, dimana jumlah demikian memiliki efek yang relatif kecil pada zeolit A, X, atau Y. Untuk alasan yang serupa struktur satu dimensi membuat mordenite tidak sesuai untuk penggunaan dimana ada kemungkinan penyerapan hidrokarbon yang mengakibatkan pembentukan karbon/coke didalam kristal. Aplikasi mordenite sebagai adsorbent terbatas pada gas nonhidrokarbon yang relatif bersih.

- Pentasil

Zeolit pentasil terdiri kelompok zeolit kaya silika dengan struktur yang berdasarkan pada cincin-lima ganda. Dengan menyusun penampang dengan urutan-urutan yang berbeda-beda, variasi dan struktur yang berbeda-beda dapat diperoleh. Deskripsi yang lebih mendetail dideskripsikan oleh Kokatailo, Meier, Olson dan lainnya.

Pada zeolit ZSM-5 dan ZSM-11, sistem aluran-saluran dibedakan oleh cincin 10 oksigen dengan diameter bebas sekitar 6 Å, yang merupakan produk tengah dari sieve berpori kecil dengan saluran cincin-8 dan sieve berpori besar dengan saluran 12-cincin. Zeolit ini memiliki rasio Si/Al sekitar 30 tapi berbagai variasi lain juga dimungkinkan dan struktur-struktur dapat dipersiapkan dalam wujud bebas aluminium.. Bentuk ZSM-5 yang bebas aluminium sering disebut dengan silikalite.

2.5.2 Sumber Zeolit

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

Ada beberapa jenis zeolit sintetik yang dibentuk dari suatu proses kristalisasi gel silika-alumina dalam kehadiran alkali dan senyawa organik. Salah satu dari proses tersebut digunakan untuk melakukan sintesis zeolit dalam proses

sol-gel. Sifat produk bergantung pada komposisi campuran reaksi, pH sistem, temperatur operasi, waktu pengumpanan sebelum reaksi, waktu reaksi, dan juga senyawa yang digunakan. Dalam proses sol-gel, elemen lainnya (logam, oksida logam) dapat dengan mudah bergabung. Sol silikalil yang terbentuk dengan metode hidrotermal sangatlah stabil. Juga kemudahan untuk *scale up* proses ini membuatnya menjadi salah satu rute sintesis zeolit yang disukai.

Sintesis zeolit memiliki beberapa kelebihan utama dibandingkan zeolit alam. Zeolit sintetik dapat, tentunya, diproduksi secara seragam, dan dalam fasa murni. Juga memungkinkan untuk memproduksi struktur zeolit yang diinginkan yang tidak terdapat pada zeolit alam. Zeolit A merupakan contoh yang sudah diketahui. Karena material mentah utama yang digunakan untuk memproduksi zeolit adalah silika dan alumina, yang merupakan material yang paling berlimpah di bumi, potensi untuk menyuplai zeolit sebenarnya tidak terbatas. Pada akhirnya, produksi zeolit yang dibuat oleh manusia memerlukan waktu jauh lebih singkat daripada pembentukan secara alami yang membutuhkan waktu 50 sampai 50.000 tahun.

2.5.3 Kegunaan Zeolit Alam

Zeolit banyak digunakan sebagai agen penukar ion pada penjernihan dan pemurnian air, serta aplikasi lainnya baik domestik maupun komersial. Di bidang ilmu kimia, zeolit biasanya digunakan untuk memisahkan molekul-molekul (hanya molekul dengan bentuk dan ukuran tertentu saja yang dapat lewat), sebagai jebakan molekul agar mereka bisa dianalisa. Zeolit memiliki potensi menyediakan proses separasi yang tepat dan spesifik untuk gas-gas termasuk penghilangan H₂O, CO₂, dan SO₂ dari aliran gas alam kualitas rendah. Separasi lainnya termasuk: gas mulia, N₂, O₂, freon, dan formaldehid. Akan tetapi pada saat ini, potensi sebenarnya untuk mengembangkan penanganan gas-gas tersebut dalam hal ini masih belum diketahui.

Zeolit sintetik secara luas digunakan sebagai katalis pada industri petrokimia, misalnya pada perengkahan katalitik dan *hydro-cracking*. Zeolit mengurung molekul dalam ruang kecil, yang menyebabkan perubahan struktur dan reaktivitasnya. Bentuk hidrogen dari zeolit (disiapkan dengan proses penukaran ion) adalah asam kuat fasa padat yang baik, dan dapat memfasilitasi

reaksi yang dikatalisis oleh asam, seperti isomerisasi, alkilasi, dan perengkahan. Besaran aktivasi spesifik sebagian besar katalis zeolit yang digunakan pada proses petrokimia termasuk di dalamnya reaksi kuantum-kimia asam Lewis. Perengkahan katalitik menggunakan sebuah pemanas dan reaktor. Mula-mula fraksi distilasi minyak mentah dipanaskan dalam pemanas dan dilewatkan ke dalam reaktor. Di dalam reaktor minyak mentah bertemu dengan katalis zeolit. Minyak mentah melakukan proses ini sebanyak 3 kali, setiap kalinya semakin dingin. Akhirnya, minyak mentah mencapai tahap yang dikenal sebagai pemisah. Pemisah (*separator*) mengumpulkan hidrogen yang terdaur-ulang. Kemudian minyak mentah melewati fraksionator dan menjadi produk akhir.

2.5.4 Mekanisme Adsorpsi Oleh Zeolit Alam

Zeolit alam memiliki struktur rangka mengandung ruang kosong yang ditempati oleh kation dan molekul air yang bebas sehingga memungkinkan pertukaran ion atau *chemisorption* (Adamson, 1990).

Sebelum digunakan sebagai adsorben, zeolit alam harus diaktifkan terlebih dahulu agar jumlah pori-pori yang terbuka lebih banyak sehingga luas permukaan pori-pori bertambah. Zeolit yang cocok untuk adsorben yaitu apabila diaktifkan akan memberikan rasio Si/Al yang tinggi (10-100). Zeolit dengan rasio Si/Al tinggi bersifat hidrofob (Sutarti, 1994).

Agar kapasitas adsorpsi zeolit tidak mengalami penurunan, molekul-molekul air harus dikeluarkan dari dalam rongga zeolit, yaitu dengan cara pemanasan hingga temperatur 150 °C. Adsorpsi dapat terjadi karena adanya interaksi antara gaya pada permukaan padatan adsorben dengan molekul-molekul adsorbat (Kasmadi, 2002). Dari hasil penelitian sebelumnya dapat diketahui bahwa mineral zeolit mampu menyerap gas-gas CO₂, H₂S, dan H₂O sebanyak 25% (Sutarti, 1994).

2.6 TiO₂

TiO₂ termasuk salah satu jenis oksida logam yang merupakan katalis semikonduktor pada proses fotokatalisis. TiO₂ memegang peranan utama dalam proses-proses fotokatalisis karena berbagai kelebihan sifat-sifat kimia fisiknya seperti aktivitas fotokatalisisnya yang tinggi, stabil, dan tidak beracun. Hal ini

dapat dilihat jika dibandingkan dengan semikonduktor lainnya seperti ZnO yang aktivitasnya berkurang seiring waktu akibat proses korosi, CdS yang beracun, ataupun Fe₂O₃ yang daya oksidanya lemah. Secara komersial, TiO₂ juga mudah didapat dan banyak diproduksi. Berikut ini adalah beberapa kelebihan TiO₂ dibandingkan bahan semikonduktor lainnya, yaitu:

1. Secara umum memiliki aktivitas fotokatalis yang lebih tinggi daripada fotokatalis lain seperti ZnO, CdS, WO₃, dan SnO₂.
2. Tidak beracun dan tidak larut dalam kondisi eksperimen.
3. Bersifat inert dalam reaksi.
4. Mempunyai sifat stabil terhadap cahaya (fotostabil)
5. Mampu menyerap cahaya ultraviolet dengan baik.
6. Memiliki kemampuan oksidasi yang tinggi, termasuk zat organik yang sulit terurai sekalipun seperti haloaromatik, polimer, herbisida, dan pestisida.
7. Relatif murah jika digunakan dalam jumlah besar.

Terdapat tiga jenis struktur kristal TiO₂ yaitu anatase, rutile, dan brookite. Kristal-kristal ini terkadang memiliki pengotor seperti besi, kromium ataupun vanadium dalam jumlah kecil (Othmer, 1997). Perbedaan diantara ketiga struktur kristal TiO₂ dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Perbandingan Sifat dari Berbagai Struktur Kristal TiO₂

Sifat	Anatase	Brookite	Rutile
Bentuk Kristal	Tetragonal	Orthrombik	Tetragonal
Band gap, eV	3.25	3.05	3.0
Banyak TiO ₂ per 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

(Othmer, 1997)

2.7 Preparasi Zeolit Alam Termodifikasi TiO₂ dengan Metode Sol Gel

Katalis komposit dapat dibuat dengan berbagai metode, salah satunya adalah dengan metode sol gel (Slamet, 2008). Metode sol gel dikenal sebagai salah satu metode yang cukup sederhana dan mudah. Metode ini terklasifikasi sebagai “*wet method*” karena melibatkan larutan sebagai medianya (Daoud, 2004). Sesuai dengan namanya, pada metode ini terjadi perubahan fasa dari sol menjadi gel. Sol merupakan koloid yang mempunyai padatan tersuspensi dalam larutannya, sedangkan gel juga merupakan koloid tapi fraksi solidnya lebih besar.

Terdapat banyak metode untuk preparasi TiO₂, diantaranya metode hidrotermal, metode elektrodeposisi, metode sol gel, dll. Sintesis hidrotermal biasa dilakukan untuk melapisi pressure vessel yang terbuat dari baja (autoklaf) dengan atau tanpa liner teflon. Sintesis ini dilakukan pada suhu/tekanan yang dikontrol. Suhu sintesis dapat ditingkatkan hingga melebihi titik didih air dan mencapai tekanan uap jenuh. Suhu dan jumlah larutan yang diberikan ketika melakukan sintesis ditentukan berdasarkan tekanan internal yang dihasilkan oleh pressure vessel. Sedangkan metode elektrodeposisi umumnya digunakan untuk menghasilkan lapisan, biasanya logam, di permukaan dengan aksi reduksi pada katoda. Substrat yang akan dilapisi digunakan sebagai katoda dan direndam ke dalam larutan yang mengandung garam dari logam yang akan disimpan. Sehingga ion-ion logam tertarik ke katoda dan direduksi untuk membentuk logam (Chen, 2007).

Metode sol gel terdiri dari beberapa tahapan yaitu:

1. Pembentukan larutan stabil yang berbeda dari metal alkoksida atau pepadatan partikel logam dari prekursor. Dengan kata lain, tahapan ini merupakan tahapan pembentukan sol.
2. Proses gelasi yang dihasilkan dari jaringan pada oksida atau alkohol karena adanya proses polikondensasi atau poliesterifikasi. Reaksi ini akan membuat viskositas larutan meningkat secara drastis.
3. Sineresis, atau biasa disebut dengan pematangan gel. Proses ini berlangsung selama reaksi polikondensasi terus berlangsung sampai gel bertransformasi menjadi padatan, yang diikuti oleh kontraksi jaringan gel dan penghilangan solvent dari pori-pori gel.

4. Pengeringan gel. Pada tahapan ini, air ataupun larutan volatil lainnya dihilangkan dari jaringan gel. Tahap ini cukup kompleks karena melibatkan perubahan struktur gel. Pengeringan gel sendiri terbagi menjadi empat tahapan yaitu:

- *Constant rate period*
- *Critical Point*
- *Falling rate period*
- *Second falling rate period*

Jika proses pengeringan dilakukan dengan evaporasi termal, maka akan dihasilkan monolith berupa xerogel. Tapi, jika pengeringan dilakukan dengan cara ekstraksi pada kondisi super kritis, yang dihasilkan adalah aerogel.

5. Dehidrasi, merupakan penghilangan ikatan M-OH di permukaan. Tahapan ini akan menstabilisasi gel sehingga tidak mengalami rehidrasi. Biasanya rehidrasi dilakukan dengan cara kalsinasi monolith sampai suhu 800°C.

6. Densifikasi dan dekomposisi gel pada temperatur tinggi ($T > 800^{\circ}\text{C}$).

Metode sol gel memiliki beberapa keunggulan, diantaranya:

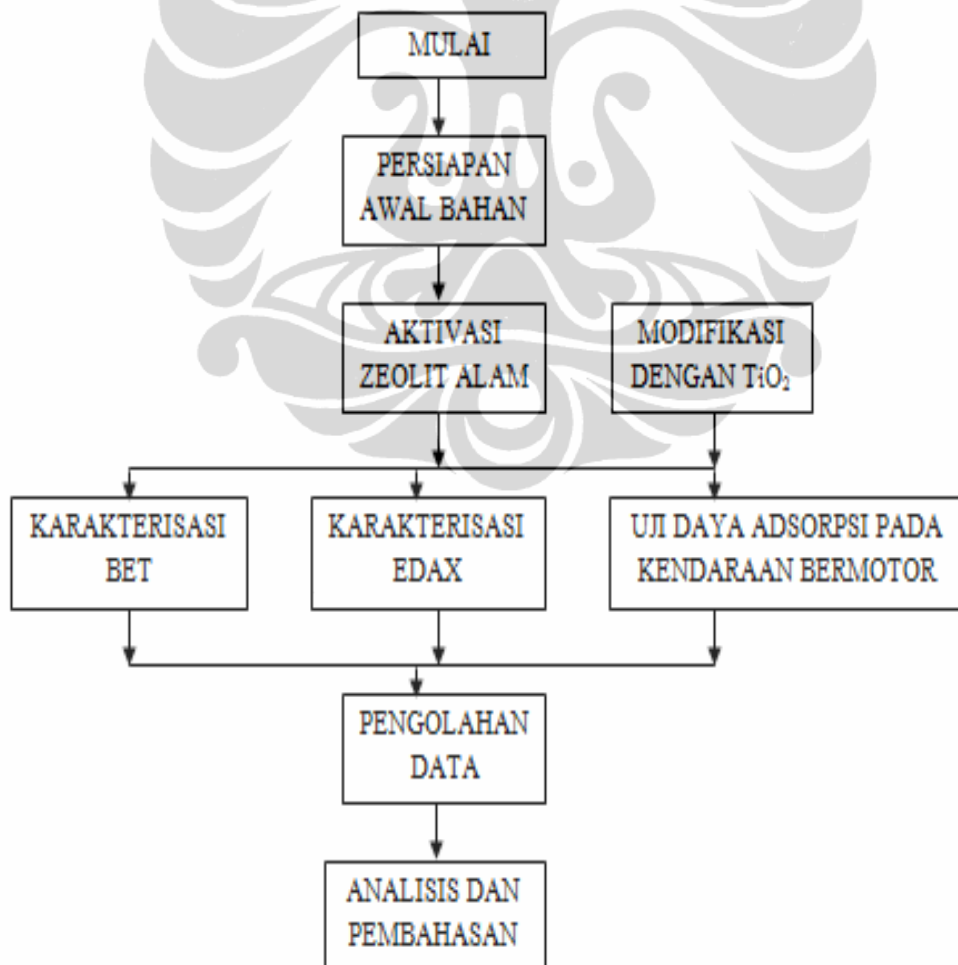
- Stabilitas termal tinggi
- Luas area permukaan partikel yang dihasilkan lebih besar (Hamid, 2003)
- Luas permukaan BET tinggi
- Daya tahan pelarut baik
- Stabilitas mekanik tinggi
- Dapat dilakukan modifikasi permukaan
- Ketebalan lapisan cukup baik

BAB 3 METODE PENELITIAN

Dalam bab ini akan dibahas metode penelitian yang terdiri atas diagram alir proses penelitian, bahan yang digunakan, variabel penelitian, dan prosedur penelitian yang secara keseluruhan dilakukan dalam skala laboratorium. Penelitian akan dilakukan di Laboratorium Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia

3.1 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian secara umum dapat dilihat pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Peralatan Percobaan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini meliputi peralatan yang digunakan dalam proses *treatment* dan modifikasi zeolit alam dengan TiO_2 , proses karakterisasi zeolit alam, proses pengujian daya adsorpsi zeolit alam, dan proses analisa sampel.

1. Mortar
2. Ayakan
3. *Beaker glass*
4. Spatula besi dan kaca
5. *Magnetic Stirrer* dan *Hot Plate*
6. Kertas saring dan corong
7. Cawan
8. Pipet tetes dan pipet volum
9. Timbangan mekanik
10. Alat ultrasonikasi
11. Furnace
12. EDAX di Lab Departemen Teknik Metalurgi dan Material Universitas Indonesia.
13. BET Autosorp-6 merk QUANTACHROME di Lab RPKA Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia
14. Peralatan adsorpsi gas
15. Spektrofotometer UV-Vis (*Ultra Violet – Visible*) di Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia
16. *Stopwatch*
17. Botol penjerap

3.2.2 Bahan-bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini meliputi bahan yang digunakan pada proses *treatment* dan integrasi zeolit alam dengan TiO_2 , dan proses pengujian daya adsorpsi zeolit alam.

1. Zeolit alam Bandung (Bratachem)
2. HF 2%

3. HCl 6 M
4. NH₄OH 0,1 M
5. Demineralized water
6. TiO₂ Degussa P-25
7. NEDA (N-(1-naftil)-etilendiamin dihidroklorida)
8. Asam sulfanilat
9. Asam asetat glasial
10. Aseton
11. Natrium nitrit

3.3 Variabel Dalam Penelitian

Variasi-variasi yang dilakukan dalam penelitian ini adalah

1. Konsentrasi/*loading* TiO₂ pada zeolit
2. Konsentrasi awal gas
3. Waktu penjerapan gas

3.4 Prosedur Percobaan

3.4.1 Penghalusan dan Pengayakan

Zeolit yang ukurannya masih kasar dan terlalu besar dihancurkan menggunakan mortar agar menjadi serbuk dengan ukuran butiran yang lebih kecil dan halus. Setelah dihaluskan, zeolit diayak menggunakan ayakan dengan ukuran 35-40 mesh (420 µm).

3.4.2 Aktivasi Zeolit Alam

Pada tahap ini dilakukan *treatment* awal zeolit alam. Tahapnya adalah sebagai berikut:

1. Tambahkan 200 ml larutan HF 2% kedalam *beaker glass* yang berisi 50 g zeolit. Campuran diaduk selama 10 menit pada suhu kamar, kemudian dicuci dengan air demin. Perendaman ini dilakukan dengan tujuan melarutkan oksida-oksida pengotor dan mengurangi senyawa organik pengotor yang dapat menurunkan daya adsorpsi zeolit.
2. Rendam 50 g zeolit yang telah diaktivasi dalam 200 ml HCl 6 M pada suhu 90°C selama 30 menit. Perendaman ini dilakukan agar aluminium

dalam zeolit dapat terekstrak dan aluminium dalam kerangka menjadi aluminium luar kerangka sehingga dapat meningkatkan rasio Si/Al

3. Rendam zeolit dalam 200 ml larutan NH_4Cl 0,1 M selama 5 hari, dengan pemanasan pada suhu 90°C dan diaduk selama 3 jam per hari.
4. Kalsinasi zeolit pada suhu 500°C selama 5 jam. Kalsinasi zeolit bertujuan untuk menguapkan kandungan air dan pengotor yang terperangkap dalam kristal zeolit.

3.4.3 Pembuatan dan Pelapisan TiO_2 pada Zeolit Alam

Pada tahap ini dilakukan pembuatan dan pelapisan TiO_2 pada zeolit alam dengan prosedur sebagai berikut:

1. Membuat sol gel TiO_2 dan zeolit alam yang telah diaktivasi dengan perbandingan konsentrasi tertentu. Caranya adalah dengan menimbang TiO_2 dan zeolit alam dengan perbandingan sebagai berikut.

Tabel 3.1 Perbandingan Massa Zeolit dan Massa TiO_2

Loading TiO_2	10%	20%	30%
Massa campuran	2 gram	2 gram	2 gram
Massa zeolit	1,8 gram	1,6	1,4
Massa TiO_2	0,2	0,4	0,6

2. Larutkan masing-masing TiO_2 yang telah ditimbang dalam 100 ml air demin kemudian disonikasi selama 10 menit. Kemudian ditambahkan masing-masing zeolit alam dengan perbandingan tertentu dan direndam selama 20 menit.
3. Uapkan campuran zeolit alam- TiO_2 hingga tidak mengandung air.
4. Masukkan adsorben yang terbentuk ke dalam *furnace* untuk dikalsinasi pada temperatur 400°C selama 2 jam. Kalsinasi pada temperatur 400°C dilakukan untuk mendispersikan TiO_2 secara merata pada seluruh permukaan zeolit alam. Adsorben yang telah terbentuk dibiarkan hingga temperaturnya kembali normal, kemudian diayak dan ditimbang.
5. Uji karakteristik EDAX untuk mengetahui kandungan TiO_2 yang terbentuk pada permukaan zeolit alam.

3.4.4 Karakterisasi Zeolit

3.4.4.1 Karakterisasi BET

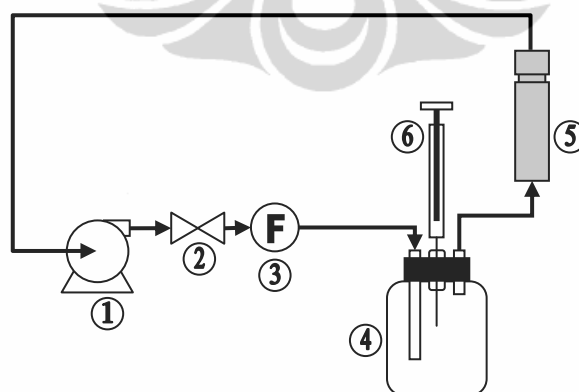
Karakterisasi BET dilakukan untuk mengetahui luas permukaan zeolit alam yang belum di *treatment*, zeolit alam yang telah di *treatment*, dan zeolit alam yang telah dimodifikasi dengan TiO₂. Melalui karakterisasi BET juga dapat diketahui volume dan diameter pori-pori rata-rata.

3.4.4.2 Karakterisasi EDAX

Karakterisasi EDAX dilakukan untuk mengetahui rasio Si/Al zeolit alam, serta kandungan TiO₂ yang diintegrasikan ke zeolit alam. Sampel yang akan dikarakterisasi dihaluskan hingga berbentuk serbuk. Kemudian serbuk yang terbentuk dikompres hingga membentuk pellet tipis. Sampel yang telah berbentuk pellet tipis dimasukkan ke dalam alat EDAX. Kemudian alat EDAX akan mengirimkan sejumlah data ke dalam komputer yang berisi grafik-grafik *peak-peak* yang dihasilkan oleh sampel. Setelah itu komputer akan menunjukkan komposisi sampel tersebut.

3.4.5 Prosedur Kerja Percobaan Adsorpsi NO₂ oleh Zeolit

Proses percobaan adsorpsi gas NO₂ pada zeolit dilakukan menggunakan peralatan dengan susunan sebagai berikut :



Gambar 3.2 Susunan Peralatan untuk Percobaan Adsorpsi Gas NO₂

(Agustiar, 2011)

Keterangan :

1. Pompa peristaltik

2. Valve
3. Flowmeter
4. Generator gas NO₂
5. Kolom adsorpsi
6. *Syringe* untuk pengambilan contoh gas

Prosedur kerja percobaan adsorpsi:

- a. Timbang $\pm 0,3$ gram zeolit dengan ketelitian hingga 1 mg.
- b. Masukkan ke dalam kolom dengan disumbat menggunakan *glasswool*. Zeolit yang digunakan sebagai adsorben diratakan pada permukaan kolom adsorpsi.
- c. Pasang kolom sesuai susunan pada Gambar 3.2.
- d. Pipet sejumlah volum tertentu dari larutan NO₂ 10000 ppm ke dalam botol generator gas.
- e. Tambahkan 5 ml HCl 6M ke dalamnya, segera ditutup rapat untuk mencegah gas yang terbentuk keluar dari botol.
- f. Biarkan selama 5 menit untuk memastikan reaksi pembentukan gas telah sempurna dan konsentrasi gas dalam botol merata.
- g. Pastikan setiap aliran dalam susunan peralatan tidak bocor. Gunakan *sealant* bila perlu
- h. Lakukan pengambilan sampel gas di dalam contoh menggunakan syringe. Diambil 2 ml sampel gas, kemudian sampel gas dari dalam syringe dialirkan ke dalam 5 ml larutan Gries-Saltzman perlahan-lahan. Kemudian tutup tempat sampel, dikocok, dan dibiarkan 15 menit untuk pembentukan warna.
- i. Pompa udara dinyalakan dan diatur laju alirnya ± 0.1 L/menit.
- j. Biarkan agar gas mengalir dan bersirkulasi selama 1 jam.
- k. Setelah 1 jam, pompa dimatikan dan didiamkan sebentar hingga aliran gas benar-benar berhenti.
- l. Lakukan pengambilan sampel gas setelah adsorpsi dengan cara seperti pada sebelum adsorpsi. Volum gas yang diambil untuk setelah adsorpsi sebanyak 5 ml.

- m. Sampel sebelum dan sesudah adsorpsi diukur dengan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 550 nm.
- n. Lakukan variasi konsentrasi awal gas dengan memipet 5, 10, dan 20 mL larutan NO₂ pada tahap (d). Selain itu dilakukan pula variasi adsorben dengan *loading* TiO₂ yang berbeda untuk setiap variasi konsentrasi awal gas.

3.4.5.1 Analisis Gas NO₂ Metode Griess-Saltzman

1. Pembuatan Larutan Griess-Saltzman

- a. Larutkan 0,1 g NEDA dengan air suling ke dalam labu ukur 100 mL, diencerkan dengan air suling hingga tanda tera.
- b. Larutkan 5 g asam sulfanilat dalam gelas piala 1000 mL dengan ditambahkan 140 mL asam asetat glasial, diaduk sambil ditambahkan air suling hingga ±800 mL.
- c. Larutan asam sulfanilat yang sudah larut sempurna dipindahkan ke dalam labu ukur 1000 mL, ditambahkan 20 mL larutan NEDA dan 10 mL aseton. Ditambahkan air suling hingga tanda tera, dihomogenkan.
- d. Disimpan dalam botol coklat di dalam lemari pendingin.

2. Pembuatan Larutan Induk Standar NO₂

- a. Keringkan natrium nitrit (NaNO₂) di dalam oven suhu 105°C selama 2 jam, kemudian dinginkan dalam desikator.
- b. Ditimbang 0,246 g kemudian dilarutkan dalam labu ukur 100 mL dengan air suling. (larutan induk 1640 µg/mL)
- c. Dipipet 10 mL larutan induk ke dalam labu ukur 1000 mL, kemudian ditambahkan air suling hingga tanda tera, dihomogenkan.

3. Pembuatan Larutan Kalibrasi

- a. Dipipet masing-masing 0 mL; 0,2 mL; 0,4 mL; 0,6 mL; 0,8 mL dan 1,0 mL larutan standar nitrit ke dalam labu ukur 25 mL.
- b. Ditambahkan larutan penjerap hingga tanda tera, dikocok dan didiamkan selama 15 menit.
- c. Diukur serapan masing-masing larutan standar dengan spektrofotometer pada panjang gelombang 550 nm.
- d. Buat kurva kalibrasi antara serapan dengan jumlah NO₂ (µg)

3.4.5.2 Cara Perhitungan

1. Perhitungan Konsentrasi Larutan Standar NO₂

Jumlah NO₂ (µg) tiap 1 mL larutan standar yang digunakan dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$NO_2 = \frac{a}{100} \times \frac{46}{69} \times \frac{1}{f} \times \frac{10}{1000} \times 10^6 \quad (3.1)$$

NO₂ = jumlah NO₂ dalam larutan standar NaNO₂ (µg/mL)

a = berat NaNO₂ yang ditimbang

46 = berat molekul NO₂

69 = berat molekul NaNO₂

f = faktor yang menyatakan jumlah mol NaNO₂ yang menghasilkan warna yang setara 1 mol NO₂ (f=0,82)

10/1000 = faktor pengenceran dari larutan induk NaNO₂

10⁶ = konversi dari gram ke µg

2. Konsentrasi NO₂ dalam sampel

Konsentrasi NO₂ dalam contoh uji dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$C = \frac{b}{V} \times \frac{5}{25} \times 10^6 \quad (3.2)$$

C = konsentrasi NO₂ dalam contoh uji (µg/m³)

b = jumlah NO₂ hasil perhitungan dari kurva kalibrasi (µg)

V = volum contoh uji yang diambil (mL)

5/25 = faktor volum untuk contoh uji terhadap volum larutan kalibrasi

10⁶ = konversi dari mL ke m³

3.4.5.3 Percobaan Adsorpsi Gas NO₂ dari Emisi Kendaraan Bermotor

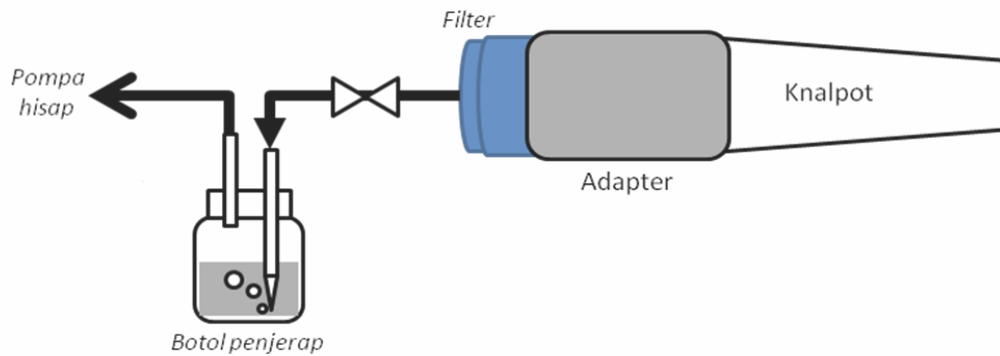
Zeolit dengan kemampuan adsorpsi NO₂ yang paling maksimal dari percobaan sebelumnya digunakan untuk percobaan ini.

1. Pembuatan Peralatan Percobaan Adsorpsi Emisi Kendaraan

a. Isi zeolit dengan merata pada kolom adsorpsi.

b. Peralatan disambungkan dengan adapter.

c. Peralatan untuk percobaan dipasang di knalpot kendaraan (sepeda motor) dan disusun seperti berikut :



Gambar 3.3 Susunan Peralatan untuk Percobaan Adsorpsi dari Emisi Kendaraan Bermotor
(Agustiar, 2011)

2. Prosedur Percobaan

- a. Mesin kendaraan dinyalakan dan dipanaskan selama 10 menit, kemudian dimatikan.
- b. Sebanyak 20 mL larutan Saltzman diisikan ke dalam botol penjerap.
- c. Peralatan disusun seperti pada Gambar 3.3.
- d. Mesin dinyalakan dan dibiarkan menyala pasif (tidak menarik-narik tuas gas)
- e. Pompa dinyalakan dan dibiarkan selama 2 menit, kemudian dimatikan
- f. Larutan Saltzman di botol penjerap dipindahkan ke wadah lain.
- g. Botol penjerap diisi dengan larutan Saltzman yang baru.
- h. Percobaan diulangi beberapa kali.
- i. Percobaan dilakukan tanpa filter (tanpa zeolit) dan dengan filter.
- j. Tiap larutan hasil percobaan diukur dengan spektrofotometer UV-Vis.

3.5 Perolehan dan Pengolahan Data

3.5.1 Perolehan Data

Data yang akan diperoleh dari penelitian ini antara lain :

- a. Data mengenai rasio Si/Al dari zeolit hasil preparasi dan kandungan TiO_2 pada zeolit yang dimodifikasi diperoleh dari pengukuran dengan EDAX.
- b. Data mengenai luas permukaan zeolit sebelum dan sesudah preparasi diperoleh dari analisa BET.

- c. Data konsentrasi awal dan akhir gas setelah adsorpsi diperoleh dengan mengukur menggunakan spektrofotometer UV-Vis.

3.5.2 Pengolahan Data

- a. Data luas permukaan tiap zeolit yang dihasilkan disajikan sebagai variabel terikat dari modifikasi zeolit dengan TiO₂.

$$x/m = \frac{c_{awal} - c_{akhir}}{w_{zeolit}} \times \frac{V}{1000} \quad (3.3)$$

- d. Data jumlah gas NO₂ teradsorpsi disajikan sebagai variabel terikat daripada variabel bebas konsentrasi awal gas NO₂, kemudian dibuat plot menurut persamaan isoterm Langmuir dan Freundlich.
- e. Plot gabungan dari berbagai jenis adsorben dapat memberikan informasi pengaruh *loading* TiO₂ terhadap kemampuan adsorpsinya terhadap gas NO₂.
- f. Konsentrasi gas NO₂ dari emisi kendaraan bermotor (awal) dan konsentrasi gas NO₂ setelah diadsorpsi dihitung sebagai persentase (%) gas NO₂ yang teradsorpsi.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Proses pada penelitian ini terdiri atas 4 tahap, yaitu: preparasi zeolit alam, pelapisan zeolit alam dengan TiO_2 , analisis kandungan zeolit dan uji daya adsorpsi zeolit alam. Analisis kandungan silika, aluminium dan TiO_2 menggunakan EDX, analisis luas permukaan menggunakan BET, dan analisis larutan uji menggunakan Spektrofotometer UV-Vis.

4.1 Preparasi Zeolit Alam Bandung

4.1.1 Penghalusan dan Pengayakan

Ukuran arang aktif yang biasa digunakan pada *filter cartridge* komersial masih cukup besar, sekitar 1-3 mm. Oleh karena itu, dilakukan penghalusan dengan ukuran 35-40 mesh (420 μm). Ukuran ini dipilih agar luas permukaan zeolit yang berkontak dengan NO_2 semakin besar namun tidak lolos dari *filter cartridge* ketika digunakan pada tahap pengujian daya adsorpsi.

4.1.2 Aktivasi Zeolit Alam Bandung

Prosedur aktivasi zeolit alam dilakukan dengan cara merendam zeolit dalam beberapa larutan. Pertama, zeolit direndam dalam larutan HF 2 % disertai pengadukan. Pada proses ini terjadi perubahan warna pada larutan yang awalnya bening menjadi berwarna putih keabu-abuan dan keruh. Hal ini menunjukkan adanya kandungan oksida-oksida dan senyawa organik pengotor di dalam zeolit yang terlarut.

Selanjutnya, zeolit didealuminasi dengan merendam dalam larutan HCl 6 M. Pada proses ini terjadi perubahan warna pada larutan yang awalnya bening menjadi kuning pekat. Hal ini menunjukkan adanya senyawa aluminium di dalam zeolit yang terekstrak dan terlarut.

Setelah proses dealuminasi, zeolit direndam dalam larutan NH_4Cl 0,1 M. Pada proses ini terjadi perubahan warna pada larutan dari bening menjadi putih keabu-abuan dan terjadi pengikisan sehingga zeolit menjadi lebih halus. Perendaman dilakukan untuk menguatkan kembali struktur zeolit.

4.1.3 Kalsinasi Zeolit Alam Bandung

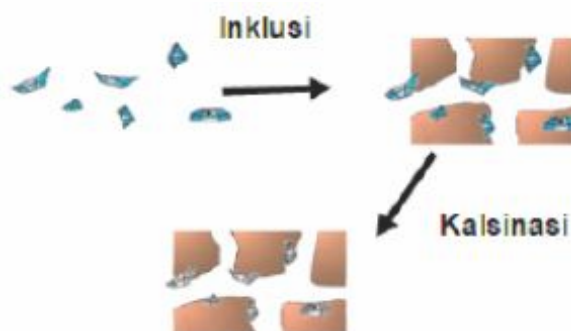
Pada akhir tahap preparasi, zeolit dikalsinasi pada suhu 500 °C dan terjadi perubahan warna zeolit menjadi coklat muda, lebih kering, dan lebih kokoh. Zeolit awal yang berwarna biru-hijau menunjukkan adanya kandungan air yang terikat di dalam zeolit. Setelah dikalsinasi, terjadi pengurangan bobot zeolit yang menunjukkan adanya air dan senyawa organik yang teruapkan dari dalam zeolit.

4.2 Modifikasi Zeolit Alam dengan TiO₂

Zeolit alam yang teraktivasi dimodifikasi dengan TiO₂ Degussa P-25 dengan perbandingan tertentu. Terlebih dahulu dipersiapkan larutan sol gel TiO₂ sebelum dilapiskan pada zeolit yang telah diaktivasi. TiO₂ yang berbentuk serbuk dilarutkan dalam air demin dan disonikasi. Sonikasi bertujuan agar larutan sol gel menjadi lebih homogen dengan bantuan gelombang ultrasonik.

Pelapisan TiO₂ pada zeolit dilakukan dengan metode perendaman (*dip coating*) dimana zeolit teraktivasi direndam ke dalam larutan sol gel TiO₂. TiO₂ menyisip ke dalam zeolit pada saat dilakukan pemanasan disertai pengadukan. Pengadukan dilakukan agar zeolit dan padatan TiO₂ tercampur hingga homogen.

TiO₂ yang disisipkan ke dalam zeolit yang terbentuk masih rapuh. Oleh karena itu, zeolit termodifikasi TiO₂ harus dikalsinasi. Kalsinasi dilakukan pada suhu 400 °C. Proses ini bertujuan untuk menstabilkan struktur zeolit alam termodifikasi TiO₂. Selain itu, kalsinasi juga bertujuan untuk menghilangkan molekul air dan senyawa pengotor organik yang menempati ruang antarlapis zeolit. Dengan demikian, luas permukaan spesifik antarlapis zeolit termodifikasi akan bertambah besar akibat dari menyisipnya TiO₂ dan hilangnya molekul air. Fenomena pembentukan TiO₂ pada zeolit dijelaskan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Proses Pembentukan TiO₂ pada Zeolit (Wijaya, 2006)

4.3 Karakterisasi Zeolit

4.3.1 Karakterisasi EDAX

Pada tahap sebelumnya telah dilakukan preparasi terhadap zeolit alam. Preparasi dilakukan salah satunya untuk meningkatkan rasio Si/Al dari zeolit alam. Setelah melalui tahap preparasi dan modifikasi, zeolit dikarakterisasi menggunakan EDAX. Hasil karakterisasi EDAX dapat dilihat pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Hasil Karakterisasi EDAX

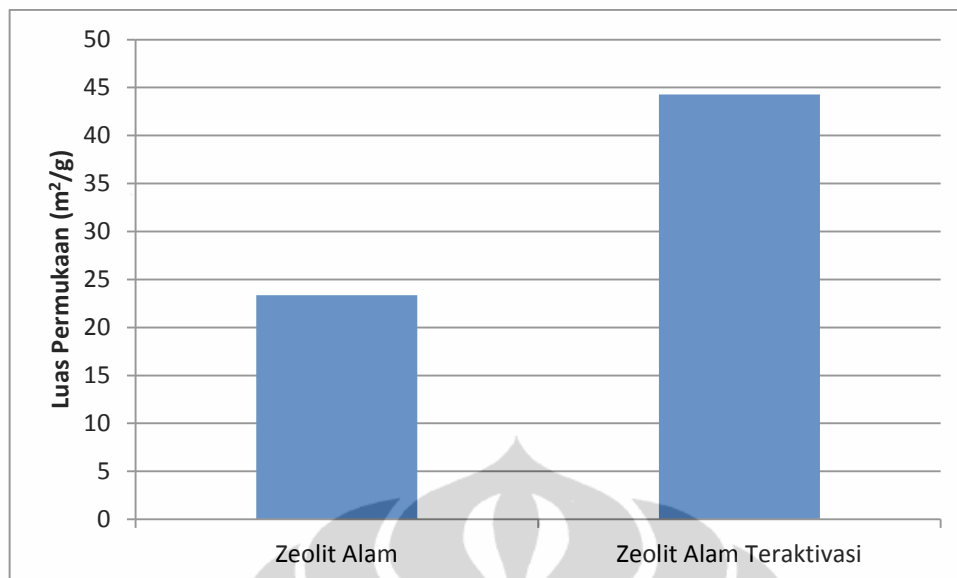
Adsorben	SiO ₂ (wt%)	AlO ₂ (wt%)	TiO ₂ (wt%)	Si/Al
ZA	37,85	4,39	-	8,62
ZA teraktivasi	54,20	2,26	-	23,98
ZA/TiO ₂ -20%	50,08	2,72	21,63	18,41

Dari hasil karakterisasi terlihat bahwa terjadi peningkatan rasio Si/Al pada zeolit yang telah diaktivasi. Namun peningkatan yang terjadi tidak terlalu signifikan. Hal ini sesuai dengan hasil yang diharapkan karena zeolit akan digunakan untuk adsorpsi NO₂. Berdasarkan penelitian Agustiar (2011), zeolit yang baik digunakan sebagai adsorben adalah zeolit dengan rasio Si/Al berkisar antara 10-100, dan semakin rendah zeolit Si/Al, akan semakin baik daya adsorpsi zeolit terhadap gas NO₂.

Dari hasil karakterisasi terhadap ZA/TiO₂-20%, dapat terlihat bahwa terdapat TiO₂ pada permukaan zeolit sebesar 21,63 wt%. Terbentuknya TiO₂ pada permukaan zeolit menunjukkan bahwa proses sintesis ZA/TiO₂ relatif berhasil.

4.3.2 Karakterisasi BET

Salah satu faktor yang sangat berpengaruh terhadap daya adsorpsi dari suatu adsorben adalah luas permukaan. Oleh karena itu, dilakukan analisa dengan menggunakan metode BET untuk mengetahui luas permukaan dari adsorben yang akan digunakan. Hasil karakterisasi BET disajikan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Perbandingan Luas Permukaan Zeolit Alam Sebelum Diaktivasi dan Setelah Diaktivasi

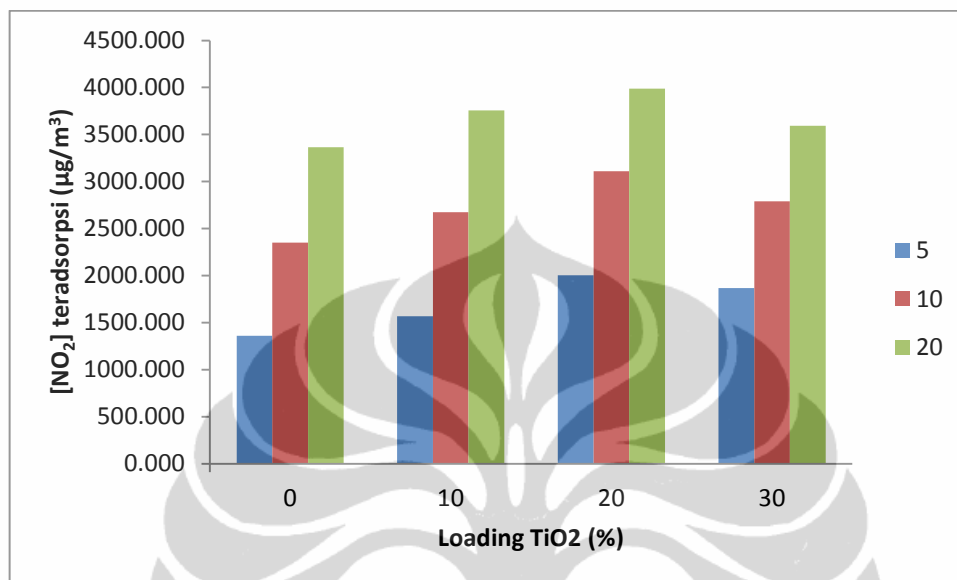
Pada Gambar 4.2 dapat dilihat terjadi peningkatan luas permukaan pada zeolit yang diaktivasi dari 23,35 m²/g menjadi 44,29 m²/g. Peningkatan luas permukaan ini terjadi karena telah dilakukannya aktivasi terhadap zeolit alam dengan cara merendam zeolit dalam beberapa larutan. Perendaman zeolit dalam larutan HF 2% akan melarutkan oksida pengotor yang terdapat pada zeolit, perendaman selanjutnya zeolit ke dalam larutan NH₄Cl 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 suhu 500°C akan menguapkan molekul air dan pengotor yang terdapat dalam kristal zeolit sehingga terbentuk suatu rongga dengan permukaan yang lebih besar. Peningkatan luas permukaan pada zeolit setelah dipreparasi disebabkan terbukanya pori-pori pada struktur zeolit alam.

4.4 Hasil Percobaan Adsorpsi dan Model Isoterm Adsorpsi

Dari hasil percobaan adsorpsi didapatkan data konsentrasi awal dan konsentrasi kesetimbangan gas setelah terjadi adsorpsi oleh zeolit. Dari data yang diperoleh kemudian diolah agar dapat dibuat plot grafik menurut persamaan Freundlich.

4.4.1 Pengaruh Konsentrasi Awal Gas Terhadap Daya Adsorpsi Zeolit pada NO_2

Data pengaruh konsentrasi awal gas terhadap daya adsorpsi zeolit pada NO_2 disajikan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Perbandingan Daya Adsorpsi pada Zeolit Alam dengan Loading TiO_2 0%, 10%, 20% dan 30% dengan Variasi Konsentrasi Awal Gas NO_2

Berdasarkan Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan jumlah NO_2 yang teradsorpsi oleh zeolit yang dimodifikasi dengan TiO_2 . Zeolit dengan *loading* TiO_2 sebesar 10%, 20% dan 30% berat memiliki daya adsorpsi yang lebih baik dibandingkan zeolit yang tidak dimodifikasi TiO_2 . Pada Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa dengan bertambahnya *loading* TiO_2 hingga 20% berat pada zeolit, maka daya adsorpsi dari zeolit semakin meningkat. Namun, terjadi penurunan daya adsorpsi pada ZA/ TiO_2 -30% dibandingkan dengan ZA/ TiO_2 -20%.

4.4.2 Pola Isoterm Adsorpsi dan Daya Adsorpsi Maksimum Zeolit Terhadap Gas NO_2

Pola isoterm adsorpsi dan daya adsorpsi maksimum zeolit terhadap gas NO_2 dapat ditentukan melalui perhitungan $\log c$ dan $\log (x/m)$. Selanjutnya hasil perhitungan tersebut disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Data Jumlah Gas NO₂ yang Teradsorpsi pada Zeolit Alam dengan Variasi Loading TiO₂ dengan Variasi Konsentrasi Awal Gas NO₂

No	Loading TiO ₂ (%)	[NO ₂] awal, c (ug/m ³)	[NO ₂] akhir (ug/m ³)	[NO ₂] teradsorpsi (ug/m ³)	(x/m)
a	b	c	d	e	F
1	0	1728,111	368,664	1359,447	27,1889
		2764,977	414,747	2350,230	47,0046
		4147,465	783,410	3364,055	67,2811
2	10	1843,318	276,498	1566,820	31,3364
		2995,392	322,581	2672,811	53,4562
		4493,088	737,327	3755,760	75,1152
3	20	2188,940	184,332	2004,608	40,0922
		3341,014	230,415	3110,599	62,2120
		4723,502	737,327	3986,175	79,7235
4	30	2188,940	322,581	1866,359	37,3272
		3110,599	322,581	2788,018	55,7604
		4147,465	552,995	3594,470	71,8894

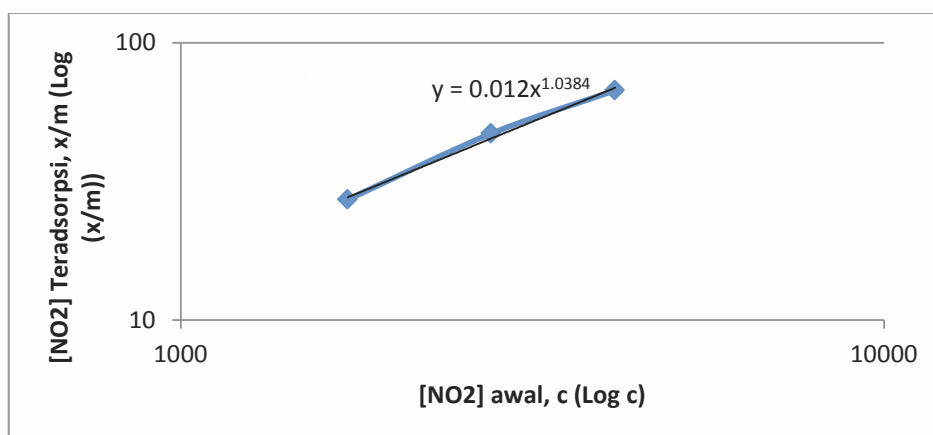
dimana : x/m = massa NO₂ yang teradsorpsi oleh setiap gram massa zeolit

Persamaan isoterm adsorpsi Freundlich dapat dituliskan sebagai berikut.

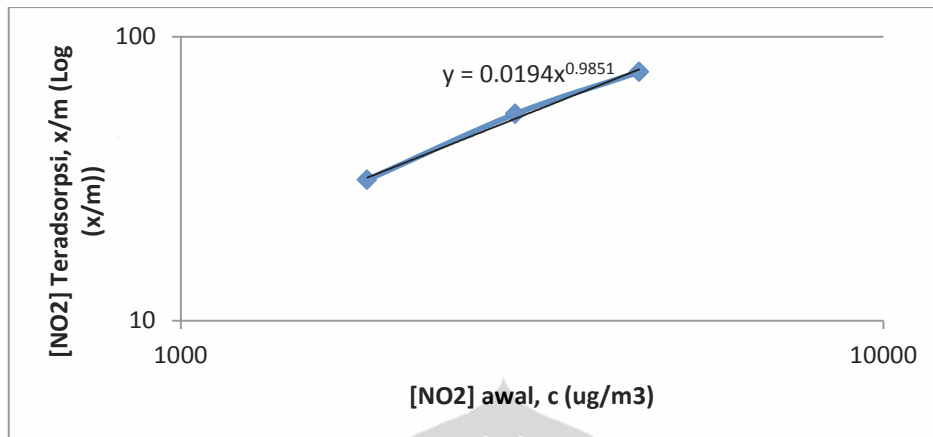
$$\text{Log } (x/m) = \text{log } k + 1/n \text{ log } c$$

Uji pola isoterm adsorpsi Freundlich dilakukan dengan membuat kurva hubungan $\text{log } (x/m)$ terhadap $\text{log } c$.

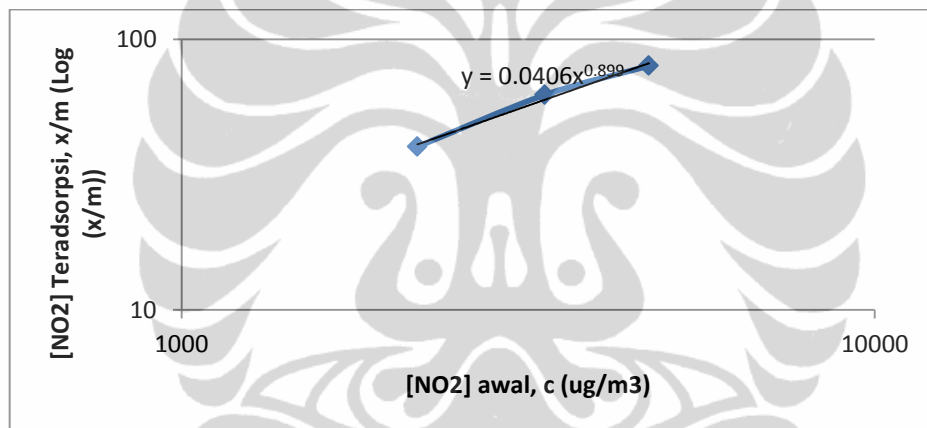
Kurva uji pola isoterm adsorpsi Freundlich untuk masing-masing zeolit disajikan secara berturut-turut sebagai berikut.



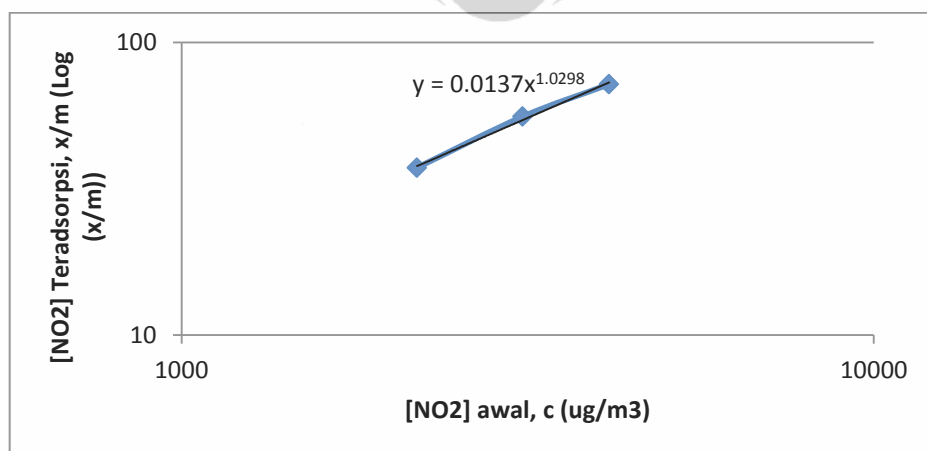
Gambar 4.4 Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Jumlah NO₂ Teradsorpsi pada Zeolit Tanpa Modifikasi



Gambar 4.5 Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Jumlah NO₂ Teradsorpsi pada ZA/TiO₂-10%



Gambar 4.6 Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Jumlah NO₂ Teradsorpsi pada ZA/TiO₂-20%



Gambar 4.7 Pengaruh Konsentrasi Awal terhadap Jumlah NO₂ Teradsorpsi pada ZA/TiO₂-30%

Dari data dan plot grafik di atas, dapat terlihat bahwa terjadi hubungan yang linier antara konsentrasi gas awal (c) dengan jumlah gas yang teradsorpsi (x/m). Dapat dilihat juga bahwa nilai R untuk semua grafik berada diatas 95% yang menunjukkan kecocokan adsorpsi NO_2 yang dilakukan dengan isoterm adsorpsi Freundlich walaupun terdapat deviasi terhadap nilai K yang diperoleh.

Dari persamaan yang didapatkan untuk setiap grafik, dapat diketahui nilai konstanta adsorpsi isoterm Freundlich k dan n untuk setiap adsorben yang disajikan pada Tabel 4.3

Tabel 4.3 Nilai Konstanta k dan $1/n$ untuk Masing-masing Adsorben

Adsorben	$1/n$	k
ZA	1,0380	0,0120
ZA/TiO ₂ -10%	0,9850	0,0190
ZA/TiO ₂ -20%	0,8990	0,0400
ZA/TiO ₂ -30%	1,0290	0,0013

Berdasarkan nilai k dan n yang diperoleh, terlihat bahwa ZA/TiO₂-20% memiliki daya jerap paling baik untuk gas NO_2 dengan konsentrasi awal rendah, diikuti ZA/TiO₂-10%, dan ZA/TiO₂-30%. Sedangkan zeolit alam tanpa modifikasi memiliki kemampuan adsorpsi paling rendah untuk gas NO_2 dengan konsentrasi rendah. Hal ini menunjukkan adanya pengaruh TiO₂ dalam proses reduksi gas NO_2 . Dapat dilihat bahwa, dengan meningkatnya jumlah TiO₂ pada zeolit, maka kemampuan zeolit untuk mereduksi gas NO_2 semakin meningkat. Zeolit dengan *loading* TiO₂ sebesar 20%, memiliki kemampuan reduksi yang lebih baik daripada ZA/TiO₂-10% maupun zeolit tanpa modifikasi. Namun, terjadi penurunan daya adsorpsi ketika *loading* TiO₂ pada zeolit mencapai 30%. Hal ini seharusnya diakibatkan oleh terlalu banyak kandungan TiO₂ pada permukaan zeolit, sehingga terjadi penurunan luas permukaan pada adsorben. Namun dibutuhkan data yang mendukung bahwa telah terjadi penurunan luas permukaan adsorben.

Percobaan untuk membuat model isoterm Langmuir tidak dapat menemui kecocokan antara data yang diperoleh dengan model isoterm Langmuir, yang ditunjukkan dengan rendahnya nilai R dari persamaan isoterm Langmuir yang

didapat ($R < 95\%$). Hal ini menunjukkan bahwa model isoterm Langmuir tidak berlaku terhadap proses adsorpsi gas NO_2 yang dilakukan. Hal ini juga berarti bahwa proses adsorpsi gas NO_2 yang dilakukan tidak dapat memenuhi asumsi-asumsi yang digunakan untuk menyusun persamaan isoterm Langmuir. Berdasarkan teorinya, isoterm Langmuir berlaku apabila adsorben memiliki ukuran partikel dan bentuk yang seragam, sedangkan adsorben yang digunakan masih memiliki distribusi ukuran partikel yang cukup luas (35-40 mesh). Adanya perbedaan tersebut membuat adsorben menjadi tidak homogen, sehingga belum memenuhi asumsi tersebut.

Asumsi lainnya yang digunakan pada isoterm Langmuir adalah gas harus berlaku ideal. Asumsi ini sebenarnya dapat didekati dengan menggunakan gas pada konsentrasi rendah. Namun gas yang digunakan sebagai ambien untuk mengencerkan gas sorbat pada percobaan ini merupakan campuran gas yang memiliki kandungan air (uap air). Penggunaan udara sebagai pengencer dimaksudkan agar gas NO_2 yang diuji mendekati keadaan nyata di udara sebagai salah satu polutan.

Dari hasil analisis diatas, dapat disimpulkan bahwa penggunaan model isoterm Langmuir terhadap uji daya adsorpsi NO_2 yang dilakukan tidak menunjukkan kecocokan. Sedangkan penggunaan model isoterm Freundlich terlihat adanya kecocokan. Hal ini ditunjukkan dengan terbentuknya persamaan yang linier antara jumlah gas yang teradsorpsi untuk setiap peningkatan konsentrasi awal gas NO_2 .

4.4.3 Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Daya Adsorpsi Zeolit pada Gas NO_2

Hubungan antara persen NO_2 yang teradsorpsi dengan waktu kontak digunakan untuk mencari konstanta kinetika adsorpsi. Adsorben yang digunakan pada percobaan ini adalah ZA/TiO₂-20%. Persamaan yang digunakan adalah (Mohanty et al, 2005):

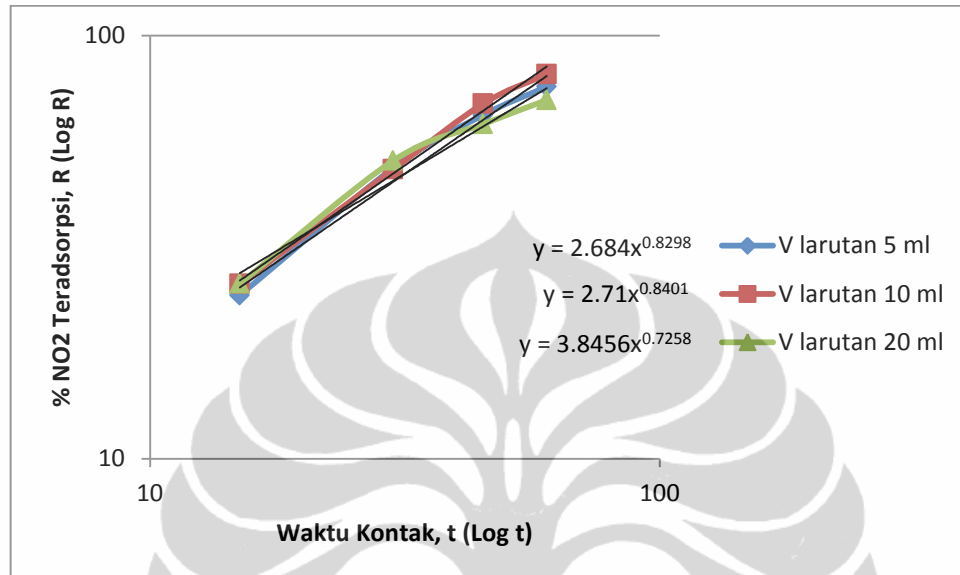
$$R = a(t)^b \quad (4.1)$$

dimana R adalah persentase NO_2 teradsorpsi untuk setiap t dan t adalah waktu kontak NO_2 dengan adsorben

Persamaan tersebut jika dilinierisasikan menjadi:

$$\text{Log}(R) = \text{Log}(a) + b \text{Log}(t) \quad (4.2)$$

Dari data yang diperoleh, kemudian diplot berdasarkan persamaan (4.) dan dijelaskan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Jumlah Gas NO₂ Teradsorpsi oleh Adsorben ZA/TiO₂-20%

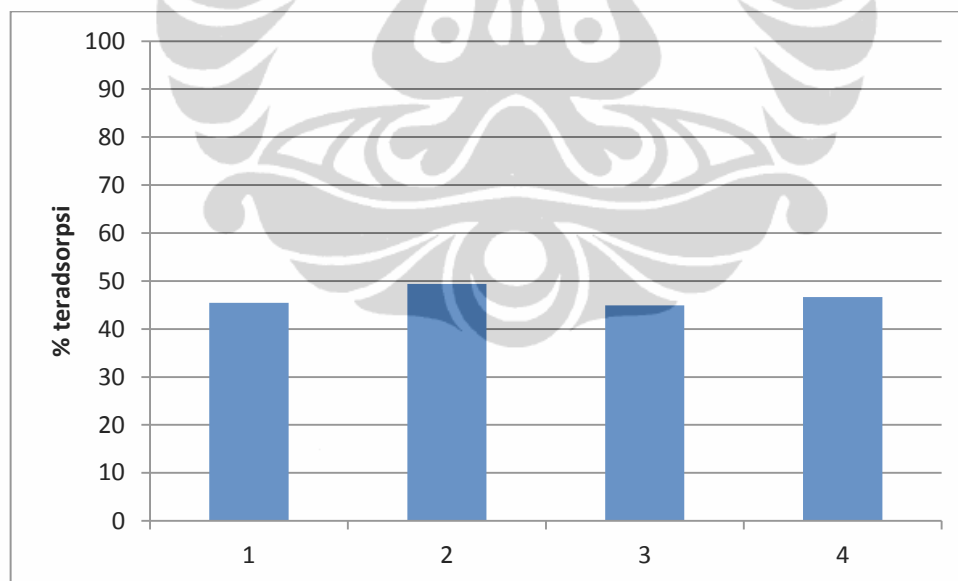
Dari plot grafik diatas dapat dilihat bahwa terbentuk hubungan yang linier antara waktu kontak (t) dengan persentase gas yang teradsorpsi (R). Semakin lama gas NO₂ melakukan kontak dengan adsorben, maka semakin banyak NO₂ yang teradsorpsi. Hal ini sesuai dengan karakteristik adsorpsi bahwa semakin lama waktu kontak adsorbat dengan adsorben, maka semakin besar jumlah adsorbat yang teradsorp (Sawitri, 2008).

Pada grafik juga terlihat bahwa semakin besar konsentrasi awal gas NO₂ maka semakin besar jumlah adsorbat yang teradsorp. Namun, pada gas NO₂ dengan konsentrasi awal yang terbentuk dari larutan standar NO₂ 20 ml, terjadi penurunan daya serap setelah melewati menit ke 30. Hal ini terjadi karena adsorben ZA/TiO₂-20% mulai mendekati kesetimbangan adsorpsi setelah menit ke 30 sehingga terjadi penurunan daya adsorpsi. Pada saat fluida yang mengandung adsorbat dikontakkan dengan adsorben padatan, molekul adsorbat berpindah dari fluida ke padatan hingga konsentrasi adsorbat di aliran fluida berada dalam keadaan setimbang dengan adsorbat yang teradsorp. Keadaan

setimbang terjadi ketika adsorben mendekati daya adsorpsi maksimumnya. Hal tersebut menyebabkan terjadinya penurunan daya jerap dari adsorben. Penurunan daya adsorpsi ini akan terus menurun hingga konsentrasi NO_2 yang di jerap mencapai kesetimbangan.

4.5 Hasil Percobaan Adsorpsi NO_2 dari Emisi Kendaraan Bermotor

Pada percobaan ini, dilakukan pengukuran gas NO_2 dari emisi kendaraan bermotor secara langsung dan dengan menggunakan adsorben. Kemampuan adsorpsi adsorben diaplikasikan pada kendaraan bermotor karena emisi gas buang kendaraan bermotor merupakan salah satu sumber gas NO_2 terbesar. Adsorben yang digunakan pada percobaan ini yaitu adsorben dengan kemampuan adsorpsi paling baik padapercobaan sebelumnya, yaitu $\text{ZA/TiO}_2\text{-20\%}$. Percobaan dilakukan beberapa kali dengan pengulangan sebanyak tiga kali. Hasil dari percobaan disajikan sebagai berikut.



Gambar 4.9 Jumlah NO_2 Teradsorpsi (%) oleh $\text{ZA/TiO}_2\text{-20\%}$ pada Kendaraan Bermotor

Dari data di atas dapat dilihat bahwa $\text{ZA/TiO}_2\text{-20\%}$ dapat menyerap gas NO_2 hingga 45-49% dari konsentrasi awal. Hasil ini masih jauh dibawah kemampuan adsorpsi $\text{ZA/TiO}_2\text{-20\%}$ terhadap gas NO_2 pada saat dilakukan uji di

laboratorium. ZA/TiO₂-20% pada saat dilakukan uji adsorpsi mampu mengadsorp gas NO₂ hingga 70% dari konsentrasi awal. Penurunan ini terjadi akibat adanya gangguan oleh karbon dioksida dan uap air yang tinggi pada gas emisi kendaraan (Agustiar, 2011). Campuran tersebut akan lebih dominan mengisi situs pada permukaan zeolit yang digunakan, sehingga mengurangi bagian yang dapat ditempati oleh molekul NO₂.

Kemampuan adsorpsi gas NO₂ pada ZA/TiO₂-20% sangat mudah terganggu oleh adanya uap air yang tinggi. Hal ini terjadi karena sifat zeolit yang memiliki afinitas tinggi terhadap air, sehingga air sangat mudah untuk terjerap (Suraputra, 2011). Masalah ini menyebabkan zeolit yang digunakan belum optimal untuk diaplikasikan sebagai adsorben pada kendaraan bermotor. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut agar zeolit bersifat lebih hidrofilik sehingga mampu mengurangi gangguan pada zeolit akibat tingginya kandungan uap air.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin tinggi konsentrasi awal gas, semakin tinggi jumlah NO₂ yang teradsorpsi oleh zeolit alam, dan dengan semakin besarnya jumlah NO₂ yang teradsorpsi, maka akan semakin besar jumlah gas NO₂ yang terdegradasi menjadi senyawa lain. Hal ini diakibatkan meningkatnya luas permukaan BET dari zeolit alam dari 23,35 m²/g menjadi 44,29 m²/g dan rasio Si/Al dari zeolit alam dari 8,62 menjadi 23,98.
2. Zeolit alam dengan daya adsorpsi paling maksimal untuk mengadsorpsi gas NO₂ pada konsentrasi rendah adalah zeolit alam dengan *loading* TiO₂ 20%.
3. Semakin tinggi konsentrasi awal gas, zeolit alam semakin cepat mencapai kesetimbangan adsorpsi sehingga daya adsorpsi zeolit alam semakin cepat menurun.
4. Zeolit alam dengan *loading* TiO₂ 20% mampu mereduksi gas NO₂ emisi kendaraan bermotor hingga 45-49% konsentrasi awal.

5.2 Saran

Dari hasil penelitian yang didapatkan, terdapat beberapa hal yang dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya, antara lain:

1. Perlu diuji metode preparasi lain untuk meningkatkan luas permukaan zeolit.
2. Pengujian luas permukaan BET sebaiknya dilakukan pada setiap zeolit termodifikasi untuk mengetahui pengaruh luas permukaan terhadap daya adsorpsi zeolit.
3. Perlu dikembangkan zeolit dengan kemampuan menyerap air yang rendah ketika digunakan untuk mengadsorpsi gas NO₂ dari kendaraan bermotor.

DAFTAR PUSTAKA

- Adamson, A. W. (1990). *Physical Chemistry of Surface*. California: John Wiley & Sons, Inc..
- Agustiar, Rasyid Ginanjar. (2011). *Adsorpsi Gas NO₂ Pada Zeolit Alam Teraktifasi Untuk Aplikasi Masker Pernapasan*. Depok: Universitas Indonesia.
- Anpo, M. Matsuoka and M. (2003). Local Structures, Excited States, And Photocatalytic Reactivities of Highly Dispersed Catalyst Constructed Within Zeolit. *J. of Photochem and Photobiology C: Photochem. Rev.*, 3, 225-52.
- Basuki, Kris Tri. (2007). Penurunan Konsentrasi CO Dan NO₂ Pada Emisi Gas Buang Dengan Menggunakan Media Penyisipan TiO₂ Lokal Pada Karbon Aktif. *JFN*, 1 No. 1, 45-64.
- Cahaya, Indra. (2003). *Pengendalian Pencemaran Udara Melalui Penanganan Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor*. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Dwi Karsa Agung Rahmatullah, et al. (2007). *Pembuatan Adsorben Dari Zeolit Alam Dengan Karakteristik Adsorption Properties Untuk Kemurnian Bioetanol*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Ebenezer L.T., et al. (2006). *Pengaruh Bahan Bakar Transportasi Terhadap Pencemaran Udara Dan Solusinya*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Fatimah, Is, et al. (2010). Preparation of ZrO₂/Al₂O₃-pillared Saponite and Its Spectroscopic Investigation on NO_x Adsorption. *J. of Phys. Sci.*, Vol 21(1), 53-65
- Handoko, S. (2002). Preparasi Katalis Cr/Zeolit Melalui Modifikasi Zeolit Alam. *Jurnal Ilmu Dasar*, 3 (1), 15-23.
- Hertanto (2010). Edan, Pertumbuhan Sepeda Motor Di DKI 890 Unit Per Hari. *Kompas*.

- Johan Wahyudi, et al. (2007). *Pengaruh Pemanfaatan Batu Zeolit Untuk Reduksi Emisi Gas Buang Pada Kendaraan Bermotor Bensin*. Surabaya: Universitas Kristen Petra.
- Kris Tri Basuki, et al. (2008). Penurunan Konsentrasi CO Dan NO₂ Pada Emisi Gas Buang Menggunakan Arang Tempurung Kelapa Yang Disisipi TiO₂. *Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir*.
- Lingga, Dian Kusuma Rini & Fendi Anthonius. (2010). *Optimasi Aktivasi Zeolit Alam Untuk Dehumidifikasi*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- M. Nur, et al. (2007). Usaha Mengurangi Global Warming Melalui Inovasi Knalpot Anti Polusi Berteknologi Plasma: Penerapan Pada Kendaraan Bermotor Roda Dua. *Riptek*, 1 No. 1, 11-18.
- Marayoga, Troeno (2010). Polusi Udara Di Jakarta. *Kabar Indonesia*.
- Sari, Myrna Tunjung & Irimina Kris Murwani. (2010). Studi Adsorpsi NO_x pada Zeolit Cr-NaA yang Disintesis dari Sekam Padi. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Slamet, S. Bismo, R. Arbianti (2007). Modifikasi Zeolit Alam Dan Karbon Aktif Dengan TiO₂ Serta Aplikasinya Sebagai Bahan Adsorben Dan Fotokatalis Untuk Degradasi Polutan Organik. *Laporan Hibah Bersaing*.
- Sugiarta, Anak Agung Gede (2008). Dampak Bising Dan Kualitas Udara Pada Lingkungan Kota Denpasar. *Jurnal Bumi Lestari*, 8 No. 2, 162-67.
- Suraputra, Reza. (2011). *Adsorpsi Gas Karbon Monoksida (CO) Dan Penjernihan Asap Kebakaran Menggunakan Zeolit Alam Lampung Termodifikasi*. Depok: Universitas Indonesia.
- Susilowati, Diah. (2009). *Uji Kinerja Alat Perangkat Nyamuk dan Purifikasi Udara Berbasis TiO₂ dan Zeoli Alam Lampung*. Depok: Universitas Indonesia.
- Torimoto, T. (1996). Effects Of Adsorbent Used As Supports for Titanium Dioxide Loading On Photocatalytic Degradation Of Propyzamide. *Environ. Sci. Technol.* 30, 1275-81.
- Widihati, I. A. G. (2008). Adsorpsi Cr(VI) oleh Batu Pasir Teraktivasi dan Tersalut Fe₂O₃. *Jurnal Kimia 2 (1)*, 25-30.