



UNIVERSITAS INDONESIA

**DEGRADASI GAS NO₂ DENGAN PROSES ADSORPSI DAN
FOTOKATALITIK MENGGUNAKAN ZEOLIT ALAM TERAKTIFASI
YANG DIINTEGRASIKAN DENGAN TiO₂ UNTUK APLIKASI MASKER
KESEHATAN**

SKRIPSI

ANDRY PRASTHIO

0806456360

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**DEGRADASI GAS NO₂ DENGAN PROSES ADSORPSI DAN
FOTOKATALITIK MENGGUNAKAN ZEOLIT ALAM TERAKTIFASI
YANG DIINTEGRASIKAN DENGAN TiO₂ UNTUK APLIKASI MASKER
KESEHATAN**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

ANDRY PRASTHIO

0806456360

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Andry Prasthio

NPM : 0806456360

Tanda Tangan : 

Tanggal : Juni 2012

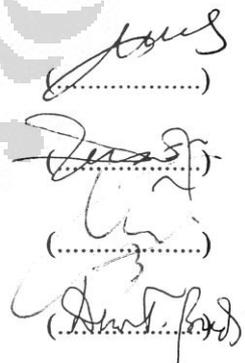
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Andry Prasthio
NPM : 0806456360
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Degradasi Gas NO₂ Dengan Proses Adsorpsi dan Fotokatalitik Menggunakan Zeolit Alam Teraktifasi yang Diintegrasikan Dengan TiO₂ Untuk Aplikasi Masker Kesehatan

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Yuliusman, M.Eng
Penguji 1 : Eva Fathul Karamah, ST, MT.
Penguji 2 : Dr. Ing. Donni Adinata
Penguji 3 : Ir. Dewi Tristantini, MSc., PhD



(.....)
(.....)
(.....)
(.....)

Ditetapkan : Depok

Tanggal : Juni 2012

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, 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, yang tidak mudah menyelesaikannya. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Papa dan Mama Tercinta atas ketulusan cinta kasih sayang, perhatian, bantuan, doa, dan dukungan yang selalu diberikan
- 2) Hendra Prasthio, adik terbaik yang selalu memberikan dukungan dan doa
- 3) Frisca, S.Kom, kekasih tercinta yang selalu memberikan dukungan, semangat, doa, bantuan dan perhatian khusus yang tiada henti
- 4) Ir. Yuliusman, M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini
- 5) Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia
- 6) Eva Fathul Karamah, ST, MT, Dr. Ing. Donni Adinata, Ir. Dewi Tristantini, MSc., PhD selaku dewan penguji skripsi
- 7) Seluruh dosen Departemen Teknik Kimia UI yang telah mengajar dan memberi ilmu pengetahuan dan wawasan di bidang ilmu teknik kimia
- 8) Mas Eko, Kang Jajat, Mang Ijal, Laboran yang telah membantu dalam penelitian di Laboratorium Teknik Kimia
- 9) Teman-teman Teknik Kimia 2008 atas persahabatan dan dukungan selama kuliah dan penelitian

- 10) Rendi Akbar, Femmy K. Yanuarta, S.T, Gabriel A. Meliala, Togar Manurung, S.T, Resiana Winata, Catur V., Intan S., dan teman-teman seperjuangan atas semua kenangan-kenangan yang tidak terlupakan
- 11) Chandra Hadiwijaya, Juherianto, Cesar, dan Eldo selaku teman santai dan belajar.
- 12) Tante Hanny dan Cici Agnes atas doa dan semangatnya saat sidang skripsi
- 13) Matius Wisnu atas semua saran dan masukan yang sangat berguna untuk pengembangan skripsi ini
- 14) Bapak Sriyono atas bantuan perihal administrasi selama perkuliahan
- 15) Semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu yang sudah membantu dalam proses penyusunan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa 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 2012

Penulis

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

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

Nama : Andry Prasthio
NPM : 0806456360
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

Degradasi Gas NO₂ Dengan Proses Adsorpsi dan Fotokatalitik Menggunakan Zeolit Alam Teraktifasi yang Diintegrasikan Dengan TiO₂ Untuk Aplikasi Masker Kesehatan.

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 2012
Yang menyatakan



(Andry Prasthio)

ABSTRAK

Nama : Andry Prasthio
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Degradasi Gas NO₂ Dengan Proses Adsorpsi dan Fotokatalitik Menggunakan Zeolit Alam Teraktifasi yang Diintegrasikan Dengan TiO₂ Untuk Aplikasi Masker Kesehatan

Penelitian ini menghasilkan katalis komposit Zeolit Alam Lampung (ZAL) terintegrasi dengan TiO₂ yang dapat mengeliminasi polutan gas NO₂ secara simultan sehingga dapat diaplikasikan sebagai masker kesehatan. Katalis komposit dibuat dengan *mechanical mixing* dan didapatkan komposisi TiO₂ 10%-ZAL 90% sebagai yang terbaik dalam mengeliminasi polutan gas NO₂. Katalis komposit ini akan mendegradasi gas NO₂ menjadi HNO₃ yang bersifat non-toksik lewat proses adsorpsi dan fotokatalisis. Katalis komposit ini dapat mendegradasi gas NO₂ dalam paparan konsentrasi awal 0,15-0,3 ppm dalam waktu 1,1-1,82 jam.

Kata Kunci:

Masker Kesehatan, gas NO₂, Katalis Komposit, ZAL-TiO₂, Adsorpsi, Fotokatalisis

ABSTRACT

Name : Andry Prasthio
Study Programm : Chemical Engineering
Title : Degradation of NO₂ with adsorption and photocatalytic process using activated natural zeolite which is integrated with TiO₂ for health mask application

This research obtained the catalyst composite of Zeolit Alam Lampung (ZAL) integrated with titanium dioxide (TiO₂) which can eliminate nitrogen dioxide (NO₂) simultaneously and applied as a health mask. The catalyst composite prepared by mechanical method. The results obtained was the composition of ZAL 90%-TiO₂ 10% eliminate the NO₂ gas pollutants effectively. Degradation of NO₂ into Nitrate Acid (HNO₃) which is a non-toxic gas through adsorption and photocatalytic process. This catalyst composite can eliminate exposure of NO₂ gas with the early concentration of 0.15 to 0.3 ppm in 1.1 to 1.82 h

Keyword:

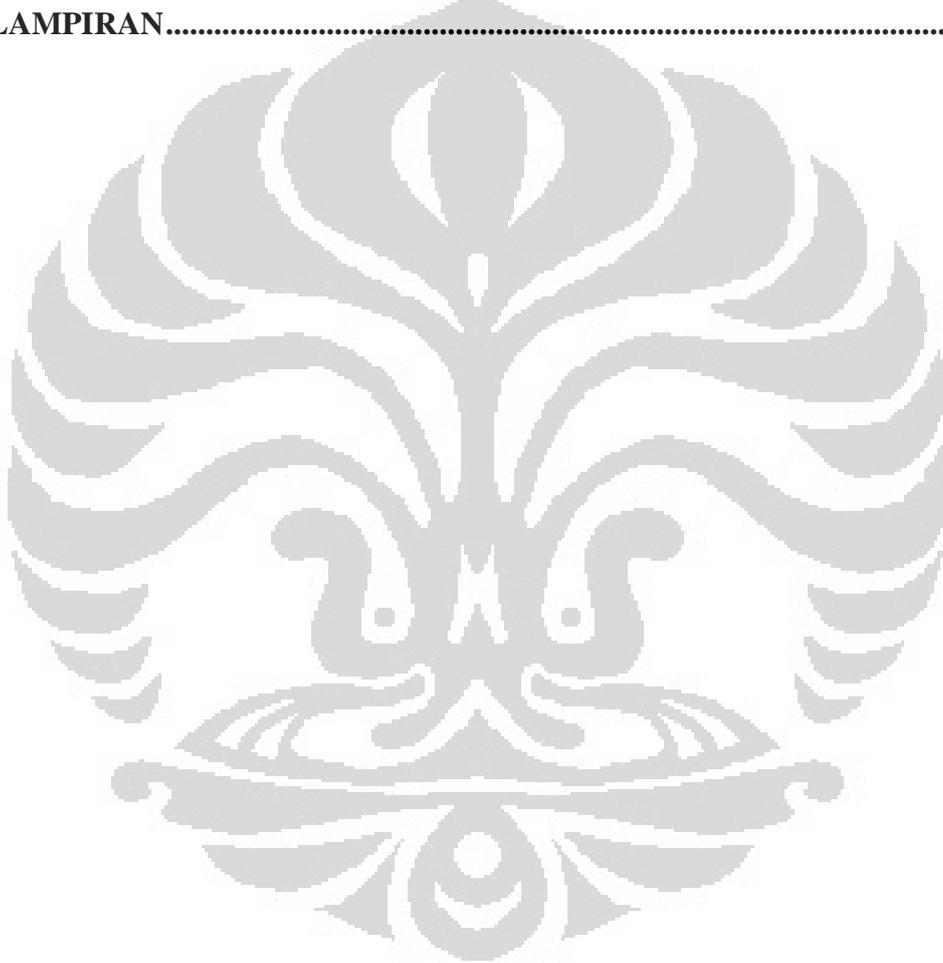
Health Mask, Nitrogen Dioxide, Composite Catalysts, Zeolit Alam Lampung-Titanium Dioxide, Adsorption, Photocatalytic

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS ...	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS	
 AKHIR UNTUK KEPENTUNGAN AKADEMIS	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
Bab 1 Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
Bab 2 Tinjauan Pustaka	6
2.1 Polusi udara	6
2.1.1 Nitrogen Oksida (NO _x).....	6
2.1.2 Karbon Oksida (CO)	8
2.1.3 Sulfur Oksida (SO _x)	9
2.2 Jenis Masker Kesehatan	11
2.2.1 Inhaler atau Alat Pelindung Paru-paru	11
2.2.2 Masker Gas Stenhouse	11
2.2.3 Masker Pernafasan Pemadam Kebakaran	12
2.2.4 Masker Pernafasan Barton	13
2.2.5 Masker Neally Penghilang Asap	14
2.2.6 Masker Cup	14
2.2.7 Masker Pernafasan Loeb	15
2.2.8 Masker Pernafasan Muntz	15
2.2.9 Masker Fotokatalitik	16
2.3 Metode Degradasi Gas NO ₂	16
2.3.1 Fotokatalisis untuk Degradasi NO ₂	17
2.3.2 Adsorpsi	19

2.4	Adsorben	23
2.5	Bahan Baku dan Produk	24
2.5.1	Zeolit	24
2.5.2	Preparasi Zeolit Alam.....	26
2.5.3	Katalis Komposit TiO ₂ -ZAL.....	29
2.6	Metode Mechanical Mixturing untuk Preparasi Katalis Komposit.....	31
2.7	Kinetika Reaksi Degradasi NO _x Secara Fotokatalitik.....	31
2.8	Karakterisasi Katalis	32
2.8.1	XRD (X-ray difraction).....	32
2.8.2	XRF	34
2.8.3	BET	34
BAB 3	Metodologi Penelitian	36
3.1	Alur Penelitian.....	36
3.2	Rancangan Penelitian	37
3.3	Peralatan Penelitian	37
3.3.1	Peralatan <i>Treatment</i> Zeolit Alam Lampung (ZAL)	37
3.3.2	Peralatan Preparasi Katalis Komposit TiO ₂ -ZAL.....	38
3.4	Karakterisasi Katalis Komposit.....	39
3.4.1	Peralatan Karakterisasi Katalis Komposit dan Zeolit Alam Lampung 39	
3.4.2	Peralatan Analisis Perubahan Konsentrasi Sampel.....	40
3.5	Variabel Penelitian	40
3.6	Bahan penelitian	40
3.7	Prosedur Penelitian.....	41
3.7.1	<i>Treatment</i> Zeolit Alam	41
3.7.2	Preparasi Katalis Komposit TiO ₂ -ZAL.....	42
3.7.3	Cetak Katalis Komposit Sesuai Filter Cotton.	44
3.8	Uji Kinerja Alat.....	44
3.9	Prototipe Alat	45
BAB 4	Hasil dan Pembahasan	48
4.1	Hasil Preparasi Zeolit	48
4.1.1	Kandungan Oksida dalam Zeolit.....	49
4.1.2	Luas Permukaan Zeolit Alam Lampung	52
4.2	Modifikasi Zeolit Alam Lampung dengan TiO ₂	53
4.3	Pengaruh Adsorpsi Terhadap Proses Eliminasi Gas NO ₂	55
4.4	Pengaruh Berat Total Katalis Komposit terhadap Eliminasi Gas NO ₂	57

4.5 Pengaruh Komposisi Katalis Komposit terhadap Eliminasi Gas NO ₂	58
4.6 Pengaruh Konsentrasi Awal Gas NO ₂ terhadap Proses Eliminasi NO ₂	60
4.7 Kinetika Reaksi Eliminasi Gas NO ₂ secara Fotokatalitik	61
4.8 Perhitungan Waktu Eliminasi.....	64
4.9 Analisis Kelayakan Masker.....	65
BAB 5 Kesimpulan dan Saran	66
5.1 Kesimpulan.....	66
5.2 Saran.....	67
DAFTAR PUSTAKA	68
LAMPIRAN.....	74



DAFTAR TABEL

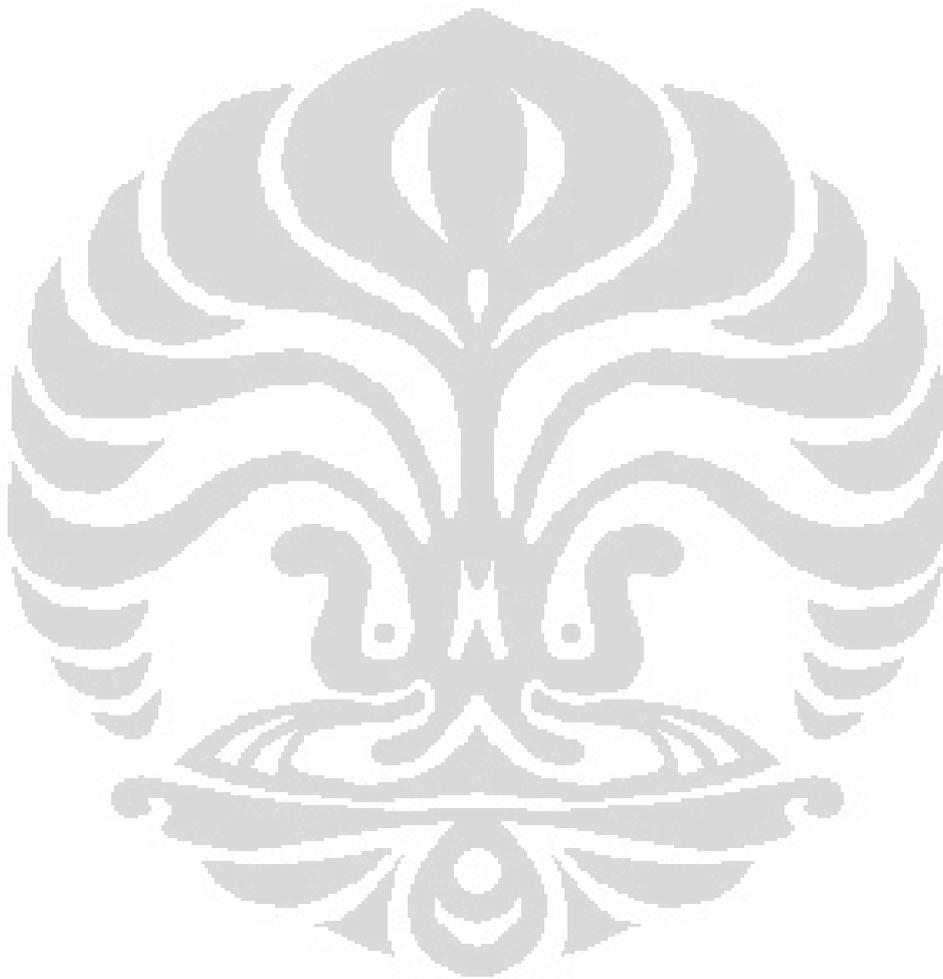
Tabel 2. 1 Emisi gas NO _x dari Pembakaran Berbagai Bahan Bakar	6
Tabel 2. 2 Pengaruh Konsentrasi SO ₂ Terhadap Kesehatan.....	11
Tabel 2. 3 Karakteristik Adsorben \Beserta Kegunaan dan Kerugiannya.....	24
Tabel 2. 4 Sifat Fisik dan Mekanik dari Titanium Dioksida	28
Tabel 2. 5 Sifat Optik dari Titanium Dioksida.....	28
Tabel 3. 1 Peralatan <i>Treatment</i> Zeolit Alam Lampung.....	38
Tabel 3. 2 Peralatan Preparasi Katalis Komposit TiO ₂ -ZAL	39
Tabel 3. 3 Peralatan Karakterisasi Katalis Komposit.....	39
Tabel 3. 4 Peralatan Analisis Perubahan Konsentrasi Sampel	40
Tabel 3. 5 Variasi Komposisi Katalis Komposit.....	43
Tabel 4. 1 Rasio Si/Al tiap tahap aktivasi zeolit alam Lampung	49
Tabel 4. 2 Nilai r ₀ untuk setiap C ₀ polutan gas NO ₂	62



DAFTAR GAMBAR

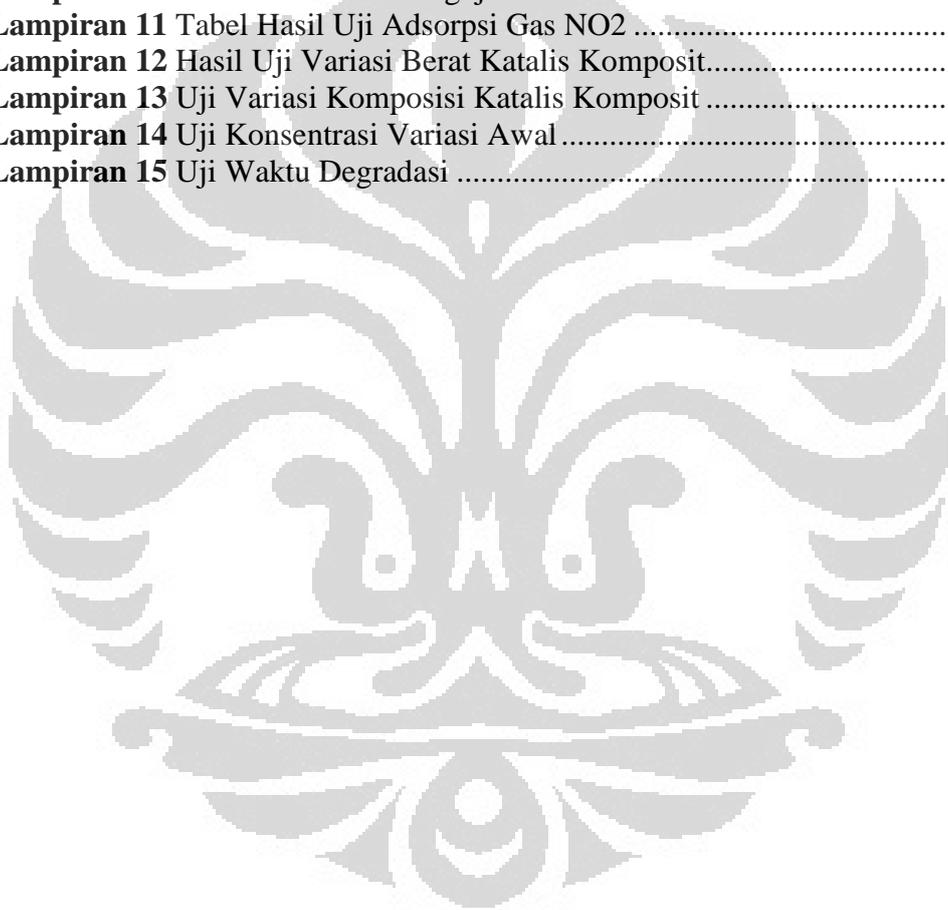
Gambar 2. 1	Masker buatan John Stenhouse.....	12
Gambar 2. 2	Masker buatan John Stenhouse.....	13
Gambar 2. 3	Masker buatan Samuel Barton.....	13
Gambar 2. 4	Masker I dan II buatan Neally	14
Gambar 2. 5	Masker buatan Hutson Hurd (US Patent # 218.976).....	14
Gambar 2. 6	Masker buatan Loeb Berlin (US Patent # 533.854).....	15
Gambar 2. 7	Masker buatan Muntz (US Patent # 703.948)	15
Gambar 2. 8	Masker fotokatalitik.....	16
Gambar 2. 9	Fotokatalis yang Teradiasi Sinar UV.....	17
Gambar 2. 10	Mekanisme Fotooksidasi NO_x	19
Gambar 2. 11	Mekanisme Reaksi Fotooksidasi CO sesuai persamaan 2.16.....	19
Gambar 2. 12	Kiri.Kristal Zeolit (Nusataraku.org) kanan.Struktur 3D Zeolit ...	25
Gambar 2. 13	Faujas de Saint dan Faujasit	25
Gambar 2. 14	TiO_2 Degussa P.25	29
Gambar 2. 15	Mekanisme degradasi CO dan NO_x oleh katalis komposit TiO_2 -ZAL di permukaan katalis komposit (a) dan di dalam pori-pori katalis komposit (b).....	30
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian.....	36
Gambar 3. 2.	Diagram Alir <i>Treatment</i> Zeolit Alam Lampung.....	42
Gambar 3. 3	Diagram Alir Preparasi katalis komposit TiO_2 -ZAL.....	43
Gambar 3. 4	Skema Pengujian Kinerja Alat.....	44
Gambar 3. 5	Prototipe tampak samping (a), Prototipe tampak depan (b)	45
Gambar 4. 1	Rasio Si/Al pada tahap aktivasi zeolit alam Lampung	49
Gambar 4. 2	Luas Permukaan Sampel	51
Gambar 4. 3	Hasil Karakterisasi XRD	54
Gambar 4. 4	Grafik Pengaruh Variasi Bahan Pengeliminasi Polutan terhadap Eliminasi Konsentrasi NO_x	55
Gambar 4. 5	Grafik Pengaruh Massa Total Katalis Komposit terhadap Eliminasi konsentrasi Gas NO_x . Katalis Komposit yang digunakan adalah TiO_2 10% - ZAL 90% dengan berat total 10 gram dan 4,28 gram. Polutan yang digunakan adalah NO_x dengan konsentrasi awal sebesar 4 ppm.....	56
Gambar 4. 6	Grafik Pengaruh Komposisi Katalis Komposit TiO_2 -ZAL terhadap Degradasi Eliminasi Konsentrasi NO_x . Berat Total Katalis Komposit yang digunakan adalah 10 gram dan polutan gas NO_x awal sebesar 4 ppm untuk masing-masing sampel komposisi Katalis Komposit.....	58
Gambar 4.7	Grafik Pengaruh Variasi Konsentrasi Awal Polutan Gas NO_x Terhadap Kinerja Degradasi Katalis Komposit (TiO_2 10% - ZAL 90%). Dengan Massa Total Katalis Sebesar 10 gram.	60
Gambar 4. 8	Grafik C vs t pada setiap kosentrasi awal gas NO_x	62
Gambar 4. 9	Grafik $1/r_0$ vs $1/[\text{NO}_x]_0$	63

Gambar 4. 10 Grafik Waktu Degradasi Baku Mutu vs Konsentrasi Awal Gas NO₂ 64



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	BET Zeolit Alam Lampung Murni	73
Lampiran 2	Hasil BET ZAL-Teraktifasi	74
Lampiran 3	Hasil BET ZAL-TiO ₂	75
Lampiran 4	Hasil Uji XRF	76
Lampiran 5	Gambar Alat Uji Masker	79
Lampiran 6	Perbandingan hasil XRD berbagai Sampel.....	79
Lampiran 7	Hasil XRD sampel ZAL-TiO ₂ 10%	80
Lampiran 8	Lembar Spesifikasi Gas Analyzer.....	81
Lampiran 9	Dokumentasi Kegiatan Penelitian.....	82
Lampiran 10	Metode Standar Pengujian Masker	83
Lampiran 11	Tabel Hasil Uji Adsorpsi Gas NO ₂	85
Lampiran 12	Hasil Uji Variasi Berat Katalis Komposit.....	86
Lampiran 13	Uji Variasi Komposisi Katalis Komposit	87
Lampiran 14	Uji Konsentrasi Variasi Awal	88
Lampiran 15	Uji Waktu Degradasi	89



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jumlah kendaraan bermotor di Indonesia terus menunjukkan peningkatan yang cukup pesat, terutama di kota-kota besar seperti Jakarta. Pada tahun 2010, jumlah kendaraan di Jakarta tercatat mencapai 11.362.396 unit kendaraan yang terdiri dari 8.244.346 unit kendaraan roda dua dan 3.118.050 unit kendaraan roda empat dan pada tahun 2011, 12 juta kendaraan hilir mudik di Jakarta (Topik News, 2010). Kendaraan bermotor menyumbang andil sebesar kurang lebih 70% polusi udara di Jakarta (Marifat, 2008). Hal ini menjadi faktor penyebab utama polusi udara yang sangat membahayakan kesehatan manusia.

Gas-gas pencemar udara yang sangat berbahaya dibagi menjadi empat kelompok besar, yaitu golongan belerang, golongan nitrogen, golongan karbon, golongan gas berbahaya lainnya seperti benzene dan vinil klorida (Indah, 2001). Hasil penelitian di Jakarta menunjukkan bahwa tingkat polusi NO_x sebesar 328,5 ppm (nilai rata-rata pengukuran 24 jam), jauh melebihi baku mutu udara ambien menurut PP No.41 tahun 1999 yang mensyaratkan batas konsentrasi gas NO_2 udara ambien sebesar 135 ppm (Shanty, 2002).

Kesehatan penduduk di kota-kota besar dengan polusi udara yang cukup parah sangatlah memprihatikan, beberapa penyakit yang disebabkan oleh polusi udara adalah, penyakit silikosis, asbestosis, bisinosis, antrakosis, dan beriliosis (smallcrab, 2009). Polusi udara di perkotaan diperkirakan memberi kontribusi bagi 800.000 kematian tiap tahun dan seharusnya dampak ini dapat diminimalisasikan dan ditanggulangi dengan mengurangi konsentrasi partikulat di udara, seperti NO_2 , SO_x ataupun gas CO yang sangat beracun. WHO (*World Health Organization*) memperkirakan bila konsentrasi partikulat dapat diturunkan maka akan terjadi penurunan tiap tahunnya: 1.400 kasus kematian bayi prematur; 2.000 kasus rawat di RS; 49.000 kunjungan ke gawat darurat; 600.000 serangan asma; 124 kasus bronchitis pada anak; 31 juta gejala penyakit saluran pernapasan serta peningkatan efisiensi 7,6 juta hari kerja yang hilang akibat penyakit saluran pernapasan- suatu jumlah yang sangat signifikan dari sudut pandang masyarakat.

Ancaman kesehatan ini dapat ditanggulangi dengan alat yang dapat menurunkan konsentrasi partikulat di udara atau paling tidak konsentrasi partikulat di dalam tubuh, dengan menggunakan masker kesehatan yang dapat mengadsorpsi partikulat-partikulat tersebut agar tidak turut masuk ke saluran pernafasan.

Beberapa penelitian tentang masker kesehatan dengan prinsip adsorpsi sudah dilakukan diantaranya adsorpsi untuk gas CO₂ pada karbon aktif maupun Zeolit serta TiO₂ yang menggunakan sistem fotokatalis. Zeolit untuk Adsorpsi CO (Apriawan, 2010) untuk adsorpsi NO₂ dengan zeolit telah dikembangkan oleh (Sari, 2010; Rasyid, 2011) dan menghasilkan hasil pengujian adsorpsi gas NO₂ semakin meningkat dengan menurunkan rasio Si/Al di dalam zeolit dan menunjukkan tingkat pengurangan rata-rata emisi gas NO₂ sebesar 29,89-51,69%. Penelitian lainnya adalah modifikasi material adsorben (zeolit dan karbon aktif) dengan fotokatalis semikonduktor TiO₂(titanium oksida) dan dihasilkan AFT (Adsorben-Fotokatalitik-Terintegrasi) yang digunakan untuk degradasi polutan organik fenol melalui kombinasi proses adsorpsi dan fotokatalitik (Bismol, 2007). Namun, penelitian AFT ini belum difokuskan ke adsorpsi polutan NO₂. Penelitian degradasi fotokatalitik NO₂ yang berasal dari gas murni dan pembakaran batubara menggunakan TiO₂ dan Ferri dioksida (Fe₂O₃) yang disinari menggunakan blacklight juga sudah dilakukan (Shinta, 2006).

Pada penelitian ini, Zeolit Alam Lampung (ZAL) diintegrasikan dengan TiO₂ yang diharapkan dapat menjadi katalis komposit. Hal yang menjadi pusat perhatian dalam penelitian ini adalah ketebalan lapisan yang optimal dalam mendegradasi polutan dan pemilihan senyawa yang akan didegradasi pada penelitian ini adalah NO₂ yang merupakan polutan inorganik. TiO₂ dipilih sebagai fotokatalisator karena dalam katalis komposit TiO₂ dapat mendegradasi CO dan NO_x dengan baik (Gustafsson, 2006; Lin, 1996; Toma, 2004; Maggos, 2005), serta bersifat nontoksik dan harganya terjangkau.

Penelitian ini menghasilkan masker kesehatan yang telah dilengkapi dengan zeolit-TiO₂ yang terintegrasi sebagai material komposit. Dari penelitian ini, masker kesehatan dengan zeolit-TiO₂ terintegrasi dapat mendegradasi kadar NO₂ di udara hingga ke bawah nilai baku mutu udara ambien. Penggunaan masker ini

dapat meningkatkan kualitas kesehatan penduduk di Indonesia terutama yang hidup di kota-kota besar dengan tingkat polusi yang mengkhawatirkan dan merealisasikan perkiraan WHO yang telah disebutkan sebelumnya.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana mengoptimasi degradasi NO_2 dengan menggunakan ZAL dan TiO_2 terintegrasi yang dilakukan dengan proses adsorpsi dan fotokatalitik yang diintegrasikan dan berlangsung secara simultan dengan cara menemukan komposisi yang optimal pada material komposit yang dapat mendegradasi gas NO_2 secara maksimal dan bagaimana mendapatkan persamaan laju reaksi eliminasi polutan dan persamaan waktu degradasi sehingga waktu untuk mengeliminasi polutan dapat dihitung dengan akurat.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Mendapatkan komposisi zeolit pengembangan ZAL – TiO_2 terintegrasi yang dapat mendegradasi kadar NO_2 di udara hingga mencapai nilai baku mutu udara ambien.
- Mendapatkan persamaan laju eliminasi NO_2 secara fotokatalitik dan persamaan waktu eliminasi, sehingga dapat dihitung waktu yang dibutuhkan oleh masker untuk mendegradasi polutan hingga mencapai nilai baku mutunya.
- Memanfaatkan ZAL- TiO_2 terintegrasi pada masker kesehatan.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, penulis membatasi masalah sebagai berikut:

- Katalis komposit yang akan dibuat merupakan kombinasi dari fotokatalis TiO_2 dan adsorben zeolit alam.
- Fotokatalis TiO_2 dalam katalis komposit akan dibuat sendiri dengan menggunakan larutan TiO_2 Degussa P 25 dicampur dengan air demin (Ikha, 2011)
- Zeolit alam yang digunakan adalah Zeolit Alam Lampung (ZAL)

- Metode preparasi katalis komposit yang akan digunakan adalah metode yang digunakan oleh Reza, 2007.
- Polutan yang akan didegradasi adalah NO_2
- Karakteristik katalis komposit yang dilakukan adalah XRD, BET, FTIR, XRF.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan seminar ini adalah sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Berisi pendahuluan yang terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tinjauan pustaka yang membahas tentang penelitian terdahulu sebagai dasar penelitian ini, Polusi NO_x , Adsorpsi, Adsorben zeolit alam, Fotokatalis TiO_2 , Metode preparasi material komposit sol gel, Metode degradasi Polutan, bahan baku dan produk, pengintegrasian ZAL- TiO_2 .

BAB 3 METODE PENELITIAN

Berisi tentang diagram alir penelitian, variabel penelitian, alat dan bahan, serta prosedur penelitian, parameter penelitian, pengolahan dan analisis data, dan cara penyimpulan serta penafsiran hasil penelitian.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang pemaparan hasil dari penelitian yang telah diolah dan dianalisis. Hasil penelitian yang didapat dan dibahas mencakup karakterisasi XRD, Karakterisasi BET, Karakterisasi FTIR, Karakterisasi XRF, pengaruh keberadaan adsorben dan fotokatalis terhadap proses degradasi polutan NO_2 , pengaruh komposisi katalis komposit terhadap proses eliminasi polutan, pengaruh konsentrasi awal polutan terhadap proses eliminasi polutan, kinetika reaksi degradasi polutan secara fotokatalitik, perhitungan waktu

degradasi, analisis kelayakan masker, dan perbandingan efisiensi masker.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan yang didapat dari penelitian dan juga saran yang patut diperhatikan jika penelitian ini dilanjutkan.

DAFTAR PUSTAKA

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



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Polusi udara

Tingkat polusi udara di Indonesia cukup tinggi dan Provinsi Jawa Barat merupakan Provinsi yang memiliki tingkat polusi yang tertinggi di Indonesia (Green Activities, 2009). Gas berbahaya di Jawa Barat yaitu karbon dioksida (CO_2), 2.222.330-2.462.866 ton, Nitrogen Oksida (NO_x), 259.300-287.365 ton, sulfur oksida (SO_x), 77.013-85.348 unit gram per tahun dan materi partikulat tersuspensi (SPM) (Afif, 2009).

2.1.1 Nitrogen Oksida (NO_x)

Nitrogen oksida sering disebut dengan NO_x karena oksida nitrogen mempunyai dua macam bentuk yang sifatnya berbeda, yaitu gas NO_2 dan gas NO . Sifat gas NO_2 adalah berwarna dan berbau, sedangkan gas NO tidak berwarna dan tidak berbau. Warna gas NO_2 adalah merah kecoklatan dan berbau tajam menyengat hidung.

Tabel 2. 1 Emisi gas NO_x dari Pembakaran Berbagai Bahan Bakar

Bahan Bakar	Emisi NO_x ($\cdot 10^3$ ppm)
Minyak	3
Kerosin	3
Gasolin	27
BatuBara	4,5
Propana	2,3
Butana	2,3
Gas Alam	1
Kayu Birch, kadar air 20%	0,7
Hidrogen	0 ^{*)}

^{*)} Nilai nol untuk hidrogen hanya nilai teoritis. Kenyataannya pembakaran hidrogen di udara menghasilkan lebih banyak NO_x daripada gas alam. (sumber: www.engineeringtoolbox.com)

Konsentrasi NO₂ di udara pada daerah perkotaan biasanya 10-100 kali lebih tinggi daripada di udara daerah perdesaan. Besaran konsentrasinya dapat mencapai 0,5 ppm (500 ppb). Seperti halnya CO, emisi nitrogen oksida dipengaruhi oleh kepadatan penduduk karena sumber utama NO₂ yang diproduksi manusia adalah dari pembakaran, dan kebanyakan pembakaran disebabkan oleh kendaraan, produksi energi dan pembuangan sampah. Sebagian besar emisi NO₂ yang dibuat manusia berasal dari pembakaran arang, minyak, gas alam dan bensin.

Oksida yang lebih rendah yaitu NO terdapat di atmosfer dalam jumlah lebih besar daripada NO₂. Pembentukan NO dan NO₂ mencakup reaksi antara nitrogen dan oksigen di udara sehingga membentuk NO, kemudian reaksi selanjutnya antara NO dengan lebih banyak oksigen membentuk NO₂. Persamaan reaksinya adalah sebagai berikut:



Udara terdiri dari sekitar 80% volume nitrogen dan 20% volume oksigen. Pada suhu kamar kedua gas ini hanya sedikit mempunyai kecenderungan untuk bereaksi satu sama lain. Pada suhu yang lebih tinggi (di atas 1.210°C) keduanya dapat bereaksi membentuk nitric oksida dalam jumlah tinggi sehingga mengakibatkan polusi udara. Dalam proses pembakaran, suhu yang digunakan biasanya mencapai 1.210-1.765°C dengan adanya udara, oleh karena itu reaksi ini merupakan sumber NO yang penting. Jadi reaksi pembentukan NO merupakan hasil samping dalam proses pembakaran.

Pembentukan NO dirangsang hanya pada suhu tinggi, oleh karena itu NO di dalam campuran ekuilibrium pada suhu tinggi akan terdisosiasi kembali menjadi N₂ dan O₂. Jika suhu campuran tersebut diturunkan perlahan-lahan dapat memberikan waktu yang cukup bagi NO untuk terdisosiasi. Akan tetapi jika campuran ekuilibrium tersebut didinginkan secara mendadak, akan banyak NO yang masih terdapat pada campuran suhu rendah tersebut. Pendinginan cepat tersebut sering terjadi pada proses pembakaran.

Reaksi pembentukan NO_2 dari NO dan O_2 terjadi dalam jumlah relatif kecil, meskipun dengan adanya udara berlebih. Hal ini berbeda dengan reaksi pembentukan CO_2 dari CO dan O_2 , dimana kelebihan udara akan mengakibatkan pembentukan CO_2 secara cepat. Pembentukan NO_2 yang lambat ini disebabkan kecepatan reaksi sangat dipengaruhi oleh suhu dan konsentrasi NO . Reaksi pembentukan NO_2 berlangsung lebih lambat pada suhu yang lebih tinggi. Pada suhu 1.100°C jumlah NO_2 yang terbentuk biasanya kurang dari 0,5% dari total NO_x . Kecepatan reaksi pembentukan NO_2 dipengaruhi oleh konsentrasi oksigen dan kuadrat dari konsentrasi NO . Hal ini berarti jika konsentrasi NO bertambah menjadi dua kalinya maka kecepatan reaksi akan naik menjadi empat kalinya, dan jika konsentrasi NO berkurang menjadi setengahnya. NO yang dikeluarkan ke udara luar bersama-sama dengan gas buangan lainnya akan mengalami pendinginan secara cepat dan terencerkan sebanyak 100 kalinya.

Udara yang mengandung gas NO dalam batas normal relatif aman dan tidak berbahaya, kecuali bila gas NO berada dalam konsentrasi tinggi. Sifat racun (toksisitas) gas NO_2 empat kali lebih kuat daripada 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 kematian.

Konsentrasi NO_2 lebih tinggi dari 100 ppm bersifat letal pada hewan percobaan, dan 90% dari kematian tersebut disebabkan oleh gejala edema pulmonary. Pemberian sebanyak 5 ppm NO_2 selama 10 menit terhadap manusia mengakibatkan sedikit kerusakan dalam bernafas. Pencemaran udara oleh gas NO_x juga dapat menyebabkan timbulnya peroxy Acetil Nitrates (PAN). PAN ini menyebabkan iritasi pada mata yang menyebabkan mata terasa pedih dan berair. Campuran PAN bersama senyawa kimia lainnya yang ada di udara dapat menyebabkan terjadinya kantung foto kimia atau photo chemistry smog yang sangat mengganggu lingkungan (Fardiaz, 1992).

2.1.2 Karbon Oksida (CO)

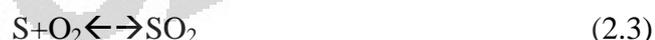
Karbon monoksida (CO) merupakan senyawa berwujud gas yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa. Karbon monoksida merupakan hasil

dari reaksi oksidasi parsial senyawa yang mengandung karbon. Dari reaksi tersebut, dihasilkan berbagai macam konsentrasi karbon monoksida, misalnya 7.000 ppm dari gas buang kendaraan tanpa konverter katalitik dan 30.000 ppm dari asap rokok (Gosink, 1983). Batas ambang batas karbon monoksida di Jakarta adalah sebesar 15 ppm (Fairbanks NSBES, 2010).

Karbon monoksida yang masuk ke dalam tubuh melalui organ pernafasan akan bergabung dengan hemoglobin membentuk senyawa karboksihemoglobin. Pembentukan senyawa karboksihemoglobin ini 200 kali lebih cepat dari pada pembentukan senyawa oksihemoglobin, sehingga fungsi darah sebagai penyalur oksigen ke seluruh jaringan tubuh menjadi tidak maksimal. Dengan konsentrasi 667 ppm saja, karbon monoksida dapat mengubah lebih dari 50% hemoglobin menjadi karboksihemoglobin (Wikipedia, 2010).

2.1.3 Sulfur Oksida (SO_x)

Dua komponen sulfur bentuk gas yang tidak berwarna, yaitu sulfur dioksida (SO₂) dan sulfur trioksida (SO₃), dan keduanya disebut sulfur oksida. Sulfur dioksida mempunyai karakteristik bau yang tajam dan tidak mudah terbakar di udara, sedangkan sulfur trioksida merupakan komponen yang tidak reaktif. Pembakaran bahan-bahan yang mengandung sulfur akan menghasilkan kedua bentuk sulfur oksida, tetapi jumlah relatif masing-masing tidak dipengaruhi oleh jumlah oksigen yang tersedia. Di udara SO₂ selalu terbentuk dalam jumlah besar. Jumlah SO₃ yang terbentuk bervariasi dari 1 sampai 10% dari total SO_x. Mekanisme pembentukan SO_x dapat dituliskan dalam dua tahap reaksi sebagai berikut:



SO₃ di udara dalam bentuk gas hanya mungkin ada jika konsentrasi uap air sangat rendah. Jika konsentrasi uap air sangat rendah. Jika uap air terdapat dalam jumlah cukup, SO₃ dan uap air akan segera bergabung membentuk droplet asam sulfat (H₂SO₄) dengan reaksi sebagai berikut:



Komponen yang normal terdapat di udara bukan SO_3 melainkan H_2SO_4 tetapi jumlah H_2SO_4 di atmosfer lebih banyak dari pada yang dihasilkan dari emisi SO_3 hal ini menunjukkan bahwa produksi H_2SO_4 juga berasal dari mekanisme lainnya. Setelah berada di atmosfer sebagai SO_2 akan diubah menjadi SO_3 dipengaruhi oleh beberapa faktor termasuk jumlah air yang tersedia, intensitas, waktu dan distribusi spektrum sinar matahari, jumlah bahan katalitik, bahan sorptif dan alkalin yang tersedia. Pada malam hari atau kondisi lembab atau selama hujan SO_2 di udara diabsorpsi oleh droplet air alkalin dan beraksi pada kecepatan tertentu untuk membentuk sulfat di dalam droplet.

Gas belerang dioksida SO_2 tidak berwarna, dan berbau sangat tajam. Gas belerang dioksida dihasilkan dari pembakaran senyawa-senyawa yang mengandung unsur belerang. Gas belerang dioksida SO_2 terdapat di udara biasanya bercampur dengan gas belerang trioksida SO_3 dan campuran ini diberi simbol SO_x .

Senyawa sulfur di atmosfer terdiri dari H_2S , merkaptan, SO_2 , SO_3 , H_2SO_4 garam-garam sulfit, garam-garam sulfat, dan aerosol sulfur organik. Dari cemaran tersebut, SO_2 memberikan sumbangan lebih dari 50% dari emisi total. Cemaran garam sulfur dan sulfit dalam bentuk aerosol yang berasal dari percikan air laut memberikan sumbangan 15% dari emisi total.

Dampak dari pencemaran SO_x menimbulkan dampak terhadap manusia dan hewan, kerusakan pada tanaman terjadi pada kadar sebesar 0,5 ppm. Pengaruh utama polutan SO_x terhadap manusia adalah iritasi sistem pernafasan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa iritasi tenggorokan terjadi pada kadar SO_2 sebesar 5 ppm atau lebih bahkan pada beberapa individu yang sensitif iritasi terjadi pada kadar 1-2 ppm. SO_2 dianggap pencemar yang berbahaya bagi kesehatan terutama terhadap orang tua dan penderita yang mengalami penyakit khronis pada sistem pernafasan kariovaskular. Individu dengan gejala penyakit tersebut sangat sensitif terhadap kontak dengan SO_2 , meskipun dengan kadar yang relatif rendah.

Tabel 2. 2 Pengaruh Konsentrasi SO₂ Terhadap Kesehatan

Konsentrasi (ppm)	pengaruh
3-5	Jumlah terkcecil yang dapat dideteksi dari baunya
8-12	Jumlah terkcecil yang segera mengakibatkan iritasi tenggorokan
20	Jumlah terkcecil yang akan mengakibatkan mata, batuk, dan konsentrasi maksimum yang diperbolehkan untuk kondisi waktu yang lama
50-100	Maksimum yang diperbolehkan untuk kontak singkat (30 menit)
400-500	Berbahaya meskipun kontak secara singkat.

2.2 Jenis Masker Kesehatan

Masker merupakan suatu alat bantu pemurni udara yang terus mengalami evolusi sejak ditemukan di abad 19. Berikut ini adalah sejarah evolusi masker pernafasan (Barker, 1926):

2.2.1 Inhaler atau Alat Pelindung Paru-paru

Diciptakan oleh Lewis P. Haslett dari Louisville pada tahun 1847. Penemuan ini mendapatkan paten pertama sebagai *air purifying respirator* yaitu dengan US Patent #6529 pada tahun 1849. Alat ini memungkinkan manusia untuk bernafas melalui hidung atau mulut. Alat ini dilengkapi dengan dua katup satu arah, yaitu satu katup untuk menghirup udara yang akan melalui saringan berbentuk bola, dan satu katup lainnya untuk menghembuskan udara langsung ke atmosfer. Bahan filter berupa wol atau zat berpori lainnya yang dibasahi oleh air. Filter ini sangat cocok untuk menyingkirkan debu atau partikel padat lainnya, tetapi tidak efektif terhadap gas.

2.2.2 Masker Gas Stenhouse

Diciptakan oleh seorang kimiawan Skotlandia, John Stenhouse pada tahun 1854. Awalnya pada tahun 1850, John Stenhouse meneliti kekuatan berbagai

bentuk arang untuk menangkap dan menahan volume sejumlah volume besar gas. Kemudian, dengan berbekal pengetahuan dasar tersebut, John Stenhouse berusaha untuk mengaplikasikannya ke dalam masker sehingga masker tersebut mampu menangkap gas beracun dari udara yang masuk. Filter dari masker ini terdiri dari dua lapisan yang berisi bubuk arang. Dua lapisan ini berbentuk dua kubah kawat kasa yang menutupi hidung dan mulut pemakainya. Penemuan ini sangat berguna bagi aplikasi teknologi modern lantaran saat ini prinsip arang atau karbon aktif sebagai media filter paling banyak digunakan untuk masker gas (Wikipedia,2010).



Gambar 2. 1 Masker buatan John Stenhouse

Sumber: <http://www33.brinkster.com>

2.2.3 Masker Pernafasan Pemadam Kebakaran

Diciptakan oleh fisikawan terkemuka Inggris John Tyndall pada tahun 1871. Beliau menggabungkan fitur pelindung dari masker Stenhouse dengan perangkat pernafasan lainnya. Masker yang diciptakan oleh Tyndall ini terdiri dari ruang katup dan tabung filter yang panjangnya sekitar 4 inchi. Filternya terdiri dari kapas yang jenuh dengan gliserin, kapur, dan arang. Kapur dapat menyerap asam karbonat yang merupakan salah satu produk pembakaran. Gliserin dapat menyerap partikel asap, sedangkan arang dapat menyerap uap air. Masker Tyndall ini diciptakan khusus untuk pemadam kebakaran.

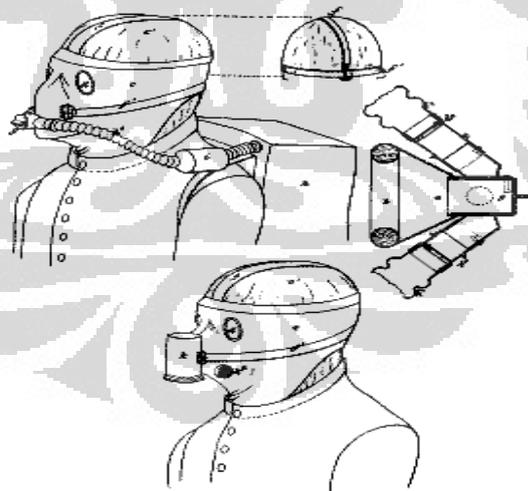


Gambar 2. 2 Masker buatan John Stenhouse

Sumber: <http://www33.brinkster.com>

2.2.4 Masker Pernafasan Barton

Diciptakan oleh Samuel Barton dari Inggris pada tahun 1874. Masker ini menutup seluruh bagian wajah dengan karet dan logam. Sebuah tabung logam yang merupakan komponen masker ini berisikan filter yang terdiri dari kapas yang terbasahi, arang, kapur, dan gliserin. Kapur digunakan untuk menghilangkan kelebihan karbon dioksida dari proses ekspirasi pernafasan.



Gambar 2. 3 Masker buatan Samuel Barton (US Patent #148.868)

Sumber: <http://www33.brinkster.com>

2.2.5 Masker Neally Penghilang Asap

Diciptakan oleh Neally pada tahun 1877 dengan target konsumennya adalah pemadam kebakaran. Ada dua macam masker yang diciptakan oleh Neally. Pertama, masker yang menutupi wajah secara rapat yang bahannya terbuat dari mika. Pada alat pertama ini, udara dihirup dari tabung karet yang dipasang dibagian dada. Kedua, masker yang juga menutupi wajah secara rapat ini, alat filternya langsung dipasang di bagian wajah.



Gambar 2. 4 Masker I dan II buatan Neally (US Patent # 195.300 dan # 212.969)

Sumber: <http://www33.brinkster.com>

2.2.6 Masker Cup

Masker ini dirancang oleh R. Hutson Hurd pada tahun 1879 untuk menangkap gas beracun berbahaya, debu, dan partikel lainnya ke dalam saluran pernafasan manusia. Masker ini mirip moncong babi ketika dipakai. Desain masker ini menutupi mulut dan hidung penggunanya, dan menggunakan tali sebagai pengikat masker ke kepala. Masker ini di bagian depannya juga terdapat filter. Jenis masker ini merupakan masker yang paling meluas penggunaannya untuk keperluan industri.

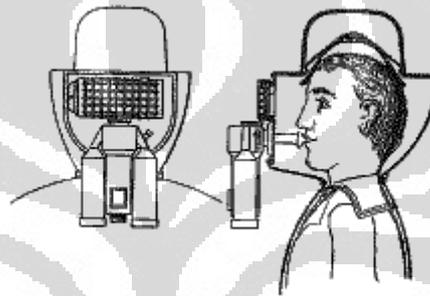


Gambar 2. 5 Masker buatan Hutson Hurd (US Patent # 218.976)

Sumber: <http://www33.brinkster.com>

2.2.7 Masker Pernafasan Loeb

Dirancang oleh Loeb Berlin, seorang berkebangsaan Jerman, pada tahun 1891. Masker ini dirancang untuk memurnikan udara kotor, menghilangkan bau asap, menghilangkan debu, gas beracun, serta uap. Salah satu komponen masker ini mencakup tabung logam yang diikatkan di bagian pinggang. Tabung logam ini berisi sistem penyaringan yang mengandung bahan kimia cair, dan gumpalan arang yang berpori-pori halus. Kemudian, komponen selanjutnya adalah sebuah selang tabung fleksibel yang terhubung ke mulut. Oleh karena itu, pemakai alat ini harus menghirup udara bersih melalui mulutnya.

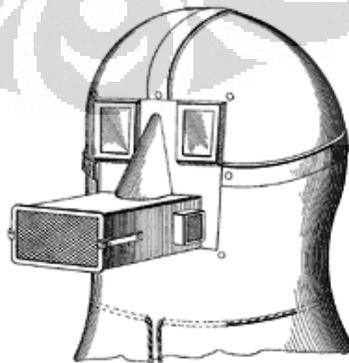


Gambar 2. 6 Masker buatan Loeb Berlin (US Patent # 533.854)

Sumber: <http://www33.brinkster.com>

2.2.8 Masker Pernafasan Muntz

Dirancang oleh Louis Muntz dari Minnesota pada tahun 1902. Masker ini didesain menutupi kepala secara penuh. Komponen masker ini berupa saluran katup, filter spons, dan adsorben berbasis karbon.

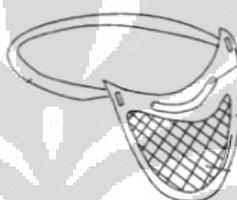


Gambar 2. 7 Masker buatan Muntz (US Patent # 703.948)

Sumber: <http://www33.brinkster.com>

2.2.9 Masker Fotokatalitik

US Patent No.5,744,407 yang berjudul “*Photocatalytic Face Mask*” ditemukan oleh Ali Tabatabaie Raissi, Nazim Z. Muradov, serta Philip W. Fairey pada tahun 1998. Paten ini menerangkan suatu membran kimia yang diletakkan di dalam masker yang berfungsi untuk mendegradasi senyawa VOC, khususnya formaldehid dan terpena. Lapisan membran yang dibuat berbasis fotokatalisis heterogen yang hanya membutuhkan cahaya tampak dari matahari agar reaksi fotokatalisis terjadi. Berikut ini adalah gambar dari masker fotokatalitik tersebut:



Gambar 2. 8 Masker fotokatalitik

Sumber: <http://www.freepatentsonline.com/57444047.html>

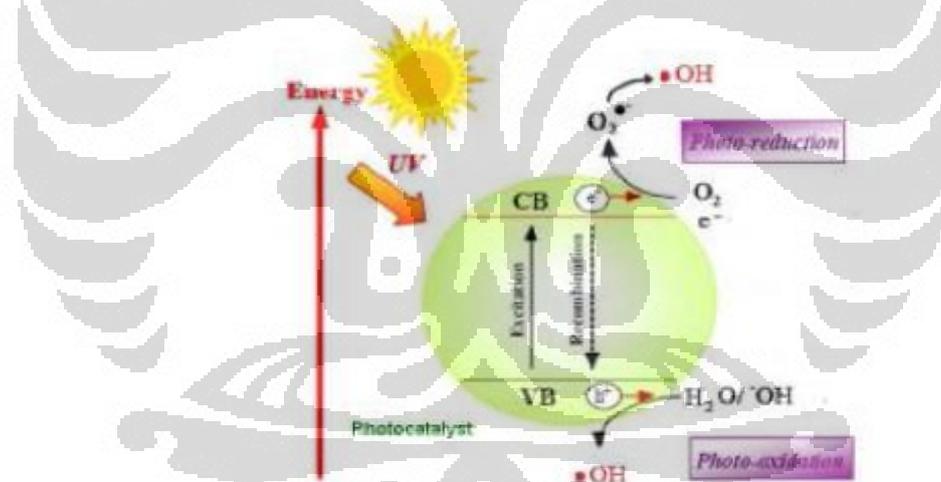
Dari paten tersebut, terdapat beberapa hal yang perlu dievaluasi, pertama desain struktur masker tersebut menyebabkan waktu kontak antara polutan dengan fotokatalis sangat singkat. Waktu kontak merupakan faktor penting dalam konversi, jika waktu kontak semakin lama maka konversi akan semakin meningkat (Fogler, 1992). Kedua, yaitu dari material pendegradasi polutan VOC hanya terdiri dari fotokatalis TiO_2 padahal daya adsorpsi TiO_2 terhadap polutan sangat rendah. Kedua hal ini menyebabkan konversi polutan VOC menjadi senyawa CO_2 dan H_2O kecil.

2.3 Metode Degradasi Gas NO_2

Pada penelitian ini metode degradasi gas NO_2 yang dilakukan adalah dengan proses fotokatalis dan adsorpsi. Berikut ini adalah penjelasan tentang kedua proses tersebut.

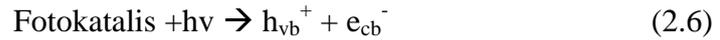
2.3.1 Fotokatalisis untuk Degradasi NO₂

Fotokatalisis merupakan suatu proses kombinasi antara fotokimia dan katalis, yaitu suatu proses transformasi kimiawi dengan melibatkan cahaya sebagai pemicu dan katalis yang dapat mempercepat proses transformasi tersebut (Fujishima, 1999). Fotokatalisis, memiliki berbagai macam fungsi, misalnya untuk purifikasi air, purifikasi udara, sterilisasi, penghilangan bau, dan anti-fogging (Gunlazuardi, 2001). Fotokatalis yang digunakan pada penelitian ini adalah TiO₂ karena dapat mendegradasi CO dan NO_x dengan baik. TiO₂ memiliki keunggulan diantaranya aktivitas fotokatalis, indeks refraktif, dan konstanta dielektrik yang tinggi, tidak beracun, transmitansi baik pada daerah infra merah dan cahaya tampak, stabilitas kimia dan cahaya baik, dapat mengatur kelembaban udara sekitar, dan harganya terjangkau (Litter, 1996; Wu, 2003; Ao, 2005; Salvado, 2007; Slamet, 2007).



Gambar 2. 9 Fotokatalis yang Teradiasi Sinar UV (Ikha, 2011)

1. Absorpsi sinar ultraviolet dan produksi pasangan elektron-hole
Ketika fotokatalis teriluminasi oleh sinar ultraviolet. Fotokatalis tersebut menyerap energi ($h\nu$) yang dimiliki oleh sinar ultraviolet. Jika energi yang diserap melebihi dari band gap fotokatalis. maka elektron (e^-) dalam fotokatalis akan tereksitasi dari pita valensi (VB) ke pita konduksi (CB), dan pada pita konduksi pun terbentuk *hole* (h^+). Lihat persamaan 2.6 berikut:



2. Reaksi fotooksidasi senyawa polutan

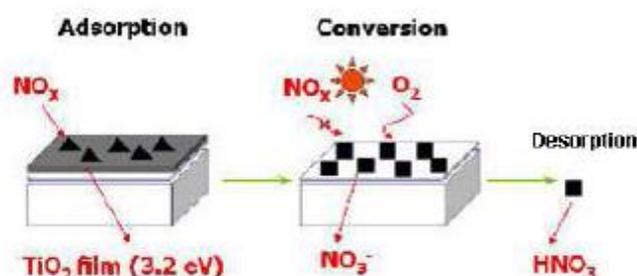
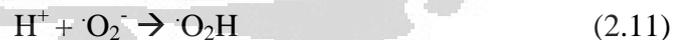
Elektron dan hole yang terbentuk dapat berkombinasi kembali baik di dalam maupun di permukaan partikel fotokatalis. Namun, ada juga elektron dan *hole* yang dapat bertahan sampai di permukaan. Elektron dan *hole* yang sampai di permukaan ini akan menginisiasi reaksi reduksi dan oksidasi senyawa yang ada di sekitarnya (Venturinin, 2009).

3. Reaksi fotooksidasi senyawa polutan

Elektron dan *hole* yang bertahan sampai di permukaan ketika bertemu dengan molekul uap air (H_2O) akan bereaksi membentuk senyawa-senyawa radikal seperti radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$), radikal ($\cdot\text{O}_2^-$) mengikuti persamaan berikut ini (Venturini, 2009):

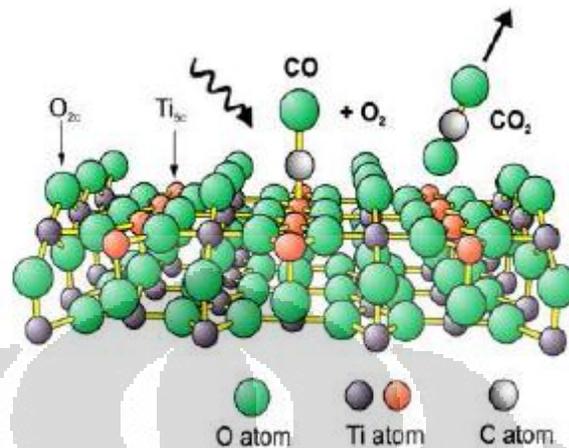


Senyawa radikal hidroksil berada dalam fasa teradsorpsi di permukaan fotokatalis dan merupakan oksidator kuat, karena memiliki potensial oksidasi sebesar 2,8 eV. Potensial oksidasi sebesar 2,8 eV ini sudah cukup untuk mengoksidasi senyawa polutan, seperti NO_x dan CO dengan mekanisme reaksi sebagai berikut:



Gambar 2. 10 Mekanisme Fotooksidasi NO_x

Mekanisme reaksi fotooksidasi CO (Sangman, 2003)

**Gambar 2. 11** Mekanisme Reaksi Fotooksidasi CO sesuai persamaan 2.16

Reaksi pada persamaan 2.14 terkadang diabaikan karena lajunya yang sangat lambat. Reaksi yang terjadi biasanya sesuai dengan persamaan 2.15 dan 2.16

2.3.2 Adsorpsi

Adsorpsi adalah proses yang terjadi ketika gas atau cairan terlarut terakumulasi pada permukaan suatu padatan atau cairan (adsorben), membentuk lapisan molekul atau atom (adsorbat). Adsorpsi berbeda dengan absorpsi, dimana substansi berdifusi ke dalam cairan atau padatan untuk membentuk larutan. Adsorpsi, pertukaran ion, dan kromatografi adalah proses penyerapan dimana adsorbat tertentu secara selektif ditransfer dari fasa fluida ke permukaan tak larut, endapan partikel kaku pada *vessel* atau *packed* dalam kolom.

Serupa dengan tegangan permukaan, adsorpsi mengakibatkan energi permukaan. Pada materi bulk, semua ikatan yang diperlukan (ionik, kovalen, atau logam) atom konstituen dari suatu material diisi oleh atom lain pada material tersebut. Namun, atom pada permukaan adsorben tidak dikelilingi oleh atom

adsorben secara keseluruhan. Dan karenanya dapat menarik adsorbat. Ikatan alami sebenarnya tergantung pada spesies detail yang terlibat.

2.3.2.1 Fisorpsi

Fisorpsi, juga disebut adsorpsi fisika, adalah proses di mana struktur elektronik atom atau molekul diganggu dengan keras selama adsorpsi (Oura, 2003). Lemahnya ikatan fisorpsi berkaitan dengan momen dipol terinduksi adsorbat non polar yang berinteraksi dengan sesamanya pada padatan yang dapat terpolarisasi.

Gaya interaksi utama dari fisorpsi disebabkan oleh gaya Van der Waals. Meskipun interaksi energinya lemah (10-100 meV), fisorpsi memainkan peranan penting di alam. Sebagai contoh, interaksi Van der Waals antara permukaan dinding dan rambut kaki cicak memberikan kemampuan untuk memanjat vertikal di dinding.

Dalam sudut pandang fisika molekular, gaya tarik van der waals bersumber pada fluktuasi tegangan antara dua ikatan molekul atau atom yang terhubung, momen dipol terinduksi bersama. Dibandingkan dengan kemosorpsi, dimana struktur elektronik ikatan atom atau molekul diubah dan ikatan ionik atau kovalen dibentuk, fisorpsi, umumnya dikatakan, hanya dapat diamati di lingkungan pada suhu rendah (energi termal pada suhu ruang 26 meV) dan ketidak hadirannya kemosorpsi yang relatif kuat.

2.3.2.2 Kemosorpsi

Kemosorpsi adalah klasifikasi adsorpsi yang dikarakterisasi oleh interaksi yang kuat antara adsorbat dan permukaan substrat, berkebalikan dengan fisorpsi yang dikarakterisasi oleh gaya Van der Waals yang lemah. Perbedaan diantara keduanya cukup sulit dan hal itu diterima secara konvensional sekitar 0,5 eV energi ikatan per atom atau molekul. Jenis interaksinya kuat meliputi ikatan kimia ionik atau kovalen, tergantung pada spesi yang terlibat (Oura, 2003).

2.3.2.3 Isoterm Adsorpsi

Adsorpsi biasanya dijelaskan secara isothermal, yaitu jumlah adsorbat pada adsorben sebagai fungsi tekanannya (jika gas) atau konsentrasinya (jika cair) pada suhu tetap.

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

$$\frac{x}{m} = kP^{\frac{1}{n}} \quad (2.17)$$

dimana x adalah kuantitas sorbat; m adalah massa adsorben; P adalah tekanan adsorbat; k dan n adalah konstanta empiris untuk setiap pasangan adsorbat-adsorben pada suhu yang diberikan. Fungsi ini memiliki asimtotik maksimum seiring peningkatan tekanan tanpa ikatan. Seiring peningkatan suhu, konstanta k dan n berubah menjadi merefleksikan pengamatan empiris bahwa kuantitas teradsorpsi meningkat lebih lambat dan tekanan yang lebih tinggi diharuskan untuk menjenuhkan permukaan.

2.3.2.4 Isoterm Langmuir

Adsorpsi monolayer secara teori yang paling simple adalah *Langmuir Isoterm*. Isoterm langmuir merupakan jenis adsorpsi dengan metode kemisorpsi. Turunan kinetik yang sederhana dan turunan termodinamika yang akan menghasilkan konstanta keseimbangan isotherm langmuir ini akan ditunjukkan seperti persamaan dibawah. Pada persamaan ini mengasumsikan hal-hal sebagai berikut:

1. Molekul-molekul yang teradsorpsi terdapat pada area dengan batas-batas yang ditentukan.
2. Setiap area ditempati oleh satu molekul adsorbate
3. Semua area adalah sama
4. Tanpa adanya interaksi antara molekul-molekul yang teradsorpsi yang bersebelahan posisi area.

Penyebab adanya pertukaran molekul-molekul yang teradsorpsi dari fasa gas yaitu:

$$\text{Laju adsorpsi} = k_a \cdot p \cdot (1 - \theta) \quad (2.18)$$

$$\text{Laju desorpsi} = k_d \cdot \theta \quad (2.19)$$

Prosedur yang umum diajukan untuk menguji kecocokan model langmuir dengan data percobaan dengan membuat plot p/q terhadap p atau $1/q$ terhadap $1/p$, sehingga persamaan dapat disusun kembali menjadi:

$$\frac{p}{q} = \frac{1}{bq_s} + \frac{p}{q_s} \quad \text{atau} \quad \frac{1}{q} = \frac{1}{q_s} + \left(\frac{1}{bq_s} \cdot \frac{1}{p}\right) \quad (2.20)$$

2.3.2.5 Adsorpsi Isotermal Freundlich

Adsorpsi isotermal Freundlich merupakan adsorpsi isotermal dimana kurva yang berhubungan dengan konsentrasi yang terlarut pada permukaan adsorben, hingga konsentrasi yang terlarut pada cairan yang terkontak.

Adsorpsi isotermal Freundlich dapat dinyatakan secara matematis sebagai

$$\frac{x}{m} = Kp^{\frac{1}{n}} \quad \text{atau} \quad \frac{x}{m} = Kc^{\frac{1}{n}} \quad (2.21)$$

Dengan

- x = massa adsorbat
- m = masa adsorben
- p = tekanan kesetimbangan dari adsorbat
- c = konsentrasi kesetimbangan adsorbat pada larutan

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

2.3.2.6 Faktor- faktor yang Mempengaruhi Adsorpsi

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

1. Jenis adsorbat

a) Ukuran molekul adsorbat

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

b) Kepolaran zat

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

2. Karakteristik Adsorben

a) Kemurnian adsorben

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

b) Luas permukaan dan volume pori adsorben

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

c) Temperatur

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

d) Tekanan adsorbat

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

2.4 Adsorben

Adsorben biasanya digunakan dalam bentuk pelet, batang, atau monolith dengan diameter hidrodinamika antara 0.5 dan 10 mm. Untuk dapat menjadi adsorben komersial zat padat harus memenuhi kriteria sebagai berikut:

- Memiliki permukaan yang besar per unit massa sehingga kapasitas adsorpsinya tinggi
- Secara alamiah dapat berinteraksi dengan adsorbat
- Memiliki ketahanan abrasi yang tinggi
- Mudah diperoleh, harga tidak mahal, tidak korosif, tidak beracun, mudah diregenerasi.

Tabel 2. 3 Karakteristik Adsorben \Beserta Kegunaan dan Kerugiannya.

Tipe	Karakteristik	Kegunaan	Kerugian
Karbon aktif	Hidrofobik	Pemisahan polutan organik	Sulit untuk diregenerasi
Zeolite	Hidrofilik, polar	Pemisahan udara	Kapasitas total rendah
Silika gel	Kapasitas tinggi, hidrofilik	Pengeringan aliran gas	Pemisahan tidak efektif
Alumina aktif	Kapasitas tinggi, hidrofilik	Pengeringan aliran gas	Pemisahan tidak efektif

Kebanyakan adsorben industri dibagi menjadi tiga kelas:

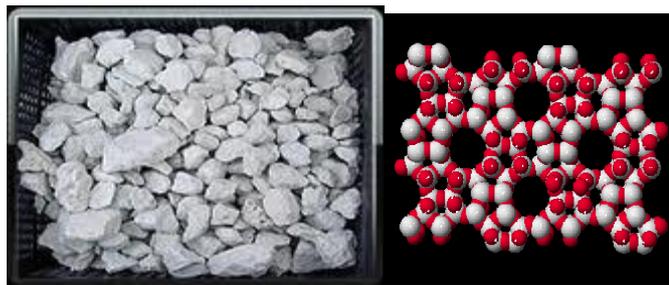
- Senyawa yang mengandung oksigen, biasanya hidrofilik dan polar, termasuk di dalamnya yaitu silika gel dan zeolit.
- Senyawa berbasis karbon, biasanya hidrofobik dan non polar, termasuk di dalamnya yaitu karbon aktif dan grafit.
- Senyawa berbasis polimer, merupakan gugus fungsi polar dan non-polar di dalam matriks polimer.

2.5 Bahan Baku dan Produk

Bahan baku yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari dua komponen utama, yaitu zeolit alam Lampung (ZAL) dan TiO_2 . Kedua bahan baku ini nantinya akan diproses dan dihasilkan katalis komposit yang terdiri dari ZAL-T yang diintegrasikan dengan TiO_2 .

2.5.1 Zeolit

Zeolit adalah suatu kristal aluminasilikat yang berpori. Struktur zeolit mengandung rangkaian tetrahendra dari SiO_4 , AlO_4 yang tergabung bersama dalam susunan beragam dengan berbagi atom oksigen, membentuk kisi kristal terbuka dengan pori berdimensi molekular sehingga suatu molekul asing dapat melaluinya. Struktur mikroporinya ditentukan oleh susunan kisi kristalnya dan terbentuk secara seragam tanpa mempengaruhi distribusi ukuran pori. Inilah yang membedakan zeolit dengan adsorben mikropori lainnya (Rasyid, 2011).



Gambar 2. 12 Kiri.Kristal Zeolit (Nusataraku.org) kanan.Struktur 3D Zeolit (chem-is-try.org)

Penemuan zeolit di dunia dimulai dengan ditemukannya stilbit pada tahun 1756 oleh seorang ilmuwan bernama A. F. Constedt. Constedt menggambarkan kekhasan mineral ini ketika berada dalam pemanasan terlihat seperti mendidih karena molekulnya kehilangan air dengan sangat cepat. Pada tahun 1784, Barthelemy Faujas de Saint seorang profesor geologi Perancis menemukan sebuah formulasi yang cantik hasil penelitiannya tentang zeolit yang dipublikasikan dalam bukunya “Mineralogie des Volcans”. Akhirnya berkat jasanya, pada tahun 1842 zeolit baru tersebut dinamai Faujasit. (Chem-is-try.org).



Gambar 2. 13 Faujas de Saint dan Faujasit

Zeolit telah dipelajari oleh para ahli mineral selama lebih dari 250 tahun. Pada lampiran akan diberikan tahun ditemukannya mineral zeolit. Karena sifat unik dari zeolit, maka zeolit ini bisa digunakan untuk adsorpsi gas-gas polutan.

Terdapat 38 jenis struktur zeolit yang berbeda yang telah diidentifikasi, termasuk bentuk alami dan sintesis. Dalam hal struktur zeolit, lebih mudah diaktakan bahwa strukturnya dibangun atas susunan daripada unit bangun sekunder, yaitu polihedra yang dibentuk oleh beberapa SiO_4 dan AlO_4 tetrahedra.

Tiap atom aluminium dalam zeolit memberikan satu muatan negatif yang harus diseimbangkan oleh suatu kation yang dipertukarkan. Kation ini mempunyai peranan penting dalam menentukan sifat adsorpsi dari zeolit. Penukaran ion dapat merubah kation yang ada sehingga akan memodifikasi sifat adsorpsinya.

Rasio Si/Al pada zeolit tidak akan pernah lebih kecil daripada 1, namun tidak ada nilai batas atas dan zeolit yang ada sekarang seringkali mendekati pada silika murni. Sifat adsorpsi yang menunjukkan perubahan yang sistematis dari yang kaya aluminium, dengan afinitas tinggi terhadap air dan molekul-molekul polar, kepada silika mikropori seperti silikalit yang hidrofobik dan lebih dapat mengadsorpsi n-parafin daripada air. Transisi dari hidrofilik ke hidrofobik biasanya terjadi pada Si/Al antara 8 dan 10.

Jenis-jenis adsorben zeolit bergantung pada struktur rangka dari rasio perbandingan Si dan Al dan bentuk susunan kation, dengan perbedaan komposisi tersebut akan pula menjadi adsorben yang selektif dalam pemilihan molekul yang akan dipisahkan.

2.5.2 Preparasi Zeolit Alam

Zeolit alam yang digunakan dalam penelitian harus melewati tahap preparasi terlebih dahulu. Hal ini bertujuan untuk menghilangkan pengotor yang ada pada zeolit itu sendiri agar dapat teraktifasi dan memiliki kemampuan adsorpsi yang diinginkan. Secara umum tahapan-tahapan dalam preparasi zeolit alam adalah perlakuan asam, penukaran ion, serta dehidrasi dan kalsinasi.

2.5.2.1 Perlakuan Asam

Perlakuan asam dilakukan dengan mencampurkan bahan zeolit alam mentah dengan suatu asam mineral ataupun organik pada kondisi tertentu. Fungsi dari perlakuan asam ini untuk mengeliminasi kandungan logam pengotor seperti natrium, kalium, kalsium, magnesium, dan besi. Pada perlakuan asam biasanya dikerjakan dengan merendam bahan zeolit dalam asam konsentrasi tertentu disertai pemanasan.

Selain itu, perlakuan asam juga menyebabkan terjadinya dealuminasi pada zeolit, yaitu berkurangnya kandungan aluminium karena terhidrolisis dari struktur kristalnya sehingga pada akhirnya meningkatkan rasio Si/Al dari zeolit.

Intinya, perlakuan asam ini dilakukan untuk menghilangkan pengotor dan mendapatkan komposisi rasio Si/Al yang diinginkan.

Jenis asam yang biasa digunakan adalah HF, HCL, HNO₃, dan H₂SO₄ yang berkerja dengan cara mengoksidasi logam dari oksidanya sehingga berubah menjadi bentuk ion terlarut dan dapat dipisahkan dari struktur zeolit.

Perlakuan menggunakan asam mineral biasanya akan menghasilkan tingkat dealuminasi yang lebih tinggi karena sifat oksidatornya yang lebih kuat. Penghilangan senyawa oksida bebas dari SiO₂ amorf dapat dilakuakn dengan asam hidrofiorida (HF) encer. Sedangkan penghilangan oksida logam lainnya dapat dilakukan dengan HCL dan HNO₃. Sedangkan perlakuan dengan asam organik setelah perlakuan asam mineral lebih bertujuan untuk mengkelat ion-ion logam yang telah larut (terutama Al) agar tidak mengkristal kembali sebagai oksida bebas dan menjadi pengotor pada zeolit nantinya.

2.5.2.2 Penukaran ion

Penukaran ion bertujuan untuk memperoleh zeolit dengan bentuk ionik tertentu melalui penukaran dalam suatu larutan kation. Perlakuan asam telah mengubah bentuk ionik dari zeolit menjadi bentuk hidrogen dan apabila diinginkan zeolit dalam bentuk kation yang lain, harus dilakukan penukaran ion setelahnya.

2.5.2.3 Dehidrasi dan Kalsinasi

Zeolit yang telah melalui perlakuan asam dan penukaran ion terlebih dahulu dikeringkan dari kandungan air dengan pemanasan pada suhu sedang (biasanya 120-150°C), kemudian dilanjutkan dengan kalsinasi pada suhu 550-700°C dengan aliran gas *purge*.

2.5.2.4 Titanium Dioksida

Titanium dioksida pertama kali ditemukan pertama kali oleh peneliti Jepang Akira Fujishima yang pada saat itu digunakan untuk memecah molekul air

menjadi oksigen dan hidrogen dengan bantuan sinar UV atau yang lebih dikenal sekarang dengan istilah fotokatalisis.

Tabel 2. 4 Sifat Fisik dan Mekanik dari Titanium Dioksida

Properti	
Density	4 gcm ⁻³
Porosity	0%
Modulus of Rupture	140MPa
Compressive Strength	680MPa
Poisson's Ratio	0.27
Fracture Toughness	3,2 Mpa.m ^{1/2}
Shear Modulus	90GPa
Modulus of Elasticity	230GPa
Microhardness (HV0.5)	880
Resistivity (25°C)	10 ¹² ohm.cm
Resistivity (700°C)	2,5×10 ⁴ ohm.cm
Dielectric Constant (1MHz)	85
Dissipation factor (1MHz)	5×10 ⁻⁴
Dielectric strength	4 kVmm ⁻¹
Thermal expansion (RT-1000°C)	9 x 10 ⁻⁶
Thermal Conductivity (25°C)	11.7 WmK ⁻¹

Sumber: Ikha, 2011

Tabel 2. 5 Sifat Optik dari Titanium Dioksida

Fasa	Refraktif	Densitas	Kristal
	Index	(g.cm ⁻³)	Struktur
Anatase	2,49	3,84	Tetragonal
Rutile	2,903	4,26	Tetragonal

Titanium dioksida dapat digunakan sebagai fotokatalis karena sifat senyawa ini digunakan sebagai alat treatment air dengan cara melewatkan air yang tercemar pada permukaan kaca yang telah dilapisi dengan senyawa ini sedangkan sumber sinar UV yang digunakan adalah berasal dari matahari jika digunakan sinar matahari sebagai katalis maka media ini cukup ramah lingkungan.

Dalam peranan fotokatalis, TiO_2 merupakan semikonduktor pemegang peranan penting dalam reaksi fotokatalis. TiO_2 memiliki bubuk berwarna putih seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 2. 14 TiO_2 Degussa P.25

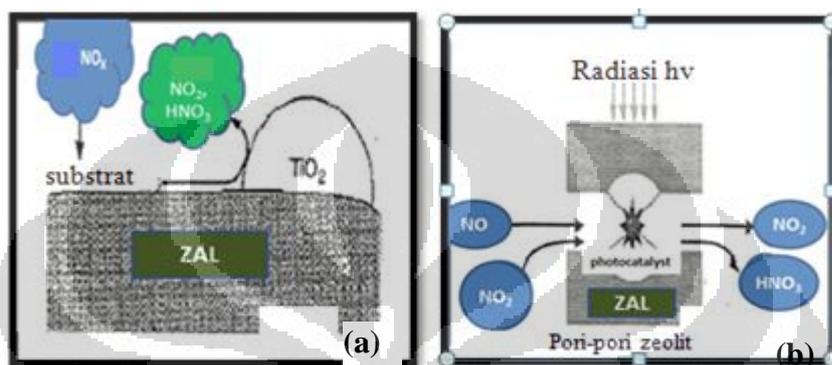
Keunggulan dari TiO_2 diantaranya adalah aktivitas fotokatalis, indeks refraktif dan konstanta dielektrik yang tinggi, tidak beracun, transmitansi baik pada daerah infra merah dan cahaya tampak, stabilitas kimia dan cahaya baik, dapat mengatur kelembaban udara sekitar, dan harganya relatif murah (Ao, 2005; Salvado, 2007; Slamet, 2007). Selain itu, TiO_2 dapat menghasilkan *hole* yang potensial oksidasinya sangat tinggi, yaitu +2,53 eV terhadap SHE, dan juga menghasilkan elektron yang dapat berperan sebagai agen pereduksi karena potensial reduksinya cukup besar, yaitu -0,52 eV terhadap SHE (Birnie n,d).

2.5.3 Katalis Komposit TiO_2 -ZAL

Dari penelitian yang telah dilakukan, ternyata penggunaan adsorben sebagai penyangga fotokatalis melalui berbagai metode dapat meningkatkan laju degradasi NO_x (Torimoto, 1996; Matsuoka, 2003; Ibadurrohman, 2008)

Mekanisme reaksi degradasi NO_x oleh katalis komposit TiO_2 -ZAL adalah sebagai berikut (lihat Gambar 2.10):

1. NO_x teradsorb oleh zeolit baik saat ada cahaya maupun saat tidak ada cahaya
2. NO_x yang teradsorb akan berdifusi di dalam zeolit sampai bertemu dengan fotokatalis
3. Ketika NO_x bertemu dengan fotokatalis, maka NO_x akan terdegradasi ketika terdapat cahaya baik di permukaan adsorben (Gambar 2.12a) maupun di dalam pori-pori adsorben (Gambar 2.12b).



Gambar 2. 15 Mekanisme degradasi CO dan NO_x oleh katalis komposit TiO_2 -ZAL di permukaan katalis komposit (a) dan di dalam pori-pori katalis komposit (b) (Torimoto, 1996)

Kinerja kombinasi antara TiO_2 -ZAL ini ditentukan oleh daya adsorpsi adsorben dan kemampuan difusi adsorbat ke fotokatalis TiO_2 (Torimoto, 1996). Semakin tinggi daya adsorpsi adsorben, maka laju degradasi polutan juga semakin meningkat. Oleh karena itu, pemilihan adsorben harus dilakukan secermat mungkin untuk menghasilkan laju degradasi yang optimal.

Tingkat aktivitas fotokatalis yang digabungkan dengan adsorben sebagai penyangga sangat dipengaruhi oleh jumlah konsentrasi atau *loading* fotokatalis TiO_2 ke adsorben penyangga (Ichiura, 2002). Aktivitas akan semakin baik apabila fotokatalis terdispersi merata (Matsuoka, 2003) ke seluruh permukaan adsorben. Pada jumlah konsentrasi TiO_2 yang cukup tinggi, diperoleh laju fotodegradasi senyawa NO_x yang rendah. Hal ini karena TiO_2 menggerombol pada bagian tertentu dari penyangga. Karena TiO_2 menggerombol, maka selain adanya ikatan TiO , terbentuk pula ikatan Ti-O-Ti . Adanya ikatan ini menyebabkan koordinat TiO_2 berbentuk oktahedral. Ternyata koordinat TiO_2 yang berbentuk oktahedral ini kurang aktif dalam fotodegradasi NO_x karena struktur ini memungkinkan

terjadinya interaksi antar TiO_2 sehingga TiO_2 tidak aktif sebagai fotokatalis (Slamet, 2007).

2.6 Metode Mechanical Mixturing untuk Preparasi Katalis Komposit

Metode pencampuran secara mekanik menggunakan alat seperti *magnetic stirrer plates* dan *motor-driven string blades*. *Magnetic stirrer plates* digunakan bersama *stirrer bar*, di mana *stirrer bar* ini akan ditempatkan di dalam larutan yang akan dicampur. Ukuran *stirrer bar* yang digunakan harus disesuaikan dengan wadah pencampuran. Berbeda dengan *magnetic stirrer plate*, yang biasa digunakan untuk pencampuran dalam volume kecil dengan cairan sebagai komponen utama pencampuran, *motor-driven stirring blades* digunakan untuk pencampuran dalam volume besar di mana padatan menjadi komponen utama dalam pencampuran (www.chem.wisc.edu).

Dalam penelitian ini, seluruh campuran yang akan digunakan didominasi oleh komponen cairan dan volumenya pun tidak terlalu banyak. Oleh karena itu *magnetic stirrer plates* dipilih sebagai alat yang akan digunakan untuk pencampuran. Terkadang, hasil pencampuran dari *magnetic stirrer plates* ini masih kurang homogen karena masih adanya aglomerat-aglomerat yang terbentuk. Untuk memecah aglomerat dari komponen padatan dalam campuran, sehingga campuran menjadi lebih homogen digunakan bantuan alat *ultrasonic processor*.

2.7 Kinetika Reaksi Degradasi NO_x Secara Fotokatalitik

Proses degradasi polutan NO_x mengikuti mekanisme Langmuir-Hinselwood. (Hunger 2010). Persamaan reaksi yang paling sederhana untuk reaksi monomolekular adalah:

$$r = \frac{dC}{dt} = \frac{kKC}{1+KC} \quad (2.22)$$

Dengan r adalah laju degradasi (ppm/menit), C adalah konsentrasi dari gas polutan (ppm), k adalah konstanta reaksi (ppm/menit), dan K adalah koefisien adsorpsi Langmuir (ppm^{-1})

Persamaan 2.22 dapat dilinearisasi menjadi persamaan 2.23 berikut:

$$\frac{1}{r} = \left(\frac{1}{kK}\right) \left(\frac{1}{D}\right) + \left(\frac{1}{k}\right) \quad (2.23)$$

Permodelan kinetika reaksi fotokatalitik yang cukup rumit biasanya disederhanakan dengan cara menggunakan metode analisis laju awal (*initial rate*) dari reaksi degradasi secara fotokatalitik. Perhitungan berdasarkan metode *initial rate* didasarkan atas konsentrasi minimum yang dapat diamati saat waktu kontak dengan reaktan juga minimum, misalnya saat $t=0$, sehingga persamaan 2.23 dapat dinyatakan menjadi persamaan 2.24 berikut ini:

$$\frac{1}{r_0} = \left(\frac{1}{kK}\right) \left(\frac{1}{C_0}\right) + \left(\frac{1}{k}\right) \quad (2.24)$$

Dengan

$$r_0 = \frac{dC}{dt_0} \quad (2.25)$$

Nilai k dan K dapat dengan mudah dicari melalui persamaan 2.24 jika nilai r_0 telah diketahui untuk setiap nilai C_0 . Nilai r_0 seperti yang ditunjukkan persamaan 2.25 dapat dihitung dengan cara menurunkan persamaan grafik C vs t , dengan C adalah konsentrasi dan t adalah waktu. Setelah persamaan tersebut diturunkan langkah berikutnya adalah memasukkan $t=0$ ke persamaan turunan tersebut, sehingga didapatkan nilai r_0 . kemudian setelah nilai r_0 didapatkan, dapat dibuat kurva invers C_0 . Dengan meregresi kurva tersebut secara linier, maka akan didapatkan garis linier dengan bentuk seperti persamaan 2.25. Dengan demikian, nilai k dan K dapat dihitung.

2.8 Karakterisasi Katalis

Subbab ini menjelaskan tentang dasar-dasar dan teknik karakterisasi katalis, pemilihan metode karakterisasi katalis, sifat-sifat partikel katalis, dan beberapa metode karakterisasi katalis X-Ray Diffraction (XRD), XRF, dan BET.

2.8.1 XRD (X-ray diffraction)

X-ray diffraction atau metode difraksi sinar X digunakan untuk mengetahui struktur kristal dari katalis yang terbentuk (Andayani, 2006). Teknik

difraksi sinar x juga digunakan untuk menentukan ukuran kristal, regangan kisi, komposisi kimia dan keadaan lain yang memiliki orde yang sama. Kemudian kita juga dapat menentukan orientasi dari kristal tunggal dan secara langsung dapat mendeteksi struktur kristal dari suatu material yang belum diketahui komposisinya. Sinar X-ray memiliki kemampuan penetrasi ke dalam suatu material. Panjang gelombang X-ray pun memiliki orde magnitude yang sama sebagai jarak interatom dalam suatu padatan. Oleh karena itu, difraksi sinar X-ray oleh fasa kristalin dalam sampel dapat terjadi menurut Hukum Bragg, yaitu:

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (2.26)$$

Dengan,

n : orde difraksi

λ : panjang gelombang X-ray

d : jarak antara dua atom secara mendatar dalam fasa kristalin

θ : sudut datang difraksi

Prinsip kerja dari XRD (Dutrow, n.d.) adalah sebagai berikut:

1. Sampel diletakkan pada sampel holder difraktometer sinar X.
2. Difraktometer dinyalakan, sinar X kemudian terpancar dari tabung sinar X. Proses difraksi pun dimulai sehingga diperoleh hasil difraksi berupa difraktogram yang menyatakan hubungan antara sudut difraksi 2θ dengan intensitas sinar X yang dipantulkan.
3. Sinar X didifraksikan dari sampel yang konvergen yang diterima dalam posisi simetris dengan respon ke fokus sinar X.
4. Sinar X ini ditangkap oleh detektor sintilator dan diubah menjadi sinyal listrik. Sinyal tersebut, setelah dieliminasi komponen noisenya, dihitung sebagai analisa pulsa tinggi.

Keuntungan utama penggunaan sinar-X dalam karakterisasi material adalah kemampuan penetrasinya, sebab sinar-X memiliki energi sangat tinggi akibat panjang gelombangnya yang pendek.

2.8.2 XRF

XRF adalah alat untuk menganalisis kandungan unsur dalam bahan baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Keunggulan XRF adalah metode analisisnya yang lebih sederhana, lebih cepat, dan tidak memerlukan preparasi yang rumit dibanding analisis dengan alat lain. Selain itu, alat uji XRF sifatnya destructive terhadap sampel.

XRF merupakan pemancaran sinar X dari atom tereksitasi yang dihasilkan oleh tumbukan elektron berenergi tinggi, partikel-partikel lain atau suatu berkas utama dari sinar X lain. Fluoresensi sinar X digunakan pada beberapa teknik seperti pada mikroanalisis dengan kuar elektron (Widyawati, 2010).

Dalam penelitian ini, XRF digunakan untuk mengetahui kandungan unsur dari zeolit alam Lampung (ZAL) setelah proses *treatment*. Dengan demikian, dapat dilihat pengaruh dari proses *treatment* terhadap perubahan kandungan unsur zeolit.

2.8.3 BET

Dengan karakterisasi BET, dapat diketahui luas permukaan partikel, diameter dan volume pori, karakterisasi BET biasanya digunakan untuk padatan yang tidak berpori, *macroporous* dan *mesoporous*. Metode yang ditemukan oleh Brunauer, Emmet dan Teller ini didasarkan pada penentuan volume molekul yang teradsorpsi (V_m) secara fisika setebal satu lapis molekul (monolayer) pada permukaan padatan.

BET juga dapat diaplikasikan untuk adsorpsi *multilayer* dengan V_m adalah jumlah volume lapisan terluar. Persamaan BET yang digunakan di persamaan 2.31 (Maron, 1990).

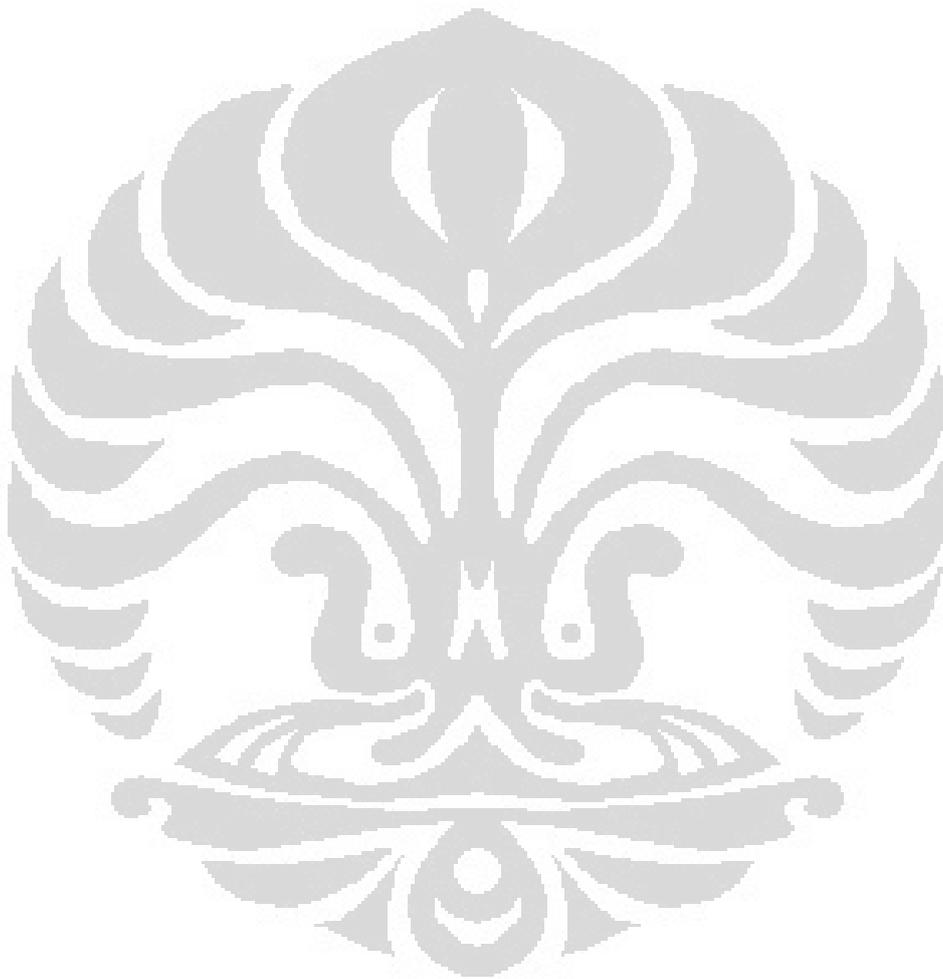
$$\frac{\left(\frac{P}{P_0}\right)}{V\left(1-\left(\frac{P}{P_0}\right)\right)} = \frac{1}{C.V_m} + \left[\frac{(C-1)}{C.V_m}\right]\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (2.27)$$

dengan,

- P : tekanan gas saat adsorpsi
- P_0 : tekanan jenuh adsorbat gas pada temperatur percobaan
- V : volume gas yang diadsorpsi pada tekanan P
- V_m : volume gas yang diadsorpsi untuk monolayer

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

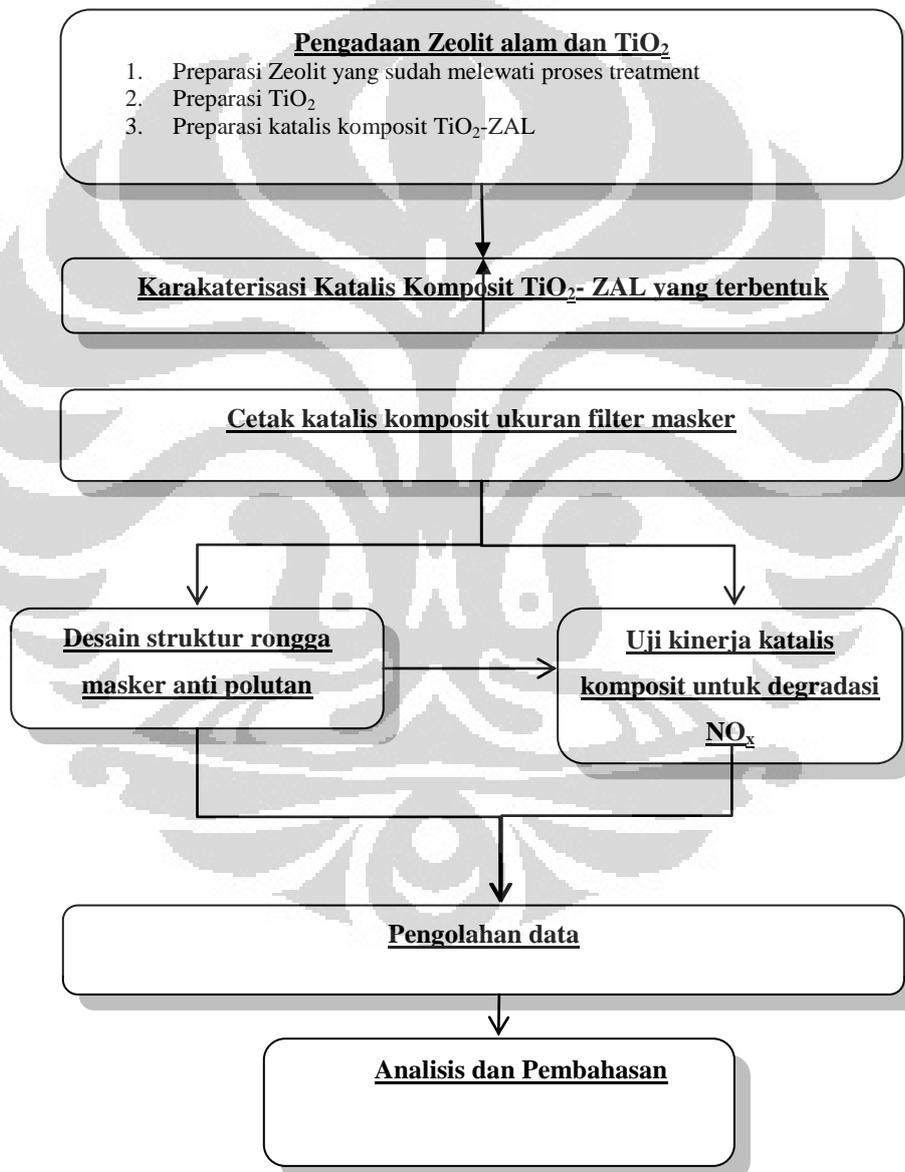
Biasanya, gas yang digunakan untuk analisis BET sebagai adsorbat adalah gas dengan ukuran molekul kecil seperti nitrogen, gas kripton, argon ataupun karbondioksia. Dan, tipe adsorpsi yang terjadi dapat dilihat dengan melihat karakteristik persamaan BET yang digunakan.



BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Alur Penelitian

Untuk memperoleh hasil penelitian yang baik dan sesuai dengan tujuan yang diharapkan, diperlukan adanya suatu desain atau skema langkah penelitian sebagai acuan dalam pelaksanaan penelitian yang dilakukan. Pada penelitian ini dibuat suatu desain penelitian sebagai berikut:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Rancangan Penelitian

Hal pertama yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah membuat material komposit yang memiliki kemampuan dalam mendegradasi NO_x dengan memanfaatkan prinsip adsorpsi dan fotokatalis. Material komposit itu sendiri akan terdiri dari TiO_2 -ZAL yang terintegrasi.

Tahapan pertama yang akan dilakukan adalah preparasi ZAL dengan melakukan treatment terlebih dahulu seperti yang dilakukan oleh Rasyid, 2011 dan Bismo, 2007. Selanjutnya pengintegrasian TiO_2 -ZAL dengan metode sol gel. Pada saat bersamaan dilakukan juga penelitian desain struktur rongga masker anti polutan. Katalis komposit yang terbentuk akan dikarakteristik dengan XRD untuk mengetahui struktur dan komponen katalis komposit.

Setelah material komposit selesai dibuat, dilakukan uji kinerja material dalam mendegradasi NO_x . Pengujian dilakukan kuantitatif dan juga kualitatif untuk mengetahui aktivitas fotokatalis dan juga proses adsorpsi. Uji kuantitatif akan dilakukan dengan menghitung konsentrasi gas NO_2 yang terbentuk selama proses oksidasi NO_2 , menghitung perubahan konsentrasi awal NO_2 . Dalam penelitian ini, analisis konsentrasi awal polutan dan konsentrasi akhir polutan akan dilakukan dengan menggunakan *gas analyzer* yang nantinya akan memberikan data secara otomatis konsentrasi NO_2 awal dan akhir setelah melewati katalis komposit yang telah dirancang sebelumnya.

3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini, dibagi menjadi dua keperluan proses penelitian. Dua set peralatan tersebut adalah peralatan *treatment* zeolit alam Lampung dan peralatan preparasi katalis komposisi ZAL- TiO_2 .

3.3.1 Peralatan *Treatment* Zeolit Alam Lampung (ZAL)

Peralatan-peralatan yang digunakan untuk *treatment* Zeolit Alam terdiri dari beberapa macam alat dan nantinya dari *treatment* ini akan dihasilkan zeolit alam lampung yang telah bersih dari pengotornya dan komposisi Si/Al yang optimum untuk dapat mengadsorpsi NO_2 . Daftar peralatan *treatment* Zeolit Alam Lampung (ZAL) dapat dilihat pada halaman selanjutnya.

Tabel 3. 1 Peralatan *Treatment* Zeolit Alam Lampung

No.	Jenis Alat	Spesifikasi/ Jumlah Alat	Kegunaan Alat
1.	Tumbukan dan mortar	Masing-masing 1 buah	Untuk menumbuk zeolit alam sampai partikelnya berukuran 0,250 -0,300 mm
2.	Gelas ukur	100 ml (1 buah)	Untuk mengukur volume larutan HF, HCl, dan NH ₄ Cl
3.	Timbangan Digital	Ketelitian sampai 0,01 g, di Lab.POT I	Untuk mengukur massa zeolit alam
4.	Batang pengaduk	Panjang 30 cm (1 buah)	Untuk mengaduk larutan yang HF yang mengandung ZAL
5.	Beaker glass	300 ml (1 buah)	Untuk wadah larutan
6.	<i>Magnetic stirer dan hot plate</i>	Masing-masing 1 buah	Untuk mengaduk rendaman zeolit alam lampung dalam larutan NH ₄ Cl
7.	Kertas saring		Untuk memfilter ZAL dari larutan
8.	Burner dan bunsen	Masing-masing 1 buah	Untuk sterilisasi alat
9.	Cawan evaporasi	Cawan berukuran besar (1 buah)	Wadah ZAL
10	<i>Atmospheric furnace</i>	Spesifikasi mesin furnace Lab.RPKA	Untuk kalsinasi ZAL
11	Spatula	1 buah yang berukuran besar	Untuk mengambil padatan ZAL

3.3.2 Peralatan Preparasi Katalis Komposit TiO₂-ZAL

Peralatan-peralatan yang digunakan untuk preparasi katalis komposit TiO₂-ZAL terdiri dari beberapa macam alat dan nantinya dari preparasi ini akan dihasilkan katalis komposit yang siap digunakan untuk mengeliminasi gas NO₂. Daftar peralatan preparasi katalis komposit TiO₂-ZAL dapat dilihat pada halaman selanjutnya

Tabel 3. 2 Peralatan Preparasi Katalis Komposit TiO₂-ZAL

No.	Jenis Alat	Spesifikasi/ Jumlah Alat	Kegunaan Alat
1.	Gelas ukur	10 ml (1 buah)	Untuk mengukur volume larutan HCl, air, etanol, dan TEOS
2.	Timbangan Digital	Ketelitian sampai 0,01 g, di Lab.POT I	Untuk mengukur massa zeolit alam
3.	Batang pengaduk	Panjang 30 cm	Untuk mengaduk larutan titanium tetraisopropoksida dan larutan yang akan dicampurkan.
4.	<i>Beaker glass</i>	100 ml (1 buah)	Untuk wadah larutan
5.	<i>Ultrasonic processor</i>		Untuk melakukan sonikasi
6.	<i>3M cotton filter</i>	50 buah	Untuk sampul katalis komposit (<i>filter cartridge</i>)

3.4 Karakterisasi Katalis Komposit

Karakterisasi katalis merupakan tahapan yang sangat penting karena dengan melakukan karakterisasi maka keefektifan dari preparasi katalis yang dilakukan dapat diketahui. Alat yang digunakan untuk karakterisasi katalis komposit adalah XRD.

3.4.1 Peralatan Karakterisasi Katalis Komposit dan Zeolit Alam Lampung

Karakterisasi merupakan tahapan yang sangat penting karena dengan melakukan karakterisasi maka dapat diketahui keefektifan dari *treatment* ZAL dan keefektifan preparasi komposit. Alat analisis yang digunakan untuk karakterisasi ZAL dan katalis komposit adalah:

Tabel 3. 3 Peralatan Karakterisasi Katalis Komposit

No.	Jenis Karakterisasi	Tempat Karakterisasi	Kegunaan Alat
1.	XRF (<i>X-Ray Fluorence</i>)	Laboratorium Lemigas, Ciledug	Untuk analisis kandungan Si/Al katalis komposit
2	XRD (<i>X-ray Diffaction</i>)	Laboratorium Lemigas, Ciledug	Untuk analisis struktur kristal katalis komposit

3	BET	Laboratorium RPKA, Departemen Teknik Kimia UI	Untuk Analisis luas permukaan katalis komposit
---	-----	--	--

3.4.2 Peralatan Analisis Perubahan Konsentrasi Sampel

Berikut ini adalah peralatan yang akan digunakan dalam analisis perubahan konsentrasi sampel:

Tabel 3. 4 Peralatan Analisis Perubahan Konsentrasi Sampel

No.	Jenis Alat	Spesifikasi/ Jumlah Alat	Kegunaan Alat
1.	<i>Gas Analyzer</i>	Memonitor secara kontinyu NO dan NO ₂ serta HNO ₃ dalam aplikasi hasil gas pembakaran. Bekerja secara otomatis untuk diagnosis analisis gas secara <i>standard analog</i>	Untuk analisis perubahan konsentrasi HNO ₃ NO, dan NO ₂

3.5 Variabel Penelitian

Variabel bebas dari kondisi operasi yang divariasikan pada penelitian ini adalah:

1. Komposisi katalis komposit yaitu rasio antara TiO₂ dengan ZAL yang terintegrasi
2. Ketebalan dan bentuk dari katalis komposit
3. Konsentrasi jenis polutan NO₂ yang divariasikan untuk mengetahui pengaruh konsentrasi polutan terhadap aktivitas fotokatalis yang optimum.

Parameter yang ingin diketahui pada berbagai kondisi operasi atau sebagai variabel yang terikat pada penelitian ini adalah:

1. Aktifitas adsorben dan fotokatalisator
2. Persentase Degradasi NO₂ dengan proses konsentrasi NO₂ yang terbentuk dari oksidasi NO, dan konsentrasi NO₂ yang berkurang karena adanya oksidasi NO₂.
3. Konsentrasi akhir polutan gas NO₂ setelah melewati filter cotton.

3.6 Bahan penelitian

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah

- Bahan *treatment* Zeolit Alam Lampung(ZAL)

Berikut ini adalah bahan yang akan digunakan dalam *treatment* zeolit alam lampung

1. Zeolit Alam Lampung
 2. HCl 6 M
 3. HF 2%
 4. NH_4Cl 0,1 M
- Bahan preparasi katalis komposit

Berikut ini adalah bahan yang akan digunakan dalam preparasi katalis komposit

1. Zeolit alam yang telah dipreparasi
 2. Titanium Isopropoxide bis Acetyl Acetonate [$\text{Ti}(\text{Opr})_4\text{Acac}$]
 3. $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (Merck)
 4. Air demin
 5. HCl (Merck)
- Bahan kemasan katalis komposit menggunakan *3M cotton filter for face mask*.

3.7 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian adalah langkah-langkah sistematis yang ditempuh untuk mendapatkan katalis komposit yang baik dan sesuai dengan tujuan penelitian. Langkah-langkah tersebut meliputi *treatment* zeolit alam, Preparasi katalis komposit TiO_2 -ZAL, dan cetak katalis komposit sesuai dengan *filter bag cotton*.

3.7.1 Treatment Zeolit Alam

Tahapan *treatment* zeolit alam dilakukan dengan tujuan mendapatkan zeolit yang murni dengan daya adsorpsi yang baik karena zeolit alam yang digunakan pada percobaan ini bukan zeolit murni melainkan zeolit yang masih mengandung pengotor oksida. Pemurniaan zeolit dilakukan dengan melakukan perendaman zeolit dalam larutan HF unruk melarutkan oksida-oksida pengotor. Dilanjutkan dengan melakukan perendaman dalam larutan HCl untuk meningkatkan rasio Si/Al. Berikutnya, dilakukan perendaman zeolit dalam NH_4Cl untuk memperkuat struktur baru zeolit yang terbentuk. Setelah itu zeolit akan

dikeringkan dengan menggunakan *furnace* agar kandungan air yang terperangkap dalam kristal zeolit dapat teruapkan secara sempurna. Dari pemurniaan zeolit ini diharapkan rasio Si/Al didapatkan dalam komposisi yang tepat, dengan begitu daya adsorpsi zeolit terhadap polutan NO_x akan semakin meningkat. Selain itu, stabilitas termal zeolit terhadap suhu tinggi juga akan semakin baik (Slamet, 2007).



Gambar 3. 2. Diagram Alir *Treatment* Zeolit Alam Lampung

3.7.2 Preparasi Katalis Komposit TiO_2 -ZAL

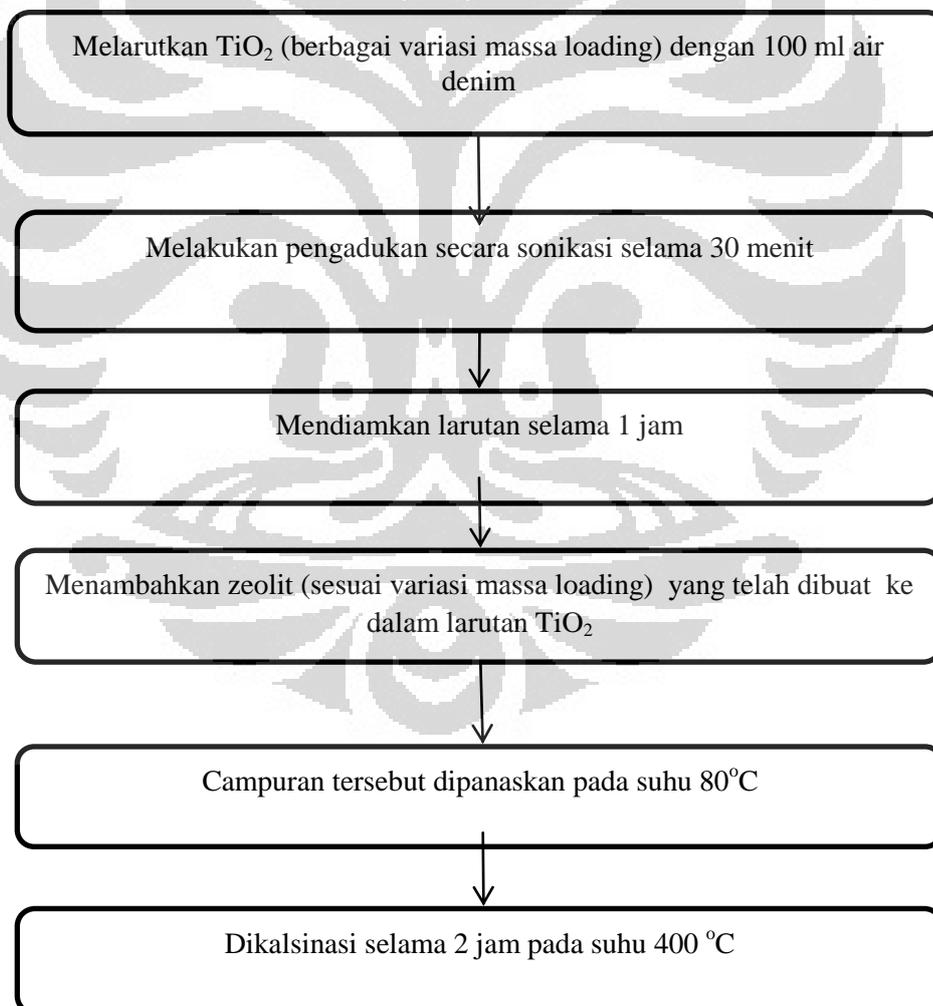
Metode yang digunakan dalam mengintegrasikan TiO_2 -ZAL adalah dengan menggunakan metode sol gel. Pada prosedur ini, akan dilakukan variasi loading TiO_2 dalam katalis komposit yaitu sebanyak 15%, 20%, 25%, dan 30% dengan cara memvariasikan berat zeolit dalam volume sol fotokatalis yang tetap. Berikut

ini adalah tabel variasi komposisi katalis komposit yang akan dilakukan dalam penelitian ini:

Tabel 3. 5 Variasi Komposisi Katalis Komposit

Kandungan TiO ₂ dalam katalis komposit	10%	15%	20%	25%
Massa Zeolit	9 gram	8,5 gram	8 gram	7,5 gram
Massa TiO ₂	1 gram	1,5 gram	2 gram	2,5 gram

Diagram alir preparasi adsorben zeolit alam lampung terintegrasi TiO₂ dengan metode sol gel ditunjukkan pada Gambar 3.3 berikut ini :



Gambar 3. 3 Diagram Alir Preparasi katalis komposit TiO₂-ZAL

Preparasi adsorben karbon aktif terintegrasi TiO₂ dengan metode *mechanical mixing* dilakukan sebagai berikut:

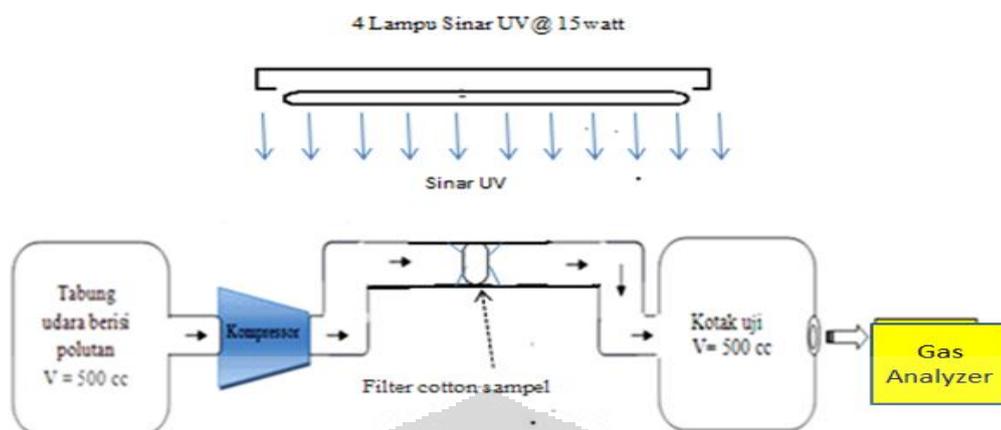
1. Melarutkan TiO₂ dengan variasi massa loading 10%, 15%, 20%, dan 25% dari katalis komposit ke dalam 100 ml air demin.
2. Zeolit Alam Teraktifasi yang telah dipreparasi dicampurkan dengan sol fotokatalis TiO₂ yang dibuat pada proses di atas.
3. Campuran tersebut dipanaskan pada suhu 80⁰C sambil diaduk dengan menggunakan *magnetic stirrer* hingga tidak mengandung air
4. Dikalsinasi selama 2 jam pada suhu 400⁰C agar TiO₂ terdispersi secara merata pada seluruh permukaan zeolit alam teraktifasi. Selain itu, pada suhu tersebut struktur TiO₂ yang terbentuk adalah anastase.

3.7.3 Cetak Katalis Komposit Sesuai Filter Cotton.

Katalis komposit akan dibentuk dalam berbagai bentuk, hal ini bertujuan untuk mendapatkan struktur bentuk terbaik yang dapat mengoptimalkan degradasi NO₂. Katalis komposit yang telah terbentuk dicetak sesuai dengan bentuk *filter cotton*. Pencetakan dilakukan secara manual dengan alat cetak yang disesuaikan dengan *filter cotton* yang tersedia dan cocok dengan desain masker. Katalis komposit yang telah dicetak dimasukkan ke dalam *filter cotton*.

3.8 Uji Kinerja Alat

Katalis komposit TiO₂-ZAL akan dipasang pada cartridge pada alat yang akan diuji kinerjanya dalam mendegradasi polutan. Pengujian kinerja katalis komposit dilakukan dalam sebuah rangkaian alat uji dengan desain sebagai berikut:



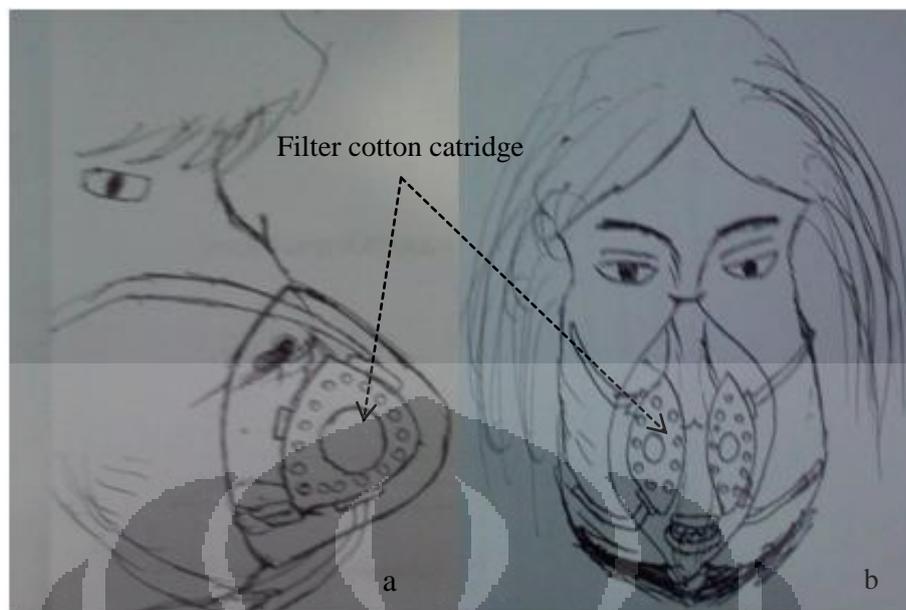
Gambar 3. 4 Skema Pengujian Kinerja Alat

Pengujian kinerja katalis komposit $\text{TiO}_2\text{-ZAL}$ akan dilakukan dengan prosedur sebagai berikut:

1. Tabung dengan volume 500 cm^3 akan diisi dengan polutan yang akan divariasikan jenisnya.
2. Polutan udara dalam tabung akan dialirkan ke dalam rongga yang telah diisi dengan filter cotton sampel dengan menggunakan kompresor dan kecepatan udaranya diatur sesuai dengan kecepatan udara pernafasan inspirasi.
3. Polutan udara akan melalui filter cotton sampel yang berisi ZAL lalu mengalami degradasi dengan bantuan sinar UV yang didapat dari penyinaran 4 lampu UV 15 Watt.
4. Udara yang lebih bersih akan mengalir ke kotak uji dengan volume 500 cm^3 .
5. Dalam selang waktu tertentu udara dalam kotak uji akan diambil dengan *syringe* untuk diuji secara kualitatif dan kuantitatif dalam *Gas Analyzer*.

3.9 Prototipe Alat

Desain dari masker kesehatan serta bentuk dari filter cotton sebagai cartridge filter masker dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 3. 5 Prototipe tampak samping (a), Prototipe tampak depan (b)

Masker ini memiliki keseluruhan bodi transparan dan tembus cahaya, hal ini bertujuan untuk memudahkan cahaya matahari dapat dengan mudah masuk ke dalam cartridge yang berisi *cotton filter* ZAL. Dengan struktur cartridge berada di samping kiri dan samping kanan masker membuat penyerapan dan degradasi polutan NO_2 menjadi lebih maksimal apabila hanya dari satu sisi.

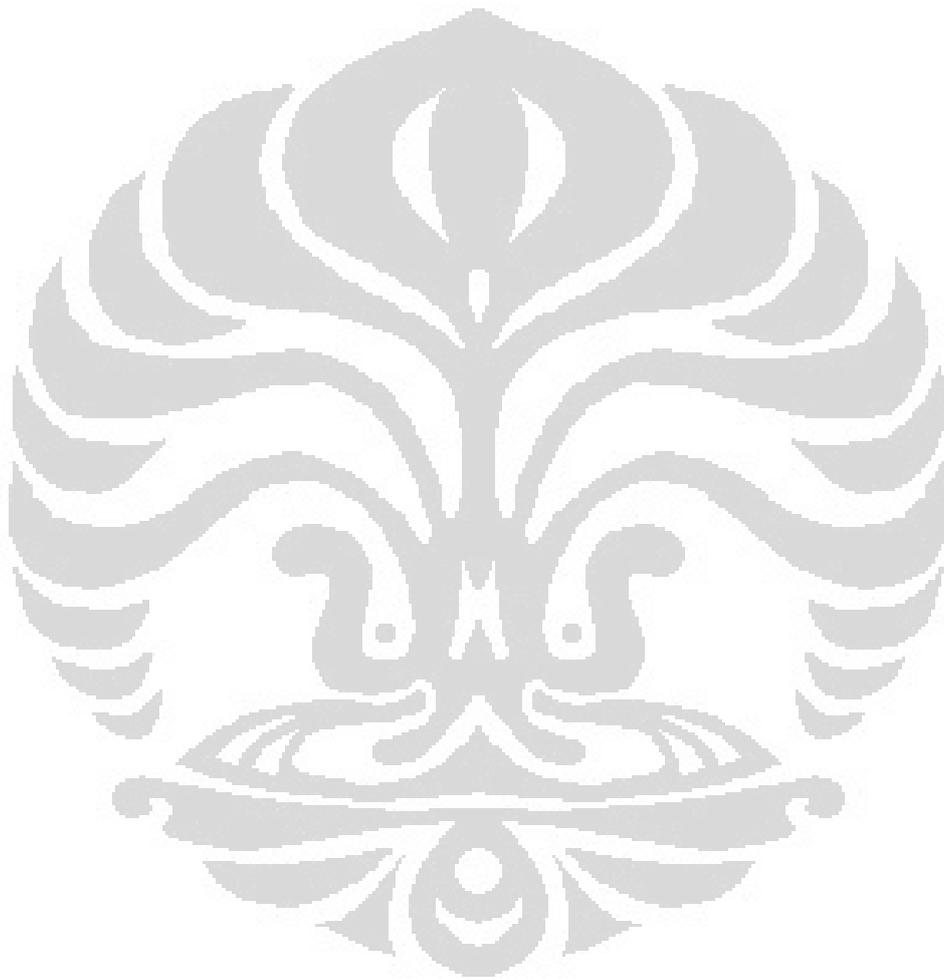
Prototipe ini juga didesain dengan kemudahan isi ulang cotton filter apabila sudah cukup jenuh dengan sistem buka tutup dan aliran udara yang terus terjaga masuk sesuai dengan aliran udara pernafasan manusia.

Cartridge masker terdiri dari 2 bagian yang berada di samping kanan dan samping kiri masker dengan diameter 7 cm. Desain cartridge dapat dilihat pada gambar 3.5. Di dalam cartridge terdapat *cotton filter* yang terdiri dari katalis komposit TiO_2 -ZAL.

Mekanisme kerja masker dalam mendegradasi NO_2 adalah sebagai berikut:

1. Masker yang transparan akan mendapatkan asupan sinar UV langsung dari sinar matahari sehingga katalis komposit bisa aktif dalam proses degradasi NO_2
2. Polutan yang berupa partikulat akan tersaring pada filter dan zeolit dan akan terdifusi ke TiO_2

3. Polutan yang berupa gas akan terus masuk ke dalam filter dan akan terdegradasi secara fotokatalitik oleh katalis komposit TiO_2 -ZAL yang sudah aktif.
4. Udara yang keluar dari filter akan menjadi bersih sehingga aman untuk dihirup manusia.



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Proses penelitian ini meliputi tahap aktivasi zeolit alam Lampung, tahap integrasi zeolit alam Lampung dengan TiO_2 , tahap pembuatan ruang uji, tahap adsorpsi dan fotokatalis gas NO_x , dan tahap uji masker dengan emisi gas buang kendaraan. Analisa-analisa yang digunakan pada penelitian ini adalah X-Ray Florescence (XRF), X-Ray Diffraction (XRD), serta BET.

4.1 Hasil Preparasi Zeolit

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.

Pada tahap awal, dilakukan pada aktivasi zeolit adalah proses pelarutan oksida pengotor dengan merendam zeolit alam Lampung dalam larutan HF 2% selama 20 menit yang disertai dengan pengadukan secara terus menerus. Langkah selanjutnya adalah proses dealuminasi atau proses pelarutan unsur aluminium dengan merefluks zeolit alam Lampung dengan 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.

Pertama-tama zeolit alam Lampung digerus dalam ukuran 0,15-0,2 mikrometer. Dalam proses aktivasi terdapat beberapa perubahan yang dapat langsung diamati secara visual. Pada proses pelarutan oksida pengotor menggunakan larutan HF 2% menimbulkan larutan berwarna keruh hijau keabu-abuan keruh dan endapan zeolit. Hal ini disebabkan pengotor-pengotor oksida logam seperti Kalium, Kalsium, Titanium, Besi larut bersama dengan HF 2%. Selanjutnya proses dealuminasi dengan menggunakan larutan HCl 6 M terjadi perubahan warna dari larutan putih keruh menjadi larutan kuning pekat. Hal ini

menunjukkan bahwa terjadi reaksi antara HCl dengan kandungan logam pada Zeolit tersebut. Sesuai dengan teori bahwa HCl akan berubah menjadi kuning apabila terkontaminasi kandungan logam.

Sedangkan pada perendaman zeolit alam Lampung dengan larutan NH_4Cl 0,1 M, larutan yang awalnya bening menjadi larutan hijau. Hal tersebut disebabkan karena oksida aluminium yang bereaksi dengan klorin akan berubah menjadi $\text{AlCl}_x(\text{OH})_y$ yang mengandung hidrat dan berwarna kehijauan.

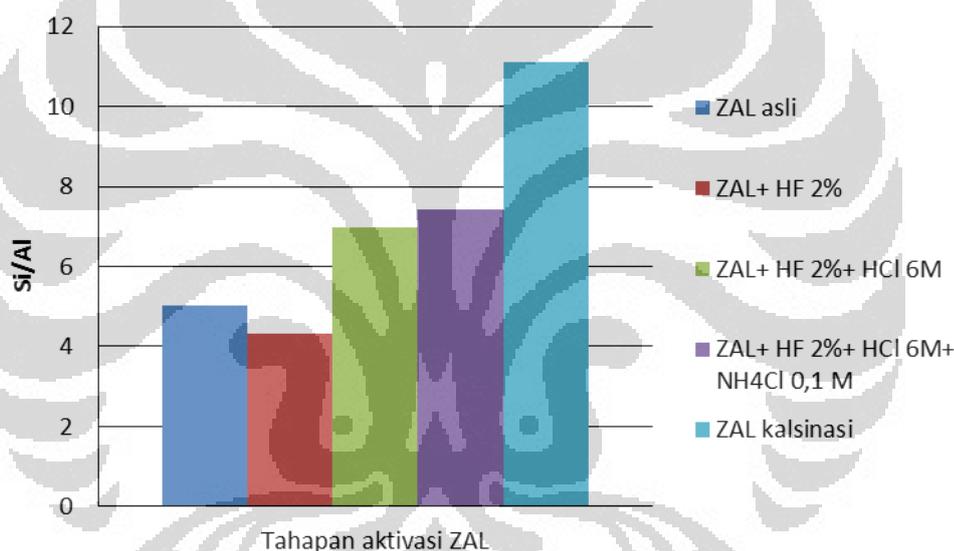
Zeolit yang telah melewati proses preparasi diproses lebih lanjut dengan proses kalsinasi. Zeolit hasil kalsinasi memiliki tampilan yang lebih putih dan lebih terang daripada zeolit sebelum dikalsinasi. Warna kebiruan dan kehijauan pada zeolit sebelum dilakukan preparasi dikarenakan adanya kandungan air (hidrat) yang terikat di dalam struktur zeolit. Setelah dikalsinasi maka kandungan hidrasi sudah dihilangkan sehingga warnanya menjadi lebih putih dan bersih.

4.1.1 Kandungan Oksida dalam Zeolit

Karakteristik zeolit menggunakan XRF memberikan data mengenai kandungan oksida-oksida logam dalam zeolit. Dalam penelitian ini, zeolit yang digunakan adalah zeolit alam Lampung yang terbentuk langsung di alam, sehingga banyak oksida-oksida logam yang terkandung didalamnya. Data pengukuran XRF dapat memberikan informasi jumlah unsur Silika dan Aluminium dalam zeolit serta oksida lainnya yang menjadi pengotor. Setelah proses preparasi dengan menggunakan metode dan asam yang diajukan pada penelitian ini, dihasilkan zeolit dengan kandungan Si dan Al, serta oksida pengotor yang berbeda-beda. Berikut ini adalah Rasio Si/Al tiap tahap aktivasi zeolit alam Lampung

Tabel 4. 1. Rasio Si/Al tiap tahap aktivasi zeolit alam Lampung

No	Tahap Aktivasi	Silika (% wt)	Alumunium (% wt)	Si/Al
1	ZAL asli	70,19	13,99	5,01
2	ZAL + HF 2%	68,35	15,78	4,33
3	ZAL + HF 2% +HCl 6 M	72,34	10,37	6,97
4	ZAL + HF 2% +HCl 6 M + NH ₄ Cl 0,1 M	80,55	10,84	7,43
5	ZAL + HF 2% +HCl 6 M + NH ₄ Cl 0,1 M + proses kalsinasi	90,76	8,18	11,09



Gambar 4. 1 Rasio Si/Al pada tahap aktivasi zeolit alam Lampung

Berdasarkan pada Gambar 4.1 pada tahapan proses dealuminasi menggunakan larutan HCl 6 M terjadi peningkatan rasio Si/Al yang cukup besar yaitu 4,33 menjadi 6,97 dan terjadi penurunan komposisi unsur Alumunium dari 15,78 (%wt) menjadi 10,37 (%wt). Pada tahap dealuminasi, HCl 6 M berfungsi untuk melarutkan oksida logam (AlO₄)⁵⁻ dengan membuka pori-pori zeolit menjadi berukuran pori lebih besar sehingga oksida alumunium dari kerangka dalam kristal akan keluar dan mendorong oksida alumunium keluar dari struktur zeolit dan terlaurt dalam larutan HCl 6 M.

Pada tahapan perendaman zeolit alam Lampung dengan larutan NH_4Cl 0,1 M terjadi peningkatan rasio Si/Al dari 6,97 menjadi 7,43 dan peningkatan unsur alumunium dari 10,37 (%wt) menjadi 10,84 (%wt). Tahap ini berfungsi untuk memperkuat struktur baru yang terbentuk dari proses dealumiasi.

Pada tahapan proses kalsinasi pada temperatur 500 °C zeolit terjadi peningkatan rasio Si/Al dari 7,43 menjadi 11,09. Pada tahap ini terjadi penurunan komposisi unsur silika dan alumunium. Hal ini 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.

Dari hasil uji ini dapat disimpulkan bahwa ternyata proses *treatment* zeolit alam Lampung dapat meningkatkan Si/Al zeolit alam. Sampai 2 kali lipat. Hal ini terutama diakibatkan oleh adanya proses dealuminasi dengan larutan HCl dalam rangkaian proses *treatment* zeolit alam Lampung. Dealuminasi adalah proses lepasnya atom Al dari kerangka zeolit. Dengan lepasnya atom Al, maka jumlah situs asam dari zeolit akan meningkat. Artinya, keaktifan dari zeolit itu sendiri akan bertambah karena situs asam zeolit itu tidak lain merupakan sisi aktif dari zeolit itu sendiri. Proses dealumiasi dilakukan dengan melakukan penambahan larutan HCl karena larutan asam ini memiliki kemampuan untuk mengekstrak Al dengan cara bereaksi dengan Al (Weitkamp, 1999).

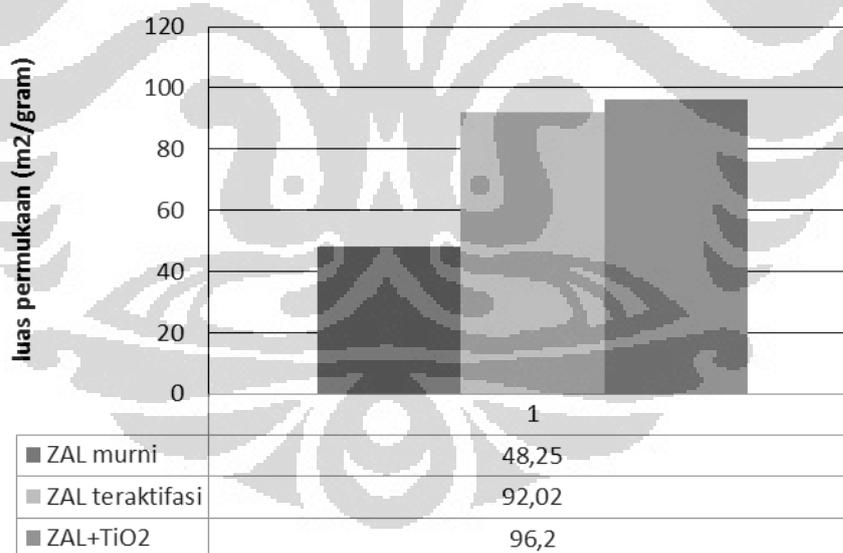
Zeolit yang baik digunakan sebagai adsorben harus memiliki rasio Si/Al dari 10-100 (Rini, 2010). Nilai Si/Al ini juga akan menentukan sifat dari zeolit. Jika Si/Al nilainya semakin tinggi maka zeolit akan cenderung bersifat hidrofobik dan non-polar, sedangkan jika nilai Si/Al-nya semakin rendah maka zeolit akan semakin bersifat hidrofilik dan polar (Saputra, 2006).

Penelitian ini memiliki tujuan agar zeolit alam yang telah teraktifasi ini dapat mengadsorpsi dengan baik gas NO_2 (Nitrogen dioksida) yang berasal dari emisi gas buang kendaraan dengan baik. NO_2 merupakan senyawa polar (*Chemwiki.ucdavis.edu*), hal ini menuntut penelitian ini untuk mendapatkan zeolit alam dengan perbandingan Si/Al yang rendah karena seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya, semakin rendah perbandingan Si/Al pada zeolit alam Lampung dalam kisaran 10-100 akan semakin bersifat polar juga zeolit alam

lampung tersebut dan akan dapat mengadsorpsi gas NO_2 dengan baik pula. Namun Nilai Si/Al dari ZAL sebelum diaktifasi terlalu rendah yaitu hanya 5,02 karena Oleh karena itu diperlukan *treatment* untuk meningkatkan Si/Al-nya. Nilai Si/Al yang didapat setelah dilakukan *treatment* adalah 11,09. Angka tersebut cukup baik untuk zeolit alam Lampung sebagai adsorben, karena mendekati nilai terendah sepuluh (interval 10-100) sebagai syarat adsorben yang baik dan bersifat polar serta hidrofilik.

4.1.2 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 terintegrasi dengan TiO_2 . Dibawah ini adalah analisa menggunakan metode BET pada zeolit-zeolit yang sudah disebutkan di atas.



Gambar 4. 2 Luas Permukaan Sampel

Pada Gambar 4.2 menunjukkan peningkatan luas permukaan zeolit alam Lampung murni dengan zeolit alam Lampung yang telah dilakukan aktivasi dari 48,25 m^2/gram menjadi 92,02 m^2/gram . Perendaman dalam larutan HF 2% akan melarutkan oksida pengotor yang terdapat pada zeolit alam Lampung,

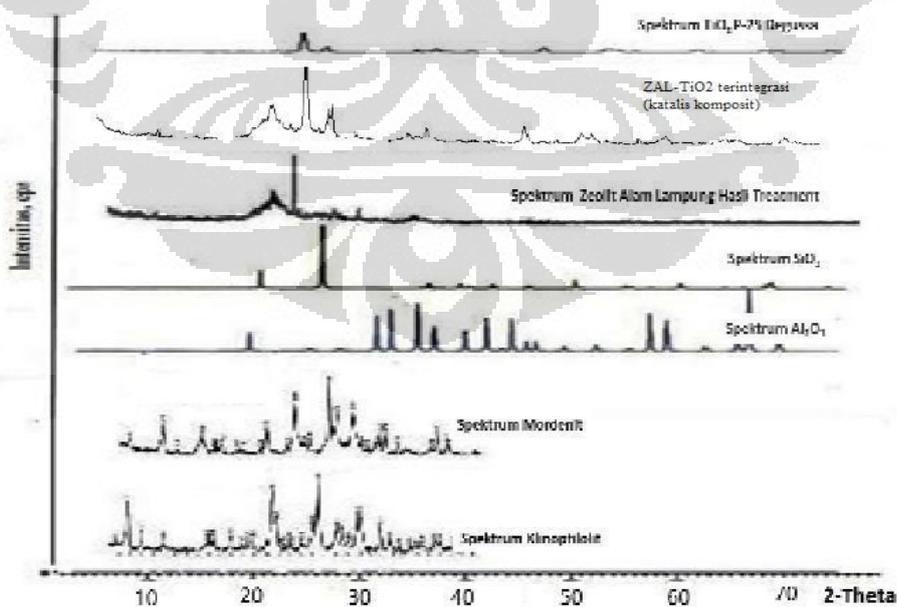
perendaman dalam larutan NH_4Cl 0,1 M akan melarutkan oksida pengotor yang masih tertinggal pada proses dealuminasi melalui proses pertukaran ion sehingga dapat menjadikan ruang kosong dalam kristal-kristal. Proses kalsinasi pada suhu 500°C akan menguapkan molekul air yang terdapat dalam kristal zeolit sehingga terbentuk suatu rongga dengan permukaan yang lebih besar. Peningkatan luas permukaan pada zeolit setelah dipreparasi disebabkan terbukanya pori-pori pada struktur zeolit alam (Rasyid, 2011) dan ZAL yang diintegrasikan dengan TiO_2 memiliki nilai luas permukaan paling tinggi, $96,2 \text{ m}^2/\text{gram}$. Hasil karakterisasi BET di atas sesuai dengan teori yang dinyatakan oleh Durgakumari (2002) yang menyatakan bahwa multikomponen dalam suatu komposit akan membuat partikel dari masing-masing komponen akan saling menempel, dan luas permukaan pun bertambah. Analisis selanjutnya adalah mengenai volume pori dari ZAL teraktivasi dengan volume pori katalis komposit ZAL- TiO_2 dimana dari hasil karakterisasi BET pada Lampiran a dan b menunjukkan bahwa volume pori dari ZAL-T adalah $2,85 \cdot 10^2 \text{ cc/g}$, lebih besar daripada ZAL- TiO_2 $1,85 \cdot 10^2 \text{ cc/g}$. Hal ini disebabkan ZAL- TiO_2 melewati proses sonikasi yang membuat volume dari katalis komposit menjadi lebih kecil daripada ZAL-T. Analisis lain yang didapatkan dari karakterisasi BET ini adalah perbandingan ukuran pori. ZAL-T memiliki ukuran pori sebesar $69,3 \text{ \AA}$ lebih kecil daripada ZAL- TiO_2 yang memiliki ukuran pori sebesar $84,9 \text{ \AA}$. Hal ini disebabkan karena ZAL terintegrasi dengan TiO_2 yang menyebabkan pori ZAL dengan pori TiO_2 terakumulasi. Maka dapat disimpulkan bahwa ZAL-T memiliki volume lebih besar dan ukuran pori yang lebih kecil daripada ZAL- TiO_2 .

4.2 Modifikasi Zeolit Alam Lampung dengan TiO_2

Zeolit alam Lampung yang telah teraktivasi dengan TiO_2 Degussa P-25 dengan berbanding 80:20 (Gondang, 2011). TiO_2 dilarutkan dalam air denim dan dilakukan sonikasi. Sonikasi bertujuan untuk memecah partikel padatan menjadi lebih kecil dengan bantuan gelombang ultrasonik. Untuk dapat mengetahui kandungan dari TiO_2 pada katalis komposit yang telah diaktivasi dilakukan karakterisasi XRD (X-Ray Diffraction). Selain itu, dari data XRD, juga dapat dihitung kristalinitas dan komposisi kristal.

Gambar 4.3 adalah gambar yang menunjukkan spektrum-spektrum yang dihasilkan oleh material yang berbeda-beda. Tiga spektrum teratas merupakan spektrum dari material yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu TiO₂ P-25 Degussa (Gambar 4.3a), katalis komposit TiO₂-ZAL (Gambar 4.3b) dan ZAL-T (Gambar 4.3c). Katalis komposit yang dianalisis dengan XRD ini memiliki komposisi 10% TiO₂, 90% ZAL-T. Kemudian, tiga spektrum berikutnya adalah spektrum-spektrum referensi yang menunjukkan karakteristik spektrum kristal SiO₂ (Gambar 4.3d), kristal Al₂O₃ (Gambar 4.3e), dan struktur klinoptilolit (Gambar 4.3f). Ketiga spektrum referensi tersebut digunakan sebagai spektrum pembanding bagi spektrum katalis komposit dan spektrum katalis komposit dan spektrum ZAL-T. Berikut ini adalah analisis untuk spektrum katalis komposit TiO₂-ZAL:

- Pada Gambar 4.3, yaitu pada spektrum TiO₂-ZAL terlihat bahwa peak yang muncul di area $\theta \geq 25^\circ$ adalah peak milik TiO₂ sesuai dengan referensi *peak* dari TiO₂ P-25 Degussa pada gambar 4.3a. Pada TiO₂ P-25 Degussa, peak yang muncul adalah peak anatase yang karakteristiknya berada pada sudut difraksi (2-Theta) 25,4°; 38,1°; 48,2°; 53,9°; 55,1° (Ngamsoparasiriskun, 2010).



Gambar 4. 3 Hasil Karakterisasi XRD

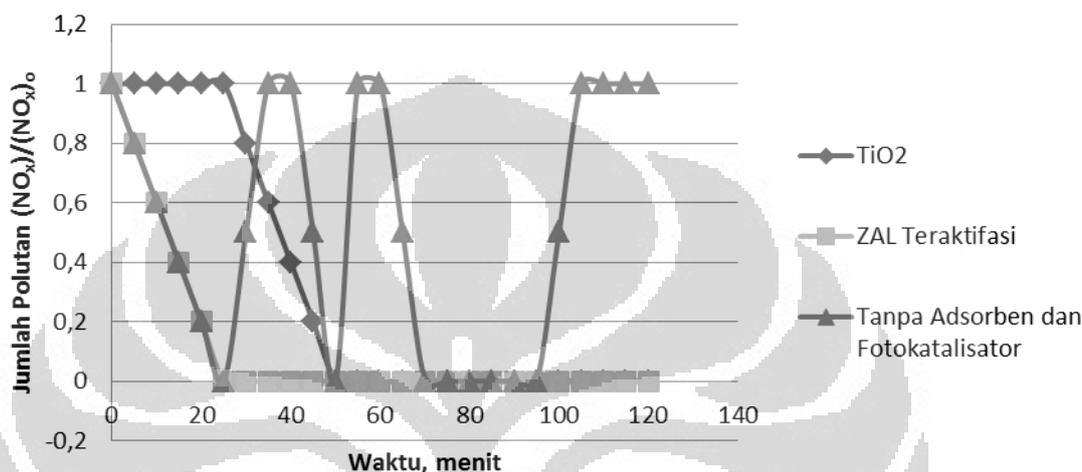
- Pada Gambar 4.3 yaitu pada spektrum ZAL-TiO₂ terlihat adanya *peak* yang muncul pada area $2\theta=23^\circ$. Peak tersebut adalah *peak* dari ZAL. Hal ini dikuatkan dengan gambar 4.3c, spektrum Zeolit Alam Lampung hasil *treatment* difraksi pada sudut 10° , 23° , dan 30° (Orha, 2010).
- Pada Gambar 4.3c yaitu pada spektrum Zeolit Alam Lampung. Hasil *Treatment* terlihat adanya peak-peak yang muncul di 2θ 20° , 23° , 30° , 36° . Jika dibandingkan dengan spektrum referensi klinoptilolit dan mordenit maka spektrum Zeolit Alam Lampung memiliki karakteristik *peak* tertinggi yang sama dengan klinoptilolit. Berdasarkan referensi juga telah dinyatakan bahwa zeolit alam yang memiliki peak pada 10° , 23° , dan 30° adalah zeolit dengan struktur klinoptilolit (Orha, 2010). Dapat disimpulkan bahwa zeolit alam Lampung yang digunakan adalah zeolit berstruktur klinoptilolit. Kemudian untuk *peak* yang muncul di 2θ 20° , 23° , dan 36° juga menunjukkan bahwa ZAL-T yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kristal SiO₂ dan Al₂O₃ yang tidak lain merupakan komponen penyusun utama dari zeolit.

4.3 Pengaruh Adsorpsi Terhadap Proses Eliminasi Gas NO₂

Dalam penelitian ini, tujuan yang ingin dicapai adalah mengeliminasi gas NO₂ dengan menggunakan mekanisme adsorpsi dan fotokatalis. Untuk proses adsorpsi digunakan adsorben zeolit alam Lampung yang telah di-*treatment*, sedangkan untuk proses fotokatalis, digunakan fotokatalisator TiO₂ Degussa P-25. Pengujian adsorpsi dan fotokatalis dilakukan dalam satu jenis uji emisi gas buang kendaraan. Pada proses uji ini, dilakukan pengamatan terhadap perubahan konsentrasi gas NO₂ dari posisi awal masukan dan posisi keluaran gas setelah melewati katalis komposit. Kinerja adsorben dan fotokatalisator tetap diamati dengan membuat grafik C/C_0 Vs waktu, dengan C adalah konsentrasi gas NO₂ tiap selang waktu tertentu sedangkan C₀ adalah konsentrasi awal polutan.

Pada grafik dibawah ini dapat kita ketahui bahwa, ZAL teraktifasi (Si/Al=11,09) lebih cepat mengeliminasi NO₂. Hal ini ditandai dengan paparan NO₂ yang sudah bernilai nol pada menit ke-25, dibanding dengan TiO₂ yang baru mencapai titik nol di menit ke 50. Fenomena yang ditunjukkan oleh kurva ZAL

sejalan dengan hasil yang telah dilakukan sebelumnya yang menyatakan bahwa zeolit merupakan adsorben yang memiliki performa sangat baik dalam mengadsorpsi NO_2 (Iman, 2011; Macala, 2007; Panov, 2010). Kurva TiO_2 juga menunjukkan bahwa konsentrasi NO_2 yang kecil menyebabkan potensi bertemunya molekul gas NO_2 dengan radikal hidroksil semakin rendah (C.H. Ao, 2005).

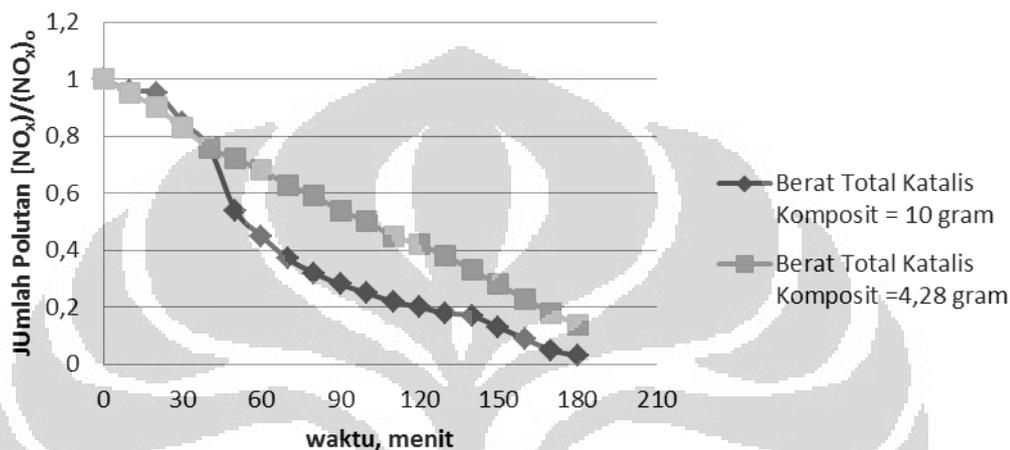


Gambar 4. 4 Grafik Pengaruh Variasi Bahan Pengeliminasi Polutan terhadap Eliminasi Konsentrasi NO_x

Kurva “tanpa adsorben dan fotokatalisator” memiliki tren yang naik turun pada $t < 50$ menit. Hal ini mungkin terjadi karena dalam selang waktu 50 menit, kondisi eksperimen belum stabil. Prosedur analisis dari *gas analyzer* yaitu menghisap gas polutan yang terdapat di kotak uji, kemudian dianalisis di mesin *analyzer*, lalu dialirkan kembali ke kotak uji. Penyebab konsentrasi NO_2 yang sudah mencapai angka nol pada menit ke-25 yaitu karena gas polutan dihisap seluruhnya oleh gas analyzer. Kemudian pada menit ke-40 kembali ke nilai konsentrasi awalnya. Oleh karena itu, data eksperimen pada $t < 40$ menit tidak diperhitungkan pada penelitian ini. kemudian, terlihat pada menit ke-100 sampai dengan 120. Konsentrasinya mulai terlihat stabil atau tidak berubah. Hal ini menunjukkan bahwa sebenarnya filter cotton tanpa adsorben dan fotokatalisator tidak dapat mengeliminasi gas NO_2

4.4 Pengaruh Berat Total Katalis Komposit terhadap Proses Eliminasi Gas NO₂

Dalam penelitian ini, akan dianalisis pula pengaruh variasi berat total katalis terhadap kinerja katalis komposit. Katalis komposit yang digunakan adalah ZAL- TiO₂ 10%. Variasi berat katalis yang digunakan yaitu 4,28 gram dan 10 gram. Konsentrasi awal gas NO₂ 4 ppm



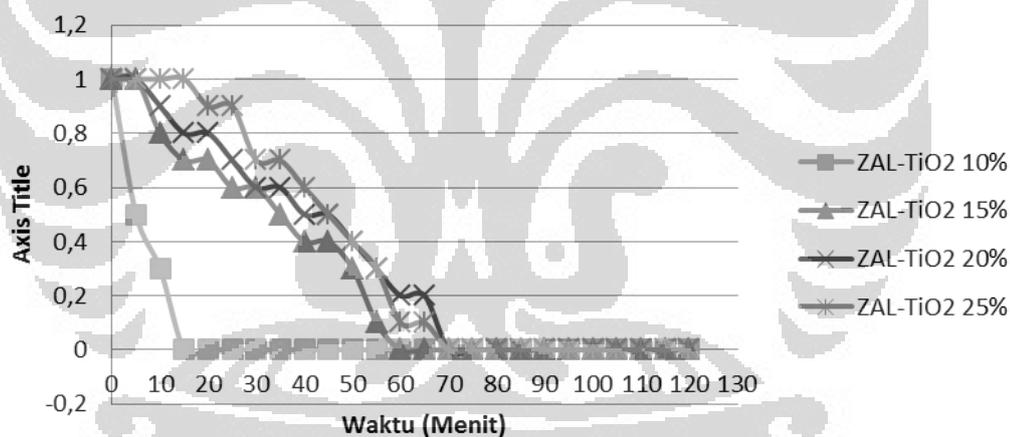
Gambar 4. 5 Grafik Pengaruh Massa Total Katalis Komposit terhadap Eliminasi konsentrasi GasNO₂. Katalis Komposit yang digunakan adalah TiO₂ 10% - ZAL 90% dengan berat total 10 gram dan 4,28 gram. Gas yang digunakan adalah NO₂ dengan konsentrasi awal sebesar 4 ppm

Dari Gambar 4.5, dapat diketahui bahwa variasi massa katalis komposit berat katalis komposit berpengaruh pada kinerja katalis komposit dalam mengeliminasi polutan. Katalis komposit yang memiliki massa lebih besar akan memiliki kinerja yang lebih baik dalam mengeliminasi polutan. Hal ini berhubungan dengan mekanisme itu sendiri, sampai batas tertentu, semakin berat katalis komposit yang digunakan, maka TiO₂ dan ZAL yang melekat pada filter cotton juga akan semakin banyak. Hal ini mengisyaratkan semakin banyaknya agen pengeliminasi polutan, baik itu adsorben maupun fotokatalis. Mekanisme adsorpsi dan fotokatalis ini akan saling bersinergi untuk dapat meningkatkan persentase eliminasi polutan.

4.5 Pengaruh Komposisi Katalis Komposit terhadap Proses Eliminasi Gas NO₂

Dalam penelitian ini, dianalisis pengaruh komposisi katalis komposit terhadap proses polutan. Terdapat empat macam variasi komposisi katalis komposit dengan massa total yang sama yaitu 10 gram. Konsentrasi awal dari tiap variasi juga dibuat seminimal mungkin perbedaannya antara variasi yang satu dengan variasi yang lain agar bisa dibandingkan. Hal tersebut diperlukan karena tujuan utama dari variasi ini adalah untuk mengetahui pengaruh *loading* (jumlah) TiO₂ pada katalis komposit terhadap kinerja katalis komposit dalam mengeliminasi polutan.

Masing-masing variasi juga diuji kemampuan degradasi gas NO₂ yang diukur secara simultan. Berikut ini adalah hasil uji masing-masing variasi terhadap gas NO₂



Gambar 4. 6 Grafik Pengaruh Komposisi Katalis Komposit TiO₂-ZAL terhadap Degradasi Eliminasi Konsentrasi NO₂. Berat Total Katalis Komposit yang digunakan adalah 10 gram dan polutan gas NO₂ awal sebesar 4 ppm untuk masing-masing sampel komposisi Katalis Komposit.

Pada Grafik di atas, dapat dilihat bahwa komposisi katalis komposit yang paling cepat dalam mendegradasi gas NO₂ adalah katalis komposit dengan komposisi ZAL- TiO₂ 10%. Komposisi ini dapat mendegradasi gas NO₂ dengan paparan awal 4 ppm dalam waktu kurun waktu 15 menit. Secara berturut-berturut komposisi katalis ZAL- TiO₂ 15%, ZAL- TiO₂ 20%, dan ZAL- TiO₂ 25%.

membutuhkan waktu 35 menit, 60 menit, 70 menit dan 70 menit. Komposisi ZAL- TiO₂ 20%, dan ZAL- TiO₂ 25% membutuhkan waktu yang paling lama untuk mengeliminasi gas NO₂ sampai 0 ppm.

Grafik ini menunjukkan peranan adsorben dan fotokatalisator dalam mengeliminasi polutan NO₂ dengan fotodegradasi. Mekanisme fotokatalis bersinergi dengan mekanisme adsorpsi dalam mengeliminasi polutan (Matos, 2010). Mekanisme fotodegradasi, adalah proses secara simultan proses adsorpsi dan fotokatalis, dimana polutan gas NO₂ yang sudah teradsorpsi dan menempel pada ZAL akan didegradasi dengan proses fotokatalis.

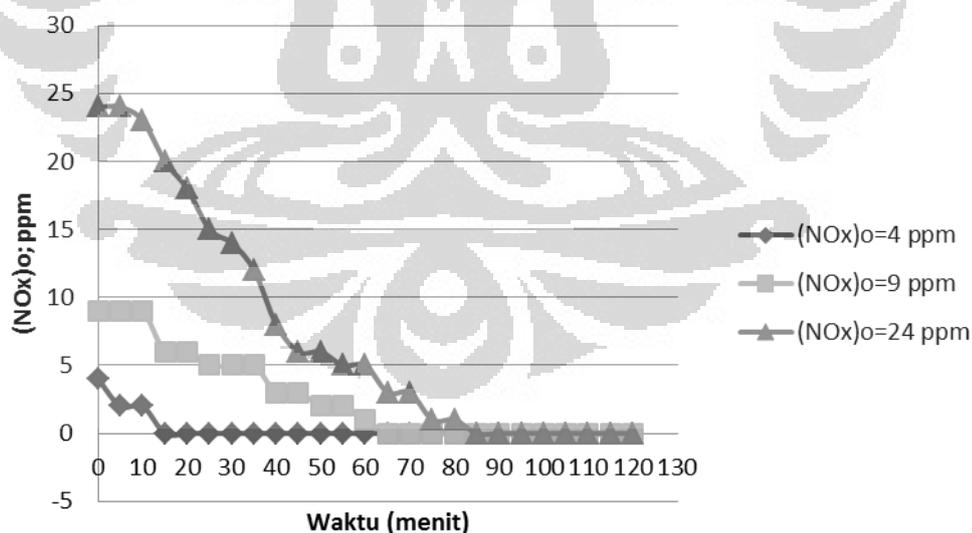
Berdasarkan tren grafik yang terdapat pada grafik di atas, dapat diketahui bahwa komposisi *loading* TiO₂ terkecil pada katalis komposit (10%) menghasilkan kinerja tercepat dalam proses degradasi NO₂. Hal ini dapat disimpulkan bahwa semakin banyak *loading* TiO₂ dalam katalis komposit akan menurunkan kinerja degradasi tersebut. Hal tersebut terkait dengan teori yang mengatakan bahwa kenaikan *loading* TiO₂ pada komposit akan menciptakan agregat yang besar dari partikel TiO₂ di permukaan adsorben, sehingga akan mengurangi area permukaan aktif dari adsorben yang akan dilewati oleh gas polutan NO₂. Hal ini akan mengakibatkan daya adsorpsi akan berkurang dan polutan yang berada pada permukaan zeolit pun semakin berkurang. Semakin berkurangnya polutan yang menempel pada permukaan zeolit akan menyebabkan semakin berkurangnya objek yang akan di degradasi lewat proses fotokatalis (Durgakumari, 2002). Semakin banyak *loading* katalis TiO₂ akan meningkatkan laju fotodegradasi, tetapi ketika sampai pada level tertentu, akan menimbulkan ruang yang tidak digunakan secara efektif untuk proses adsorpsi polutan dan selanjutnya akan berdampak pada berkurangnya gas polutan yang akan didegradasi oleh fotokatalisator itu sendiri.

Selain melihat aspek dari efektivitas dalam mendegradasi polutan untuk menentukan komposisi katalis komposit, perlu dilihat juga aspek-aspek lain yang berhubungan dengan penggunaan dari katalis komposit itu sendiri. Karena katalis komposit ini digunakan untuk aplikasi masker kesehatan, maka diperlukan analisis aspek kesehatan dan juga aspek *lifetime* dari katalis komposit. Aspek pertama yang perlu dianalisis adalah aspek kesehatan, dimana keberadaan

komposit yang terdiri dari adsorben dan fotokatalis itu tidak hanya mampu mengadsorp polutan tetapi juga dapat mendegradasi polutan itu secara *in situ*. Jika masker hanya terdiri dari adsorben saja, tentu polutan tidak akan dapat terdegradasi. Aspek kedua yang perlu dianalisis adalah aspek *lifetime filter cotton* masker itu sendiri. Komposisi katalis komposit yang terdapat pada *filter cotton* terdiri dari adsorben dan fotokatalisator akan menyebabkan *lifetime* lebih lama karena polutan teradsorp dapat segera didegradasi oleh fotokatalis, sehingga adsorben pun menjadi tidak cepat jenuh, dan *lifetime* masker pun menjadi lebih lama. Selain itu, dengan rancangan desain masker yang ada, maka proses degradasi diharapkan dapat dilakukan proses fotokatalis secara optimal.

4.6 Pengaruh Konsentrasi Awal Gas NO₂ terhadap Proses Eliminasi NO₂

Pada penelitian ini dilakukan analisis pula terhadap pengaruh variasi konsentrasi awal terhadap proses eliminasi polutan. Dalam pengujian ini, katalis komposit yang digunakan adalah komposisi katalis komposit ZAL-TiO₂ 10% dengan variasi konsentrasi polutan awal sebesar 4 ppm, 9 ppm, dan 24 ppm. Dibawah ini adalah grafik hasil penelitian ini.



Gambar 4. 7 Grafik Pengaruh Variasi Konsentrasi Awal Polutan Gas NO_x Terhadap Kinerja Degradasi Katalis Komposit (TiO₂ 10% - ZAL 90%). Dengan Massa Total Katalis Sebesar 10 gram.

Berdasarkan Gambar 4.7, terlihat bahwa pada kurva $(NO_2)_0=4$ ppm pada 10 menit awal terjadi penurunan konsentrasi polutan yang cukup signifikan dari 4 ppm menjadi 2 ppm dan terus turun sampai nol ppm pada menit ke 15. Kemudian pada kurva $(NO_2)_0=9$ ppm, 15 menit awal adalah waktu penurunan konsentrasi polutan gas NO_2 yang paling signifikan dari 9 ppm sampai 6 ppm selanjutnya selacara konstan turun per 1 ppm. Pada menit ke-65, polutan gas NO_2 habis terdegradasi oleh katalis komposit. Untuk konsentrasi awal polutan 24 ppm terjadi penurunan yang cenderung konstan dan cepat dari 24 ppm sampai 6 ppm sampai menit ke -45 dan selanjutnya penurunan konsentrasi polutan turun sampai 0 ppm pada menit ke-75. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi awal gas NO_2 akan terdegradasi lebih cepat pada menit-menit awal dan akan semakin berkurang kecepatan degradasinya seiring dengan berkurangnya konsentrasi polutan yang akan didegradasi. Hal ini menunjukkan bahwa ketika konsentrasi awal dari polutan semakin banyak, maka % eliminasinya pun semakin banyak. Hal ini menunjukkan adanya mekanisme dominan yang membantu peningkatan % eliminasi polutan ketika jumlah polutan itu semakin banyak. Karakteristik eliminasi seperti ini merupakan karakteristik yang dimiliki oleh adsorpsi.

Laju adsorpsi suatu gas pada adsorben padatan dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya adalah luas permukaan dari adsorben, sifat gas yang akan di adsorbi, temperatur dan tekanan. Dari keempat faktor tersebut, yang berkaitan langsung dengan jumlah polutan adalah tekanan. Ketika jumlah polutan semakin meningkat, maka tekanan juga akan meningkat. Pada temperatur yang konstan, maka adsorpsi gas juga akan semakin meningkat seiring dengan kenaikan tekanan. Kemudian, pada temperatur yang rendah, misalnya temperatur ruang, dengan kenaikan sedikit tekanan saja mampu meningkatkannya adsorpsi gas dengan sangat signifikan.

4.7 Kinetika Reaksi Eliminasi Gas NO_2 secara Fotokatalitik

Berdasarkan teori yang telah dijelaskan pada bab 2 sebelumnya yang mengatakan bahwa degradasi polutan NO_2 mengikuti mekanisme Langmuir-Hinselwood. Langkah pertama yang harus dilakukan adalah menghitung nilai r_0 untuk setiap konsentrasi awal pada polutan yang berbeda. Dari Gambar 4.7, kurva

tersebut dapat diregresi dan menghasilkan trendline (Gambar 4.8 dengan persamaan kurva berbentuk polinomial pangkat dua seperti berikut:

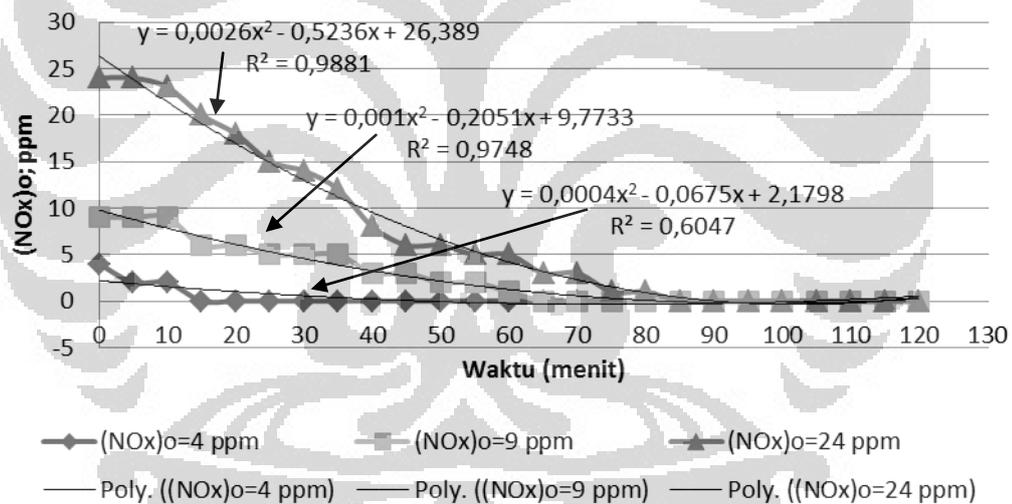
$$y = ax^2 + bx + c \quad (4.1)$$

Jika persamaan 4.1 diturunkan akan menjadi:

$$\frac{dy}{dx} = 2ax + b \quad (4.2)$$

Karena sumbu y pada grafik adalah C (konsentrasi), sedangkan sumbu x pada grafik adalah t (waktu), maka persamaan 4.2 akan menjadi sama dengan persamaan 4.3 berikut:

$$\frac{dC}{dt} = 2at + b \quad (4.3)$$



Gambar 4. 8 Grafik C vs t pada setiap kosentrasi awal gas NO_x

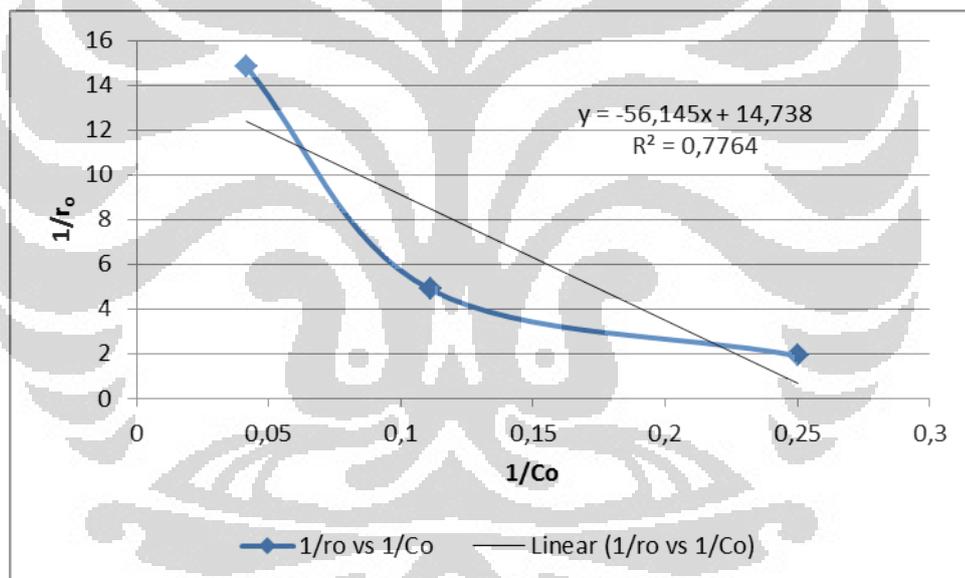
Untuk menghitung r_0 nilai t pada persamaan 4.3 harus disubstitusi dengan 0, sehingga nilai r_0 (ppm/menit) untuk setiap konsentrasi awal (C_0) ppm polutan NO_x

Tabel 4. 2 Nilai r_0 untuk setiap C_0 polutan gas NO₂

Polutan	C_0 NO ₂ (ppm)	r_0 polutan (ppm/menit)

NO ₂	4	0,5236
	9	0,2051
	24	0,0675

Untuk mendapatkan nilai k (konstanta laju reaksi) dan K (konstanta adsorpsi), maka dibuat grafik invers dari r_0 terhadap invers C_0 , seperti yang terlihat pada Gambar 4.9. Begitu juga persamaan linier yang dibentuk oleh grafik dapat dibuat, sehingga nilai k dan K dapat dihitung.



Gambar 4.9 Grafik $1/r_0$ vs $1/[NO_x]_0$

Dengan persamaan linear:

$$y = -56,145x + 14,738 \quad (4.4)$$

dan dihubungkan dengan persamaan 2.24, maka nilai k dan K secara berurutan adalah 0,067 dan 0,262. Sehingga persamaan laju degradasi polutan NO₂ adalah

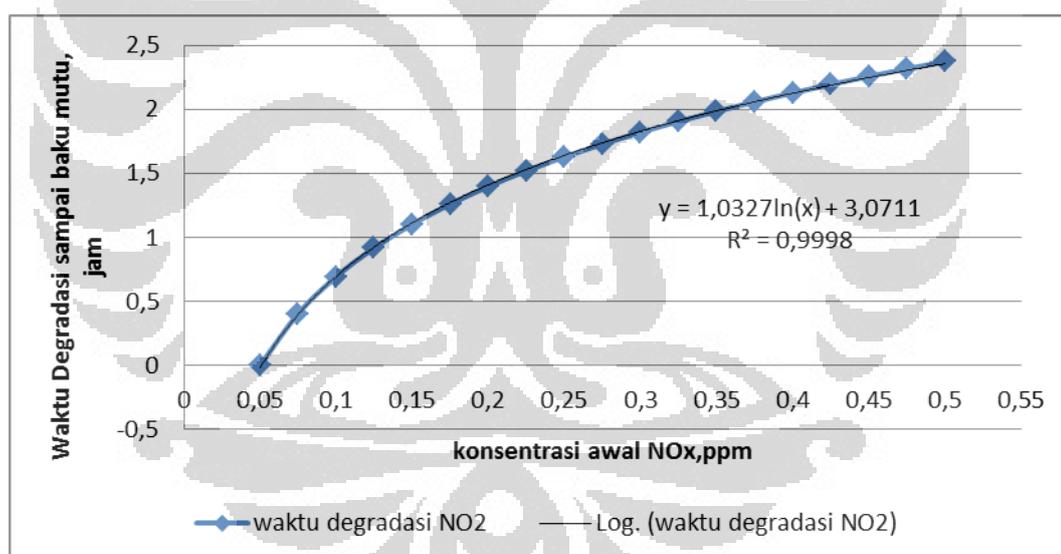
$$r = \frac{dC}{dt} = \frac{(0,017)C}{1+(0,262)C} \quad (4.5)$$

4.8 Perhitungan Waktu Eliminasi

Penelitian ini memiliki tujuan untuk mendegradasi polutan minimal sampai titik baku mutunya, oleh karena itulah perlu dilakukan perhitungan waktu (t_b) yang dibutuhkan oleh masker untuk mengeliminasi polutan sampai ke level baku mutu udara ambient yang bersih. Caranya adalah dengan mengintegalkan persamaan 4.5 laju degradasi yang telah di dapat di sub-bab 4.7. Dari hasil intergral itu sendiri didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$t_d = (58,82 \ln C + 15,4117 C)]_{0,05}^{C_0} \quad (4.6)$$

Dengan memasukkan berbagai nilai C_0 (konsentrasi awal) polutan NO_2 yang merujuk pada variasi konsentrasi polutan di atmosfer, maka waktu yang dibutuhkan oleh masker untuk mengeliminasi NO_x dengan konsentrasi berbeda, dapat dilihat pada gambar di bawah ini



Gambar 4. 10 Grafik Waktu Degradasi Baku Mutu vs Konsentrasi Awal Gas NO_2

Dari kurva yang didapatkan seperti terlihat pada Gambar 4.10 dapat dibuat persamaan waktu degradasi sebagai fungsi dari konsentrasi awal, seperti yang dirangkumkan pada tabel di bawah ini. Dengan menggunakan Persamaan 4.5 Dapat diprediksi waktu yang dibutuhkan oleh masker untuk mengeliminasi gas NO_2 dengan konsentrasi awal yang berbeda-beda dengan melihat pada *trendline* logaritma dari grafik Gambar 4.11, yaitu:

$$y = 1,0327 \ln(C_o) + 3,0711$$

4.9 Analisis Kelayakan Masker

Berdasarkan perhitungan waktu degradasi dari gas NO₂ dengan kadarnya di jalan mencapai 0,15-0,30 ppm di sekitar Stasiun Thamrin, Jakarta (Saepudin, 2005), dibutuhkan waktu 1,1-1,82 jam untuk mengeliminasi gas NO₂ hingga titik baku mutunya, yaitu 0,05 ppm (Dharma,2011). Oleh karena itu, masker ini dinilai masih layak difungsikan sebagai masker kesehatan untuk mendegradasi NO₂. Hal tersebut dikarenakan waktu yang dibutuhkan untuk mendegradasi NO₂ masih memungkinkan dan realistis untuk proses tersebut, sebelum katalis komposit mengalami kejenuhan karena penumpukan pada adsorben Zeolit Alam Teraktifasi.



BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berikut ini adalah kesimpulan yang didapat dari penelitian ini:

1. Komposisi terbaik dalam penelitian ini untuk mengeliminasi gas polutan NO₂ adalah ZAL-TiO₂ 10%
2. Semakin besar massa dari katalis komposit, semakin besar pula keefektifan dari katalis komposit itu dalam mengeliminasi gas NO₂. Dalam penelitian ini terbukti bahwa dengan massa katalis komposit sebesar 10 gram lebih efektif dibanding massa katalis komposit sebesar 4,28 gram.
3. Semakin besar konsentrasi awal polutan juga membuat laju eliminasi polutan semakin besar
4. Persamaan laju degradasi yang didapat adalah:

$$r = \frac{dC}{dt} = \frac{(0,017)C}{1 + (0,262)C}$$

5. Persamaan waktu degradasi tiap polutan sampai ke baku mutu:
 $y = 1,0327 \ln(C_0) + 3,0711$
6. Untuk paparan konsentrasi awal polutan gas NO₂ 0,3-0,15 ppm, dibutuhkan waktu sekitar 1,1-1,82 jam
7. Masker kesehatan yang direkayasa ini cukup layak untuk meneliminasi gas NO₂.

5.2 Saran

Saran yang diajukan oleh penulis untuk penelitian ini adalah:

1. Sebaiknya variasi konsentrasi awal diperbanyak, minimal 7 jenis, agar dari hasil uji tersebut dapat dibuat persamaan laju eliminasinya. Dengan demikian, dapat dihitung waktu yang dibutuhkan oleh masker untuk mendegradasi polutan dengan berbagai macam konsentrasi
2. Sebaiknya, juga dilakukan uji kejenuhan katalis komposit, sehingga *lifetime* dari masker dapat dihitung
3. Sebaiknya, juga dilakukan uji karakterisasi untuk setiap hasil preparasi sampel, untuk mendapatkan data pembanding setiap sampel yang didapat mulai dari ZAL murni, ZAL yang sudah teraktifasi, ataupun ZAL yang sudah diintegrasikan dengan TiO_2
4. Sebaiknya, sampel yang dibuat minimal dalam jumlah 5 kali lipat dari yang diperlukan. Hal ini dibutuhkan karena sampel yang berlebih akan memberikan kemudahan dalam melakukan uji sampel ulang apabila terjadi kesalahan atau data yang didapat tidak meyakinkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. *NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazard : Nitrogen dioxide..* <http://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0454.html> (diakses 17 Maret 2011).
- Anonim. *Nitrogen Oksida (NO_x)*. <http://putraprabu.wordpress.com/2008/12/20/nitrogen-oksida-nox/> (diakses 18 Maret 2011).
- Anonim. *Lalu Lintas Jakarta Lumpuh Total*. <http://unic77.info/tahun-2011-lalu-lintas-jakarta-lumpuh-total.html> (diakses 10 Maret 2011).
- Anonim. *Dampak Nitrogen (NO_x)*. <http://putraprabu.wordpress.com/2008/12/29/dampak-nitrogen-oksida-nox-terhadap-kesehatan/> (diakses 12 Maret 2011).
- Anonim. *Gas Chromatography*. Sheffield Hallam University. <http://teaching.shu.ac.uk/hwb/chemistry/tutorials/chrom/gaschr.htm> (diakses pada 13 April 2011).
- Anonim. *Gas – Liquid Chromatography*. http://en.wikipedia.org/wiki/gas_chromatography (diakses pada 13 April 2011).
- Anonim. *Mechanical Mixing*. <http://www.chem.wisc.edu> (diakses pada 12 April 2012).
- Anonim. *NO_x Photocatalyst*. <http://www.cheme.tudelf.nl> (diakses pada 16 April 2012).
- Anonim. *Potensi dan Pemanfaatan Zeolit di Provinsi Jawa Barat dan Banten*. <http://www.dim.esdm.go.id> (diakses tanggal 25 Oktober 2011).
- Anonim. *Totobobo Mask*. <http://totobobo.com> (diakses pada 16 Juli 2011).
- Alfat, M.A., (2009). *Rekayasa Alat dan Uji Kinerja Katalis Komposit TiO₂-Adsorben Alam untuk Degradasi Polutan Asap Rokok*. *Skripsi*. Universitas Indonesia, pp. 46-50.
- Anwar., Syamsul., (2005). *Distribusi Spesial dan Temporal SO₂ dan NO₂ DKI Jakarta*. Departemen Geofisika dan Meteorologi FMIPA Institut Pertanian Bogor, pp.18-23.
- Apelian, Minas, R., Degnan, T., Fung, A. & Kennedy G. *Process for the dealumination of zeolite Beta*. Us Patent 5200168
- Apriawan., (2010). *Adsorpsi Gas CO pada Kasus Kebakaran Menggunakan Zeolite Alam Teraktivasi*. *Skripsi*. Universitas Indonesia, pp. 38-42.

DAFTAR PUSTAKA (Lanjutan 1)

- Babrauskas, V. & Richard, D., (1992) *A methodology for obtaining and using toxic potency data for fire hazard analysis*. National Institute of Standards and technology, Gaithersburg, MD 20899, USA, pp. 78-80.
- Barker, M.E., (1926). *Gas Mask Development*. Chemical Warfare, Vol.12, No.7, pp.11-15.
- Birnie, M., Riffat, S., Mark Gillot., *Photocatalytic Reactors: Design for Effective Air Purification*. International Journal of Low Carbon Technologies. Vol.1, No.1, pp. 47-58.
- Bismo, S., Slamet., Arbianti, R. (2007). *Modifikasi Zeolit Alam dan Karbon Aktif dengan TiO₂ serta Aplikasinya sebagai Bahan Adsorben dan Fotokatalis untuk Degradasi Polutan Organik*. Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, Depok, p. 3.
- Cejka, J., (2007). *Introduction to Zeolite Science and Practice*. Elsevier B.V, No. 27, p. 3.
- Charles, A.W., (1998). *Safety, Health and Environmental protection*. MGH.
- Chun, O.W., (2008). *Effect of Fe Contents in Fe-AC/TiO₂ Composites on Photodegradation Behaviors of Methylene Blue*. Journal of the Korean Ceramic Society, Vol. 4, No. 6, pp. 324-330.
- Debie, A.K., (2010). *Uji Kapasitas Gas Karbon Monoksida (CO) Menggunakan Oksida Logam dan Karbon Aktif*. Skripsi. Universitas Indonesia, pp. 46-48.
- Depres, J., (2003). *Adsorption and Catalytic Oxidation of Nitrogen Monoxide in Lean Exhaust for Future Automotive DeNO_x Techniques*. Thesis. Univesity Louis Pasteur, pp. 56-59.
- Drago., Russel, S., Burns., Douglas, S., and Lafrenz, T.J., (1996). *A New Adsorption Model of Analyzing gas-Solid Equilibria in Porous Materials*. Departemen of Chemistry, University of Florida, pp. 67-72.
- Fujishima, A., Hashimoto, K., Watanabe, T., (1999). *TiO₂ Photocatalysis, Fundamental and Applications*. Tokyo: BKC, Inc, pp.78-81.
- Foo, K. Y., Hammed, B.H., (2010). *Insight Into Modeling of Adsorption Isotherm System*. Chemical Engineering Journal, No. 156, pp. 2-10.
- Gosink, T., (1983, Jauary 2008). *What Do Carbon Monoxide Levels Mean?*. Alaska Science Forum, No. 588, pp. 3-5.

DAFTAR PUSTAKA (Lanjutan 2)

- Guillaume, E., Rein, G., Rogaume, T., Torero, J.L., (2009). *Analysis of principal gas products during combustion of polyether polyurethane foam at different irradiance levels*. Safety engineering, University of Edinburgh, UK, pp. 34-39.
- Gustafson, R. J., Turner, R. D., Lutz, R.A., Vrijenhoek, R.C., (2006). *Reduction of NO₂ to Nitous Acid on Illuminated Tatinium Dioxide Aerosol Surfaces: Implication for Photocatalysis and Atmospheric Chemistry*. The Royal Society of Chemistry, pp. 3936-3938.
- Hamid, M.A., Rahman, I.A., (2003). Preparation of Titanium Dioxide (TiO₂) Thin Films by Sol Gel Dip Coating Method. *Malaysian Journal of Chemistry*, Vol.5, No.1, pp. 86-91..
- Handoko, D., Setyawan., (2003). *Pengaruh Perlakuan Asam, Hidrotermal, dan Impregnasi Logam Kromium pada Zeolit Alam dalam Preparasi Katalis*. Jember: FMIPA UNEJ, pp. 64-67.
- Hunger, M., Brouwers, H.J.H., M. Ballari., (2008). *Photocatalytic Degradation Ability of Cementitious Materials: A Modeling Approach*. 1st International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites. China, pp. 75-76.
- Huuhtanen, M., (2006). *Zeolite in The Reduction of NO_x in Lean Automotive Exhaust Gas Conditions*. Dissertation. University of Oulu, pp. 83-89.
- Ibadurrohman, M., (2008). *Rekayasa Alat untuk Purifikasi dan Deodorisasi Udara dari Polutan Asap Rokok Menggunakan TiO₂ yang Dimodifikasi dengan Bahan Adsorben*. Skripsi. Universitas Indonesia, pp. 75-80
- Ichiura, H., Kitaoka, T., Tanaka, H., (2002). *Preparation of Composite TiO₂-zeolite Sheets Using a Papermaking Technique and Their Application to Environmental Improvement*. Journal of Materials Science, No. 37, pp. 2937-2941.
- Knaebel, Kent, S. *Adsorbent Selection*. Dublin: Adsorption Research, Inc, pp.12-14.
- Li, W., Shang, J., Zhu, Y., (2003). *Structure and photocatalytic characteristics of TiO₂ film photocatalyst coated on stainless steel webnet*, J. Mol. Catal. A: Chemistry, No. 202, pp. 187-195.

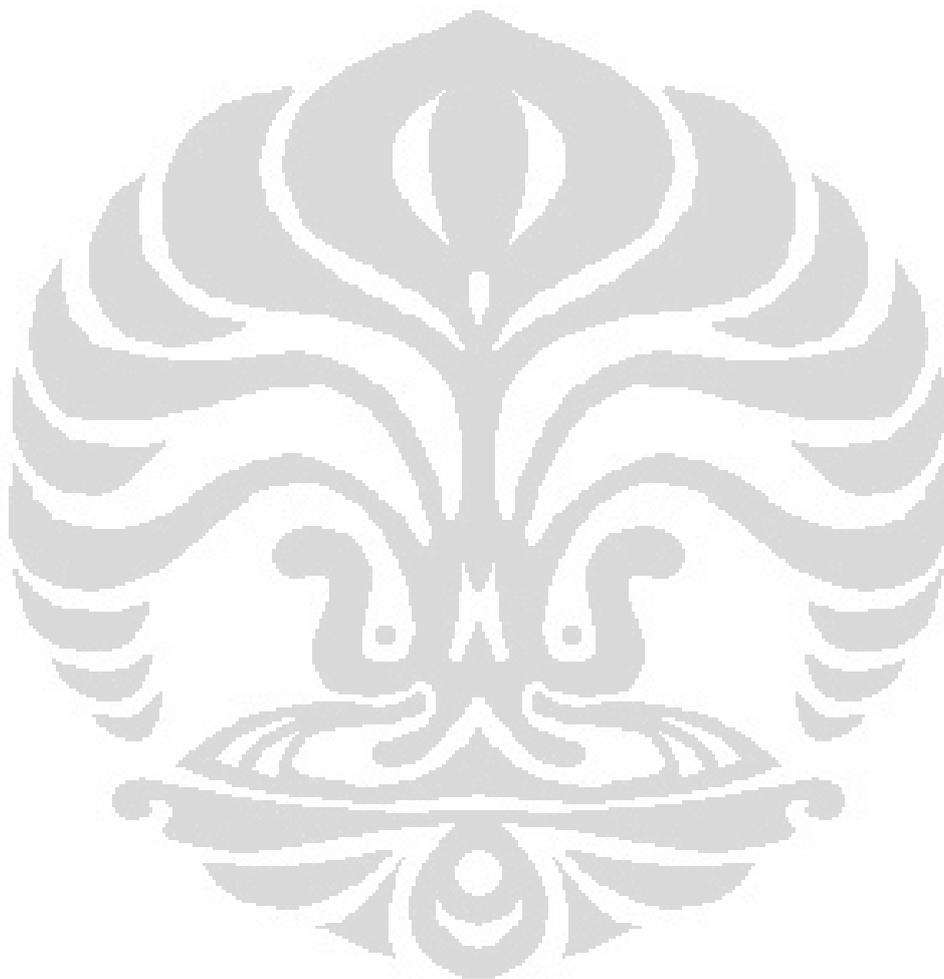
DAFTAR PUSTAKA (Lanjutan 3)

- Lin, Y.M., Huang, C.H., Wang, I.K., Lu, C.M., (2006). *Photocatalytic Activity for Degradation of Nitrogen Oxides over Visible Light Responsive Titania-Based Photocatalysts*. *Environmental Science & Technology*, Vol-40, No.5, pp.1616-1621.
- Lestari, F., Hayes, A., Green, A., (2009) *An alternative method for fire smoke toxicity assessment using human lung cells*. Chemical Safety and Applied Toxicology (CSAT) Laboratories, The University of New South Wales, Sydney 2052, Australia, pp.89-96.
- Maggos, T., Bartzis, J., Leva, P., Kotzias, D., (2005). *Application of photocatalytic technology for NO_x removal*. Greece: Department of Energy Resources Engineering, University of West Macedonia, pp. 90-93.
- Muhammad, A., (2009). *Rekayasa Alat dan Uji Kinerja Katalis Komposit TiO₂-Adsorben Alam Untuk Degradasi Polutan Asap Rokok*. Skripsi. Depok: Departemen Teknik Kimia FTUI, pp. 35-48.
- Muliawati, I. (2011). *Rekayasa Masker Anti Polutan Berbasis Katalis Komposit TiO₂-ZAL*. Proposal penelitian. Universitas Indonesia, pp. 35-42.
- OSHA, 1978. *Occupational Health Guideline or Nitrogen Dioxide*. U.S Departement of Labor, pp.23-28.
- Pichat, P., (2007). *Passive Photocatalytic Oxidation of Air Pollution*. Lawrence Berkeley National Laboratory Workshop.
- Rasyid, G., (2011). *Adsorpsi Gas NO₂ pada Zeolit Alam Teraktifasi untuk Aplikasi Masker Kesehatan*. Skripsi.Universitas Indonesia, pp.32-35.
- Rohmah, Y., (2006). *Penyisihan Gas NO_x dengan proses fotokatalitik TiO₂ dan Fe₂O₃ menggunakan reaktor spiral*. Tesis. Institut Teknologi Bandung, pp. 34-49.
- Saepudin, A., Adimono, T., (2005). *Kajian Pencemaran Udara Akibat Emisi Kendaraan bermotor di DKI Jakarta*. Jurnal Teknologi Indonesia 28
- Salvado, I., Hargreaves, D.M., Gianluca L. P., (2007). *Evaluation of Intrinsic Photocatalytic Oxidation Kinetics of Indoor Air Pollutans*. *Environmental Science & technology*, Vol. 41, No.6, pp. 2028-2035.

DAFTAR PUSTAKA (Lanjutan 4)

- Siriwardane, R. V., Morgantown, W.V., (2002). *Adsorption of CO₂, N₂ dan O₂ on Natural Zeolites*. Energy and Fuels Vol. 17, pp. 571-576.
- Handoko, S., (2002)., *Preparasi Katalis Cr/ Zeolit Melalui Modifikasi Zeolit Alam*, Jurnal ILMU DASAR, No. 3, pp. 15-23.
- Suwardi., Mulyanto, B., (2010). *Prospek Zeolit Sebagai Bahan Penyerap dalam Remediasi Lahan Bekas Tambang*. Presentasi. Departemen Ilmu Tanah dan Sumber Daya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB, pp.45-56.
- Tajabadi, F., (2002). *Standard Nitrogen Dioxide Gas Generation and Determination of Nitrogen Dioxide by Using Sulfanilamide/Phosphoric Acid System*, Thesis in Analytical Chemistry. Iran, Shiraz University, pp.23-28
- Toma, F.L., Bertrand, G., Klien, D., Coddet, C., (2004). *Photocatalytic Removal of Nitrogen Oxides via Titanium Dioxide*. Environ Chem Lett 2, pp. 117-121.
- Tompkins, D.T., Zeltner, W.A. (2005). Evaluation of Photocatalysis for Gas-Phase Air Cleaning-Part 1: Process, Technical, and Sizing Consideration. *ASHRAE Transactions*, Vol. 111, No. 2, pp. 60-84.
- Torimoto, T., Ito, S., Kuwabata, S., Yoneyama, H., (1996). *Effects of Adsorbent used as Supports for Titanium Dioxide Loading on Photocatalytic Degradation of Propylamide*. Environmental Science. Technology. No.30, pp.1275-1281.
- Trisuaryanti, W., Triwahyuni, E., Sudiono, S., (2005). *Preparasi, Modifikasi dan Karakterisasi Katalis Ni-Mo/Zeolit Alam dan Mo-Ni/Zeolit Alam*. Yogyakarta; Departemen Kimia FMIPA UGM, pp. 23-40.
- Wu, W.C., Liao, L.F., Chuang, C.C., (2000). *Adsorption and Photooxidation of Formamide on Powdered TiO₂*. Journal of Catalysis No. 195, pp. 416-419.
- Xie, Y., Zhang, J., Qin, J., Yang, Ge., (1996). *Zeolites Modified by CuCl for Separating CO from Gas Mixtures Containing CO₂*. Netherlands: Kluwer Academic Publisher, pp 39-45.

Yuda, P., (2009). *Preparasi Zeolit Alam Lampung dengan Metode Dealuminasi dan Kalsinasi untuk Adsorpsi Gas CO*. Skripsi. Depok: Departemen Teknik Kimia FTUI, pp 78-89.



LAMPIRAN

Lampiran 1 BET Zeolit Alam Lampung Murni

**SURFACE AREA METER SORPTOMATIC 1800 CARLO ERBA
BET SURFACE AREA ANALYSIS**

Report Date	:		Temperature	:	25,2 °C
Sample ID	:	Zeolit	Adsorbate	:	Nitrogen
User	:	-	Sample Weight	:	0,4477 gr
Operator	:		Po	:	697 mmHg
P Operation	:	760 mmHg	Pe	:	846 mmHg

EXPERIMENTAL DATA

No	Pa	Vi	Vg	Va	Va/g	P / Po (x)
1.	41,7689	17,4335	14,3827	3,0508	6,8145	0,0610
2.	92,3201	34,8671	30,4122	4,4549	9,9506	0,1348
3.	144,5090	52,3006	46,9611	5,3395	11,9266	0,2110
4.	224,3247	69,7342	72,2702	-2,5360	-5,6646	0,3275
5.	275,6711	87,1677	88,5032	-2,3355	-5,2166	0,4068
6.	318,91	104,6012	102,2628	2,3384	5,2233	0,4656
7.	355,7559	122,0348	114,2635	7,7713	17,3583	0,8208
8.						
9.						
10.						
11.						
12.						

No	Pa	Va/g	Pa - Po	$Y = P / \{V_a (P_o - P) \cdot g\}$	P / Po (x)
1.	41,7689	6,8145	643,2311	0,0095	0,0610
2.	92,3201	9,9506	592,6799	0,0157	0,1348
3.	144,509	11,9266	540,4910	0,0224	0,2110
4.					
5.					
6.					

Slope (m) : 0,0060
 Intercept (b) : 0,0042
 Vm : 11,0847 cm³ / gr
 Correlation Coefficient : 0,9998
 BET Surface Area : 21,6034 m²
 BET Spesific Surface Area (SS) : 48,2541 m² / gr

Lampiran 2 Hasil BET ZAL-Teraktifasi

BET ZAL

Date: 11/03/2011

Quantachrome Corporation
Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
Autosorb for Windows® for AS-3 and AS-6 Version 1.23

Sample ID: ZAL Aktivasi

Description: ZAL Aktivasi

Comments:

Sample Weight: 0.3780 g

Adsorbate: NITROGEN

Cross-Sec Area: 16.2 A²/molec

NonIdeality: 6.580E-05

13:31

Molecular wt: 28.0134 g/mol

Station #: 6

Outgas Temp: 150 °C

Outgas Time: 24.0 hrs

P/Po Toler: 3

Equil Time: 2

Bath Temp.: 77.40

Operator: jajat

Analysis Time: 91.8 min

End of Run: 03/04/2011

File Name:

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	9.202E+01	m ² /g
Langmuir Surface Area.....	1.384E+02	m ² /g
t-Method External Surface Area.....	3.798E+01	m ² /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	5.404E+01	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	1.340E+02	m ² /g

PORE VOLUME DATA

t-Method Micro Pore Volume.....	2.859E-02	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	4.762E-02	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	4.438E-02	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	4.473E-02	cc/g

PORE SIZE DATA

DR Method Micro Pore width.....	6.929E+01	A
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.640E+01	A
HK Method Pore width (Mode).....	1.408E+01	A
SF Method Pore Diameter (Mode).....	2.639E+01	A

DATA REDUCTION PARAMETERS

Thermal Transpiration : OFF

Last Po Acquired 768.18 mm Hg

Additional Initialization Information Not Recorded.

BJH/DH Moving Average Size : 1

Interaction Constant (x) 2.9600 nm³ x kJ/mol

Lampiran 3 Hasil BET ZAL-TiO₂

Quantachrome Corporation
 Quantachrome Autosorb Automated Gas Sorption System Report
 Autosorb for Windows® for AS-3 and AS-6 Version 1.23

Sample ID: T102
 Description:
 Comments:
 Sample Weight: 0.3009 g
 Adsorbate: NITROGEN Outgas Temp: 150.0 °C Operator: .jajat
 Cross-Section Area: 16.2 Å²/molecule Outgas Time: 24.0 hrs Analysis Time: 62.4 min
 Non-ideality: 6.580E-05 P/Po Toler: 3 End of Run:
 Molecular Wt: 28.0134 g/mol Equil Time: 2 File Name:
 Station #: 5 Bath Temp: 77.40 PC SW Version: Pre-1.20

AREA-VOLUME-PORE SIZE SUMMARY

SURFACE AREA DATA

Multipoint BET.....	9.625E+01	m ² /g
Langmuir Surface Area.....	1.474E+02	m ² /g
t-Method External Surface Area.....	6.050E+01	m ² /g
t-Method Micro Pore Surface Area.....	3.535E+01	m ² /g
DR Method Micro Pore Area.....	1.362E+02	m ² /g

PORE VOLUME DATA

t-Method Micro Pore Volume.....	1.859E-02	cc/g
DR Method Micro Pore Volume.....	4.839E-02	cc/g
HK Method Cumulative Pore Volume.....	4.348E-02	cc/g
SF Method Cumulative Pore Volume.....	4.406E-02	cc/g

PORE SIZE DATA

DR Method Micro Pore Width.....	8.492E+01	Å
DA Method Pore Diameter (Mode).....	1.749E+01	Å
HK Method Pore Width (Mode).....	1.417E+01	Å
SF Method Pore Diameter (Mode).....	2.657E+01	Å

DATA REDUCTION PARAMETERS

Thermal Transpiration : OFF
 Last P_o Acquired 767.35 mm Hg
 Additional Initialization Information Not Recorded.

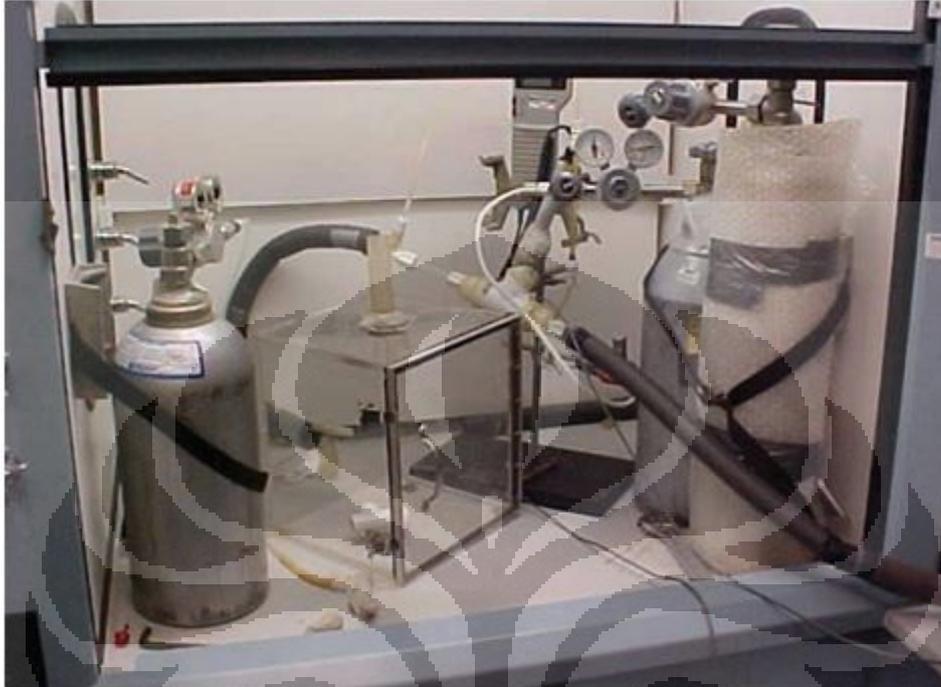
BJR/DR Moving Average Size : 1

Interaction Constant (K) 2.9600 nm³ x kJ/mol

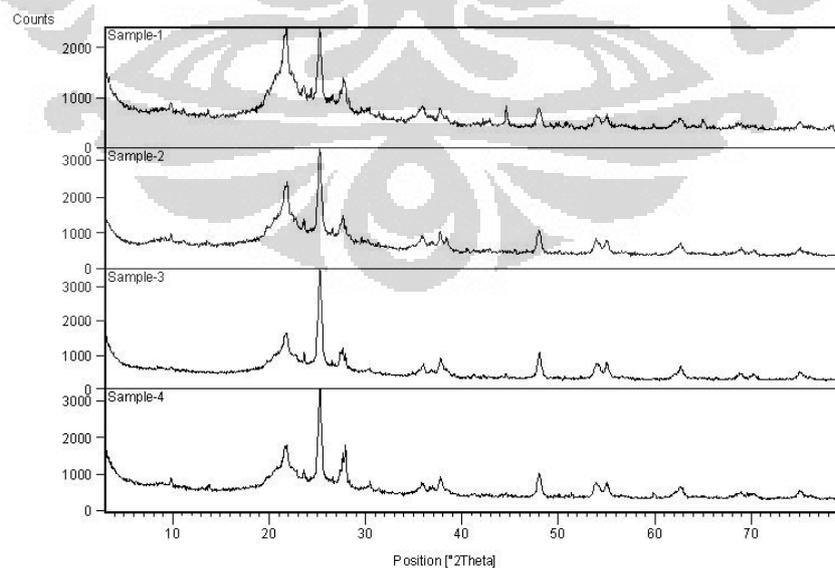
Lampiran 4 Hasil Uji XRF

Sample name	Ca	Cr	Fe	Al	Mg	Si	S	Cl	K	Na	Co	Ni	Cu	Zn	Ba	Total
Sample name	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g
Sample name	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
VER_BLa.NK a	0.019	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	-0.0070	-0.01	0.00	0.00	0.00
VER_BLa.NK b	0.0079	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.0016	-0.01	0.00	0.00	0.00
VER_BLa.NK C	0.0075	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.00	0.0000	-0.01	0.00	0.00	0.00
VER_MILTRT33 a	55.137	0.01	1.62	60.76	0.00	6.51	1.05	-0.01	0.01	9.0151	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
VER_MILTRT33 b	55.001	0.01	1.60	60.50	0.00	6.50	1.05	-0.00	0.01	8.9700	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
VER_PL-01 a	67.570	0.00	0.00	75.70	0.00	0.00	1.57	0.01	0.16	1.3005	0.11	0.01	0.11	0.09	0.00	0.00
VER_PL-01 b	68.351	0.00	0.00	77.36	0.00	0.00	1.60	0.00	0.16	1.3281	0.13	0.01	0.13	0.09	0.00	0.00
VER_MCS DC7331 a	11.395	0.19	0.00	6.10	1.72	0.37	0.10	0.11	0.07	57.00	0.11	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
VER_MCS DC7331 b	11.511	0.10	0.00	6.10	1.70	0.37	0.10	0.12	0.07	57.00	0.12	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
VER_SoRAd 11 a	12.903	0.03	0.06	90.51	0.16	0.05	0.01	-0.05	0.09	3.1175	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
VER_SoRAd 11 b	10.000	0.00	0.00	90.00	0.16	0.05	0.01	-0.01	0.09	3.1556	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
VER_2RAd 686-1 a	0.1751	0.01	0.01	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
VER_2RAd 686-1 b	0.1755	0.01	0.01	100.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
VER_C BCa 609-1 a	0.3035	0.19	0.00	0.31	3.19	0.29	0.15	1.00	5	17.993	0.19	0.11	0.01	0.03	0.01	0.00
VER_C BCa 609-1 b	0.3037	0.23	0.01	0.27	3.21	0.29	0.15	1.00	9	17.170	0.19	0.11	0.01	0.03	0.01	0.00
VER_G BAd 396-1 a	0.0031	0.15	0.11	11.95	0.06	0.20	1.10	0.06	6	56.513	0.06	0.01	0.19	0.07	0.00	0.00
VER_G BAd 396-1 b	0.0033	0.16	0.11	11.93	0.06	0.20	1.10	0.06	6	56.501	0.06	0.01	0.19	0.07	0.00	0.00
VER_J55 805-1 a	1.0335	0.03	0.00	97.61	0.01	0.06	0.31	0.16	0.09	0.5129	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

Lampiran 5 Gambar Alat Uji Masker



Lampiran 6 Perbandingan hasil XRD berbagai Sampel



Lampiran 7 Hasil XRD sampel ZAL-TiO₂ 10%

Dataset Name	Sample-3
Measurement Date / Time	4/16/2012 12:13:21 AM
Raw Data Origin	XRD measurement (*.XRDML)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2Th.]	3.0107
End Position [°2Th.]	79.9667
Step Size [°2Th.]	0.0330
Scan Step Time [s]	49.4427
Scan Type	Continuous
PSD Mode	Scanning
PSD Length [°2Th.]	0.52
Offset [°2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	0.4785
Specimen Length [mm]	10.00
Measurement Temperature [°C]	22.00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	30 mA, 40 kV
Diffraction Type	PANalytical PW3040/60
Goniometer Radius [mm]	240.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	91.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	No

Lampiran 8 Lembar Spesifikasi Gas Analyzer

		GAS ANALYSIS
		MULTIGAS 473BOX - 488 - 488PLUS
		
DESCRIPTION		
<p>Multigas 488 plus is an infrared exhaust gas analyzers for gasoline engines. Tests conducted with 488 plus allow operators to measure CO, CO2, HC, O2 values according to which lambda coefficient is automatically calculated. The operator's work is facilitated since the rpm and of temperature values can be kept under control at the same time. Kit is also available as an optional in order to measure NOx. The 488 plus allows the electronic lambda test, and has an lcd screen of 2x16cm.</p>		
<p>Multigas 488 is an infrared exhaust gas analyzer for gasoline engines. Tests conducted with 488 allow operators to measure CO, CO2, HC, O2 values according to which lambda coefficient is automatically calculated. The operator's work is facilitated since the rpm and of temperature values can be kept under control at the same time. Kit is also available as an optional in order to measure NOx.</p>		
<p>Multigas 473 is an infrared exhaust gas analyser for gasoline engines with the same features as multigas 488 plus, and have to be used with Visa family or files.</p>		
TECHNICAL SPECIFICATIONS		
	Mod. 488plus/ 473	Mod. 488
Main power supply:	187,0-230,0 V/50 Hz optional: 240V	187,0-230,0 V/50 Hz optional: 240V
Measuring range:	CO 0-14,0% Vol (opt. 0-20) CO2 0-16,0% Vol (opt. 0-20) HC 0-1000 ppm Vol (opt. 0-1) O2 0-21,0% Vol (opt. 0-21) O2 0-21,0% Vol (opt. 0-21) No. O2 0-200 ppm Vol (opt. 0-200) Lambda 0,95-2,00 (opt. 0,95-2,00)	CO 0-14,0% Vol (opt. 0-20) CO2 0-16,0% Vol (opt. 0-20) HC 0-1000 ppm Vol (opt. 0-1) O2 0-21,0% Vol (opt. 0-21) O2 0-21,0% Vol (opt. 0-21) No. O2 0-200 ppm Vol (opt. 0-200) Lambda 0,95-2,00 (opt. 0,95-2,00)
Induction rpm control:	0-5000 rpm (opt. 10)	0-5000 rpm (opt. 10)
Electronic Lambda test:	YES	NO
Operating temperature (°C):	0-40	0-40
Measuring gas induction:	5 Path (optional)	4 Path (optional)
Response time:	~10sec (probe length 30)	~10sec (probe length 30)
Zero setting:	Electronic and automatic	Electronic and automatic
Condensate drain:	Continuous and automatic	Continuous and automatic
Warm up time:	Max 15 min	Max 15 min
Serial output:	RS232	RS232
Dimensions:	400x100x425 mm	400x100x425 mm
Weight:	12,5kg	11,5kg

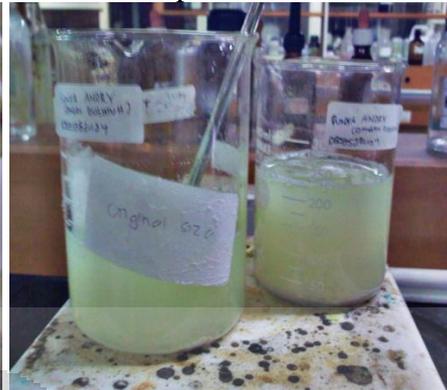
10/2004

Lampiran 9. Dokumentasi Kegiatan Penelitian

Gambar. ZAL Murni



Gambar Preparasi Zeolit



Gambar Proses Sonikasi



Gambar Proses Kalsinasi



Gambar. Desikator



Gambar Sampel ZAL-TiO₂



Gambar ZaL-Teraktifasi



Gambar Desain Masker



penyaringan Zeolit dari HCl



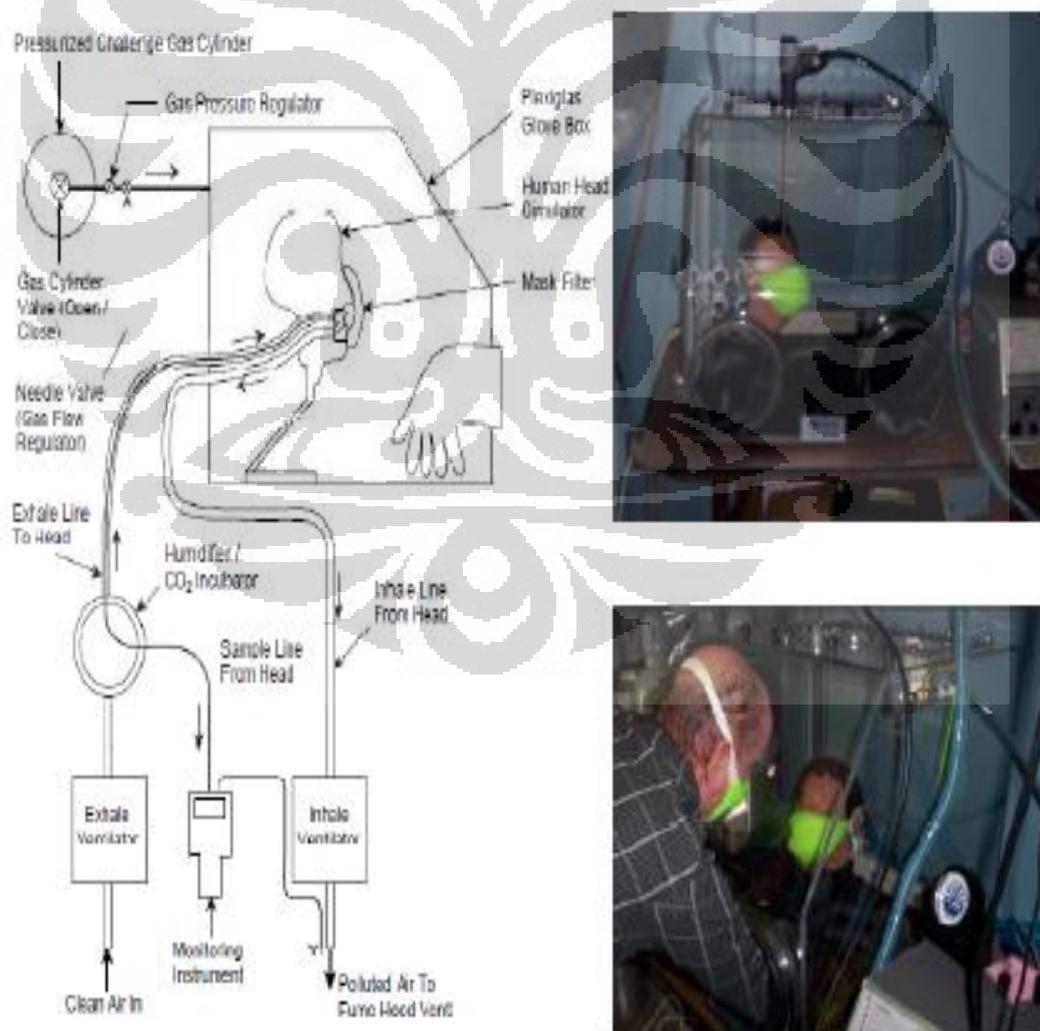
perendaman Zeolit dengan HF



Lampiran 10 Metode Standar Pengujian Masker

Untuk mengetahui efisiensi dari masker, dilakukan uji kinerja masker. Uji kinerja masker, biasanya dilakukan dengan metode standar pengujian, seperti contohnya dari ASTM yaitu ASTM F1471 dan ASTM F2100. Kemudian, NIOSH juga mengeluarkan metode standar pengujian tergantung pada gas yang akan diuji, misalnya untuk gas Oksida Nitrogen digunakan NIOSH RCT-APR-STP0062. Pengujian masker secara keseluruhan bukanlah hal sederhana. Ada banyak sekali metode uji standar masker yang dapat diaplikasikan tergantung pada sifat apa yang akan diuji, misalnya pressure drop, breathing resistance, efisiensi filtrasi, dan juga penetrasi material masker. Dalam penelitian ini yang diuji dispesifikasikan kepada efisiensi material masker saja, maka metode standar yang akan dirujuk juga hanya metode pengujian standar untuk material masker, yang biasa disebut sebagai fitur masker.

Berikut ini adalah contoh metode uji masker yang telah dilakukan oleh peneliti di Amerika, Riley M. Kirman, Phd., PE:



Prosedur uji kinerja masker yang dilakukan oleh Kinnan adalah sebagai berikut:

1. Pasang masker yang akan diuji ke model kepala. Catat nomor filter
2. Nyalakan inkubator CO₂ untuk proses exhale dan header untuk menciptakan kelembaban selama 10 menit
3. Nyalakan alat *analyzer* dan kalibrasi *analyzer*
4. Cek kebocoran pada seluruh tubing
5. Buka valve silinder gas
6. Atur tekanan hingga mencapai 10 psi
7. Isilah glove box chamber dengan gas
8. Pengujian dimulai ketika gas dalam chamber mendekati konsentrasi target
9. Baca temperatur dan kelembaban dalam chamber
10. Atur laju alir sebanyak yang dibutuhkan
11. Nyalakan insale vent. Tepat saat insale vent dinyalakan maka waktu pengujian dihitung sebagai t=0
12. Kemudian nyalakan exhale vent 1 detik kemudian
13. Baca hasil analisis instrument setiap interval 1 menit selama 15 menit
14. Tutup aliran gas ke chamber
15. Matikan alat analisis
16. Nyalakan kipas untuk membersihkan chamber.

Lampiran 11 Tabel Hasil Uji Adsorpsi Gas NO₂

Jumlah polutan NO _x /(NO _x) ₀			Waktu (menit)
TiO ₂	ZAL-T	Tanpa Adsorben dan Fotokatalisator	
1	1	1	0
1	0,8	0,8	5
1	0,6	0,6	10
1	0,4	0,4	15
1	0,2	0,2	20
1	0	0	25
0,8	0	0,5	30
0,6	0	1	35
0,4	0	1	40
0,2	0	0,5	45
0	0	0	50
0	0	1	55
0	0	1	60
0	0	0,5	65
0	0	0	70
0	0	0	75
0	0	0	80
0	0	0	85
0	0	0	90
0	0	0	95
0	0	0,5	100
0	0	1	105
0	0	1	110
0	0	1	115
0	0	1	120

Lampiran 12 Hasil Uji Variasi Berat Katalis Komposit

waktu, menit	Jumlah polutan NO _x /(NO _x) ₀	
	Berat total katalis komposit =4,28 gram	Berat total katalis komposit= 10 gr
0	1	1
10	0,95	0,98
20	0,9	0,93
30	0,83	0,9
40	0,76	0,76
50	0,72	0,54
60	0,68	0,45
70	0,63	0,37
80	0,59	0,32
90	0,54	0,28
100	0,5	0,25
110	0,45	0,22
120	0,42	0,2
130	0,38	0,18
140	0,33	0,17
150	0,28	0,13
160	0,23	0,09
170	0,18	0,05
180	0,14	0,03

Lampiran 13 Uji Variasi Komposisi Katalis Komposit

waktu(menit)	Jumlah gas NOx/(NOx)0			
	kandungan 10% TiO2	kandungan 15% TiO2	kandungan 20% TiO2	kandungan 25% TiO2
0	1	1	1	1
5	0,5	1	1	1
10	0,3	0,8	0,9	1
15	0	0,7	0,8	1
20	0	0,7	0,8	0,9
25	0	0,6	0,7	0,9
30	0	0,6	0,6	0,7
35	0	0,5	0,6	0,7
40	0	0,4	0,5	0,6
45	0	0,4	0,5	0,5
50	0	0,3	0,4	0,4
55	0	0,1	0,3	0,3
60	0	0	0,2	0,1
65	0	0	0,2	0,1
70	0	0	0	0
75	0	0	0	0
80	0	0	0	0
85	0	0	0	0
90	0	0	0	0
95	0	0	0	0
100	0	0	0	0
105	0	0	0	0
110	0	0	0	0
115	0	0	0	0
120	0	0	0	0

Lampiran 14 Uji Konsentrasi Variasi Awal

Konsentrasi Awal (NOx) _o			waktu eliminasi (menit)
4 ppm	9 ppm	24 ppm	
4	9	24	0
2	9	24	5
2	9	23	10
0	6	20	15
0	6	18	20
0	5	15	25
0	5	14	30
0	5	12	35
0	3	8	40
0	3	6	45
0	2	6	50
0	2	5	55
0	1	5	60
0	0	3	65
0	0	3	70
0	0	1	75
0	0	1	80
0	0	0	85
0	0	0	90
0	0	0	95
0	0	0	100
0	0	0	105
0	0	0	110
0	0	0	115
0	0	0	120

Lampiran 15 Uji Waktu Degradasi

Konsentrasi awal polutan NO2 (ppm)	menit	jam
0,5	142,3733	2,372889
0,475	138,971	2,316183
0,45	135,4054	2,256757
0,425	131,6581	2,194301
0,4	127,7068	2,128447
0,375	123,5254	2,058757
0,35	119,0819	1,984699
0,325	114,3376	1,905627
0,3	109,2442	1,820737
0,275	103,7409	1,729015
0,25	97,74948	1,629158
0,225	91,16688	1,519448
0,2	83,85359	1,39756
0,175	75,61398	1,260233
0,15	66,16154	1,102692
0,125	55,0521	0,917535
0,1	41,5415	0,692358
0,075	24,23475	0,403913
0,05	0	0