

**REKAYASA ALAT DAN UJI KINERJA KATALIS KOMPOSIT
TiO₂ – ADSORBEN ALAM UNTUK DEGRADASI
POLUTAN ASAP ROKOK**

SKRIPSI

**MUHAMMAD ARIF ALFAT
06 06 07 66 33**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
DESEMBER 2009**

**REKAYASA ALAT DAN UJI KINERJA KATALIS KOMPOSIT
TiO₂ – ADSORBEN ALAM UNTUK DEGRADASI
POLUTAN ASAP ROKOK**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**MUHAMMAD ARIF ALFAT
06 06 07 66 33**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
DESEMBER 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS

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

Nama : Muhammad Arif Alfat

NPM : 06 06 07 66 33

Tanda tangan :

Tanggal : 28 Desember 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Muhammad Arif Alfat
NPM : 06 06 07 66 33
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Rekayasa Alat dan Uji Kinerja Katalis Komposit
TiO₂-Adsorben Alam untuk Degradasi Polutan
Asap Rokok

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Slamet, MT ()
Penguji : Ir. Dewi Tristantini, MT., PhD. ()
Penguji : Ir. Sukirno, M.Eng ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 28 Desember 2009

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah membimbing setiap detik hidup saya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi saya untuk dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu saya mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia
- 2) Dr.Ir. Slamet MT selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini
- 3) Mang Ijal, Kang Jajat, Mas Eko dan teknisi laboran lainnya yang telah banyak membantu proses penelitian di laboratorium RPKA
- 4) Pak Hermawan dan Mba Pipit dari UIN Syarif Hidayatullah yang telah memberikan banyak kemudahan dan pertolongan dalam menganalisis piridin dan nikotin
- 5) Teman-teman riset grup dan lab RPKA (Catherine, Anny, Panji, Yayah, Witta, Mba Diah, Kak Aji, Mba Witta, Mba Ema, Kak AP, Kak Yudha, Bang Roni, dll) atas segala nasihat, bantuan, pertolongan, pinjaman alat, hingga kesedian menggilir GC-TCD selama beraktivitas di RPKA dan bengkel
- 6) Orang tua dan keluarga saya di Bogor yang selalu memberikan perhatian, dukungan, dan doa dalam setiap usaha saya.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 28 Desember 2009

Penulis

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

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

Nama : Muhammad Arif Alfath
NPM : 06 06 07 66 33
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

**Rekayasa Alat dan Uji Kinerja Katalis Komposit TiO₂-Adsorben Alam
untuk Degradasi Polutan Asap Rokok**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 28 Desember 2009

Yang menyatakan

(Muhammad Arif Alfath)

ABSTRAK

Nama : Muhammad Arif Alfat
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Rekayasa Alat dan Uji Kinerja Katalis Komposit TiO₂-Adsorben Alam untuk Degradasi Polutan Asap Rokok

Rekayasa alat dan uji kinerja katalis komposit TiO₂-Adsorben Alam untuk degradasi polutan asap rokok telah dilakukan. Model polutan yang digunakan adalah CO murni, CO pada asap rokok, piridin, dan nikotin. Hasil uji kinerja alat menunjukkan bahwa CO murni dan CO pada asap rokok masing-masing dapat terdegradasi hingga 95% dan 70% dari konsentrasi awalnya dalam waktu 30 menit dengan komposisi katalis TiO₂-ZAL yang optimal yaitu 85%:15%. Produk CO₂ yang terbentuk secara stoikiometris dengan CO menunjukkan terjadinya aktivitas fotokatalis. Hasil uji kinerja katalis pada piridin dan nikotin dalam fasa cair menunjukkan bahwa penambahan adsorben pada TiO₂ tidak memberikan efek peningkatan kinerja degradasi polutan.

Kata kunci :
Rekayasa alat, katalis TiO₂-ZAL komposisi 85%:15%, polutan asap rokok

ABSTRACT

Name : Muhammad Arif Alfat
Study Program : Chemical Engineering
Title : Device Prototyping and Composite Catalyst TiO₂-Natural Adsorbent Performance Test to Degrade Cigar Smoke Pollutants

Device prototyping and composite catalyst TiO₂-natural adsorbent performance test to degrade cigar smoke pollutants has been done. Pure CO and that contains in cigar smoke, nicotine, and pyridine were used as a pollutants model. The test result showed that CO, both in pure condition and in cigar smoke, can be decreased respectively upto 95% and 70% from initial concentration in 30 minute by using the optimal catalyst, TiO₂-ZAL which composition is 85%:15%. Product CO₂ which was formed stoichiometry with reactant CO showed the activity of photocatalyst. The result of catalyst performance test in pyridine and nicotine showed that addition of natural adsorben in TiO₂ did not increase the degradation of nicotine and pyridine in liquid phase.

Key words:
Device prototyping, catalyst TiO₂-Zeolit Alam which composition 85%:15%, cigar smoke pollutants

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	6
1.5 Sistematika Penulisan.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Fotokatalisis.....	8
2.1.1 Proses Fotokatalisis.....	8
2.1.2 Fotokatalis TiO ₂	10
2.2 Adsorpsi.....	14
2.2.1 Adsorben Zeolit Alam.....	15
2.2.2 Adsorben Karbon Aktif.....	17
2.3 Kombinasi Proses Fotokatalisis-Adsorpsi.....	18
2.4 Asap Rokok.....	21
2.4.1 Piridin.....	22
2.4.2 Nikotin.....	24
2.4.3 Karbon Monoksida.....	25
2.5 Penelusuran Paten yang Terkait.....	27
2.5.1 <i>Photocatalyst, Methods for Deodorizing, and Methods for Making a Deodorizer Sistem</i> , Pub. No. US 0050272 A1 (Carrey, 2008).....	27
2.5.2 <i>Air Purifier With Control Sensors</i> , Pub. No. US 7,166,259 B2 (Beam, et al., 2007).....	28

BAB III METODE PENELITIAN.....	30
3.1 Diagram Alir Percobaan	30
3.1.1 Diagram Alir Penelitian	30
3.1.2 Diagram Alir Preparasi Katalis AFT	31
3.1.3 Diagram Alir Pembuatan Prototipe Alat.....	32
3.1.4 Diagram Alir Uji Kinerja Alat dan Katalis	33
3.2 Peralatan Penelitian	34
3.2.1 Peralatan Preparasi Katalis AFT	34
3.2.2 Peralatan Pembuatan Prototipe Alat	34
3.2.3 Peralatan Uji Kinerja Alat dan Katalis.....	35
3.2.4 Peralatan Analisis Perubahan Konsentrasi Sampel.....	35
3.3 Bahan Penelitian	35
3.3.1 Bahan Preparasi Katalis AFT.....	35
3.3.2 Bahan Uji Kinerja Alat dan Katalis	36
3.4 Prototipe Alat.....	36
3.5 Prosedur Penelitian	40
3.5.1 Prosedur Preparasi Katalis.....	40
3.5.2 Prosedur Pembuatan Prototipe Alat	42
3.5.3 Prosedur Uji Kinerja Alat dan Katalis	43
3.5.4 Analisis Polutan Terdegradasi.....	44
3.6 Parameter yang Divariasikan	44
3.7 Data Penelitian dan Cara Pengambilan Data	45
3.8 Pengolahan Data Penelitian	45
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	47
4.1 Uji Degradasi Polutan CO Murni	47
4.1.1 Pengaruh Variasi Komposisi Katalis Terhadap Degradasi CO Murni.....	48
4.1.2 Pengaruh Variasi Jenis Katalis Terhadap Degradasi CO Murni.....	52
4.1.3 Analisis Produksi CO ₂ Pada Degradasi CO Murni	55
4.2 Uji Degradasi Polutan CO Asap Rokok	62
4.3 Uji Degradasi Nikotin	65
4.4 Uji Degradasi Piridin	67
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	71
5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran	71

DAFTAR PUSTAKA	72
LAMPIRAN	77



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Konsumsi rokok Indonesia (milyar batang) periode 1960-2008	2
Gambar 2.1	Fenomena foto-eksitasi elektron pada suatu semikonduktor.....	9
Gambar 2.2	Perspektif struktur kristal anatase.....	11
Gambar 2.3	Perspektif struktur kristal rutil	11
Gambar 2.4	Gambar daerah energi pada semikonduktor	12
Gambar 2.5	Energi celah, posisi pita valensi (bawah), konduksi (atas), dan potensial redoks dari berbagai semikonduktor.....	13
Gambar 2.6	Struktur karbon aktif.....	17
Gambar 2.7	Mekanisme reaksi fotokatalisis dengan adsorben sebagai penyangga	19
Gambar 2.8	Mekanisme reaksi fotokatalisis di dalam pori zeolit	19
Gambar 2.9	Struktur kimia piridin	22
Gambar 2.10	Struktur kimia nikotin.....	24
Gambar 2.11	Struktur kimia karbon monoksida	26
Gambar 2.12	Skema alat paten.....	28
Gambar 2.13	Skema alat paten <i>Air Purifier With Control Sensor</i>	29
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	30
Gambar 3.2	Diagram alir preparasi katalis AFT	31
Gambar 3.3	Diagram alir pembuatan prototipe alat	32
Gambar 3.4	Diagram alir uji kinerja alat dan katalis.....	33
Gambar 3.5	Visualisasi tampak samping bagian dalam prototipe alat uji	37
Gambar 3.6	Visualisasi tampak depan prototipe alat uji.....	37
Gambar 3.7	Prototipe alat uji secara tampak depan di dalam ruang uji	39
Gambar 3.8	Ilustrasi reaktor fotokatalitik sistem <i>batch</i> fasa cair	40
Gambar 3.9	Visualisasi aliran polutan sampel fasa gas pada alat uji.....	44
Gambar 4.1	Degradasi CO murni dengan variasi komposisi katalis TiO ₂ -ZAM	49
Gambar 4.2	Degradasi CO murni dengan variasi komposisi katalis TiO ₂ -ZAL	51
Gambar 4.3	Degradasi CO murni dengan variasi jenis katalis.....	53
Gambar 4.4	Produksi CO ₂ pada degradasi CO dengan variasi jenis katalis	55
Gambar 4.5	Produksi CO ₂ pada degradasi CO dengan katalis TiO ₂	56
Gambar 4.6	Ilustrasi skema oksidasi CO dengan bantuan katalis.....	57
Gambar 4.7	Produksi CO ₂ pada degradasi CO dengan katalis TiO ₂ (85%)-ZAM(15%)	59
Gambar 4.8	Produksi CO ₂ pada degradasi CO dengan katalis TiO ₂ (85%)-ZAL(15%)	60
Gambar 4.9	Produksi CO ₂ pada degradasi CO dengan katalis TiO ₂ (85%)-KA(15%)	61
Gambar 4.10	Produksi CO ₂ pada degradasi CO asap rokok dengan katalis TiO ₂ (85%)-ZAL(15%)	62
Gambar 4.11	Proses homogenisasi ruang uji dengan asap rokok	63
Gambar 4.12	Kondisi ruang uji setelah lampu UV dan blower dinyalakan selama 30 menit.....	64

Gambar 4.13 Kondisi ruang uji setelah lampu UV dan blower dinyalakan selama 60 menit.....	64
Gambar 4.14 Degradasi nikotin dengan variasi jenis katalis	66
Gambar 4.15 Degradasi piridin dengan variasi jenis katalis	68



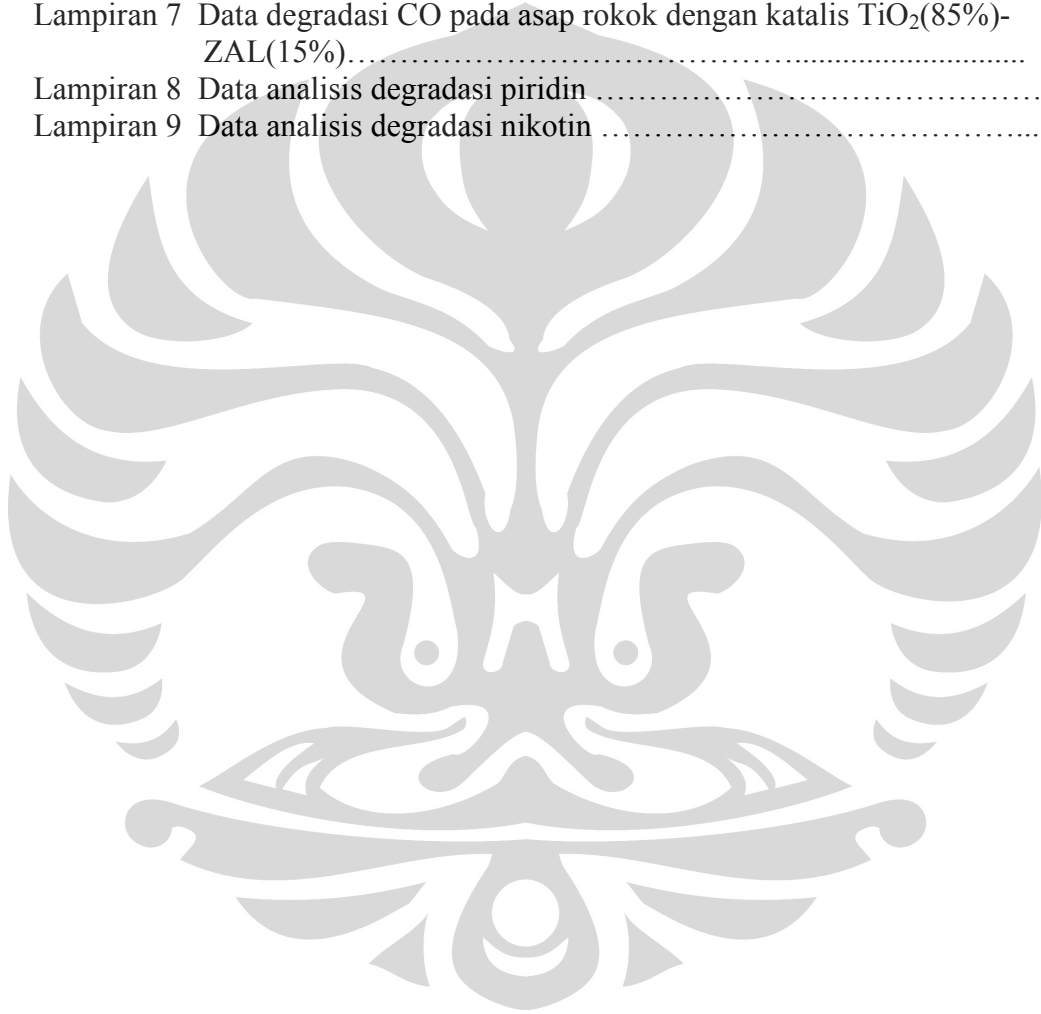
DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Daftar 10 negara perokok terbesar di dunia tahun 2008	1
Tabel 2.1 Perbandingan antara adsorpsi fisika dan kimia	14
Tabel 2.2 Ukuran rongga dan rasio Si/Al berbagai jenis zeolit.....	16
Tabel 2.3 Ukuran pori karbon aktif.....	18
Tabel 2.4 Properties piridin pada 1 atm dan 25°C.....	23
Tabel 2.5 Properties nikotin	24
Tabel 2.6 Properties karbon monoksida.....	26
Tabel 4.1 Perbandingan keekonomian katalis TiO ₂ dengan katalis TiO ₂ (85%)- ZAL(15%).....	69



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Kalibrasi CO.....	78
Lampiran 2 Kalibrasi CO ₂	79
Lampiran 3 Data analisis CO murni dengan variasi konsentrasi ZAM.....	80
Lampiran 4 Data analisis CO murni dengan variasi konsentrasi ZAL	81
Lampiran 5 Data analisis CO murni dengan variasi jenis katalis	82
Lampiran 6 Data analisis produksi CO ₂	83
Lampiran 7 Data degradasi CO pada asap rokok dengan katalis TiO ₂ (85%)- ZAL(15%).....	84
Lampiran 8 Data analisis degradasi piridin	85
Lampiran 9 Data analisis degradasi nikotin	86



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Keberadaan rokok di era yang marak dengan isu lingkungan pada saat ini terus menjadi permasalahan. Dari segi kesehatan dan lingkungan, rokok jelas merupakan komoditi yang amat berbahaya. Asap yang dihasilkan dari rokok merupakan salah satu polutan udara yang sangat berbahaya, baik bagi perokok aktif maupun perokok pasif (Susana, 2003; Bazemore, 2006; Shapiro, 2000). Asap rokok yang dihirup secara langsung berpotensi menyebabkan penyakit berupa bronkitis kronis, emfisema, kanker paru, larink, mulut, faring, esofagus, kandung kemih, penyempitan pembuluh nadi dan lain-lain. Selain itu, rokok juga dapat mengganggu lingkungan karena menimbulkan bau yang tidak sedap, baik bagi udara di sekitarnya maupun nafas si perokok itu sendiri (Bazemore, 2006).

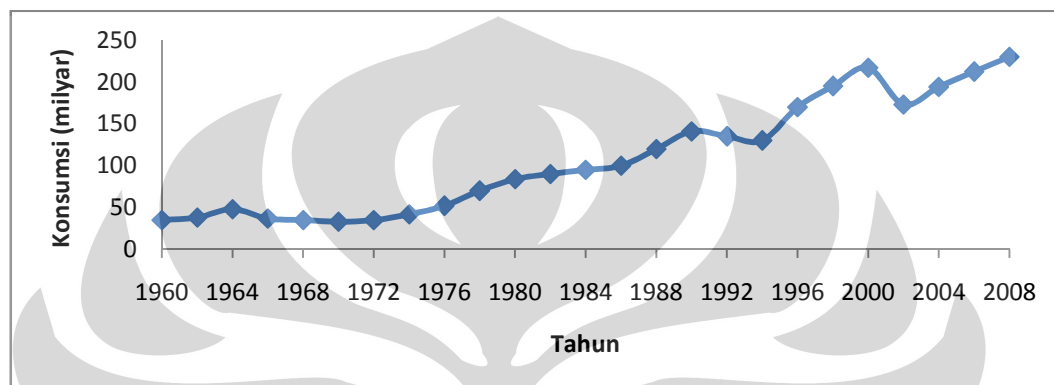
Berdasarkan data yang dirilis oleh WHO pada tahun 2008, konsumsi rokok di Indonesia mencapai 225 milyar batang per tahun atau sebanding dengan 65 juta perokok (28%) per penduduk. Jumlah ini menempati urutan ketiga dalam 10 negara perokok terbesar di dunia. Tabel 1.1 berikut ini menunjukkan daftar 10 negara pengonsumsi rokok terbesar di dunia pada tahun 2008 (WHO, 2008).

Tabel 1.1 Daftar 10 negara perokok terbesar di dunia tahun 2008

No	Negara	Jumlah perokok	Persentase per penduduk
1	Republik Rakyat Cina	390 juta	29%
2	India	144 juta	12,5%
3	Indonesia	65 juta	28%
4	Rusia	61 juta	43%
5	Amerika Serikat	58 juta	19%
6	Jepang	49 juta	38%
7	Brazil	24 juta	12,5%
8	Bangladesh	23,3 juta	23,5%
9	Jerman	22,3 juta	27%
10	Turki	21,5 juta	30,5%

Sumber : WHO, 2008

Data di atas merupakan laporan WHO pada tahun 2008 dengan statistik jumlah perokok 1,35 miliar orang. Sementara itu, secara agregat konsumsi rokok di Indonesia meningkat sekitar tujuh kali lipat selama periode 1970-2008 dari 33 milyar batang (1970) hingga menjadi 230 milyar batang (2008). Gambar berikut ini menunjukkan grafik pertumbuhan konsumsi rokok masyarakat Indonesia dari tahun 1960 hingga tahun 2008 (WHO, 2008).



Gambar 1.1 Konsumsi rokok Indonesia (dalam milyar batang) periode 1960-2008

Sumber : WHO, 2008

Berdasarkan kedua data tersebut, terlihat bahwa tingkat konsumsi rokok di Indonesia amatlah besar. Dengan potensi bahaya yang dapat ditimbulkannya, banyaknya jumlah rokok ini dapat merusak kesehatan lingkungan dan manusia di Indonesia. Dalam menyikapi permasalahan tersebut, diperlukan solusi yang bersifat teknis dan aplikatif, terutama dalam mengurangi atau bahkan menghilangkan efek bahaya dari rokok.

Jika ditinjau lebih mendalam, permasalahan umum yang ditimbulkan oleh rokok sebenarnya berasal dari zat kimia yang dikandungnya yang kemudian teremisi dalam bentuk asap yang mencemari udara sekitar. Zat kimia yang terkandung di dalam satu batang rokok dapat mencapai 4000 jenis senyawa seperti nikotin, piridin, CO, NO, benzena, *acrolein*, *acetien*, methanol, dan lain-lain (Yu, 2006). Dari semua jenis zat kimia itu, terdapat tiga senyawa yang merupakan polutan berbahaya. Ketiga polutan itu adalah karbon monoksida (senyawa dengan kadar toksisitas yang tinggi) (Ibadurrohman, 2008), piridin (penyebab bau tak

sedap pada rokok) (Bazemore, 2006), dan nikotin (senyawa penyebab efek adiktif) (Ibadurrohman, 2008).

Oleh karena itu, menjadi suatu hal yang penting sekaligus merupakan solusi teknik yang tepat untuk melakukan usaha pendegradasian berbagai zat kimia tersebut dari asap rokok. Berbagai upaya dan penelitian telah dilakukan untuk proses purifikasi dan deodorasi udara dari zat-zat tersebut. Usaha yang telah dilakukan untuk degradasi piridin antara lain: oksidasi menggunakan KMnO_4 , oksidasi menggunakan HNO_3 , oksidasi katalitik dengan udara, fotokatalitik, kombinasi fotokatalitik-adsorpsi dan kombinasi fotokatalitik-ozonasi (Toomey, 1984; Kopf, 2000; Sampath, 1994). Sementara itu, berbagai usaha telah dilakukan untuk mengoksidasi CO menjadi CO_2 , salah satunya adalah dengan menggunakan oksidasi katalitik logam seperti kobalt. Sedangkan usaha yang telah dilakukan untuk mengurangi kadar nikotin dalam udara antara lain: ekstraksi molekular fasa padat (Zander, 1998), oksidasi menggunakan enzim P450 2A (Murphy, 2005) dan oksidasi dengan mikroorganisme (Holmes, 1971).

Secara umum, degradasi polutan biasanya dilakukan dengan adsorpsi. Namun, adsorben hanya memindahkan polutan dari udara tetapi tidak dapat menghancurkannya. Pada suatu waktu tertentu, adsorben akan mengalami kejenuhan dan tidak dapat mengadsorpsi polutan kembali. Untuk mengembalikan keaktifannya, adsorben memerlukan proses pemanasan sehingga proses adsorpsi tidak dapat dilakukan secara kontinu dan kurang ekonomis (Kahn, 2003).

Salah satu cara degradasi polutan yang kini dikembangkan adalah proses fotokatalisis dengan semikonduktor. TiO_2 merupakan semikonduktor yang paling banyak digunakan sebagai fotokatalis dalam aplikasi reaksi fotokatalitik karena keunggulannya dibandingkan jenis semikonduktor lain (Litter, 1996; Wu, 2004; Slamet, 2007). Proses fotokatalisis terjadi pada fasa teradsorpsi (Fogler, 1992). Hal ini menimbulkan masalah bagi proses fotokatalisis karena sebagian besar semikonduktor yang digunakan sebagai fotokatalis berdaya adsorpsi lemah. Untuk menutupi kekurangan tersebut, maka proses fotokatalisis oleh fotokatalis semikonduktor perlu ditopang dengan suatu adsorben sebagai penyangga (Canela, 1999; El-Maazawi, 2000). Dengan menggabungkan fotokatalis dan adsorben, diharapkan kontak fotokatalis dengan polutan menjadi lebih optimal. Selain itu,

adsorben yang digunakan tidak perlu diregenerasi karena polutan yang menempel pada adsorben akan didegradasi secara *in situ* oleh fotokatalis sehingga kejenuhan adsorben dapat dihindari (Torimoto, 1996; Matsuoka, 2003; Slamet, 2007).

Kombinasi proses adsorpsi dan fotokatalisis ini telah terbukti dapat mendegradasi berbagai senyawa organik komponen tunggal seperti piridin (Sampath, 1994), NO (Hashimoto, 2000), benzena (Hisanaga, 2002), *propylamide* (Torimoto, 1996), *metil orange* (Li, 2005), aseton (El-Maazawi, 1999), *formamide* (Wu, 2000) dan berbagai VOC (*Volatile Organic Compound*) lainnya (Canela, 1999). Namun untuk senyawa multikomponen seperti asap rokok, penelitian untuk degradasi dengan kombinasi proses ini masih belum banyak dikembangkan.

Penelitian yang menggunakan kombinasi teknik adsorpsi-fotokatalisis dalam mendegradasi asap rokok salah satunya telah dilakukan oleh saudara Ibadurrohman. Penelitian tersebut menggunakan karbon aktif sebagai adsorbennya. Namun, sampel yang digunakan masih diinjeksikan langsung ke dalam alat uji. Pada penelitian ini, telah dirancang sebuah alat yang dapat menghisap sampel polutan secara langsung ke dalam alat dari sebuah model ruangan. Jenis adsorben yang digunakan pun diganti dengan zeolit alam. Zeolit merupakan bahan alam yang ketersediaannya melimpah di Indonesia. Zeolit alam dapat digunakan sebagai penyangga karena struktur kristalnya berpori dan memiliki luas permukaan yang cukup besar, memiliki stabilitas termal yang tinggi, dan harganya murah (Handoko, 2002). Selain itu, zeolit ternyata juga dapat mengadsorpsi senyawa organik dan sifat hidrofilik zeolit pun dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan lebih banyak radikal hidroksil (oksidator polutan).

Dengan adanya penelitian ini, diharapkan alat uji beserta katalisnya yang telah selesai dibuat dapat dikembangkan dan diuji lebih lanjut sehingga kelak dapat diaplikasikan di masyarakat sebagai unit purifikasi dan deodorisasi udara ruangan dari asap rokok untuk menghasilkan udara keluaran yang bersih dan bebas bau asap rokok.

1.2 Perumusan Masalah

Berbagai usaha untuk mendegradasi polutan organik dengan teknik fotokatalisis, adsorpsi, ataupun kombinasi keduanya telah banyak dilakukan.

Namun, penelitian yang menggunakan gabungan kedua kombinasi teknik tersebut untuk mendegradasi polutan udara multikomponen masih sedikit dijumpai. Kombinasi teknik fotokatalisis-adsorpsi memberikan suatu prospek yang menjanjikan dalam usaha purifikasi udara karena diharapkan kontak fotokatalis dengan polutan menjadi lebih optimal dan adsorben yang digunakan tidak perlu diregenerasi. Namun, hal ini masih harus diuji terlebih dahulu untuk melihat apakah efektivitas dari kombinasi teknik ini dapat memberikan hasil yang lebih optimal. Lebih lanjut, adsorben yang digunakan pun sebagian besar masih berupa adsorben sintetik sehingga perlu diganti dengan bahan lokal yang bersifat alami.

Penelitian sebelumnya telah menggunakan karbon aktif sebagai adsorbennya. Dalam penelitian ini, adsorben yang digunakan adalah zeolit alam yang keberadaannya cukup melimpah di Indonesia. Adsorben karbon aktif tetap digunakan sebagai salah satu pembandingan dalam mencari jenis katalis yang paling optimal dalam mendegradasi polutan udara. Permasalahan yang dipelajari adalah bagaimana memodifikasi performa fotokatalis TiO_2 dengan bahan adsorben alami zeolit alam untuk mendapatkan katalis dengan aktivitas yang tinggi dalam mendegradasi polutan udara serta bagaimana menguji efektivitas prototipe alat unit purifikasi dan deodorisasi udara dari asap rokok secara langsung dalam suatu model ruangan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan prototipe alat purifikasi udara dari polutan asap rokok yang berbasis material adsorben- TiO_2 terintegrasi dengan jenis adsorben lokal dengan desain yang optimum yang dapat digunakan untuk mendegradasi dan mendeodorisasi polutan udara secara efektif.
2. Mendapatkan jenis dan komposisi katalis yang optimum dalam deodorisasi dan purifikasi udara akibat asap rokok.

1.4 Batasan masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini menggunakan katalis yang merupakan modifikasi fotokatalis TiO_2 dengan bahan adsorben sebagai penyangganya yang selanjutnya dinamakan katalis AFT (Adsorben-Fotokatalis Terintegrasi).
2. Senyawa yang digunakan sebagai model untuk asap rokok adalah karbon monoksida (senyawa dengan kadar toksisitas yang tinggi di dalam rokok), piridin (penyebab bau tak sedap pada rokok), nikotin (senyawa yang memberikan dampak adiktif bagi perokok) dan karbon monoksida dari asap rokok yang sebenarnya.
3. Material fotokatalis yang digunakan adalah TiO_2 komersial Degussa-P25.
4. Material adsorben yang digunakan adalah adsorben lokal berupa Zeolit Alam Malang (selanjutnya disingkat menjadi ZAM), Zeolit Alam Lampung (selanjutnya disingkat menjadi ZAL), dan karbon aktif (selanjutnya disingkat menjadi KA) sebagai pembanding.
5. Rekayasa alat hanya dilakukan terhadap katalis dan bukan terhadap disain.
6. Analisis hanya dilakukan pada konversi polutan organik dan bukan produk hasil reaksinya.

1.5 Sistematika penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan pada makalah ini adalah:

BAB I : PENDAHULUAN

Menjelaskan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Menjelaskan proses fotokatalisis secara umum, fotokatalis TiO_2 , adsorpsi, adsorben zeolit alam, adsorben karbon aktif, kombinasi fotokatalisis-adsorpsi, sifat dan karakteristik asap rokok, piridin, nikotin, serta karbon monoksida, dan penelusuran paten terkait.

BAB III : METODE PENELITIAN

Menjelaskan tentang diagram alir penelitian, peralatan penelitian, bahan penelitian, prototipe alat, prosedur penelitian, parameter

yang divariasikan, data penelitian dan cara pengambilan data, serta pengolahan data penelitian.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Menjelaskan tentang hasil yang didapat selama penelitian, terdiri dari : uji degradasi polutan CO murni, uji degradasi polutan CO dari asap rokok, uji degradasi piridin, dan uji degradasi nikotin.

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

Menjelaskan mengenai kesimpulan yang didapat selama penelitian dan beberapa hal yang disarankan untuk kepentingan pengembangan penelitian.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fotokatalisis

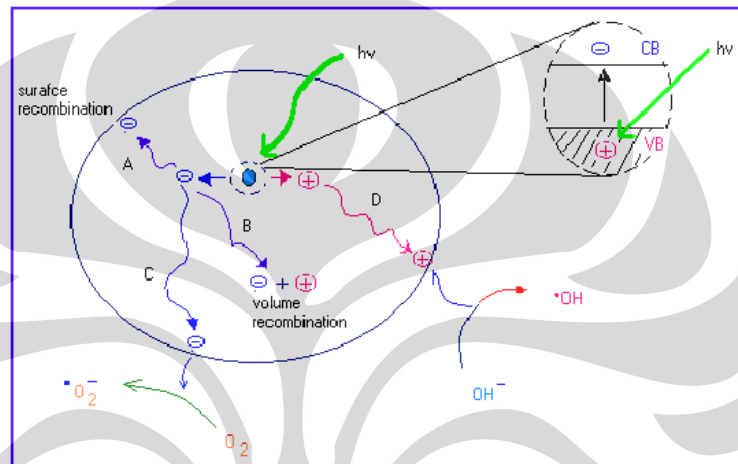
Sejak ditemukannya efek *photosensitization* dari elektroda TiO₂ dalam proses elektrolisis air menjadi H₂ dan O₂ oleh Honda dan Fujishima pada tahun 1972, fotokatalisis dengan semikonduktor TiO₂ telah banyak mencuri perhatian para peneliti dan dipelajari secara luas dalam rangka mendapatkan efisiensi optimum untuk mengkonversi energi surya menjadi energi kimia yang berguna (Anpo, 2002). Pada saat ini, aplikasi penerapan fotokatalisis terus meluas tidak hanya di bidang konversi energi, tetapi juga di bidang kehidupan lainnya. Teknik *swa-cleaning*, purifikasi udara, *anti-fogging glass*, dan pemurnian air merupakan contoh penerapan terbaru dari teknik fotokatalisis (Fujishima, 1999).

2.1.1 Proses Fotokatalisis

Proses oksidasi fotokatalitik merupakan teknologi yang bersih dan efektif untuk degradasi dan mineralisasi berbagai polutan (Puma, 2001). Pada umumnya proses fotokatalitik terbagi menjadi dua, yakni fotokatalitik homogen dan fotokatalitik heterogen. Fotokatalitik homogen adalah proses fotokatalitik dengan bantuan zat pengoksidasi seperti ozon dan hidrogen peroksida, sedangkan fotokatalitik heterogen merupakan suatu teknologi yang didasarkan pada iradiasi fotokatalis semikonduktor. Fotokatalitik heterogen dapat berlangsung pada berbagai macam media yaitu fasa gas, organik murni fasa cair, atau larutan encer.

Secara umum, fenomena fotokatalisis pada permukaan semikonduktor dapat dijelaskan oleh gambar 2.1. Jika suatu semikonduktor dikenai cahaya ($h\nu$) dengan energi yang sesuai, maka elektron (e^-) pada pita valensi akan terfotoeksitasi ke pita konduksi, dan meninggalkan lubang positif ($hole^+$, disingkat sebagai h^+) pada pita valensi. Kemungkinan yang terjadi pada h^+ dan e^- yang tereksitasi adalah sebagai berikut (Gunlazuardi, 2001; Yasumori, 2001; Catherine, 2001; Kopf, 2000; Jacoby, 1996):

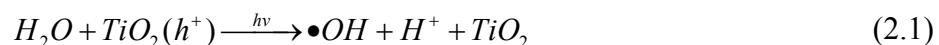
1. Rekombinasi antara h^+ dan e^- terfotoeksitasi, baik di permukaan (jalur A) ataupun didalam *bulk* partikel (jalur B).
2. Pasangan e^- dan h^+ dapat bertahan sampai pada permukaan semikonduktor (jalur C dan D), dimana h^+ dapat menginisiasi reaksi oksidasi dan di lain pihak e^- akan menginisiasi reaksi reduksi zat kimia yang ada disekitar permukaan semikonduktor. Reaksi ini merupakan tahap penentu laju reaksi dalam reaksi redoks fotokatalitik. (Gunlazuardi, 2001; Yasumori, 2001)



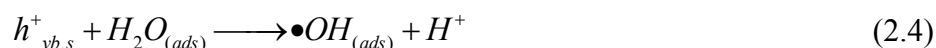
Gambar 2.1 Fenomena foto-eksitasi elektron pada suatu semikonduktor

Sumber : Linsebigler, 1995

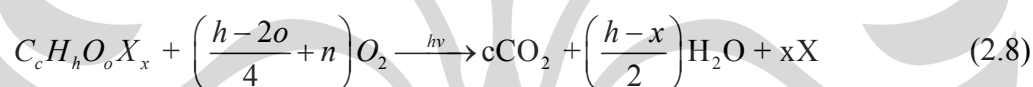
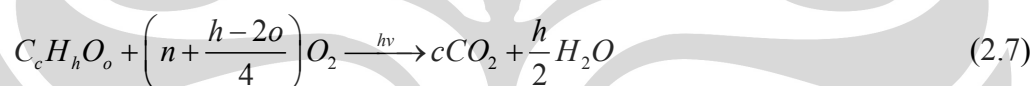
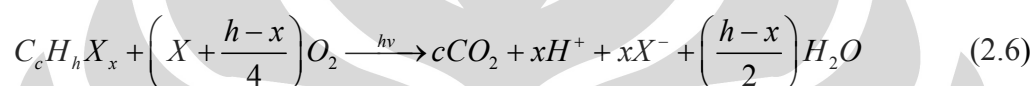
Pada prinsipnya, reaksi oksidasi pada permukaan semikonduktor dapat berlangsung melalui donasi elektron dari substrat ke h^+ (menghasilkan radikal pada substrat yang akan menginisiasi reaksi berantai). Apabila potensial oksidasi yang dimiliki oleh h^+ pada pita valensi ini cukup besar untuk mengoksidasi air dan/atau gugus hidroksil pada permukaan partikel, maka akan dihasilkan radikal hidroksil. Radikal hidroksil adalah spesi pengoksidasi kuat (pada pH = 1) yang memiliki potensial redoks sebesar 2,8 Volt (relatif terhadap elektroda hidrogen Nernst). Potensial sebesar ini cukup kuat untuk mengoksidasi kebanyakan polutan organik dalam konsentrasi rendah menjadi air, asam mineral dan karbon dioksida (Gunlazuardi, 2001; Jacoby, 1996). Proses di atas dapat dijelaskan dengan persamaan-persamaan reaksi berikut :



Mekanisme reaksi lebih rinci adalah sebagai berikut (Gunlazuardi, 2001; Litter, 1996; Kopf, 2000):



Dari keempat tahapan reaksi tersebut, dihasilkan *oxydizing agent*, yaitu radikal bebas hidroksil yang dapat menginisiasi degradasi berbagai polutan. Untuk polutan organik, reaksi oksidasi yang diinisiasi oleh radikal hidroksil mengikuti persamaan sebagai berikut :

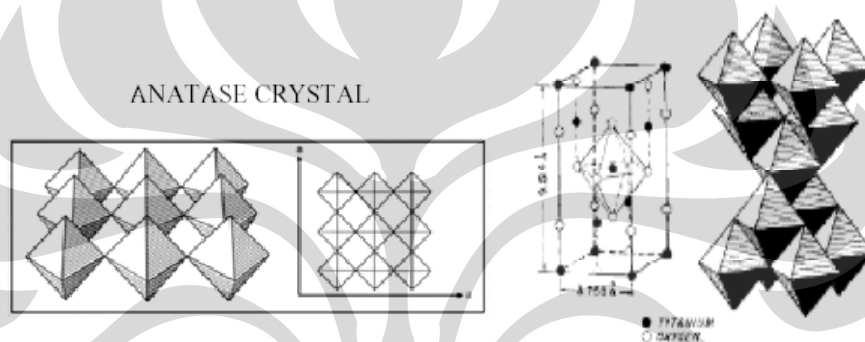


2.1.2 Fotokatalis TiO₂

Terdapat banyak jenis semikonduktor yang dapat digunakan sebagai fotokatalis, diantaranya ZnO, WO₃, CdS, CdSe, SiC dan TiO₂. Dari semuanya itu, TiO₂ merupakan semikonduktor yang paling sering digunakan sebagai fotokatalis dalam aplikasi reaksi fotokatalitik karena keunggulannya, yaitu (Litter, 1996; Wu, 2003; Slamet, 2007):

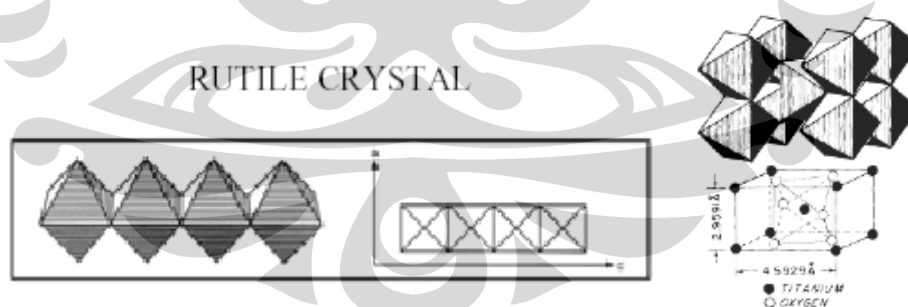
1. Indeks refraktif tinggi (sifat optis)
2. Transmittansi baik pada daerah infra merah dan cahaya tampak (sifat optis)
3. Konstanta dielektrik tinggi (sifat elektrik)
4. Stabilitas kimia baik
5. Stabilitas cahaya baik
6. Tidak beracun
7. Aktivitas fotokatalisis tinggi
8. Harganya relatif terjangkau

Salah satu faktor yang mempengaruhi aktivitas TiO_2 sebagai fotokatalis adalah bentuk kristalnya (Tjahjanto, 2001). TiO_2 memiliki tiga struktur kristal, yaitu rutile yang lebih stabil pada temperatur tinggi (mulai terbentuk pada temperatur 700°C), anatase, dan brookite yang hanya ditemukan pada mineral (Tjahjanto, 2001; Slamet, 2007). Hanya rutile dan anatase yang cukup stabil keberadaannya dan biasa digunakan sebagai fotokatalis. Gambar 2.2 dan 2.3 menunjukkan perspektif struktur rutile dan anatase. Dari gambar perspektif tersebut nampak jelas perbedaan kedua struktur yang berakibat pada perbedaan massa jenis ($3,9\text{ g/cc}$ untuk anatase dan $4,2\text{ g/cc}$ untuk rutile), luas permukaan, dan sisi aktifnya (Gunlazuardi, 2001).



Gambar 2.2 Perspektif struktur kristal anatase

Sumber : Licciuli, 2002



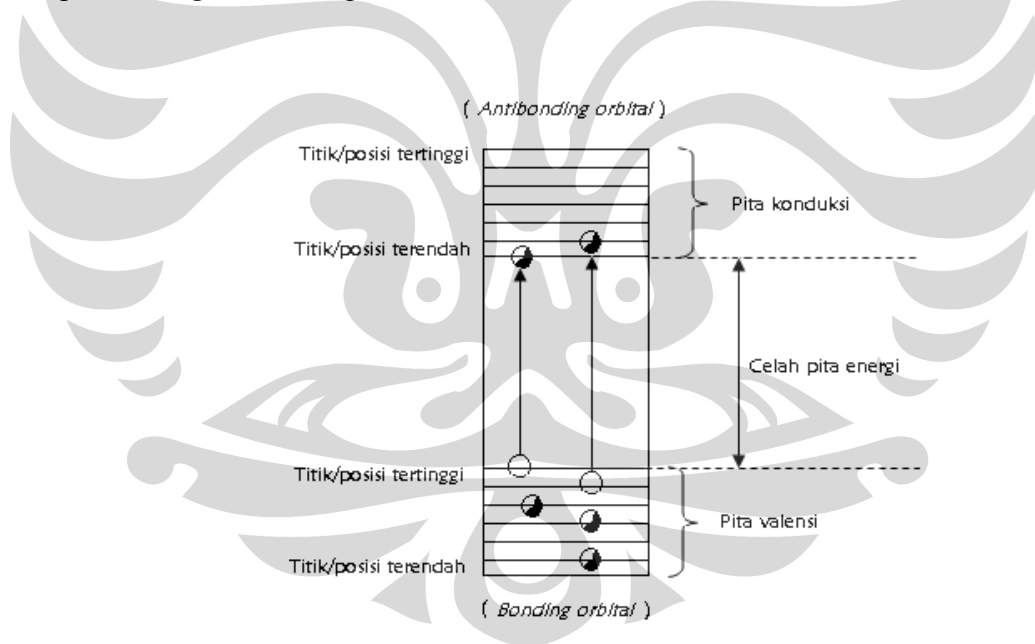
Gambar 2.3 Perspektif struktur kristal rutile

Sumber : Licciuli, 2002

Anatase secara termodinamika kurang stabil daripada rutile tetapi pembentukannya yang terjadi pada temperatur $<600^\circ\text{C}$ membuatnya memiliki luas permukaan yang lebih besar dan densitas permukaan aktif yang lebih tinggi untuk adsorpsi dan katalisis (Slamet, 2007).

Anatase merupakan tipe yang paling aktif karena memiliki *bandgap energy* (celah pita energi yang menggambarkan energi cahaya minimum yang dibutuhkan untuk mengeksitasi elektron) sebesar 3,2 eV (lebih dekat ke sinar UV, panjang gelombang maksimum 388 nm), sedangkan rutile 3,0 eV (lebih dekat ke sinar tampak, panjang gelombang maksimum 413 nm). Perbedaan ini membuat letak *conduction band* (CB : tingkat energi hasil hibridisasi yang berasal dari kulit 3d titanium) dari anatase lebih tinggi daripada rutile, sedangkan *valence band* (VB : tingkat energi hasil hibridisasi dari kulit 2p oksigen) anatase dan rutile sama yang membuat anatase mampu mereduksi oksigen molekular menjadi superoksida serta mereduksi air menjadi hidrogen (Slamet, 2007).

Semakin kecil *band gap*, semakin mudah pula fotokatalis menyerap foton dengan tingkat energi lebih kecil namun semakin besar *band gap*, kemungkinan h^+ dan e^- untuk berekombinasi semakin besar. Sehingga kedua aspek ini perlu dipertimbangkan dalam pemilihan fasa semikonduktor TiO_2 .



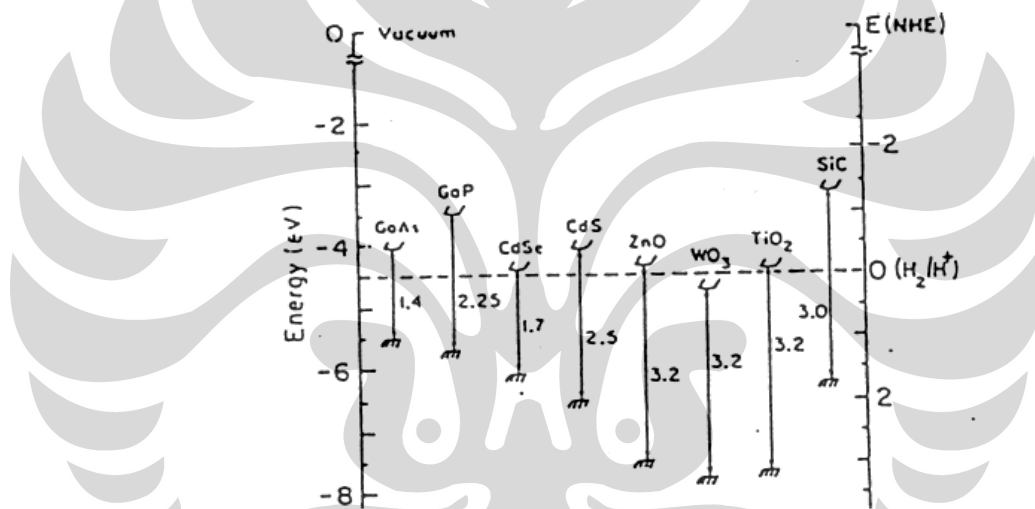
Gambar 2.4 Gambar daerah energi pada semikonduktor

Sumber : Amemiya, 2004

TiO_2 anatase bersifat metastabil dan cenderung bertransformasi menjadi rutile pada suhu tinggi (sekitar $915^{\circ}C$). Banyak faktor yang mempengaruhi transformasi anatase-rutile, antara lain (Cristallo, 2001):

- Dimensi rata-rata partikel dan kristal
- Adanya *impurities* pada bagian dalam dan permukaan TiO_2 (V_2O_5 meningkatkan transformasi anatase-rutile sedangkan keberadaan SO_4^{2-} dan SiO_2 menurunkan kinetika reaksi)
- Komposisi gas di sekitar katalis selama reaksi katalitik

Fasa rutile TiO_2 menunjukkan fotoaktivitas yang lebih rendah dari fasa anatase. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, rutile dipreparasi dengan kalsinasi anatase pada suhu tinggi. Namun, beberapa sumber melaporkan bahwa preparasi rutile pada suhu rendah telah berkembang dan menghasilkan fotoaktivitas yang cukup tinggi (Palmisano, 2007).



Gambar 2.5. Energi celah, posisi pita valensi (bawah), konduksi (atas), dan potensial redoks dari berbagai semikonduktor

Sumber : Linsebigler, 1995

Dari Gambar 2.5 terlihat TiO_2 mempunyai celah energi sebesar 3,2 eV. Hal ini mengindikasikan bahwa h^+ pada permukaan TiO_2 merupakan spesi oksidator kuat karena akan mengoksidasi spesi kimia lainnya yang mempunyai potensial redoks lebih kecil, termasuk dalam hal ini molekul air dan/atau gugus hidroksil yang akan menghasilkan radikal hidroksil. Radikal hidroksil ini pada $\text{pH} = 1$ mempunyai potensial sebesar 2, 8 V dan kebanyakan zat organik mempunyai potensial redoks yang lebih kecil dari potensial tersebut (Gunlazuardi, 2001).

2.2 Adsorpsi

Adsorpsi adalah sebuah proses yang terjadi manakala sejumlah gas atau cairan terkonsentrasi pada suatu permukaan padatan atau cairan, membentuk lapisan molekular ataupun atom. Molekul-molekul zat padat ataupun cairan memiliki gaya molekular yang tidak stabil atau tidak jenuh sehingga permukaan padatan atau cairan tersebut memiliki kecenderungan untuk tertarik ke arah dalam dan menarik zat-zat lain yang melakukan kontak dengannya (Maron, 1941; Yang, 1987). Substansi yang teradsorb dinamakan adsorbat dan berada pada fasa teradsorpsi sedangkan padatan atau cairan yang mengadsorb substansi disebut adsorben. Adsorben yang saat ini dikenal antara lain: karbon aktif, silika gel dan zeolit (Yang, 1987).

Adsorpsi biasanya dinyatakan dalam isotherm. Banyaknya adsorbat gas yang diserap oleh adsorben padat dipengaruhi jenis adsorben dan adsorbat, luas permukaan adsorben, tekanan, dan suhu. Secara umum, adsorpsi dapat dibedakan menjadi dua jenis (Maron, 1941):

1. Adsorpsi Fisika → tanpa reaksi kimia, cepat, reversible dan dikategorikan berenergi rendah
2. Adsorpsi Kimia → melibatkan reaksi kimia, irreversible dan dikategorikan berenergi tinggi

Tabel 2.1 Perbandingan antara adsorpsi fisika dan kimia

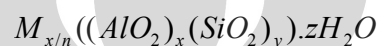
Adsorpsi fisika	Adsorpsi kimia
Panas adsorpsi rendah (kurang dari 2-3 kali kalor penguapan)	Panas adsorpsi tinggi (lebih dari 2-3 kali panas penguapan)
Non-spesifik	Sangat spesifik
Monolayer dan multilayer	Monolayer
Tidak ada disosiasi adsorbat	Ada disosiasi adsorbat
Signifikan hanya pada suhu relatif rendah	Signifikan pada range suhu yang tinggi

Sumber : Slamet, 2007; Ruthven, ; Yang, 1987

Banyaknya adsorbat yang teradsorb pada permukaan adsorben dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain jenis adsorbat, sifat adsorben, suhu, dan tekanan (Slamet, 2007).

2.2.1 Adsorben Zeolit Alam

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa suatu bahan yang dapat mengadsorp senyawa lain disebut adsorben. Di antara adsorben yang dikenal sekarang dan jumlahnya melimpah di Indonesia adalah zeolit. Zeolit adalah bentuk kristalin berpori alumina-silikat dari logam alkali dan alkali tanah seperti natrium, kalium, dan kalsium yang diwakili oleh stoikiometri (Yang, 1987):



Dimana x dan y adalah bilangan bulat dengan y/x lebih besar dari 1, n adalah valensi dari kation M dan z adalah jumlah molekul air di setiap unit sel.

Kerangka dari zeolit terdiri dari molekul-molekul SiO_4 dan AlO_4 tetrahedral yang terhubung dengan atom-atom O membentuk pola geometris kristal dan membentuk pori dengan dimensi molekular yang memungkinkan molekul asing untuk masuk ke dalamnya. Karena struktur mikropori dari zeolit ditentukan oleh pola geometris kristal, maka distribusi pori zeolit sangat seragam. Inilah yang membedakan zeolit dengan adsorben lain (Ruthven, n.d.).

Zeolit dapat dimanfaatkan sebagai adsorben, penukar ion dan katalis maupun penyangga katalis. Dalam penelitian ini, zeolit berfungsi sebagai adsorben maupun sebagai penyangga katalis. Molekul-molekul zat dengan diameter tertentu akan dapat melewati dan menempati pori-pori dan rongga dari zeolit sementara molekul yang terlalu besar akan ditolak. Jadi sebagai adsorben, zeolit mempunyai sifat *shape selectivity*. Zeolit juga memiliki kemampuan untuk mengondensasi gas yang teradsorpsi (Matsuoka, 2003). Zeolit yang merupakan adsorben polar yang bersifat hidrofilik ternyata dapat menyerap zat organik maupun anorganik (Handoko, 2002). Kemampuan zeolit menyerap zat organik maupun anorganik ini, bergantung dari rasio Si/Al dalam zeolit. Makin rendah rasio Si/Al, maka zeolit akan cenderung memilih molekul-molekul yang polar (air dan amoniak) untuk diadsorpsi. Sebaliknya jika rasio Si/Al makin tinggi, maka zeolit cenderung memilih molekul-molekul non-polar (senyawa organik) untuk diadsorpsi (Jansen, 1994; Handoko, 2002). Hal ini

disebabkan karena dengan semakin rendahnya rasio Si/Al dalam zeolit maka dalam zeolit tersebut akan timbul gradien medan elektronik yang makin besar sehingga molekul-molekul polar akan berinteraksi lebih kuat dengan medan elektronik itu daripada molekul-molekul non-polar (Handoko, 2002).

Tabel 2.2 Ukuran rongga dan rasio Si/Al berbagai jenis zeolit

Jenis Zeolit	Ukuran Rongga (Å)	Si/Al	Kapasitas tukar kation (meq/g)
Analsim	2.6	4	4.9
Klinoptilolit	3.7 x 4.2	4	4.9
	4.0 x 5.5	10	2.6
Erionit	3.6 x 5.5	5	3.3
Ferririt	3.6 x 5.2	11	2.4
	3.4 x 4.6		
Mordenit	6.7 x 7.0	10	2.6
	2.9 x 5.7		
Filipsit	4.2 x 4.4	4.4	4.7
	4.3 x 4.0		

Sumber : Sutarti, 1994

Zeolit merupakan bahan alam yang ketersediaannya melimpah di Indonesia. Beberapa diantaranya yaitu jenis Zeolit Alam Lampung (ZAL) dan Zeolit Alam Malang (ZAM). Ketersediaan zeolit alam di Indonesia cukup melimpah karena sebagian besar wilayah Indonesia terdiri dari batuan gunung api yang merupakan sumber mineral zeolit. Zeolit Alam Malang dan Lampung memiliki jenis yang berbeda. Zeolit Alam Malang (ZAM) memiliki struktur mordenit yang dominan sedangkan Zeolit Alam Lampung (ZAL) memiliki struktur klinoptilolit yang dominan.

Zeolit digunakan sebagai penyangga katalis karena struktur kristalnya berpori dan memiliki luas permukaan yang besar, tersusun oleh kerangka silika-alumina, memiliki stabilitas termal yang tinggi, harganya murah serta ketersediaannya cukup melimpah (Handoko, 2002). Dispersi katalis/logam aktif ke permukaan penyangga katalis bertujuan untuk memperluas permukaan katalis dan memperbanyak jumlah situs aktif. Dengan demikian diharapkan kontak antara reaktan dengan katalis akan semakin banyak sehingga reaksi akan berlangsung mudah dan cepat. Selain itu,

penggunaan penyangga katalis adalah untuk mengatur jumlah katalis/logam aktif yang dibutuhkan, meningkatkan aktivitas katalis serta daya tahan kerja katalis.

2.2.2 Adsorben Karbon Aktif

Karbon aktif biasanya dibuat dengan dekomposisi termal dari material berkarbon yang diikuti dengan aktivasi dengan steam atau karbon dioksida pada suhu tinggi. Struktur karbon aktif (Gambar 2.6) mengandung mikrokristalit dari grafit dan mikrokristalit ini terkumpul pada arah yang acak. Ruang antar kristal inilah yang membentuk pori mikro (Ruthven, n.d.; Yang, 1987).



Gambar 2.6 Struktur karbon aktif

Sumber : Figuredo, 1986

Sifat adsorpsi karbon aktif juga tergantung pada luas permukaan internalnya. Daya guna permukaan karbon aktif, yaitu dinding porinya, ditentukan oleh ukuran pori dan distribusinya. Aktivitas karbon aktif sebagai adsorben dibentuk salah satunya oleh unsur-unsur mineral dan senyawa kimia yang ditambahkan pada saat aktivasi yang akan meresap ke dalamnya dan membuka permukaan yang tadinya tertutup oleh komponen-komponen kimia sehingga pori-pori akan semakin besar. Pori-pori yang terbuka ini menyebabkan karbon aktif dapat bertindak sebagai adsorben yang sangat tinggi kualitasnya. Luas permukaan karbon aktif biasanya diukur oleh BET. Produk komersial umumnya memiliki luas permukaan spesifik antara 200-1500 m²/gr (Othmer, 1992).

Karbon aktif adalah senyawa kompleks yang sulit diklasifikasikan berdasarkan sifat dasar, karakteristik permukaan dan metode preparasinya. Namun karbon aktif dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Wikipedia, 2009):

1. *Powdered Activated Carbon* (PAC)
2. *Granulated Activated Carbon* (GAC)
3. *Extruded Activated Carbon* (EAC)
4. *Impregnated Carbon*
5. *Polymer Coated Carbon*

Distribusi pori dan luas pori total berhubungan dengan kondisi awal pirolisis dan prosedur aktivasinya. Properti dari karbon aktif dapat dilihat pada tabel 2.3 (Ruthven, n.d.):

Tabel 2.3 Ukuran pori karbon aktif

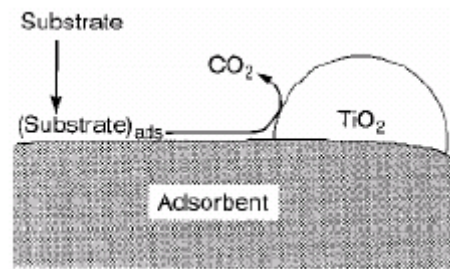
	Micropore	Mesopores or Transitional Pores	Macropores
Diameter (Å)	< 20	20–500	> 500
Pore volume (cm ³ /g)	0.15–0.5	0.02–0.1	0.2–0.5
Surface area (m ² /g)	100–1000	10–100	0.5–2
(Particle density 0.6–0.9 g/cm ³ ; porosity 0.4–0.6)			

Sumber : Ruthven, n.d.

2.3 Kombinasi Proses Fotokatalisis-Adsorpsi

Proses fotokatalisis terjadi pada fasa teradsorpsi (Fogler, 1992). Hal ini menjadi masalah bagi proses fotokatalisis karena kebanyakan semikonduktor yang digunakan sebagai fotokatalis memiliki daya adsorpsi yang lemah. Untuk menutupi kekurangan tersebut, maka proses fotokatalisis oleh fotokatalis semikonduktor perlu dimodifikasi dengan suatu adsorben sebagai penyangga (Canela, 1999; El-Maazawi, 2000).

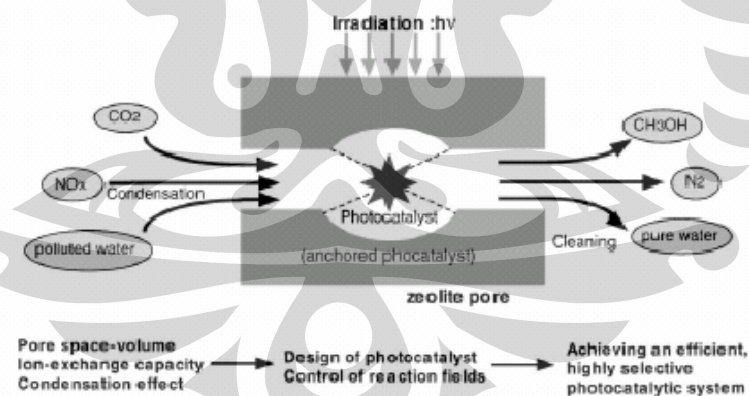
Dari penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa penggunaan adsorben sebagai penyangga fotokatalis dapat meningkatkan laju fotodegradasi berbagai polutan (Torimoto, 1996). Gambar 2.7 menunjukkan mekanisme reaksi kombinasi fotokatalisis dan adsorpsi.



Gambar 2.7 Mekanisme reaksi fotokatalisis dengan adsorben sebagai penyangga

Sumber : Torimoto, 1996

Adsorben yang digunakan merupakan suatu media berpori sehingga ada kemungkinan fotokatalis menempel di permukaan adsorben atau di dalam pori-pori adsorben. Sebuah penelitian melaporkan, dengan memasukkan fotokatalis ke dalam pori adsorben (yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah zeolit) dengan metode impregnasi dan *ion exchange*, diperoleh peningkatan laju fotodekomposisi NO_x dan CO_2 dibandingkan dengan *bulk* TiO_2 tanpa zeolit (Matsuoka, 2003). Mekanisme reaksi yang terjadi adalah seperti pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Mekanisme reaksi fotokatalisis di dalam pori zeolit

Sumber : Torimoto, 1996

Dari hasil sejumlah penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa faktor utama penyebab meningkatnya laju fotodegradasi polutan adalah karena penggunaan adsorben sebagai penyangga fotokatalis. Fotokatalis yang terdapat dalam pori maupun pada permukaan zeolit dapat aktif memicu reaksi

fotokatalitik sehingga dapat disimpulkan bahwa hal yang mempengaruhi keaktifan fotokatalis adalah bagaimana dispersi fotokatalis dalam adsorben penyangga dan bukan masalah letak fotokatalis pada support. Makin tinggi dispersi atau penyebaran fotokatalis yang memiliki struktur koordinat tetrahedral, maka makin aktif fotokatalis tersebut. Untuk itu perlu dipilih metode preparasi yang memungkinkan dispersi fotokatalis dengan baik pada adsorben (Slamet, 2007).

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

- Meningkatkan konsentrasi senyawa yang akan didegradasi pada sekitar ruang TiO_2 sehingga dapat meningkatkan laju reaksi.
- Meningkatkan kemampuan adsorpsi katalis. Bila kemampuan adsorpsi meningkat maka kinetika fotokatalitik juga akan meningkat karena fotokatalis dapat langsung mengoksidasi polutan tersebut.
- Penggunaan penyangga dapat mendispersikan fotokatalis TiO_2 sehingga luas permukaan katalis menjadi lebih besar dan fotokatalis menjadi lebih aktif.
- Polutan yang teradsorpsi oleh penyangga kemudian dioksidasi oleh fotokatalis, sehingga *intermediate* yang terbentuk pun akan teradsorpsi oleh penyangga yang selanjutnya akan dioksidasi lagi oleh fotokatalis
- Polutan yang teradsorpsi oleh penyangga dapat langsung dioksidasi oleh fotokatalis menjadi CO_2 dan H_2O sehingga adsorben akan membutuhkan waktu yang cukup lama untuk menjadi jenuh. Dengan kata lain, adsorben diregenerasi secara *insitu* oleh fotokatalis, sehingga proses degradasi polutan dapat berlangsung dalam waktu yang cukup lama dan lebih efisien.

Kinerja kombinasi antara fotokatalis dan adsorben ini ditentukan daya adsorpsi adsorben dan kemampuan difusi adsorbat ke fotokatalis TiO_2 (Torimoto, 1996). Semakin tinggi daya adsorpsi adsorben, maka laju degradasi polutan juga akan meningkat. Karena itu pemilihan adsorben harus dilakukan secermat mungkin untuk menghasilkan laju degradasi yang optimal. Kemampuan difusi adsorbat ke fotokatalis juga turut berperan dalam menentukan laju degradasi polutan. Bila kemampuan difusi adsorbat ke fotokatalis baik, maka laju degradasi juga akan semakin tinggi. Karbon aktif memiliki kemampuan adsorpsi yang baik,

akan tetapi laju degradasi polutan tidak selalu paling tinggi apabila kita menggunakan karbon aktif sebagai penyangga fotokatalis (Slamet, 2007).

Tingkat aktivitas fotokatalis yang digabungkan dengan adsorben sebagai penyangga sangat dipengaruhi oleh jumlah konsentrasi atau *loading* fotokatalis TiO_2 ke adsorben penyangga. Aktivitas akan semakin baik apabila fotokatalis terdispersi merata ke seluruh permukaan adsorben. Hal ini karena TiO_2 akan berbentuk tetrahedral ketika terdispersi secara merata (Matsuoka, 2003). Pada jumlah konsentrasi TiO_2 yang cukup tinggi, diperoleh laju fotodegradasi senyawa CO_2 dan NO_x yang rendah. Hal ini karena TiO_2 menggerombol pada bagian tertentu dari penyangga. Karena TiO_2 bergerombol, maka selain adanya ikatan Ti-O, 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 CO_2 dan NO_x . Koordinat TiO_2 yang berbentuk tetrahedral memungkinkan adanya interaksi TiO_2 dengan substansi yang akan didegradasi sehingga ketika diberi cahaya foton TiO_2 dapat langsung mengoksidasi substansi polutan tersebut. Pada struktur koordinat TiO_2 yang berbentuk oktahedral hanya ada interaksi antar TiO_2 sehingga TiO_2 tidak aktif berfungsi sebagai fotokatalis (Slamet, 2007).

2.4 Asap Rokok

Asap rokok telah lama dikenal sebagai polutan udara yang cukup berbahaya. Penyakit-penyakit yang bisa ditimbulkan akibat menghisap rokok baik sebagai perokok aktif maupun perokok aktif adalah bronkitis kronis, emfisema, kanker, penyempitan pembuluh darah, pneumonia, dan asma (Susana, 2003).

Rokok memiliki dua arus asap: arus utama dan arus samping. Asap arus utama adalah asap rokok yang dihisap oleh si perokok sedangkan asap arus samping adalah asap rokok yang dilepaskan ke lingkungan sekelilingnya yang memungkinkan dihirup oleh orang lain yang berada pada lingkungan tersebut. Dari hasil sebuah penelitian, didapatkan data bahwa polutan lebih banyak terdapat pada asap arus samping dari pada asap arus utama. Inilah alasan mengapa dampak negatif dari rokok lebih banyak dirasakan oleh perokok pasif (Susana, 2003).

2.4.1 Piridin

Senyawa kimia yang terdapat di dalam satu batang rokok mencapai 4000 jenis senyawa (Yu, 2006). Dari sekian banyak senyawa tersebut, senyawa yang paling bertanggung jawab dalam menimbulkan bau tak sedap adalah persenyawaan pyrrole, pyrazine dan piridin. Senyawa-senyawa ini diproduksi dari pembakaran rokok dan reaksi Mailard yang menyebabkan tembakau berwarna coklat ketika dikeringkan dan difermentasikan selama proses produksi rokok. Kedua proses tersebut membentuk senyawa pyrolisis dari reduksi gula dan asam amino yang terdapat di dalam daun tembakau. Dari ketiga senyawa tersebut yang memegang peranan terbesar dalam menimbulkan bau pada asap rokok adalah piridin (Bazemore, 2006). Senyawa-senyawa yang merupakan polutan penyebab bau pada asap rokok yang juga sekaligus turunan piridin antara lain 2-etilpiridin; 3-metilpiridin; 2,3,5-trimetilpiridin; 2,5-dimetilpyrazine; 2-etil-3,5-dimetilpiridin dan nikotin (Yu, 2006; Bazemore, 2006).

Piridin adalah senyawa kimia dengan rumus kimia C_5H_5N dan struktur kimia seperti pada Gambar 2.8. Piridin memiliki aroma yang tak sedap dan menyengat. Piridin merupakan salah satu senyawa organik aromatik heterosiklik. Struktur piridin memiliki hubungan yang dekat dengan benzena dimana satu grup CH pada cincin benzena digantikan oleh sebuah atom nitrogen. Piridin juga digunakan sebagai ligan pada kimia koordinasi. Sebagai ligan, piridin memiliki unsur “py” dalam penamaannya (Wikipedia, 2009).



Gambar 2.9 Struktur kimia piridin

Sumber : Wikipedia, 2009

Tabel 2.4 Properties piridin pada 1 atm dan 25°C

SIFAT	KETERANGAN
Rumus molekul	C ₅ H ₅ N
Wujud	Cairan tak berwarna
Berat molekul	79,1 g/mol
Titik beku	-41,6 °C
Titik didih	115,2 °C
Titik nyala	21 °C
Densitas	0,9819 g/cm ³ , liquid
Viskositas	0,94 cP
Kelarutan dalam air	Tinggi

Sumber : Wikipedia, 2009

Pada reaksi organik, piridin bersifat seperti amina tersier yaitu mengalami protonasi, alkilasi, asilasi dan n-oksidasi. Selain itu, piridin juga bersifat seperti senyawa aromatik yaitu mengalami substitusi nukleofilik. Piridin adalah nukleofil yang baik. Senyawa ini mudah diserang oleh *alkylating agents* menghasilkan garam *N*-alkylpyridinium (Wikipedia, 2009).

Piridin bersifat *volatile* dan bisa diserap oleh kulit. Data eksperimen menunjukkan piridin bersifat karsinogenik. Dosis kecil 2-etilpiridin dan 3-etilpiridin serta dosis besar piridin dapat menghambat pertumbuhan sel pembuluh darah pusat (Yu, 2006). Dampak lain dari piridin antara lain pusing, sakit kepala, sakit perut, penyumbatan paru-paru, *nausea* dan *anorexia* (Wikipedia, 2009).

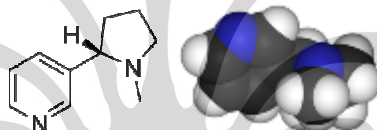
Analisis biasanya dilakukan dengan mengkonsentrasikan piridin pada suatu sorben seperti Tenax ® atau karbon aktif yang bisa dilepaskan kembali secara termal atau dilarutkan dengan pelarut organik seperti diklorometana untuk berikutnya dianalisis dengan *Gas Chromatography/Mass Spectroscopy* atau *Flame Ionization Detection* (FID). Metode lain yang dapat digunakan adalah *High Resolution Gas Chromatography* (HRGC) dan *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) serta *Fourier Transform Infrared spectroscopy* (FTIR). (U.S. Public Health Service, 1992). Kendala-kendala metode sampling untuk senyawa piridin tersebut adalah

1. Sampel yang tidak representatif

2. Volume sampel yang tidak sesuai
3. Adanya kontaminan
4. Membutuhkan prosedur lab yang ketat
5. Membutuhkan ekstraksi yang baik
6. Membutuhkan prosedur pemisahan

2.4.2 Nikotin

Nikotin merupakan senyawa alkaloid dan turunan piridin yang membentuk 0,3-6% kandungan tembakau basis kering (Islandcounty, 2000). Nikotin berbentuk cairan, tidak berwarna, dan merupakan basa yang mudah menguap (Gan, 1987). Nikotin dapat dengan mudah terserap oleh kulit dan terbakar di bawah titik didihnya dan uapnya akan terbakar pada suhu 35°C. Oleh karena itu, nikotin akan terbakar ketika rokok dinyalakan (Wikipedia, 2009).



Gambar 2.10 Struktur kimia nikotin

Sumber : Wikipedia, 2009

Tabel 2.5 Properties nikotin

SIFAT	KETERANGAN
Rumus molekul	$C_{10}H_{14}N_2$
Wujud	Cairan berminyak
Berat molekul	162,26 g/mol
Titik beku	-79°C
Titik didih	247 °C
Densitas	1,01 g/cm ³

Sumber : Wikipedia, 2009

Pada konsentrasi yang rendah, nikotin dapat bekerja sebagai stimulan bagi terbentuknya berbagai senyawa kimia didalam tubuh seperti *acetylcholine*,

norepinephrine, *epinephrine*, *vasopressin*, *arginine*, *dopamine*, dan *beta-endorphin*. Senyawa-senyawa tersebut dapat mengakibatkan dampak psikoaktif bagi penghisap rokok yang terdapat di dalam rokok. Penghisap rokok akan merasakan kegembiraan dan hilangnya kegelisahan yang bertahan selama beberapa jam. Selain itu, nikotin juga menimbulkan efek adiktif bagi pemakainya. (Wikipedia, 2009).

Nikotin mendorong terjadinya adhesi platelet yang diasosiasikan dengan penyakit kardiovaskuler dan hipertensi (Silverman, 1985). Nikotin merupakan bahan yang mempunyai aktifitas biologi yang poten yang akan menaikkan tingkat epinefrin dalam darah, menaikkan tekanan darah, menambah denyut jantung dan menginduksi vasokonstriksi perifer (Gan, 1987; Rivera, 1986). Nikotin selain dimetabolisme di hati, paru-paru dan ginjal, juga diekskresi melalui air susu.

Tidak ditemukan dampak karsinogen ataupun mutagen pada nikotin. Namun hasil penelitian menunjukkan bahwa nikotin berhubungan secara tidak langsung pada pertumbuhan sel kanker. Dan sebagian penelitian juga menunjukkan bahwa sekitar 75% penderita *schizophrenia* adalah perokok. Selain itu, penelitian juga menunjukkan bahwa dosis sebesar 40–60 mg menyebabkan kematian bagi pria dewasa. Hal ini berarti nikotin lebih toksik dari alkaloid lain seperti kokain. (Wikipedia, 2009; Islandcounty, 2000)

Pengukuran kadar nikotin dilakukan dengan menggunakan metode Kromatografi Cair Kinerja Tinggi (*High Performance Liquid Chromatography*). Langkah pertama yang dilakukan adalah mempersiapkan bahan-bahan dan alat yang diperlukan, pembuatan larutan standar nikotin, penentuan volume larutan pengabsorpsi, uji kualitatif nikotin, absorpsi nikotin dari asap rokok dan analisis dengan Kromatografi Cair Kinerja Tinggi. Banyaknya nikotin dalam asap rokok dihitung berdasarkan luas puncak kromatogram standar nikotin yang diketahui konsentrasinya (Snyder and Kirkland, 1980).

2.4.3 Karbon Monoksida

Karbon monoksida adalah senyawa kimia yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa. Karbon monoksida memiliki densitas yang lebih rendah dari udara dan sulit larut dalam air. Karbon monoksida dikenal sebagai polutan

yang sangat berbahaya bagi manusia sehingga kandungannya di udara sangat perlu untuk dikurangi. (Wikipedia, 2009)



Gambar 2.11 Struktur kimia karbon monoksida

Sumber : Wikipedia, 2009

Tabel 2.6 Properties karbon monoksida

SIFAT	KETERANGAN
Rumus molekul	CO
Wujud	Gas tak berwarna dan berbau
Berat molekul	28,0101 g/mol
Titik beku	-205 °C
Titik didih	-192 °C
Densitas	0,789 g/cm ³ , liquid 1,250 g/L at 0°C, 1 atm. 1,145 g/L at 25°C, 1 atm.
Kelarutan dalam air	0,0026 g/100 mL (20 °C)

Sumber : Wikipedia, 2009

Karbon monoksida merupakan senyawa yang sangat beracun. Pemaparan karbon monoksida dapat menyebabkan kerusakan pada sistem saraf dan hati. Karbon monoksida juga dapat berdampak buruk bagi bayi yang berada di dalam kandungan. Konsentrasi yang kecil (100 ppm) dapat menyebabkan sakit kepala dan konsentrasi yang lebih besar (sekitar 667 ppm) dapat menyebabkan 50% hemoglobin terkonversi menjadi karboksi hemoglobin. Karboksi hemoglobin ini tidak dapat menghantarkan oksigen dengan baik sehingga asupan oksigen bagi tubuh manusia menjadi terganggu. (Wikipedia, 2009).

Karbon monoksida dapat terbentuk dari berbagai sumber dengan konsentrasi yang bervariasi. Di bawah ini adalah berbagai sumber karbon monoksida beserta konsentrasinya (Wikipedia, 2009) :

- 0.1 ppm – Tingkat alami pada udara atmosfer

- 0.5 to 5 ppm – Rata-rata pada rumah tangga
- 5 to 15 ppm – Konsentrasi pada gas perapian
- 100-200 ppm – Daerah padat kendaraan
- 5,000 ppm – Cerobong asap pada pembakaran kayu rumah tangga
- 7,000 ppm – Gas buang kendaraan tanpa konverter katalitik
- 30,000 ppm – Asap rokok

Metode yang biasanya digunakan untuk mengukur konsentrasi karbon monoksida di udara didasarkan pada absorpsi radiasi infra merah oleh gas pada fotometer non-dispersif. Metode ini sangat sesuai untuk instalasi permanen pada stasiun monitoring yang telah ditetapkan. Selain itu, untuk mengukur jumlah pemaparan karbon monoksida pada seseorang digunakan alat analisis yang didasarkan pada reaksi elektrokimia antara CO dengan air terdeionisasi. Untuk keperluan skala lab, pengukuran kandungan CO biasa menggunakan *Gas Chromatography*.

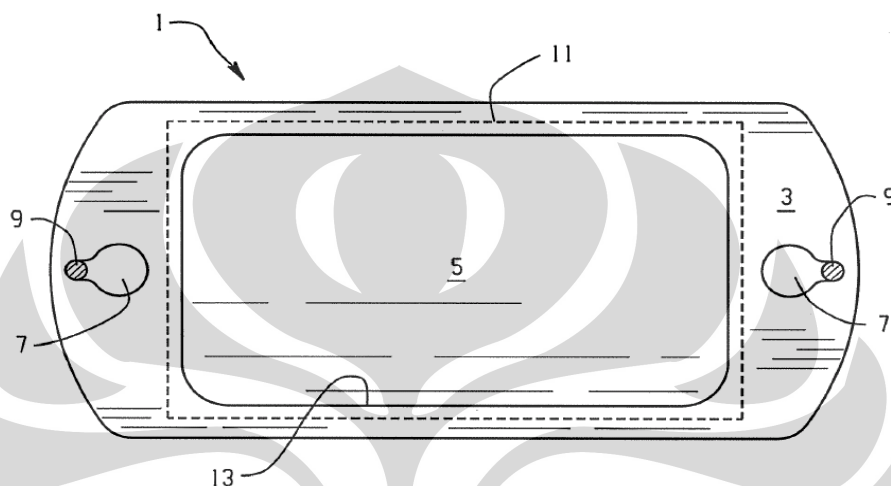
2.5 Penelusuran Paten yang Terkait

Di berbagai sumber, telah ada paten-paten yang berhubungan dengan pemurnian udara dan penghilangan bau udara ruangan dengan berbagai metode. Paten-paten tersebut menghasilkan alat yang berfungsi sebagai unit purifikasi dan deodorisasi udara berbasis fotokatalisis, ozonasi dan berbagai proses lainnya yang tergolong AOP (*Advance Oxidation Process*).

2.5.1 *Photocatalyst, Methods for Deodorizing, and Methods for Making a Deodorizer Sistem, Pub. No. US 0050272 A1 (Carrey, 2008)*

Paten ini menerangkan mengenai sistem deodorisasi yang didasarkan pada proses fotokatalitik. Fokus paten ini adalah fotokatalis yang digunakan dan metode yang dapat diterapkan untuk membuat dan menggunakan sistem tersebut. Pada penerapannya, sistem deodorisasi terdiri dari : sebuah lubang/kisi, nanopartikel titania dan kerangka di sekitar kisi yang memungkinkan kisi untuk dapat kontak dengan sinar matahari dan gas terkontaminasi yang akan dideodorisasi. Lubang/kisi memiliki daerah terbuka sebesar 35% dan 6400 bukaan/in². Pada penerapan yang lain, sebuah sistem deodorisasi terdiri dari

sebuah lubang/kisi pada sebuah *casing* dan sebuah *port* untuk menerima gas terkontaminasi yang akan dideodorisasi, nanopartikel titania yang dicoating pada lubang/kisi dan sebuah lampu UV sebagai sumber cahaya untuk kontak dengan lubang/kisi. Lubang/kisi memiliki daerah terbuka sebesar 35% dan 6400 bukaan/in².



Gambar 2.12 Skema alat paten

Sumber : Carey, 2008

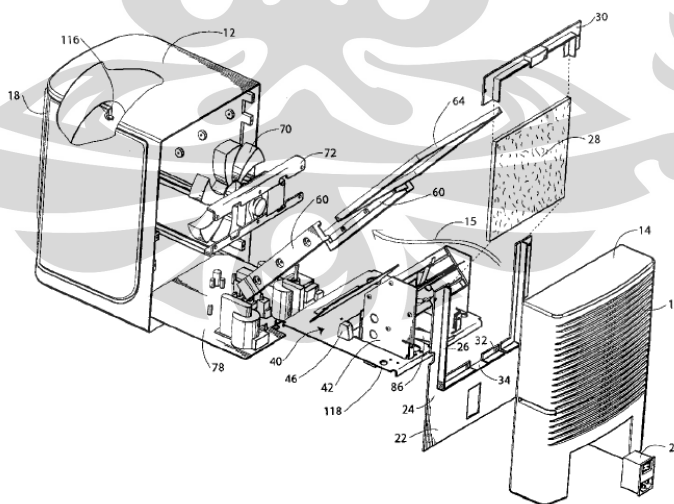
Keterangan Gambar :

1. Sistem deodorisasi
3. Casing
5. Lubang/kisi yang dilapisi nanopartikel titania
7. Bukaan untuk menerima elemen yang dimasukkan
9. Tempat masuknya elemen
11. Perluasan kisi/lubang
13. Lingkaran dalam

2.5.2 Air Purifier With Control Sensors, Pub. No. US 7,166,259 B2 (Beam, et al., 2007)

Patent ini menerangkan mengenai alat purifikasi udara dengan teknologi fotokatalisis dan ionizer. Air purifier menarik udara masuk melalui kisi-kisi udara pada bagian belakang alat (16) dengan kipas (70). Pada tahap awal, udara akan

disaring dengan filter (28) sehingga partikulat-partikulat padat akan terperangkap dan tertahan pada filter. Selanjutnya, udara yang keluar dari filter akan memasuki tahap ionizer dimana pancaran bunga api listrik dari *corona discharge* plat purifikasi (44) akan menghasilkan ion negatif dan ion positif. Jumlah atau frekuensi pancaran bunga api listrik dari *corona discharge* tergantung dari luas area ruangan yang akan dipurifikasi. Pada bagian ini juga terdapat antena ionizer (118) yang akan menghasilkan ion positif. Sistem ionizer ini akan membunuh kuman, bakteri, dan virus serta mengendapkan partikulat padat yang masih terdapat di udara. Keluar dari tahap ionizer, udara akan memasuki tahap fotokatalisis. Pada bagian ini, pancaran UV dari bola lampu UV (48) akan menghancurkan patogen dan mikroba berbahaya lainnya. Lebih lanjut, pancaran UV juga mengaktifkan plat fotokatalisis (64) yang akan menghasilkan radikal hidroksil yang akan mendegradasi polutan udara. Udara yang telah dipurifikasi akan keluar dari kisi-kisi pada bagian depan alat (18) dengan bantuan kipas (70). Udara yang telah keluar ini juga diperkaya dengan ion negatif yang dihasilkan oleh *needle ionizer* (116). Ion negative ini memiliki kemampuan untuk mempurifikasi udara di ruangan sekaligus menciptakan suasana nyaman di ruangan.



Gambar 2.13 Skema alat paten *Air Purifier With Control Sensor*
Sumber : Beam, et al., 2007

BAB III

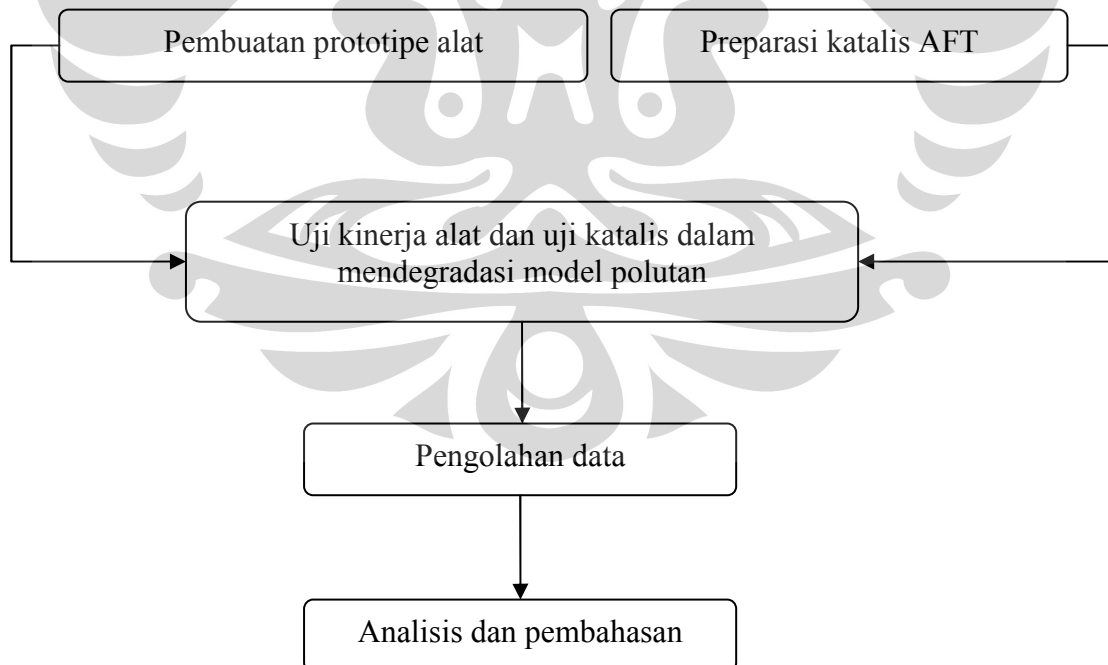
METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Percobaan

Penelitian ini dilaksanakan dalam bentuk eksperimen dengan menggunakan prototipe alat uji purifikasi udara dan reaktor *batch* fasa cair. Penelitian ini telah dilaksanakan di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (RPKA) Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok. Pada bagian ini ditampilkan keseluruhan diagram alir dari penelitian yang telah dilakukan.

3.1.1 Diagram Alir Penelitian

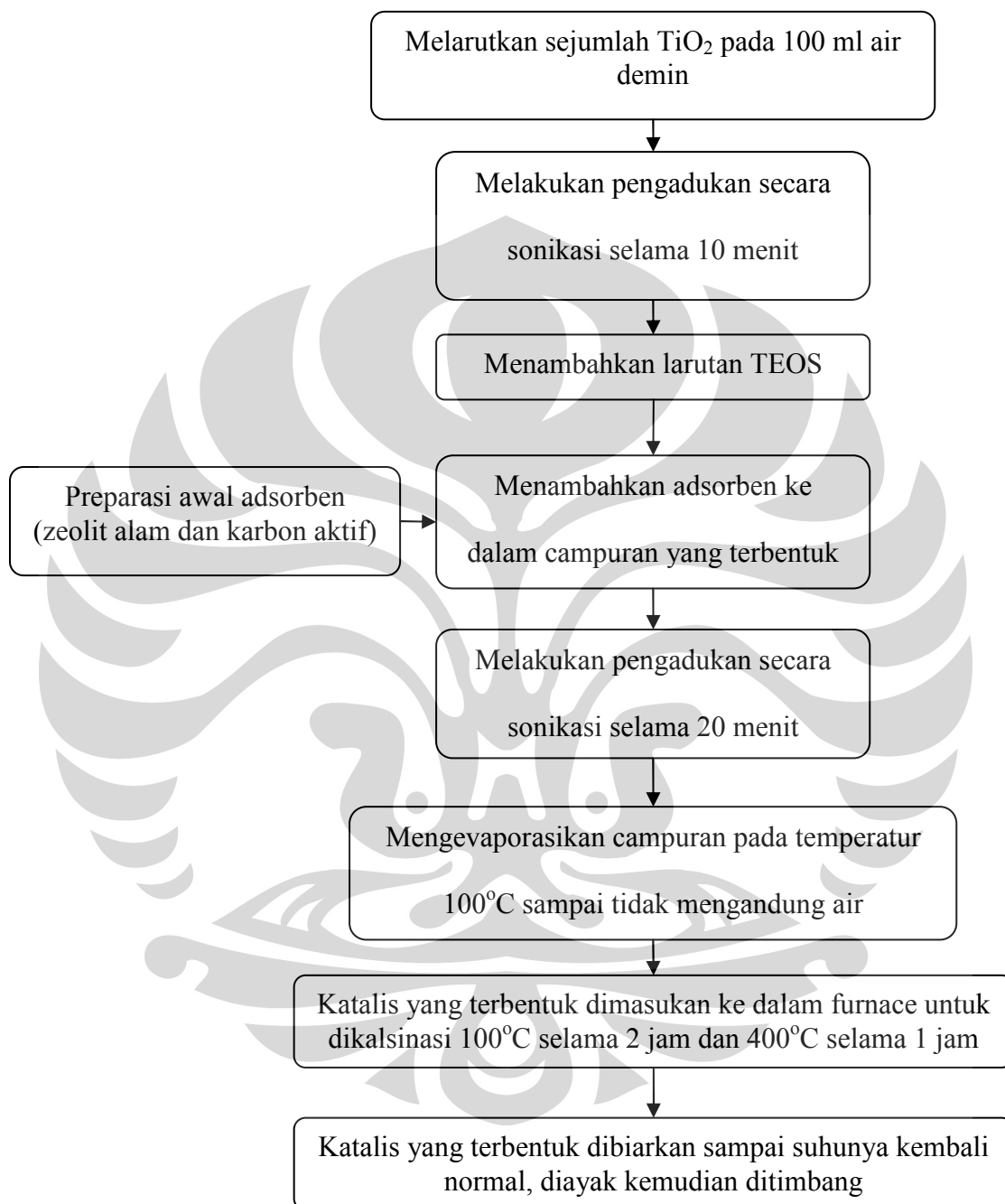
Penelitian diawali dengan pembuatan prototipe alat yang dilaksanakan secara simultan dengan preparasi katalis. Diagram alir penelitian secara umum dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut ini :



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.1.2 Diagram Alir Preparasi Katalis AFT

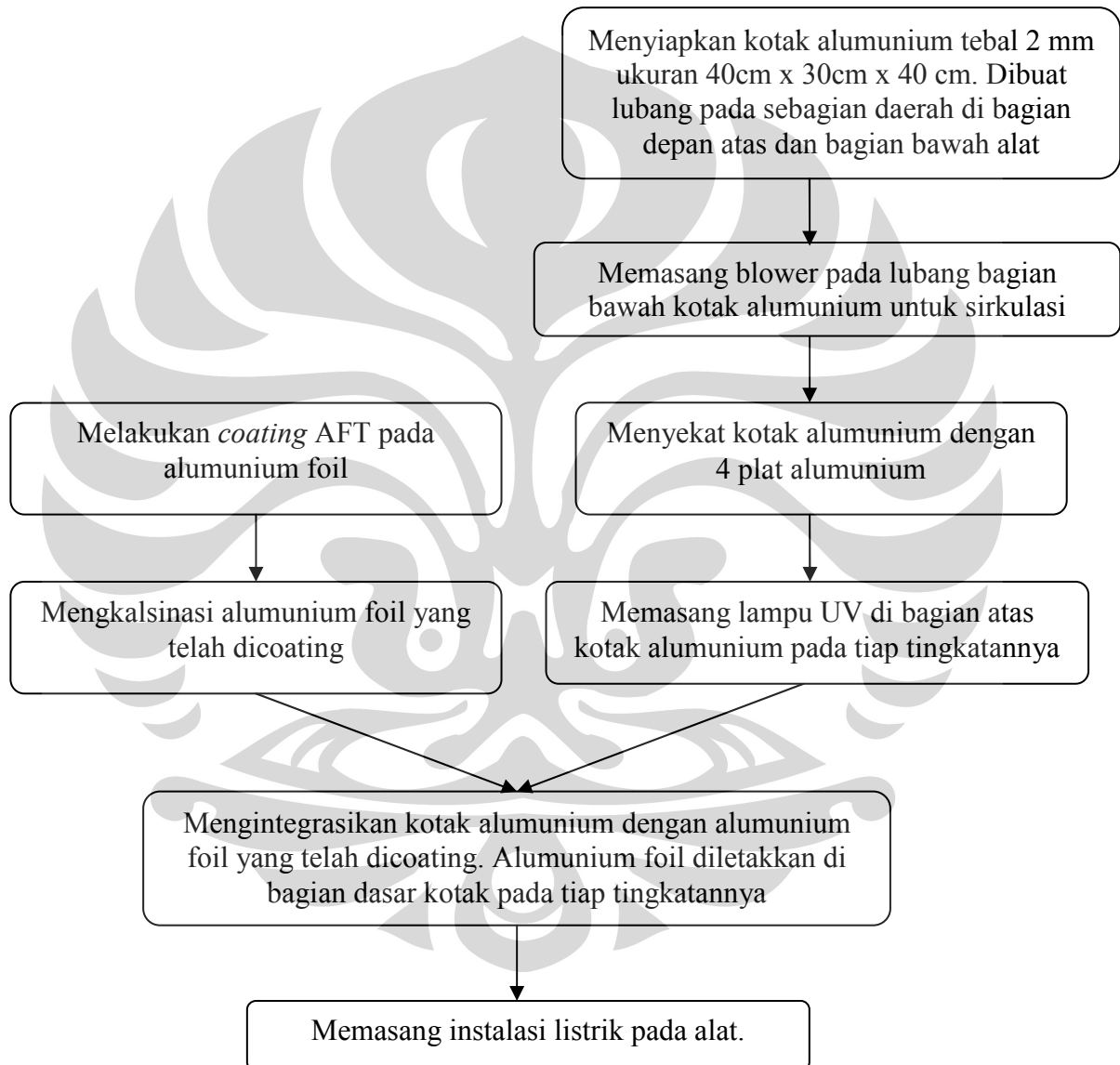
Diagram alir preparasi katalis ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 3.2 Diagram alir preparasi katalis AFT

3.1.3 Diagram Alir Pembuatan Prototipe Alat

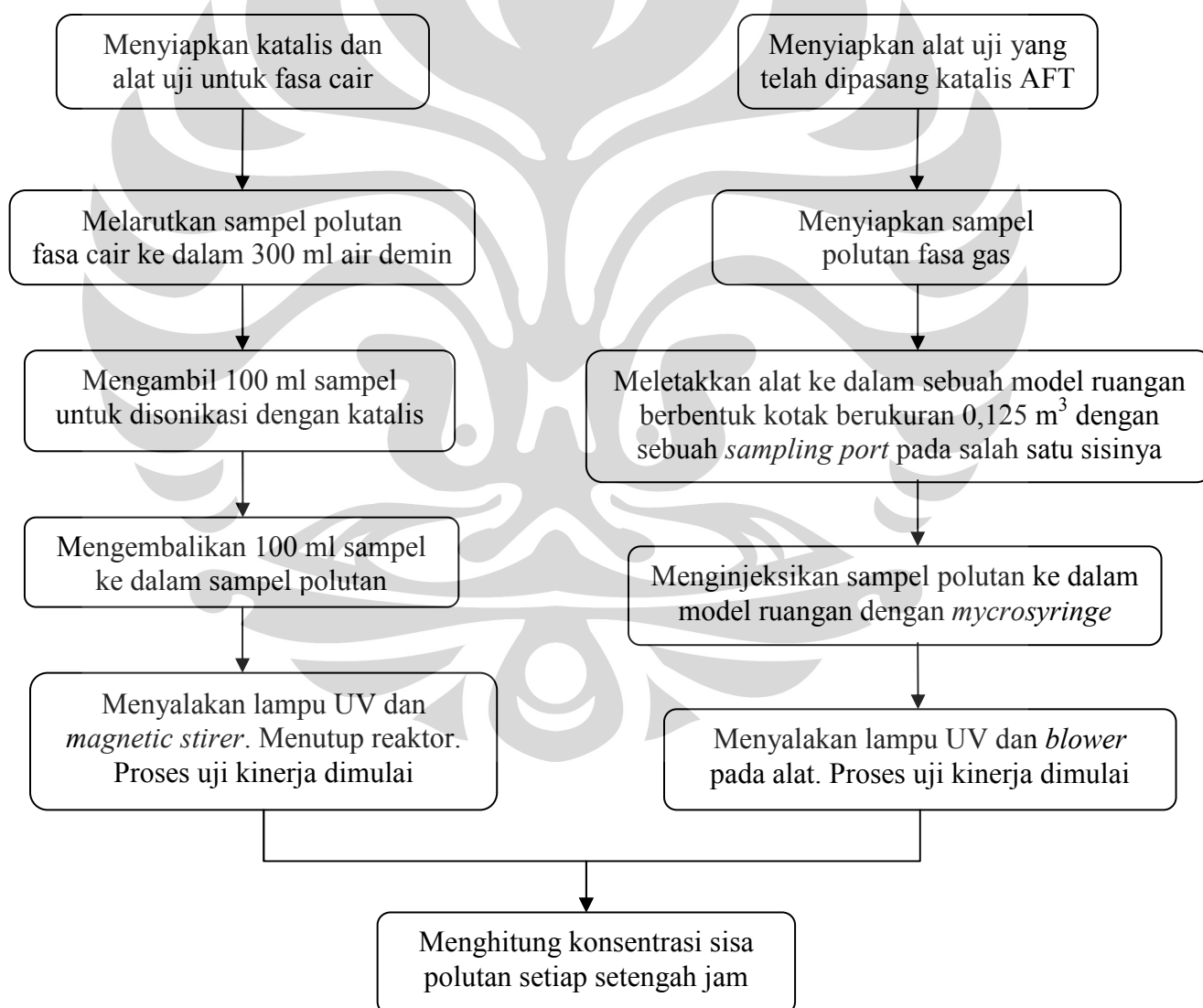
Prototipe alat dibuat dengan terlebih dahulu mengcoating katalis AFT pada plat alumunium. Katalis yang dicoating kemudian dikalsinasi dan dipasang dengan perangkat lain secara terintegrasi untuk membentuk prototipe alat. Diagram alir pembuatan prototipe alat ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 3.3 Diagram alir pembuatan prototipe alat

3.1.4 Diagram Alir Uji Kinerja Alat dan Katalis

Uji kinerja alat dan katalis dilakukan dengan menyiapkan alat uji yang telah dibuat dan dimulai setelah polutan dimasukkan serta lampu UV dinyalakan. Berdasarkan jenis sampel polutan yang diinjeksikan, uji kinerja alat dan katalis ini dibagi menjadi dua jenis percobaan. Percobaan pertama dilakukan pada jenis polutan sampel yang tersedia dalam fasa cair seperti nikotin dan piridin. Sampel polutan jenis ini diuji dalam reaktor fotokatalitik sistem *batch* untuk fasa cair. Sementara itu, percobaan kedua dilakukan pada jenis polutan sampel yang tersedia dalam fasa gas seperti karbon monoksida. Diagram alir uji kinerja alat ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 3.4 Diagram alir uji kinerja alat dan katalis

3.2 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini dibagi berdasarkan jenis aktivitas penelitian. Aktivitas penelitian meliputi preparasi katalis, pembuatan prototipe alat, uji kinerja alat dan katalis, dan analisis perubahan sampel.

3.2.1 Peralatan Preparasi Katalis AFT

Peralatan yang akan digunakan dalam preparasi katalis AFT adalah sebagai berikut :

1. Tumbukan dan mortar
2. Beaker glass 300 ml
3. Gelas ukur 100 ml
4. Kertas saring
5. Labu bulat dan *electromantel*
6. Kondensor
7. Labu erlenmeyer
8. Cawan petri steril (15 x 100mm)
9. Burner dan bunsen untuk sterilisasi alat
10. *Ultrasonic processor*
11. *Atmospheric furnace*
12. Cawan evaporasi
13. Batang pengaduk
14. Kaca arloji
15. *Magnetic Stirer* dan *Hot plate*
16. Timbangan
17. Spatula

3.2.2 Peralatan Pembuatan Prototipe Alat

Peralatan yang akan digunakan dalam pembuatan prototipe alat adalah sebagai berikut :

1. Kotak yang terbuat dari alumunium dengan tebal 2 mm
2. Plat Alumunium
3. Alumunium foil

4. Lampu UV-A jenis *black lamp* 8 Watt
5. Blower
6. Siku alumunium

3.2.3 Peralatan Uji Kinerja Alat dan Katalis

Peralatan yang akan digunakan dalam uji kinerja alat adalah sebagai berikut :

1. Prototipe alat yang telah dibuat
2. Reaktor *batch* fasa cair
3. *Hot plate dan magnetic stirrer*
4. Wadah polutan
5. Microsyringe
6. Botol sampel
7. Stopwatch
8. Kotak kaca ukuran 0,125 m³

3.2.4 Peralatan Analisis Perubahan Konsentrasi Sampel

Metode analisis yang akan digunakan untuk melihat perubahan konsentrasi polutan sampel adalah sebagai berikut :

1. GC-TCD untuk CO muni dan CO dalam asap rokok
2. GC-MS untuk nikotin dan piridin

3.3 Bahan Penelitian

Sebagaimana pada bagian peralatan penelitian, bahan yang digunakan dalam penelitian ini juga dibagi berdasarkan jenis aktivitas penelitian. Di bawah ini adalah bahan yang digunakan dalam penelitian berdasarkan aktivitasnya.

3.3.1 Bahan Preparasi Katalis AFT

Bahan-bahan yang akan digunakan dalam preparasi katalis AFT adalah sebagai berikut :

1. Serbuk TiO₂ komersial Degussa P-25 (79,23% anatase, 20,77% rutil, luas permukaan: 53,6 m²/g).

2. Zeolit Alam Malang (ZAM)
3. Zeolit Alam Lampung (ZAL)
4. Karbon Aktif (KA)
5. Air demin
6. HCl 6 M
7. HF 1%
8. NH_4Cl 0,1 M
9. TEOS 98% (Aldrich)

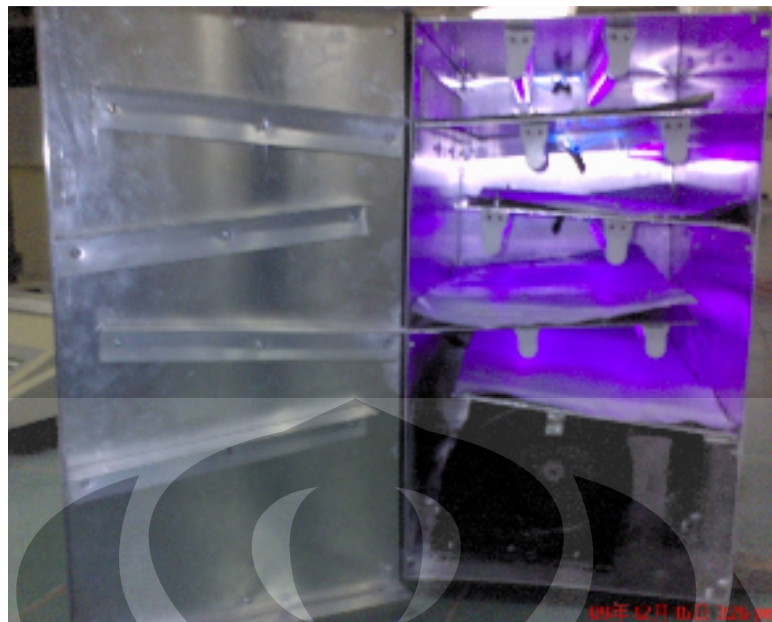
3.3.2 Bahan Uji Kinerja Alat dan Katalis

Bahan-bahan yang akan digunakan dalam uji kinerja alat dan katalis adalah sebagai berikut :

1. Udara
2. Piridin (Merck) cair
3. CO
4. Nikotin cair
5. Asap rokok
6. Material katalis AFT
7. Air demin

3.4 Prototipe Alat

Model alat yang dirancang terbuat dari alumunium dengan ketebalan 2 mm yang dibagi menjadi 5 tingkat oleh 4 buah sekat berupa plat alumunium. Perhatikan Gambar 3.5 dan 3.6 berikut ini yang menunjukkan visualisasi prototipe alat uji secara tampak samping dan tampak depan.



Gambar 3.5 Visualisasi tampak samping bagian dalam prototipe alat uji



Gambar 3.6 Visualisasi tampak depan prototipe alat uji

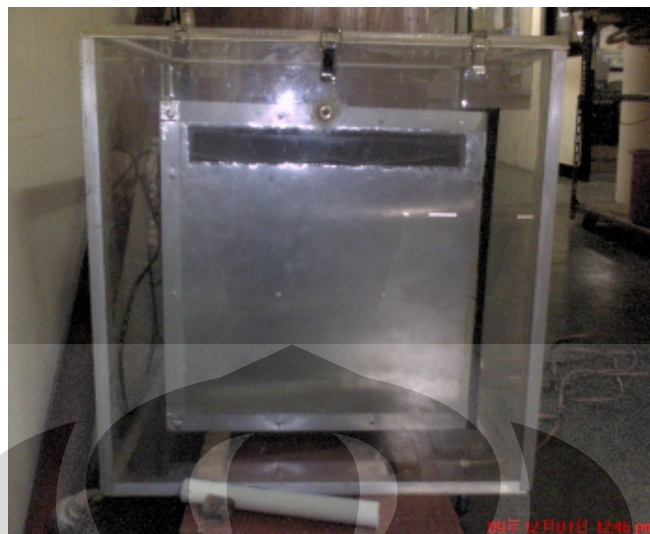
Berdasarkan Gambar 3.5, terlihat bahwa terdapat 4 buah plat alumunium yang membagi bagian dalam alat uji menjadi 5 tingkat. Pada bagian bawah alat terdapat blower yang dilengkapi dengan *casingnya*. Setiap sekat pada tiap tingkatan dimiringkan sekitar 15^0 ke atas. Hal ini bertujuan untuk menciptakan aliran turbulen pada sampel sekaligus meningkatkan waktu tinggal sampel pada

alat. Daerah kosong pada tiap tingkatan untuk aliran sampel juga diletakkan pada tempat yang berjauhan agar memberikan kesempatan sampel polutan untuk mengalami kontak seluas-luasnya dengan plat alumunium foil yang dilapisi katalis AFT. Pada bagian dasar tiap tingkat (kecuali pada tingkat terbawah) terdapat plat alumunium foil yang dilapisi dengan material AFT dan pada bagian atas tiap tingkat dipasang lampu UV. Secara umum, alat berbentuk kotak ini berukuran 40 cm x 30 cm x 40 cm.

Sementara itu, dari Gambar 3.6 terlihat bahwa sebagian daerah pada bagian depan atas alat yang diberi teralis merupakan tempat sampel polutan untuk masuk ke dalam alat. Bagian yang terbuka ini diberi teralis untuk mencegah serangga atau binatang kecil masuk ke dalam alat. Untuk memudahkan dalam mengganti katalis yang digunakan, pada sisi bagian kanan alat (tampak depan) digunakan karet ban yang berfungsi sebagai engsel sehingga sisi bagian kanan alat dapat dibuka-tutup. Dipilih karet ban sebagai engsel agar dapat menutup seluruh celah yang biasanya terbuka pada saat membuat pintu dari engsel jenis biasa. Di sisi lain, pada bagian bawah alat juga dibuat lubang untuk dipasang blower. Instalasi listrik dan tombol on/off diletakkan pada sisi bagian kiri alat (tampak depan).

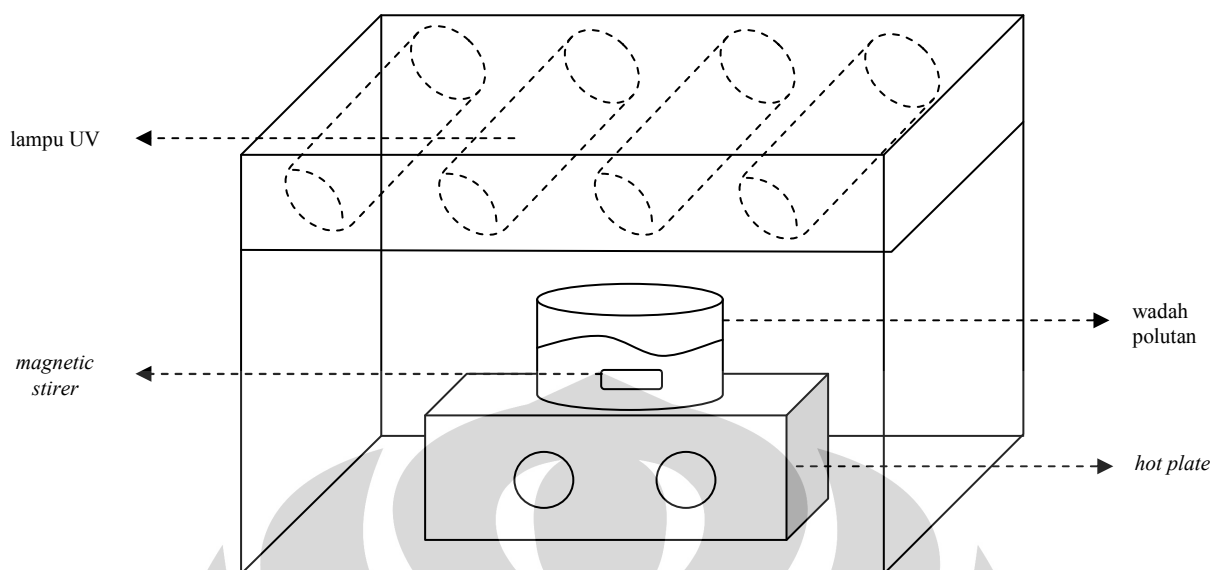
Pemilihan bahan merupakan salah satu faktor penting dalam perancangan alat ini. Pada penelitian sebelumnya, digunakan kaca akrilik sebagai bahan utama untuk membuat prototipe alat uji karena sifatnya yang transparan dan ringan. Namun, penggunaan kaca akrilik ternyata menimbulkan permasalahan pada saat percobaan berlangsung. Radiasi panas yang dihasilkan oleh sinar lampu UV-A mampu melelehkan kaca akrilik. Oleh karena itu, penelitian ini akan menggunakan alumunium dengan tebal 2 mm sebagai bahan utama penyusun prototipe alat yang telah terbukti tahan terhadap radiasi panas sinar UV-A. Lebih lanjut, kemampuan alumunium sebagai reflektor diharapkan juga dapat meningkatkan efektivitas penyinaran sinar UV.

Alat ini dirancang untuk uji percobaan dengan sampel polutan yang dihisap langsung oleh blower (untuk polutan fasa gas). Pada percobaan ini, blower pada bagian bawah alat dapat menghisap polutan sampel yang diinjeksikan ke dalam model ruangan. Gambar 3.7 berikut ini menunjukkan visualisasi prototipe alat uji dalam model ruangan uji berukuran 50 cm x 50 cm x 50 cm.



Gambar 3.7 Prototipe alat uji secara tampak depan di dalam ruang uji

Sementara itu untuk uji polutan fasa cair, digunakan reaktor fotokatalitik sistem *batch* fasa cair berupa kotak kayu yang bagian dalamnya dilapisi aluminium foil. Pelapisan dengan aluminium foil ini dilakukan agar intensitas sinar UV yang diterima katalis tidak berkurang karena serapan bahan pembuat kotak. Bagian atas dari kotak ini dilengkapi dengan 4 buah lampu UV. Jarak antara permukaan cairan dengan lampu UV adalah sekitar 5 cm agar intensitas sinar UV yang diterima tetap optimal. *Magnetic stirrer* beserta wadah polutan diletakkan pada *hot plate* yang terdapat di dalam kotak. Pada saat pengujian, kotak ditutup dalam keadaan dimana *hot plate* dan lampu UV dinyalakan. Gambar 3.8 berikut ini menunjukkan ilustrasi dari reaktor fotokatalitik sistem *batch* fasa cair.



Gambar 3.8 Ilustrasi reaktor fotokatalitik sistem *batch* fasa cair

3.5 Prosedur Penelitian

Langkah-langkah yang akan dilakukan dalam penelitian ini ialah sebagai berikut:

3.5.1 Prosedur Preparasi Katalis

Prosedur preparasi katalis ini dilakukan dengan mengacu pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Preparasi katalis AFT terdiri dari tiga aktivitas utama (Slamet, 2007), yaitu:

a. Preparasi Awal Zeolit Alam

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

- Preparasi zeolit alam dengan perlakuan asam
 - 1) Menggerus zeolit alam hingga berukuran 0,25 mm – 0,315 mm.
 - 2) Merendam zeolit dengan 200 ml larutan HF 1% selama 10 menit disertai pengadukan menggunakan magnetik stirer. Setelah itu zeolit dibilas dengan air demin dan disaring. Perendaman zeolit dalam larutan HF ini bertujuan untuk melarutkan oksida-oksida pengotor yang terdapat dalam zeolit.

- 3) Merefluks zeolit dengan 200 ml larutan HCl 6 M pada temperatur 90°C selama 30 menit. Zeolit ini kemudian dibilas dengan air demin dan disaring. Refluks zeolit dalam larutan HCl bertujuan agar alumunium dalam zeolit dapat terekstrak dan alumunium dalam kerangka menjadi alumunium luar kerangka sehingga rasio Si/Al dapat meningkat.
 - 4) Merendam zeolit dalam 200 ml larutan NH₄Cl 0,1 M selama seminggu dengan pemanasan pada suhu 90°C selama 3 jam per hari. Perendaman zeolit dalam NH₄Cl bertujuan untuk memperkuat struktur baru yang terbentuk karena proses dealuminasi oleh HCl.
- Preparasi zeolit alam dengan pemanasan
Zeolit alam yang telah diberikan perlakuan asam, dimasukkan ke dalam furnace pada suhu 500°C selama 5 jam sehingga diperoleh zeolit alam yang berwujud serbuk-serbuk kering.

b. Preparasi Awal Karbon Aktif

1. Karbon aktif yang tersedia dicuci terlebih dahulu menggunakan aquadest sampai tidak terdapat pengotor lagi (hitamnya air bilasan menandakan karbon aktif belum bersih).
2. Karbon aktif kemudian dimasukkan ke dalam *atmospheric furnace* sampai kering (suhu 250°C, selama 60 menit)
3. Karbon aktif yang telah dipanaskan ditumbuk hingga berukuran 0,2–0,3 mm.

c. Preparasi Adsorben-Fotokatalis Terintegrasi (AFT)

1. Sejumlah TiO₂ Degussa P-25 dilarutkan dalam 100 ml air demin dan diaduk secara sonikasi selama 10 menit.
2. Larutan TiO₂ ditambahkan TEOS (Tetra etil ortosilikat) dan bahan adsorben yang telah dipreparasi (0-15% berat katalis) dan dilanjutkan dengan sonikasi selama 20 menit.
3. Mengevaporasikan campuran pada temperatur 100°C sampai tidak mengandung air.
4. Katalis yang terbentuk kemudian dimasukkan ke dalam furnace untuk dikalsinasi 100°C selama 2 jam dan 400°C selama 1 jam. Kalsinasi pada suhu

100⁰C dilakukan untuk mendispersikan TiO₂ secara merata pada seluruh permukaan adsorben alam. Pada suhu 400⁰C, SiO₂ dalam larutan TEOS diharapkan teraktivasi sebagai perekat. Selain itu, pada suhu tersebut struktur kristal TiO₂ yang terbentuk adalah anatase. Setelah itu katalis yang terbentuk dibiarkan sampai suhunya kembali normal, diayak kemudian ditimbang.

3.5.2 Prosedur Pembuatan Prototipe Alat

Langkah-langkah dalam pembuatan prototipe alat adalah sebagai berikut :

- 1) Melakukan pelapisan katalis AFT dengan teknik *spray-coating* pada alumunium foil.
- 2) Mengkalsinasi alumunium foil yang telah di-*coating* pada suhu 250⁰C selama satu jam.
- 3) Menyiapkan kotak berbahan alumunium foil dengan ketebalan 2 mm ukuran 40 cm x 30cm x 40 cm. Sebagian daerah pada bagian depan atas dan pada bagian bawah alat dilubangi. Daerah yang dilubangi pada bagian depan atas alat diberi teralis untuk mencegah masuknya serangga dan binatang kecil. Sisi bagian kanan alat diberi engsel berupa karet ban sehingga sisi bagian kanan alat dapat dibuka-tutup.
- 4) Memasang blower pada sisi bagian bawah alat yang dilubangi.
- 5) Membagi kotak kaca menjadi 5 tingkatan dengan menyekatnya. Digunakan 4 buah plat alumunium untuk menyekatnya. Setiap sekat pada tiap tingkatan ini dimiringkan sekitar 15⁰ ke atas.
- 6) Memasang lampu UV-A pada bagian atas tiap tingkatan kotak. Lampu UV-A yang digunakan diatur berarus listrik DC.
- 7) Memasang plat alumunium foil pada bagian dasar tiap tingkatannya (kecuali pada tingkat terbawah).
- 8) Memasang instalasi listrik pada kotak.

3.5.3 Prosedur Uji Kinerja Alat dan Katalis

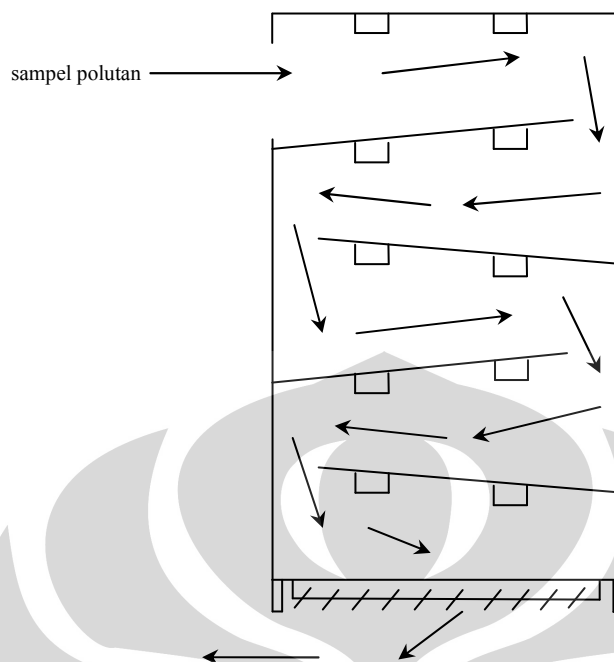
Prosedur uji kinerja alat dibagi menjadi dua aktivitas berdasarkan jenis polutannya, yaitu:

a. Polutan fasa cair

1. Menyiapkan alat uji untuk fasa cair.
2. Menyiapkan sampel polutan fasa cair (nikotin dan piridin) dengan melarutkan polutan murni sebanyak 0,8 - 1 ml dan dilarutkan ke dalam 300 ml air demin.
3. Mengambil 100 ml larutan tersebut untuk ditambahkan dengan katalis AFT.
4. Melakukan sonikasi kepada campuran ini selama 10 menit. Hasil sonikasi dikembalikan ke dalam larutan 200 ml polutan.
5. Menghitung konsentrasi sisa polutan setiap setengah jam selama 90 menit.

b. Polutan fasa gas

1. Menyiapkan alat uji yang telah dipasang katalis AFT.
2. Menyiapkan sampel polutan fasa gas (CO) sebanyak 1 ml.
3. Meletakkan alat ke dalam sebuah model ruangan berbentuk kotak akrilik berukuran 0,125 m³ dengan sebuah *sampling port* pada salah satu sisinya.
4. Menginjeksikan sampel polutan ke dalam model ruangan melalui *mycrosyringe*. Menunggu selama 60 menit untuk proses homogenisasi sehingga polutan dapat tersebar secara merata dalam ruang uji.
5. Menyalakan lampu UV-A dan blower pada alat. Pada percobaan ini, blower digunakan untuk menghisap sampel polutan yang diinjeksikan ke dalam model ruangan. Sampel polutan akan bergerak dari lubang pada bagian atas alat menuju ke bawah melintasi sekat plat alumunium. Sampel akan keluar dari alat melalui blower pada bagian bawah alat. Visualisasi proses tersebut dapat dilihat pada gambar 3.8 berikut ini



Gambar 3.9 Visualisasi aliran polutan sampel fasa gas pada alat uji

6. Menghitung konsentrasi sisa polutan setiap setengah jam selama 0-4 jam.

3.5.4 Analisis Polutan Terdegradasi

Tahapan ini bertujuan untuk melihat seberapa efektif kinerja alat dalam mendegradasi polutan asap rokok yang dimodelkan dengan CO, piridin, nikotin, dan asap rokok yang sesungguhnya. Analisis dilakukan untuk melihat konsentrasi akhir polutan setelah memasuki skema alat berisi katalis AFT dalam suatu selang waktu tertentu.

3.6 Parameter yang Divariasikan

➤ Jenis Polutan

Jenis polutan yang digunakan adalah CO murni, CO dalam asap rokok, piridin, dan nikotin. Pemilihan polutan didasarkan pada kandungannya dalam asap rokok.

➤ Waktu reaksi

Variasi waktu reaksi dilakukan untuk melihat berapa waktu yang diperlukan untuk mendegradasi polutan secara keseluruhan pada konsentrasi tertentu.

➤ Komposisi katalis AFT

Variasi komposisi katalis AFT dilakukan untuk menentukan komposisi katalis AFT yang paling aktif dan efektif dalam mendegradasi polutan udara. Variasi komposisi katalis ini hanya dilakukan pada jenis adsorben zeolit alam. Hal yang dilakukan adalah memvariasikan komposisi ZAM dan ZAL dalam katalis AFT untuk memilih komposisi yang terbaik pada masing-masing jenisnya.

➤ Jenis katalis AFT

Variasi jenis katalis dilakukan untuk melihat jenis katalis AFT manakah yang paling baik dalam mendegradasi polutan asap rokok. Jenis katalis AFT yang divariasikan adalah katalis TiO_2 tanpa adsorben, katalis TiO_2 -ZAM, katalis TiO_2 -ZAL, dan katalis TiO_2 -KA.

3.7 Data Penelitian dan Cara Pengambilan Data

Data-data yang akan dikumpulkan dalam percobaan ini adalah:

- Data perubahan konsentrasi polutan ditentukan dengan GC-TCD dan GC-MS setiap selang waktu tertentu
- Waktu reaksi dan waktu tinggal polutan dihitung dengan menggunakan stopwatch

3.8 Pengolahan Data Penelitian

Data yang diambil dengan menggunakan GC-MS dan GC-TCD adalah *peak area*. Data tersebut diolah sampai mendapatkan konsentrasi polutan organik dengan membuat kurva kalibrasi *peak area* vs konsentrasi polutan dari larutan standar dan kemudian memplot setiap data *peak area* sampel ke kurva tersebut sehingga didapatkan konsentrasi untuk masing-masing sampel. Kemudian dibuat grafik konsentrasi vs waktu untuk setiap sampel polutan.

Dari plot grafik yang telah didapat, dilihat kecenderungan garis yang terbentuk. Pada grafik konsentrasi polutan vs waktu, degradasi polutan akan terjadi jika konsentrasi polutan menurun seiring dengan berjalannya waktu.



BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini membahas hasil penelitian yang telah dilakukan beserta analisisnya. Definisi degradasi pada penelitian ini mengacu pada proses oksidasi yang terjadi pada senyawa organik akibat dari reaksi fotokatalitik. Untuk memudahkan dalam penyebutannya, nama dari adsorben yang digunakan pada penelitian disingkat sebagai berikut :

1. Zeolit Alam Malang disingkat menjadi ZAM
2. Zeolit Alam Lampung disingkat menjadi ZAL
3. Karbon Aktif disingkat menjadi KA

Pada penelitian ini terdapat dua jenis pengujian, yaitu pengujian polutan fasa gas dalam alat uji yang telah dibuat dan pengujian polutan fasa cair dalam reaktor fotokatalitik sistem *batch*. Seharusnya, seluruh pengujian polutan dilakukan pada fasa gas dalam alat uji sehingga kinerja alat uji beserta katalis dapat diamati. Namun, penulis tidak mendapatkan GC-MS yang dapat menganalisis piridin dan nikotin dalam fasa gas. GC-MS yang tersedia hanya dapat menganalisis piridin dan nikotin dalam fasa cair. Dengan demikian, pengujian terhadap nikotin dan piridin dilakukan dalam fasa cair di dalam reaktor fotokatalitik fasa cair. Dalam hal ini, pengamatan kinerja dilakukan terhadap katalis adsorben-fotokatalis terintegrasi yang merupakan material utama yang terdapat dalam alat uji. Katalis ini dilarutkan bersama dengan polutan dalam air demin. Asumsinya, bila polutan fasa cair dapat terdegradasi oleh katalis dalam uji ini, maka dalam bentuk gas pun polutan tersebut dapat lebih mudah terdegradasi.

4.1 Uji Degradasi Polutan CO Murni

Polutan CO merupakan salah satu polutan asap rokok yang paling berbahaya. Pada konsentrasi yang kecil (100 ppm) CO sudah dapat menyebabkan sakit kepala dan pada konsentrasi yang lebih besar (sekitar 667 ppm) dapat menyebabkan 50% hemoglobin terkonversi menjadi karboksi hemoglobin

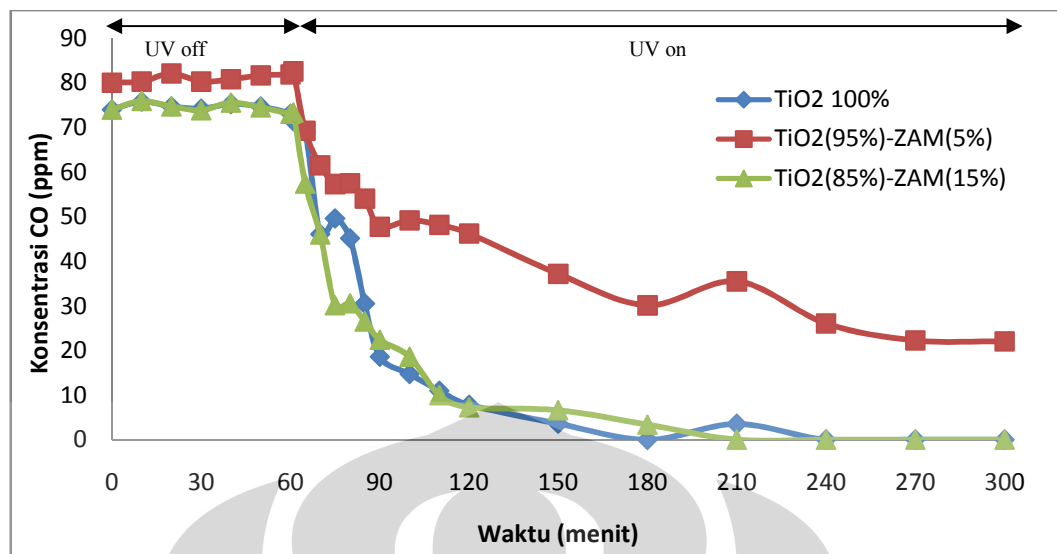
(Wikipedia, 2009). Pada penelitian ini, telah dilakukan uji variasi komposisi dan variasi jenis katalis dalam mendegradasi CO murni. Uji degradasi ini dilakukan pada prototipe alat uji yang diletakkan dalam suatu ruang kaca akrilik berukuran 50cm x 50cm x 50cm selama selang waktu 300 menit dimana lampu UV mulai dinyalakan pada menit ke-60.

Kadar CO dalam asap yang dihasilkan 1 bungkus rokok (isi 12 batang) jika terdistribusi merata dalam suatu rumah berukuran sedang diperkirakan dapat mencapai 14 ppm (Gosink, Tom. 1983). Pada penelitian ini, CO yang diinjeksikan ke dalam suatu ruang kaca akrilik bervolume 125000 ml berjumlah 10 ml. Dengan demikian, dalam uji ini kadar CO yang akan didegradasi sekitar 80 ppm. Desain ini akan mendekati kondisi dimana terdapat 6 bungkus rokok yang dihabiskan dalam suatu rumah berukuran sedang.

Data yang diperoleh dari analisis CO pada alat GC-TCD berupa *peak area*. Sementara itu, data yang ditampilkan untuk dianalisis sebaiknya berupa fungsi konsentrasi. Untuk memudahkan konversi ke dalam fungsi konsentrasi, dibuat suatu kurva kalibrasi seperti yang terdapat pada Lampiran 1. Kurva kalibrasi ini dibuat dengan pada rentang volume injeksi CO murni dari 0 sampai 1 ml. Dengan menggunakan kurva kalibrasi ini, konsentrasi CO (dalam satuan ppm) sebagai fungsi waktu dapat ditentukan.

4.1.1 Pengaruh Variasi Komposisi Katalis Terhadap Degradasi CO Murni

Variasi dilakukan terhadap katalis $\text{TiO}_2\text{-ZAM}$ dan $\text{TiO}_2\text{-ZAL}$ dengan rentang konsentrasi zeolit dalam katalis sebanyak sebanyak 0%, 5%, dan 15%. Variasi konsentrasi ini dilakukan untuk mendapatkan komposisi optimum dari kedua jenis katalis tersebut. Data kuantitatif secara mendetail dari hasil uji variasi komposisi ini dapat dilihat pada Lampiran 3 dan 4. Gambar 4.1 berikut ini menunjukkan tampilan grafik dari hasil uji degradasi CO murni dengan katalis $\text{TiO}_2\text{-ZAM}$.



Gambar 4.1 Degradasi CO murni dengan variasi komposisi katalis TiO₂-ZAM

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa katalis TiO₂ tanpa adsorben memberikan aktivitas degradasi yang paling besar dan paling cepat dibandingkan dua komposit katalis lainnya. Sekitar 30 menit setelah lampu UV dinyalakan, konsentrasi CO turun secara drastis sebanyak 75% dari konsentrasi awal. Reaksi degradasi yang berlangsung begitu cepat pada menit-menit awal ini disebabkan laju reaksi akan tinggi apabila konsentrasi reaktan tinggi. Hal ini menunjukkan TiO₂ sangat aktif dalam mendegradasi CO setelah lampu UV dinyalakan. Lebih lanjut, konsentrasi CO murni bahkan sudah tidak dapat terdeteksi lagi oleh GC pada menit ke-240.

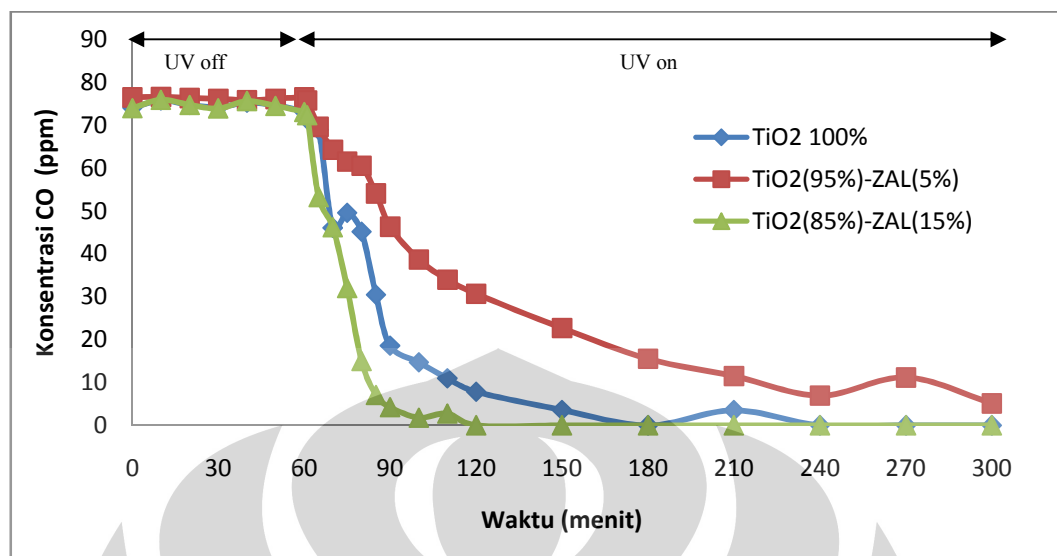
Sementara itu, *loading* ZAM sebanyak 5% ternyata memberikan efek penurunan tingkat degradasi yang cukup besar. CO hanya berkurang sekitar 40% dari konsentrasi awal setelah lampu UV dinyalakan selama 30 menit. Selama 300 menit waktu pengujian, konsentrasi CO bahkan masih dapat terdeteksi oleh GC sebanyak 22 ppm. Hal ini diduga terjadi karena penambahan ZAM sebanyak 5% justru menyebabkan aktivitas dari inti aktif fotokatalis menjadi terganggu. Konsentrasi adsorben yang hanya sebesar 5% menyebabkan ZAM belum bisa berperan sebagai penyangga yang baik dikarenakan penyebarannya yang belum merata pada seluruh permukaan katalis. Akibatnya, keberadaan ZAM justru akan menutupi inti aktif fotokatalis sehingga mengurangi kemampuan katalis dalam mendegradasi polutan. Fenomena inilah yang disebut sebagai *shading effect* pada permukaan katalis akibat adanya adsorben yang menghalangi TiO₂ dari cahaya

UV sehingga proses fotokatalisis tidak berjalan optimal. Dengan adanya gangguan dari adsorben ZAM ini, diduga dibutuhkan waktu uji yang lebih lama bagi katalis $\text{TiO}_2(95\%)\text{-ZAM}(5\%)$ untuk mendegradasi seluruh CO yang ada pada ruang uji.

Di sisi lain, penambahan ZAM sebanyak 15% pada katalis TiO_2 ternyata memberikan peningkatan aktivitas degradasi yang cukup besar. Peningkatan lebih lanjut terhadap komposisi ZAM ternyata dapat meningkatkan kemampuan degradasi katalis terhadap CO. 30 menit setelah lampu UV dinyalakan, konsentrasi CO telah berkurang hingga 70% dari konsentrasi awalnya. Bahkan, pada menit ke-210 konsentrasi CO dalam model ruang uji sudah tidak dapat terdeteksi lagi oleh GC. Hasil uji dengan menggunakan katalis $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAM}(15\%)$ ini menunjukkan profil yang hampir mirip dengan hasil uji yang dilakukan dengan katalis TiO_2 tanpa adsorben.

Adanya peningkatan aktivitas degradasi CO dengan penambahan ZAM sebanyak 15% pada katalis TiO_2 diduga disebabkan oleh peran adsorben ZAM yang telah dapat berfungsi sebagai penyangga fotokatalis yang baik. Pada proses fotokatalisis-adsorpsi, penggunaan adsorben sebagai penyangga fotokatalis dapat meningkatkan laju fotodegradasi berbagai polutan (Torimoto,1996). Sebuah penelitian melaporkan bahwa dengan penambahan adsorben (yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah zeolit) ke dalam TiO_2 dengan metode impregnasi dan *ion exchange*, diperoleh peningkatan laju fotodekomposisi NO_x dan CO_2 dibandingkan dengan TiO_2 tanpa zeolit (Matsuoka, 2003). Hal ini dikarenakan adsorben dapat meningkatkan kemampuan adsorpsi katalis dan mendispersikan fotokatalis TiO_2 sehingga luas permukaan katalis menjadi lebih besar dan fotokatalis menjadi lebih aktif. Makin tinggi dispersi atau penyebaran fotokatalis yang memiliki struktur koordinat tetrahedral, maka makin aktif fotokatalis tersebut. Fenomena inilah yang diduga terjadi pada penambahan ZAM sebanyak 15% ke dalam katalis TiO_2 . Pada konsentrasi sebanyak ini, ZAM telah dapat berperan sebagai penyangga yang baik dan dapat mendispersikan permukaan aktif fotokatalis TiO_2 secara merata.

Selanjutnya, dilakukan juga variasi terhadap katalis $\text{TiO}_2\text{-ZAL}$ dengan variasi konsentrasi zeolit dalam katalis sebanyak 0%, 5% dan 15%. Berikut ini adalah ilustrasi grafik dari penelitian yang telah dilakukan.



Gambar 4.2 Degradasi CO murni dengan variasi komposisi katalis TiO₂-ZAL

Terlihat pada Gambar 4.2 bahwa katalis TiO₂(85%)-ZAL(15%) memberikan aktivitas degradasi yang paling besar dan paling cepat, bahkan melebihi aktivitas katalis TiO₂ tanpa adsorben. Sekitar 30 menit setelah lampu UV dinyalakan, konsentrasi CO turun secara drastis sebanyak 95% dari konsentrasi awalnya. Bahkan pada menit ke-60 setelah lampu UV dinyalakan, konsentrasi CO dalam ruang uji telah terdegradasi seluruhnya (terdegradasi 100%). Hal ini menunjukkan aktivitas fotokatalisis yang sangat baik yang disebabkan oleh dispersi TiO₂ yang tinggi karena penambahan adsorben ZAL sebanyak 15%. Perilaku ini mirip dengan pembahasan sebelumnya dimana adsorben telah dapat berperan sebagai penyangga yang baik pada konsentrasi 15% dari berat total katalis.

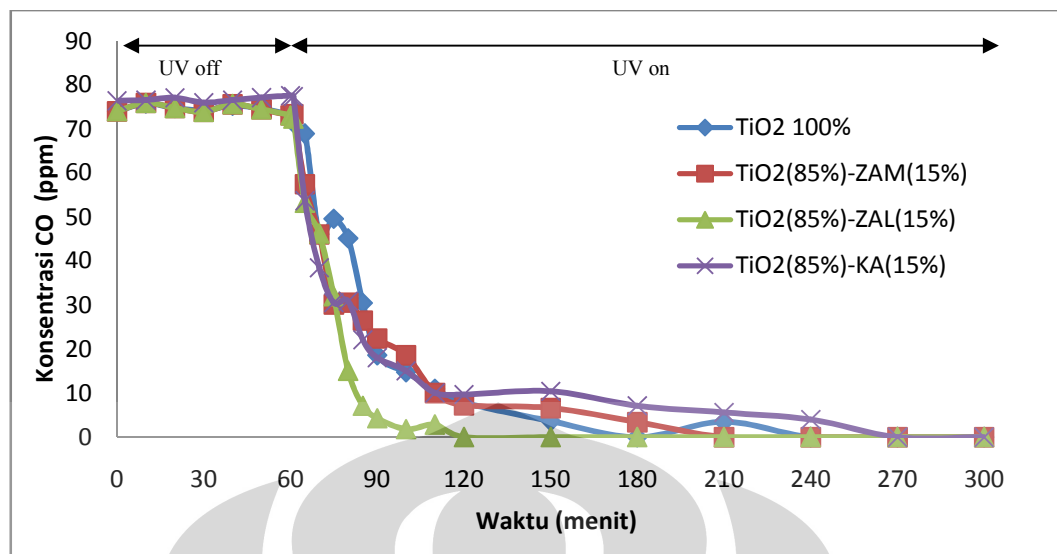
Sementara itu, penambahan ZAL sebanyak 5% menunjukkan penurunan aktivitas degradasi dibandingkan aktivitas TiO₂ tanpa penambahan ZAL. Setelah lampu UV dinyalakan selama 30 menit, CO hanya berkurang sekitar 40% dari konsentrasi awalnya. Bahkan hingga akhir waktu pengujian, sebanyak 5 ppm CO masih terdeteksi di dalam ruang uji. Fenomena ini kembali menegaskan bahwa pada penambahan adsorben dalam jumlah yang kecil, aktivitas fotokatalis TiO₂ akan terganggu akibat belum baiknya peran adsorben sebagai penyangga.

Dari dua hasil uji ini, dapat disimpulkan bahwa penambahan konsentrasi adsorben dapat mempengaruhi aktivitas fotokatalis TiO₂ dalam mendegradasi CO.

Penambahan adsorben dalam jumlah kecil akan menyebabkan turunnya kemampuan degradasi terhadap CO akibat belum meratanya persebaran adsorben pada permukaan katalis. Namun, penambahan konsentrasi adsorben lebih lanjut akan meningkatkan aktivitas degradasi terhadap CO. Pada konsentrasi sebanyak 15%, ZAL dan ZAM telah dapat berperan dengan baik sebagai penyangga fotokatalis. Tampaknya, peningkatan konsentrasi adsorben dapat mengakibatkan persebaran TiO_2 lebih merata sehingga aktivitas fotokatalis menjadi lebih tinggi.

4.1.2 Pengaruh Variasi Jenis Katalis Terhadap Degradasi CO Murni

Dalam penelitian ini telah divariasikan jenis katalis yang digunakan, yaitu katalis TiO_2 tanpa adsorben, $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAM}(15\%)$, $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAL}(15\%)$, dan $\text{TiO}_2(85\%)\text{-KA}(15\%)$. Dipilih katalis $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAM}(15\%)$ dan $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAL}(15\%)$ karena keduanya merupakan katalis dengan komposisi yang memberikan hasil yang paling baik dari uji pada bagian sebelumnya. Sementara itu, katalis $\text{TiO}_2(85\%)\text{-KA}(15\%)$ digunakan sebagai pembanding untuk melihat kemampuan adsorben dari jenis lain selain zeolit alam. Seperti diketahui, karbon aktif merupakan salah satu adsorben yang keberadaannya cukup melimpah di Indonesia dan banyak digunakan dalam unit pengolahan gas buang. Data kuantitatif secara mendetail dari hasil uji variasi jenis katalis ini dapat dilihat pada Lampiran 5. Gambar 4.3 berikut ini menunjukkan tampilan grafik dari hasil uji yang dilakukan terhadap CO murni dengan menggunakan keempat jenis katalis tersebut.



Gambar 4.3 Degradasi CO murni dengan variasi jenis katalis

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa aktivitas dari keempat jenis katalis tidak terlalu berbeda jauh. Namun jika ditinjau dari kecepatan reaksi dan % degradasi polutan, terlihat bahwa katalis TiO₂(85%)-ZAL(15%) menunjukkan aktivitas yang paling baik selama waktu pengujian. Jika dibandingkan dengan komposit katalis lainnya, katalis TiO₂(85%)-ZAL(15%) menunjukkan kinerja degradasi CO yang paling besar dan paling cepat. Pada 30 menit awal setelah lampu UV dinyalakan, konsentrasi CO yang didegradasi oleh katalis TiO₂(85%)-ZAL(15%) mencapai 95% dari konsentrasi awalnya. Hal ini jauh lebih tinggi dari % degradasi CO oleh katalis TiO₂ tanpa adsorben, TiO₂(85%)-ZAM(15%), dan TiO₂(85%)-KA(15%) yang berturut-turut bernilai 75%, 70%, dan 76%.

Jika dilihat dari waktu yang dibutuhkan oleh katalis untuk mendegradasi CO hingga habis, katalis TiO₂(85%)-ZAL(15%) tetap menunjukkan kinerja yang paling baik dengan waktu degradasi sekitar 60 menit setelah lampu UV dinyalakan. Jumlah ini jauh lebih cepat dibandingkan katalis TiO₂ tanpa adsorben, TiO₂(85%)-ZAM(15%), dan TiO₂(85%)-KA(15%) yang masing-masing bernilai 120 menit, 150 menit, dan 210 menit setelah lampu UV dinyalakan.

Kemampuan katalis TiO₂(85%)-ZAL(15%) yang sangat baik dibandingkan jenis katalis lainnya dalam mendegradasi CO disebabkan oleh peran adsorben ZAL sebagai penyangga fotokatalis. Jika dibandingkan dengan katalis TiO₂(85%)-ZAM(15%), aktivitas TiO₂(85%)-ZAL(15%) yang lebih tinggi disebabkan oleh

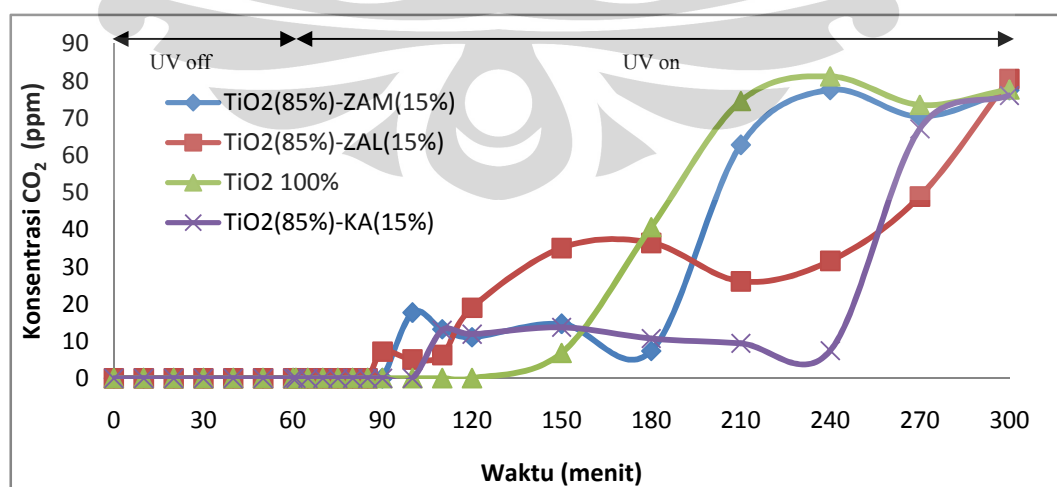
kandungan klinoptilolite yang cukup dominan pada ZAL. Klinoptilolite memiliki kandungan Si/Al yang tidak terlalu besar sehingga dalam ZAL timbul gradien medan elektrostatis yang makin besar. Peristiwa ini menyebabkan ZAL akan lebih tertarik untuk berinteraksi dengan molekul-molekul polar (Handoko, 2002). Ketertarikan yang besar terhadap molekul polar inilah yang menyebabkan ZAL lebih aktif dalam mengadsorpsi CO yang merupakan molekul polar. Tingginya tingkat adsorpsi CO oleh penyangga ZAL akan meningkatkan konsentrasi CO yang akan didegradasi pada sekitar ruang TiO_2 sehingga akan meningkatkan laju reaksi fotokatalitik. Berdasarkan Gambar 4.1 dan 4.2 pun terlihat bahwa pada konsentrasi adsorben sebanyak 5% dan 15%, katalis TiO_2 -ZAL jauh lebih baik daripada katalis TiO_2 -ZAM. Hal ini jelas menunjukkan bahwa jenis adsorben ZAL jauh lebih baik dalam mendegradasi polutan CO dibandingkan adsorben ZAM.

Sementara itu jika kita membandingkan katalis $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAL}(15\%)$ dengan katalis $\text{TiO}_2(85\%)\text{-KA}(15\%)$, faktor kepolaran dan struktur kristal adsorben memegang peranan penting dalam menjelaskan fenomena tersebut. Sifat karbon aktif yang non-polar menyebabkan daya tariknya terhadap CO tidak sebesar ZAL. Akibatnya, konsentrasi senyawa CO yang teradsorpsi pada permukaan katalis tidak sebanyak ZAL dalam selang waktu yang sama. Hasil ini juga identik dengan hasil yang didapatkan oleh Ao (2004) dimana kinerja penyisihan NO menjadi NO_2 dengan katalis $\text{TiO}_2\text{-KA}$ tidak menunjukkan hasil yang jauh berbeda relatif terhadap penggunaan fotokatalis TiO_2 saja. Hal ini diduga karena kepolaran yang berbeda antara adsorben (karbon aktif) dengan polutan adsorbat (CO dan NO). Oleh karena itu, dibutuhkan waktu lebih lama bagi katalis $\text{TiO}_2(85\%)\text{-KA}(15\%)$ untuk mendegradasi CO hingga habis. Di sisi lain, tingginya aktivitas katalis $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAL}(15\%)$ juga disebabkan oleh struktur kristal zeolit yang berbentuk kristalin. Struktur kristalin zeolit memiliki struktur pori dan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan struktur amorf karbon aktif (Bhatia, Subhash. 1990). Oleh karena itu, daya adsorpsi zeolit terlihat lebih baik dibandingkan karbon aktif. Hal ini juga ditunjukkan pada Gambar 4.3 dimana aktivitas degradasi dari katalis $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAL}(15\%)$ dan $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAM}(15\%)$ lebih baik dibandingkan katalis $\text{TiO}_2(85\%)\text{-KA}(15\%)$.

Berdasarkan keseluruhan analisis terhadap keempat jenis katalis ini, terlihat bahwa laju degradasi CO dengan katalis TiO₂-adsorben lebih baik dibandingkan katalis TiO₂ tanpa adsorben. Hal ini terjadi karena kekuatan adsorpsi dari katalis TiO₂ berpenyangga adsorben lebih besar jika dibandingkan dengan katalis TiO₂ tanpa penyangga. Hasil ini analog dengan hasil yang didapat dari proses fotodegradasi benzena oleh Jacoby (1996) dan methyl orange oleh Youji Li (2005) dimana laju degradasi polutan dengan TiO₂ berpenyangga menunjukkan nilai yang lebih besar dari TiO₂ tanpa penyangga.

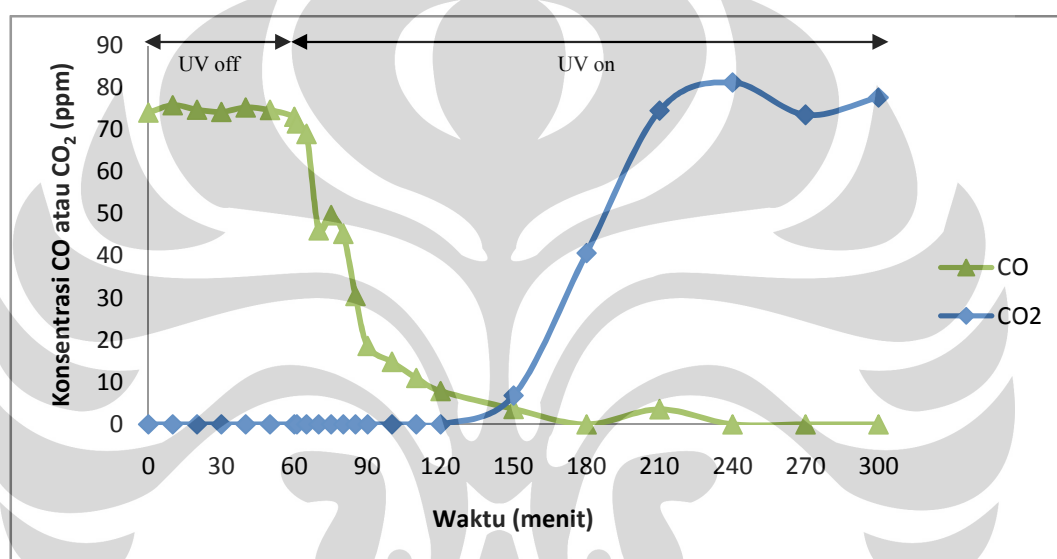
4.1.3 Analisis Produksi CO₂ Pada Degradasi CO Murni

Proses degradasi senyawa organik dengan proses fotokatalitik merupakan proses oksidasi yang menghasilkan CO₂, uap air, dan senyawa mineral. Namun pada proses oksidasi CO, produk hasil reaksinya bisa dipastikan berupa CO₂. Keberadaan senyawa CO₂ merupakan bukti bahwa berkurangnya kandungan CO bukanlah karena model ruang uji yang bocor atau teradsorpsi seluruhnya oleh penyangga. Data yang diperoleh dari analisis CO₂ pada GC-TCD ini berupa *peak area*. Untuk memudahkan konversi ke dalam fungsi konsentrasi, dibuat suatu kurva kalibrasi seperti yang terdapat pada Lampiran 2. Sementara itu, data kuantitatif secara mendetail dari produksi CO₂ pada variasi jenis katalis dapat dilihat pada Lampiran 6. Berikut ini adalah hasil produksi CO₂ pada degradasi CO murni sebagai bukti berlangsungnya reaksi fotokatalisis:



Gambar 4.4 Produksi CO₂ pada degradasi CO dengan variasi jenis katalis

Gambar 4.4 menunjukkan perbandingan produksi CO₂ sebagai hasil oksidasi CO oleh 4 jenis katalis yang digunakan pada uji ini. Keempat jenis katalis mulai menunjukkan aktivitasnya secara signifikan dalam memproduksi CO₂ pada menit ke-180. Berdasarkan Gambar 4.4, terlihat bahwa katalis TiO₂ tanpa adsorben memproduksi CO₂ lebih cepat dibandingkan katalis lainnya. Fenomena ini dapat kita investigasi dengan melihat terlebih dahulu proses degradasi CO dan produksi CO₂ secara simultan pada katalis TiO₂ seperti yang ditunjukkan Gambar 4.5 berikut ini.



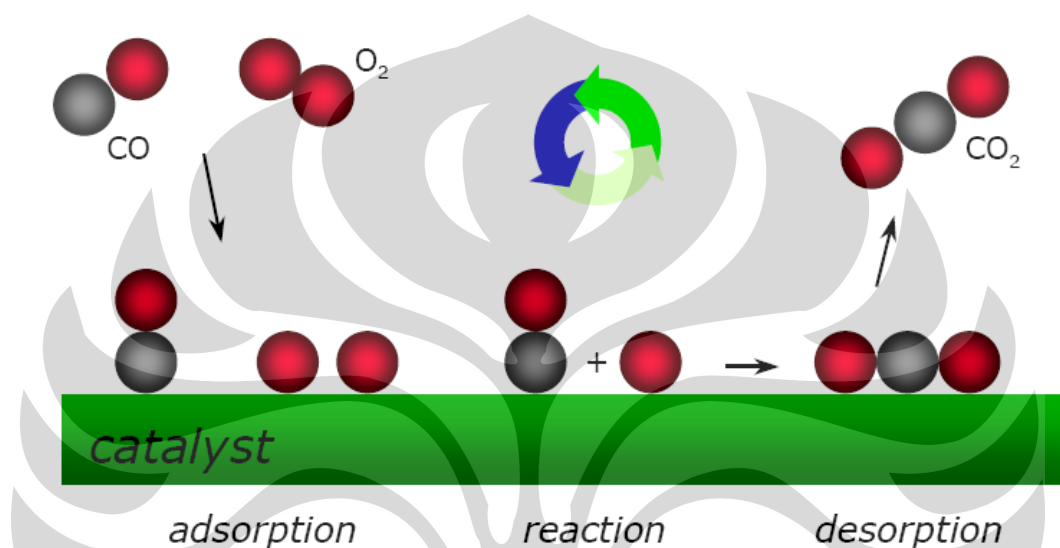
Gambar 4.5 Produksi CO₂ pada degradasi CO dengan katalis TiO₂

Secara stoikiometris, setiap 1 mol CO yang terdegradasi akan menghasilkan 1 mol CO₂. Berdasarkan Gambar 4.5, terlihat bahwa CO mulai turun secara signifikan pada rentang waktu 60-150 menit. Sementara itu, produksi CO₂ mulai mengalami peningkatan yang cukup signifikan pada selang waktu 120-210 menit. Meskipun ada selang waktu tunda antara kedua proses tersebut untuk saling menunjukkan aktivitas optimalnya, namun hal ini menunjukkan bahwa telah terjadinya reaksi fotokatalisis sesuai persamaan reaksi :



Waktu tunda pada proses ini merupakan suatu keadaan dimana konsentrasi CO telah turun secara signifikan, namun tidak diimbangi dengan produksi CO₂ secara proporsional. Jika mengacu pada persamaan oksidasi CO di atas,

seharusnya penurunan CO yang signifikan akan langsung diikuti oleh produksi CO₂ secara proporsional. Berdasarkan Gambar 4.5, terlihat bahwa katalis TiO₂ tanpa adsorben membutuhkan waktu tunda sekitar 60 menit. Diduga sebagian besar CO pada selang waktu tersebut telah mengalami oksidasi oleh radikal hidroksil dan diubah menjadi CO₂, tetapi belum dilepas ke udara sekitar dari permukaan katalis. Perhatikan Gambar 4.6 berikut ini



Gambar 4.6 Ilustrasi skema oksidasi CO dengan bantuan katalis

Dengan memperhatikan Gambar 4.6, maka waktu tunda selama 60 menit ini diduga merupakan waktu yang dibutuhkan untuk peristiwa desorpsi, yaitu suatu fenomena pelepasan produk reaksi oleh katalis. Peristiwa desorpsi ini merupakan salah satu tahapan penting dalam proses fotokatalisis heterogen. Takada et al. (1998) menjelaskan bahwa proses fotokatalisis heterogen terdiri dari 5 langkah esensial :

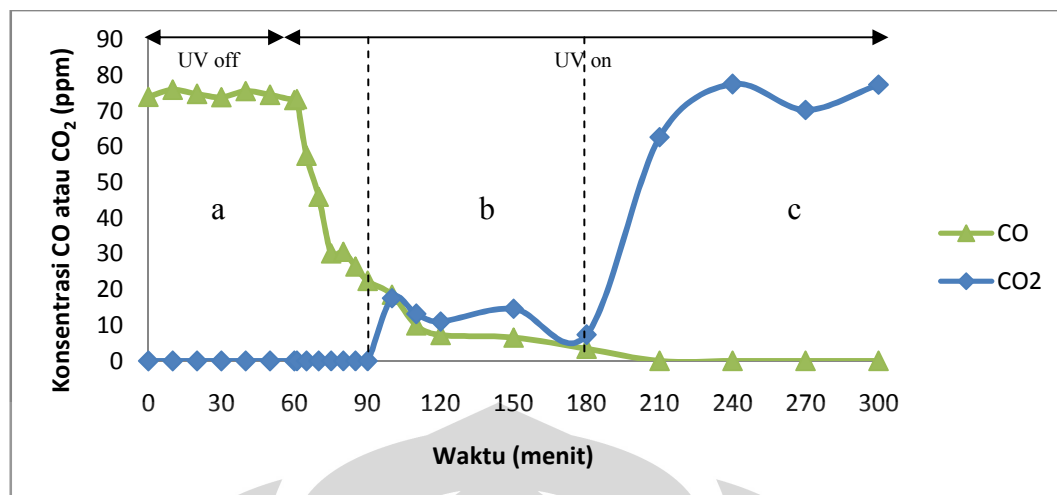
1. Reaktan berdifusi ke permukaan katalis
2. Reaktan mengalami adsorpsi pada permukaan katalis
3. Reaktan bereaksi dengan katalis menghasilkan produk
4. Produk yang dihasilkan terdesorpsi dari katalis
5. Produk berdifusi keluar dari permukaan katalis

Untuk proses fotokatalisis polutan dengan konsentrasi rendah, langkah (2) dan (4) merupakan langkah yang mempengaruhi laju reaksi berdasarkan teori

kinetika reaksi. Dengan demikian, pelepasan produk dari suatu reaksi berfotokatalisis juga dipengaruhi oleh kemampuan desorpsi katalis terhadap produk tersebut. Kemampuan desorpsi ini dipengaruhi oleh jenis katalis yang digunakan dan jenis produk yang dihasilkan. Dengan jenis katalis yang digunakan berupa katalis TiO_2 dan produk yang dihasilkan adalah CO_2 , maka dibutuhkan waktu desorpsi selama 60 menit. Waktu ini termasuk singkat karena layaknya semikonduktor lainnya, katalis TiO_2 memiliki kemampuan desorpsi yang cukup baik (Canela, 1999; El-Maazawi, 2000). Dengan menduga skema mekanisme adsorpsi seperti pada Gambar 4.6, maka persamaan reaksi oksidasi CO oleh katalis TiO_2 ini mengikuti mekanisme adsorpsi Langmuir-Hinshelwood. Model persamaan Langmuir-Hinshelwood sendiri berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu dianggap sebagai model yang paling mewakili proses fotokatalisis, dimana selama proses fotokatalisis terdapat juga proses adsorpsi yang mempengaruhi hasil secara signifikan (Perry, 1999).

Setelah CO_2 dilepas oleh katalis TiO_2 , berdasarkan Gambar 4.5 terlihat bahwa produksi CO_2 meningkat secara signifikan dari menit ke-150 hingga 210. Pada menit ke-210, CO_2 yang dihasilkan sebanding dengan jumlah CO pada awal reaksi, yaitu sekitar 80 ppm. Hal ini sesuai dengan persamaan reaksi oksidasi CO dimana 1 mol CO terkonversi menjadi 1 mol CO_2 pada akhir reaksi. Dari menit 210 hingga 300, konsentrasi CO_2 tidak mengalami penambahan lebih lanjut karena pada selang waktu ini telah dicapai keadaan maksimal dimana seluruh CO yang dioksidasi telah dirubah menjadi CO_2 dan dilepas seluruhnya ke udara.

Sementara itu, produksi CO_2 oleh katalis $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAM}(15\%)$ memberikan fenomena yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 berikut ini. Untuk Gambar 4.7, tampilan grafik dibagi menjadi 3 daerah utama berdasarkan kecenderungan perilaku yang terjadi. Daerah (a) menggambarkan fenomena penurunan CO secara drastis. Daerah (b) menunjukkan perilaku mulai terdeteksinya CO_2 dalam jumlah kecil dan daerah (c) mengilustrasikan drastisnya peningkatan CO_2 pada ruang uji.



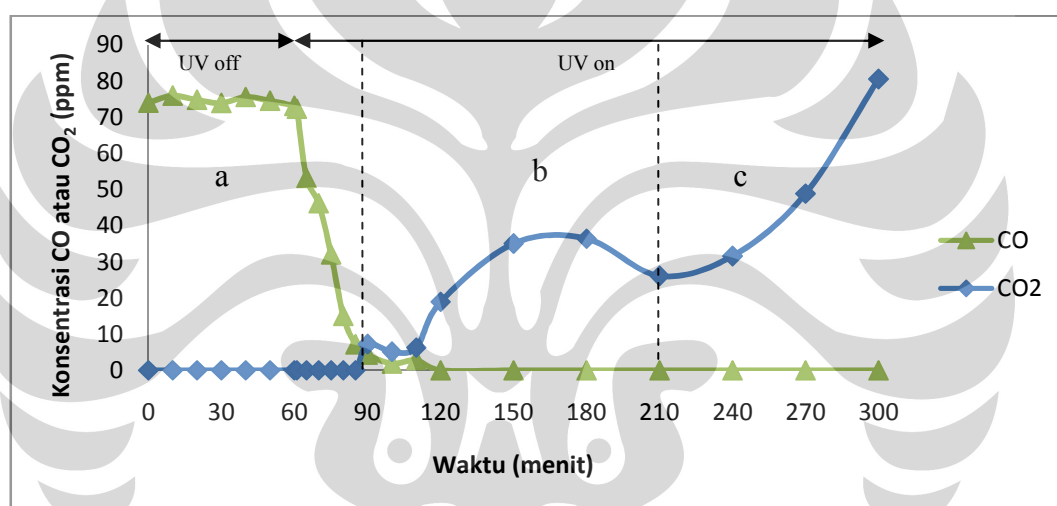
Gambar 4.7 Produksi CO₂ pada degradasi CO dengan katalis TiO₂(85%)-ZAM(15%)

Berdasarkan Gambar 4.7, terlihat bahwa waktu tunda yang dibutuhkan oleh katalis TiO₂(85%)-ZAM(15%) lebih besar dari katalis TiO₂ tanpa adsorben, yaitu sekitar 90 menit (daerah b). Hal ini diduga karena adanya penambahan adsorben ZAM sebagai penyangga fotokatalis. Penambahan ZAM memang berperan meningkatkan laju adsorpsi CO. Namun ketika sebagian CO₂ telah dilepas ke udara, ternyata ZAM kembali mengadsorpsi sebagian CO₂ akibat daya tariknya terhadap molekul non-polar yang cukup besar. Dengan demikian ketika produk CO₂ terdesorpsi keluar dari katalis, terjadi proses adsorpsi kembali produk CO₂ oleh adsorben pada katalis. ZAM merupakan zeolit alam dengan kandungan modernite yang cukup dominan. Modernite memiliki nilai Si/Al yang cukup besar sehingga ZAM cenderung tertarik menyerap molekul-molekul non-polar seperti CO₂ untuk diadsorpsi (Jansen, 1994; Handoko, 2002). Oleh karena itu, waktu tunda yang terjadi pada katalis TiO₂(85%)-ZAM(15%) lebih besar dibandingkan dengan waktu tunda katalis TiO₂ tanpa adsorben. Proses desorpsi dan adsorpsi kembali yang berkompetisi juga menunjukkan profil produksi CO₂ pada daerah (b) yang naik-turun. Ketika konsentrasi CO₂ naik, hal tersebut menandakan desorpsi CO₂ yang lebih unggul dibandingkan adsorpsi kembali oleh katalis. Namun ketika konsentrasi CO₂ turun, diduga terjadi adsorpsi kembali CO₂ oleh katalis dimana kekuatan adsorpsi kembali ini lebih besar dibandingkan desorpsi.

Sementara itu pada menit ke-210 (daerah c), terlihat bahwa laju desorpsi meningkat dimana kandungan CO₂ telah mendekati nilai stoikiometrisnya dengan

konsentrasi CO pada awal reaksi. Hal ini diduga disebabkan oleh telah tingginya konsentrasi CO₂ pada permukaan katalis. Di sisi lain, kandungan ZAM yang ada hanya sekitar 15% sehingga tidak dapat lagi menyerap kembali CO₂ dan justru melepas CO₂ yang ada di permukaannya ke udara.

Berikut ini adalah ilustrasi produksi CO₂ pada degradasi CO dengan katalis TiO₂(85%)-ZAL(15%). Serupa seperti pada Gambar 4.7, Gambar 4.8 juga dibagi menjadi 3 daerah utama berdasarkan kecenderungan perilaku yang terjadi. Daerah (a) menggambarkan fenomena penurunan CO secara drastis. Daerah (b) menunjukkan perilaku mulai terdeteksinya CO₂ dalam jumlah kecil dan daerah (c) mengilustrasikan drastisnya peningkatan CO₂ pada ruang uji.

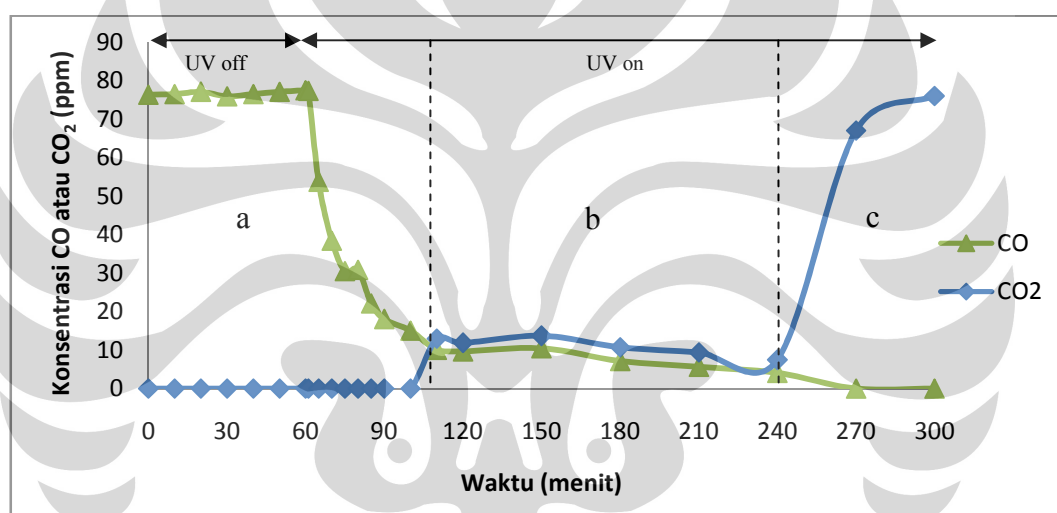


Gambar 4.8 Produksi CO₂ pada degradasi CO dengan katalis TiO₂(85%)-ZAL(15%)

Gambar 4.8 memperlihatkan bahwa waktu tunda yang terjadi pada produksi CO₂ ini cukup singkat, yaitu sekitar 60 menit (pada daerah b). Hal ini diduga karena kandungan klinoptilolit yang cukup dominan pada ZAL menyebabkan ZAL kurang tertarik mengadsorpsi CO₂ sehingga pada menit ke-150, konsentrasi CO₂ di udara mulai meningkat. Peningkatan CO₂ secara drastis semakin terlihat mulai menit ke-210 (daerah c). Klinoptilolit yang bersifat polar cenderung kurang tertarik dalam mengadsorpsi molekul CO₂ yang bersifat non-polar. Namun, peningkatan produksi CO₂ ini juga menunjukkan perilaku yang naik-turun seperti yang terlihat pada daerah (b). Hal ini semakin mempertegas adanya kompetisi antara adsorpsi kembali dan desorpsi CO₂ oleh katalis TiO₂ yang ditambahkan

adsorben. Karena ZAL lebih tertarik pada molekul polar, maka laju adsorpsi kembali CO₂ lebih rendah dibandingkan laju desorpsinya sehingga perilaku naik-turunnya konsentrasi CO₂ terjadi di kisaran konsentrasi yang cukup besar.

Ilustrasi produksi CO₂ pada degradasi CO dengan katalis TiO₂(85%)-KA(15%) juga juga dibagi menjadi 3 daerah utama berdasarkan kecenderungan perilaku yang terjadi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 berikut ini. Daerah (a) menggambarkan fenomena penurunan CO secara drastis. Daerah (b) menunjukkan perilaku mulai terdeteksinya CO₂ dalam jumlah kecil dan daerah (c) mengilustrasikan drastisnya peningkatan CO₂ pada ruang uji.



Gambar 4.9 Produksi CO₂ pada degradasi CO dengan katalis TiO₂(85%)-KA(15%)

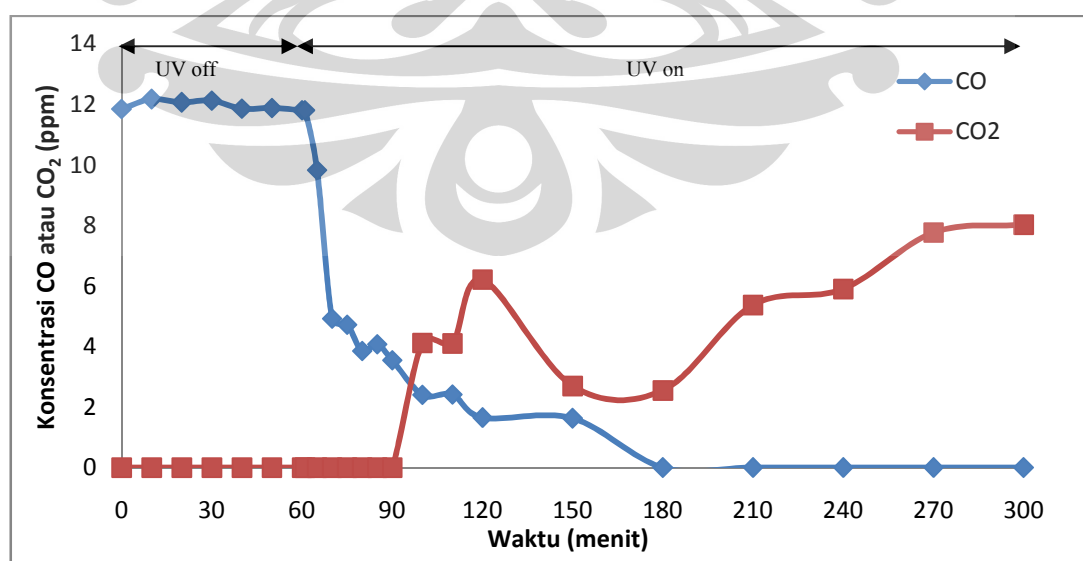
Fenomena yang terjadi pada Gambar 4.9 menunjukkan aktivitas yang mirip dengan katalis TiO₂(85%)-ZAM(15%) (Gambar 4,7) dimana waktu tunda yang terjadi cukup besar. Hal ini dikarenakan adsorben karbon aktif juga sangat kuat dalam mengadsorp molekul non-polar seperti CO₂. Terlihat bahwa waktu tunda pada proses ini mencapai 150 menit. Proses adsorpsi kembali menunjukkan aktivitasnya yang lebih besar dibandingkan desorpsi sehingga profil produksi CO₂ pada daerah (b) terjadi pada kisaran konsentarsi yang kecil. Perilaku ini menunjukkan ketertarikan karbon aktif kepada molekul CO₂. Selanjutnya, pada menit ke-270 dapat dilihat bahwa konsentrasi CO₂ di udara mulai meningkat

drastis akibat telah penuhnya permukaan adsorben karbon aktif oleh molekul CO_2 (daerah c).

Dari hasil analisis terhadap produksi CO_2 pada keempat jenis katalis yang digunakan, dapat ditarik kesimpulan bahwa proses oksidasi CO menjadi CO_2 telah berjalan sesuai persamaan reaksinya dimana 1 mol CO akan terkonversi menjadi 1 mol CO_2 . Namun demikian, adanya waktu tunda akibat proses desorpsi yang berbeda-beda karena adanya adsorpsi kembali CO_2 oleh beberapa adsorben menyebabkan laju produksi CO_2 di udara terjadi cukup lambat.

4.2 Uji Degradasi Polutan CO Asap Rokok

Keberadaan asap rokok dalam suatu ruangan amat mengganggu manusia yang berada di sekitarnya. Asap rokok merupakan substansi penghasil CO yang cukup besar. Bahkan, sumbangsih CO dari asap rokok mencapai 30.000 ppm di udara bebas. Pengujian degradasi CO pada asap rokok dilakukan untuk melihat kemampuan alat mempurifikasi CO pada keadaan sebenarnya dalam asap rokok. Pada uji ini diinjeksikan asap rokok yang dihasilkan dari 3 batang rokok. Katalis yang digunakan adalah katalis $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAL}(15\%)$ yang merupakan katalis yang memberikan kinerja yang optimal dibanding jenis katalis uji lainnya. Data kuantitatif secara mendetail dari hasil uji asap rokok dengan katalis $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAL}(15\%)$ dapat dilihat pada Lampiran 7. Berikut ini adalah ilustrasi grafiknya.



Gambar 4.10 Produksi CO_2 pada degradasi CO asap rokok dengan katalis $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAL}(15\%)$

Berdasarkan Gambar 4.10, terlihat bahwa degradasi CO terjadi dengan signifikan pada 30 menit awal setelah lampu dinyalakan dimana terjadi penurunan kadar CO sebesar 72%. Jika dibandingkan dengan degradasi CO murni oleh katalis $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAL}(15\%)$ yang mencapai 95%, nilai ini relatif tidak terlalu besar. Hal ini diduga karena pada polutan asap rokok, tidak hanya CO yang didegradasi oleh katalis $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAL}(15\%)$ tetapi juga senyawa organik lainnya yang tidak terdeteksi GC. Selanjutnya, CO secara bertahap berkurang konsentrasinya hingga habis sama sekali pada sekitar menit ke-180. Penurunan CO ini juga diikuti dengan produksi CO_2 pada sekitar menit ke-100.

Selain mengamati dari segi penurunan konsentrasi CO dalam ruang uji, pengamatan panca indera secara fisik juga dapat dilakukan pada uji degradasi CO pada asap rokok. Hal ini dikarenakan asap rokok merupakan polutan yang berwarna dan berbau. Oleh karena itu, indikasi telah berhasilnya proses degradasi tidak hanya dilakukan dengan analisis kuantitatif menggunakan GC, tetapi juga dapat dilakukan secara kualitatif dengan panca indera. Gambar 4.11 hingga 4.13 berikut ini menunjukkan hasil pengamatan secara kualitatif terhadap uji degradasi CO pada asap rokok.



Gambar 4.11 Proses homogenisasi ruang uji dengan asap rokok



Gambar 4.12 Kondisi ruang uji setelah lampu UV dan blower dinyalakan selama 30 menit



Gambar 4.13 Kondisi ruang uji setelah lampu UV & blower dinyalakan selama 60 menit

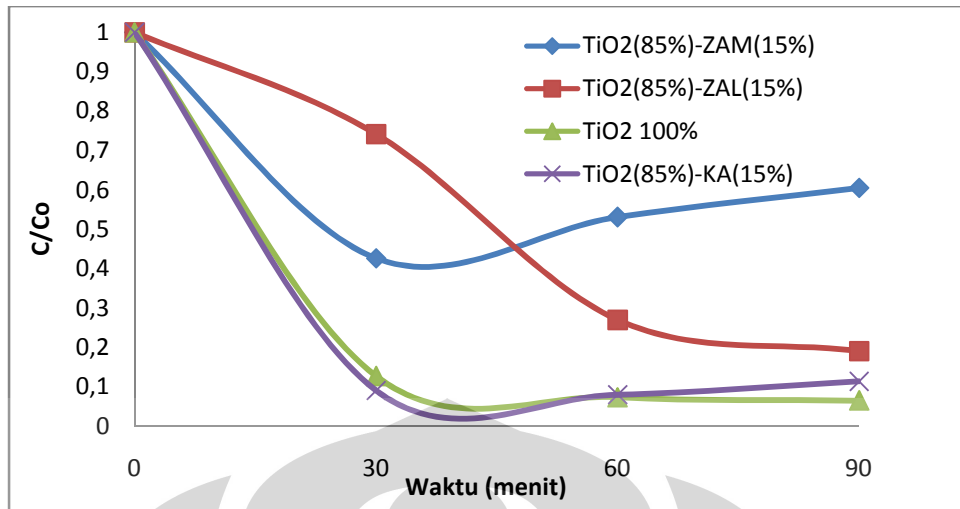
Gambar 4.11 menunjukkan bahwa pada saat proses homogenisasi, ruang uji terlihat cukup pekat tertutupi oleh asap rokok yang berwarna abu-abu. Selama 60 menit awal ini, blower dan lampu UV belum dinyalakan agar asap rokok dapat menyebar secara merata ke seluruh sisi ruang uji. Setelah 60 menit, lampu UV dan blower kemudian dinyalakan. Pada 30 menit awal setelah lampu UV dan blower dinyalakan, tingkat kepekatan ruangan mulai sedikit memudar. Dari Gambar 4.12, dapat terlihat bahwa masih tampak sedikit warna keabu-abuan pada daerah sekitar alat uji. Jika kita bandingkan dengan hasil kuantitatif, pada rentang waktu ini terjadi penurunan konsentrasi CO secara signifikan. Namun karena gas CO tidak berwarna, maka hal ini tidak bisa dijadikan bukti bahwa sedikit memudarnya kepekatan asap rokok dikarenakan konsentrasi CO yang berkurang. Dalam hal ini, diduga ada sebagian polutan organik lainnya pada asap rokok yang ikut terdegradasi sehingga menyebabkan kepekatan asap rokok berkurang.

Setelah 60 menit waktu pengujian, terlihat bahwa kepekatan asap rokok dalam ruang uji telah menghilang. Ruang uji terlihat kembali seperti pada keadaan awal sebelum diinjeksikan asap rokok. Hal ini menunjukkan bahwa polutan-polutan organik pada asap rokok telah terdegradasi secara signifikan. Konsentrasi CO pada rentang waktu ini pun cukup rendah, bernilai sekitar 2 ppm. Sebagai gantinya, muncul gas CO₂ yang dapat terdeteksi oleh GC sebagai hasil dari reaksi fotokatalitik yang terjadi. Gas CO₂ ini mengalami peningkatan hingga proses pengujian berhenti pada menit ke-300. Pada saat membuka kotak uji, bau khas piridin yang biasanya terhirup dari asap rokok tidak tercium sama sekali oleh hidung penguji. Observasi panca indera ini menunjukkan bahwa selain CO, terjadi juga proses degradasi senyawa organik lainnya pada asap rokok seperti piridin.

Uji yang telah dilakukan, baik secara kuantitatif dan kualitatif, merupakan bukti langsung kemampuan alat yang dilengkapi dengan katalis fotokatalis-adsorben dalam mendegradasi polutan asap rokok secara langsung. Hasil degradasi yang cukup besar menunjukkan bahwa alat yang dilengkapi dengan katalis komposit ini telah dapat bekerja dengan baik dalam mendegradasi polutan asap rokok.

4.3 Uji Degradasi Nikotin

Pada penelitian ini, degradasi nikotin diujikan dengan memvariasikan jenis katalis yang digunakan. Pada penelitian ini, jenis katalis yang digunakan adalah katalis TiO₂ tanpa adsorben, TiO₂(85%)-ZAM(15%), TiO₂(85%)-ZAL(15%), dan TiO₂(85%)-KA(15%). Reaktor yang digunakan adalah reaktor fotokatalitik sistem *batch* fasa cair. Kadar nikotin dalam suatu batang rokok mencapai 2666,67 ppm. Untuk memodelkan keadaan ini, maka dilarutkan 0,8 ml nikotin dalam 300 ml air demin. Data kuantitatif secara mendetail dari hasil uji degradasi nikotin dapat dilihat pada Lampiran 9. Berikut ini adalah ilustrasi grafik dari hasil penelitian untuk degradasi nikotin selama 90 menit.



Gambar 4.14 Degradasi nikotin dengan variasi jenis katalis

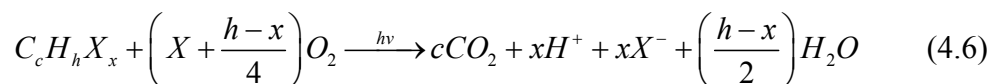
Berdasarkan gambar 4.11, terlihat bahwa C/C_0 (perbandingan konsentrasi waktu tertentu dengan konsentrasi awal) dari nikotin berkurang selama selang waktu 90 menit. Katalis TiO_2 tanpa adsorben dan $TiO_2(85\%)-KA(15\%)$ menunjukkan aktivitas degradasi yang paling besar dimana pada 30 menit pertama telah terjadi penurunan konsentrasi nikotin hingga 90%. Dalam hal ini, fotokatalis TiO_2 menunjukkan aktivitas yang tinggi dalam lingkungan berfasa cair karena sifat hidrofiliknya. Ketika lingkungan sekitarnya kaya akan air, maka *hole* yang muncul akibat fotoeksitasi elektron akan mengoksidasi air di sekitarnya menjadi radikal hidroksil sesuai mekanisme reaksi berikut :



Radikal hidroksil tersebut kemudian akan mendegradasi nikotin yang berada disekitarnya. Pada percobaan ini, katalis dan polutan disonikasi terlebih dahulu. Akibatnya, polutan dan katalis akan membentuk sistem padat-cair dengan tingkat homogenitas yang cukup besar. Dengan demikian, interaksi antara nikotin dengan katalis akan menjadi lebih besar sehingga peran adsorben dalam hal ini tidak terlalu signifikan. Hal itu pula yang terjadi pada katalis $TiO_2(85\%)-KA(15\%)$

dimana adsorben karbon aktif diduga hanya berperan dalam mendispersikan fotokatalis TiO₂ secara merata pada permukaan katalis.

Jika mengacu pada persamaan umum reaksi oksidasi polutan organik secara fotokatalitik, maka persamaan berikut diduga terjadi pada reaksi oksidasi nikotin:



Namun, mekanisme reaksi ini tidak dapat dibuktikan pada percobaan ini karena analisis terhadap produk reaksi tidak dilakukan.

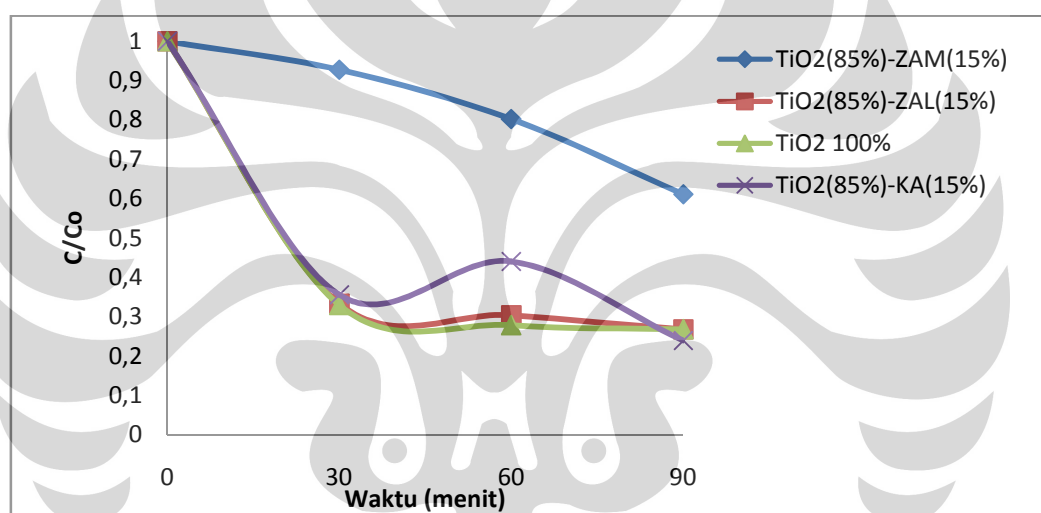
Sementara itu, katalis TiO₂(85%)-ZAL(15%) terlihat memberikan aktivitas degradasi yang cukup besar. Hal ini menunjukkan kinerja fotokatalisis yang mulai teraktivasi ketika lampu UV mulai dinyalakan. Aktivitas fotokatalis terlihat cukup signifikan dimana penurunan konsentrasi pada 60 menit pertama ini mencapai hampir 85%. Hal ini dikarenakan adanya penambahan adsorben ZAL yang dapat mendispersikan fotokatalis TiO₂. Selain itu, sifat polar yang dimiliki klinoptilolite pada ZAL juga ikut meningkatkan aktivitas adsorpsi polutan pada katalis. Namun demikian, terlihat bahwa konsentrasi nikotin belum sepenuhnya habis ketika pengujian dilakukan hingga menit ke-90. Aktivitas fotokatalisis-adsorpsi memang mampu menurunkan konsentrasi polutan secara signifikan. Namun demikian, untuk mendegradasi polutan hingga habis, tampaknya dibutuhkan waktu pengujian yang lebih lama lagi.

Di sisi lain, katalis TiO₂(85%)-ZAM(15%) tidak terlalu memberikan hasil % degradasi yang besar. Pada akhir waktu pengujian, hanya 40% nikotin yang dapat didegradasi. Diduga, hal ini disebabkan oleh aktivitas adsorpsi ZAM yang kurang tertarik terhadap molekul polar seperti nikotin. Lebih lanjut, proses fotokatalitik yang dilakukan dalam lingkungan yang kaya akan air yang bersifat polar juga menghambat aktivitas ZAM dalam mengadsorpsi nikotin. Kurang kuatnya adsorpsi ZAM ini menyebabkan fotokatalis TiO₂ menjadi berkurang aktivitasnya.

4.4 Uji Degradasi Piridin

Pada penelitian ini, degradasi piridin diujikan dengan memvariasikan jenis katalis yang digunakan. Pada penelitian ini, jenis katalis yang digunakan adalah

katalis TiO_2 tanpa adsorben, $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAM}(15\%)$, $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAL}(15\%)$, dan $\text{TiO}_2(85\%)\text{-KA}(15\%)$. Reaktor yang digunakan adalah reaktor fotokatalitik sistem *batch* fasa cair. Kadar piridin dalam suatu batang rokok mencapai 22 ppm. Untuk memodelkan keadaan ini, usaha yang dilakukan cukup sulit karena jumlah piridin yang harus dilarutkan pada 300 ml air demin sebanyak 0,0068 ml. Oleh karena itu, diasumsikan uji dilakukan terhadap 47 batang rokok sehingga jumlah piridin yang dilarutkan dalam 300 ml air demin sebanyak 1 ml. Data kuantitatif secara mendetail dari hasil uji degradasi piridin dapat dilihat pada Lampiran 8. Berikut ini adalah ilustrasi grafik dari hasil penelitian untuk degradasi piridin dengan menggunakan keempat jenis katalis tersebut selama 90 menit.



Gambar 4.15 Degradasi piridin dengan variasi jenis katalis

Berdasarkan gambar 4.12, terlihat bahwa nilai C/Co (perbandingan konsentrasi waktu tertentu dengan konsentrasi awal) dari piridin berkurang selama selang waktu 90 menit. Terlihat bahwa penurunan yang signifikan mulai terjadi pada menit ke-30 setelah lampu dinyalakan. Hal ini menunjukkan kinerja fotokatalisis yang mulai teraktivasi ketika lampu UV mulai dinyalakan. Aktivitas fotokatalis terlihat cukup signifikan dimana penurunan pada 30 menit pertama ini mencapai hampir 75% dari konsentrasi awal. Namun demikian, terlihat bahwa konsentrasi piridin belum sepenuhnya habis ketika pengujian dilakukan hingga menit ke-90. Aktivitas fotokatalisis-adsorpsi memang mampu menurunkan konsentrasi polutan secara signifikan. Namun demikian, untuk mendegradasi

polutan hingga habis, tampaknya dibutuhkan waktu pengujian yang lebih lama lagi.

Pada uji ini, katalis TiO_2 tanpa adsorben dan katalis $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAL}(15\%)$ memberikan hasil degradasi yang paling baik. Hal ini dikarenakan adanya penambahan adsorben ZAL yang dapat berperan dengan baik sebagai penyangga bagi fotokatalis TiO_2 . Namun demikian, katalis TiO_2 tanpa adsorben ternyata juga menunjukkan perilaku degradasi yang baik. Tampaknya, penambahan adsorben ZAL tidak terlalu memberikan perubahan yang signifikan dalam hal tingkat degradasi piridin. Pada percobaan ini, katalis dan polutan disonikasi terlebih dahulu. Akibatnya, polutan dan katalis akan membentuk sistem padat-cair dengan tingkat homogenitas yang cukup besar. Dengan demikian, interaksi antara piridin dengan katalis akan menjadi lebih besar sehingga peran adsorben dalam hal ini tidak terlalu signifikan. Polutan piridin telah berada di sekitar katalis TiO_2 sehingga proses fotokatalisis dapat berjalan dengan lebih mudah.

Namun demikian, jika kita meninjau sisi keekonomian, penambahan adsorben pada katalis ternyata memberikan suatu penghematan yang cukup besar. Perhitungan ekonomi sederhana dengan hanya mempertimbangkan aspek bahan baku dapat diterapkan dalam analisis ini. Seperti diketahui, TiO_2 merupakan barang impor dengan harga per kg mencapai Rp 1.000.000,-. Sementara itu, ZAL merupakan barang lokal yang harganya hanya sekitar Rp 50.000,- per kg. Diasumsikan berat total katalis sekitar 1 gram dan biaya *treatment* zeolit per gram sebesar Rp 100,-. Berikut ini adalah tabel perbandingan keekonomian dari dua jenis katalis ini.

Tabel 4.1 Perbandingan keekonomian katalis TiO_2 dengan katalis $\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAL}(15\%)$

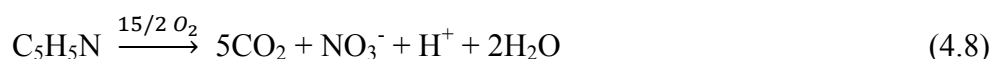
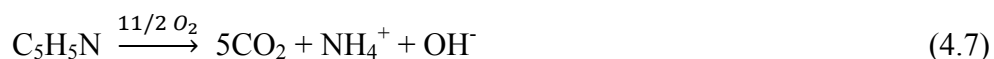
Variabel Biaya	TiO_2	$\text{TiO}_2(85\%)\text{-ZAL}(15\%)$
Bahan baku TiO_2	1000	850
Bahan baku zeolit	0	7,5
<i>Treatment</i> zeolit	0	100
Total biaya	Rp 1000,-	Rp 957,5

Berdasarkan Tabel 4.1, terlihat bahwa didapat penghematan sebesar Rp 42,5 untuk setiap gram katalis TiO₂(85%)-ZAL(15%) yang dibuat. Jika dilakukan *scale-up* terhadap pembuatan katalis ini, maka akan didapatkan tingkat penghematan yang jauh lebih besar. Lebih lanjut, penggunaan zeolit sebagai adsorben juga meningkatkan nilai guna dari bahan lokal asli Indonesia. Dengan aktivitas degradasi yang tidak berbeda jauh, penggunaan ZAL sebagai adsorben memberikan nilai tambah tersendiri.

Sementara itu, katalis TiO₂(85%)-ZAM(15%) tidak terlalu memberikan nilai % degradasi yang besar. Pada akhir waktu pengujian, hanya 40% piridin yang dapat didegradasi. Diduga, hal ini disebabkan oleh aktivitas adsorpsi ZAM yang kurang tertarik terhadap molekul polar seperti piridin. Berbeda dengan kandungan klinoptilolite ZAL yang menyukai molekul polar, kandungan modernite dalam ZAM kurang tertarik dalam menarik molekul polar seperti piridin. Lebih lanjut, proses fotokatalitik yang dilakukan dalam lingkungan yang kaya akan air yang bersifat polar juga menghambat aktivitas ZAM dalam mengadsorpsi piridin. Sifat hidrofobik ZAM menyebabkan penambahannya pada fotokatalis TiO₂ memberikan efek penurunan kinerja yang cukup besar.

Perilaku yang berbeda ditunjukkan oleh katalis TiO₂(85%)-KA(15%) dimana tingkat aktivitas degradasinya cukup besar. Meskipun karbon aktif juga merupakan molekul non-polar, namun dalam hal ini tampaknya karbon aktif dapat mendispersikan fotokatalis TiO₂ secara merata pada permukaan katalis. Kemampuan dispersi karbon aktif yang lebih baik ini disebabkan oleh pori-pori permukaannya yang cukup besar dibandingkan dengan zeolit alam (Othmer, 1992). Dengan demikian, aktivitas fotokatalis TiO₂ menjadi dominan dan menutupi kekurangan karbon aktif dalam mengadsorpsi piridin.

Reaksi oksidasi piridin secara fotokatalitik pada fasa cair diduga menghasilkan CO₂ dan H₂O seperti yang diajukan oleh Sampath pada tahun 1994:



Namun demikian, pada penelitian ini mekanisme reaksi tersebut tidak dapat dibuktikan karena analisis terhadap produk hasil reaksi ini tidak dilakukan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang bisa diambil dari penelitian ini adalah :

- a) Pada uji degradasi CO dengan variasi komposisi katalis, penambahan adsorben ZAL sebanyak 15% pada fotokatalis TiO₂ memberikan hasil yang optimum, yaitu konsentrasi CO dapat diturunkan hingga mencapai 95% dari konsentrasi awal dalam selang waktu 30 menit.
- b) Alat uji yang dilengkapi katalis komposit TiO₂(85%)-ZAL(15%) mampu mendegradasi hingga 70% CO pada asap rokok dalam selang waktu 30 menit.
- c) Degradasi polutan CO murni dan polutan CO pada asap rokok menghasilkan produk CO₂ yang berjalan sesuai persamaan reaksinya dimana 1 mol CO terkonversi menjadi 1 mol CO₂.
- d) Pada uji polutan nikotin dan piridin, penambahan adsorben tidak memberikan efek peningkatan kinerja degradasi polutan.

5.2 Saran

Hal-hal yang dapat direkomendasikan untuk dilakukan pada penelitian selanjutnya adalah :

- a) Mengubah nikotin dan piridin cair ke dalam fasa gas sehingga dapat diujikan pada alat purifikasi udara.
- b) Mencari laboratorium yang memiliki GC-MS yang dapat menganalisis nikotin dan piridin dalam fasa gas.
- c) Melakukan variasi konsentrasi dengan kisaran konsentrasi yang lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. (1992). “*Toxicological Profile for Pyridine*”, U.S. Public Health Service.
- Anonim. (2009). *Pyridine*. [Online]. Available from: <http://www.wikipedia.org/wiki/pyridine>. [Accessed 1st March 2009]
- Anonim. (2009). *Nicotine*. [Online]. Available from: <http://www.wikipedia.org/wiki/nicotine>. [Accessed 1st March 2009]
- Anonim. (2009). *CO*. [Online]. Available from: <http://www.wikipedia.org/wiki/co>. [Accessed 3rd March 2009]
- Anonim. (2009). *Activated Carbon*. [Online]. Available from: http://www.wikipedia.org/wiki/activated_carbon. [Accessed 1st May 2009]
- Anonim. (2009). *HPLC*. [Online]. Available from: <http://www.chem-is-try.org/hplc>. [Accessed 17th May 2009]
- Anonim. (2009). *WHO*. [Online]. Available from: <http://www.who.com>. [Accessed 17th June 2009]
- Anpo, M., Takeuchi, M., (2003), “The design and development of highly reactive titanium oxide photocatalysts operating under visible light irradiation”, *J. of Catal.*, 216: pp 505–516
- Bazemore, R., Harrison, C., Greenberg, M., (2006), “Identification of Components Responsible for the Odor of Cigar Smoker's Breath”, *J. Agric. Food Chem.*, 54 (2): pp 497 -501., 10.1021/jf0519109 S0021-8561(05)01910-2
- Bhatia, Subhash. (1990). *Zeolite Catalysis : Principles and Applications*. CRC Press : Florida.
- Bourzac, K. (2000). *Nicotine*. [Online]. Available from: <http://www.islandcounty.net/health/nicotine>. [Accessed 15th April 2009]
- Canela, M.C. , Alberici,, R. , Sofia, R. , Eberlin, M., Jardim, W., (1999) “Destruction of Malodorous Compounds Using Heterogeneous Photocatalysis”, *Environ. Sci. Technol.*, 33: pp 2788-2792
- Carrey, W.F., (2008), “Photocatalyst, Methods for Deodorizing, and Methods for Making a Deodorizer Sistem”, *US Patent Application Publication*, Pub. No. US 0050272 A1

- Catherine, M.B., Falconer, J.L., (2001), "Characterization of Adsorbed Species on TiO₂ after Photocatalytic Oxidation of Toluene", *J. of Catal*, 200: pp 21–33
- Cristallo, G., Roncari E., Rinaldo A., Trifirò F., (2001), "Study of anatase–rutile transition phase in monolithic catalyst V₂O₅/TiO₂ and V₂O₅–WO₃/TiO₂", *Applied Catal. A General* 209: pp 249–256
- El-Maazawi, M., Finken, A.N., Nair, A.B., Grassian, A.V., (2000), "Adsorption and Photocatalytic Oxidation of Acetone on TiO₂: An in Situ Transmission FT-IR Study", *J. of Catal.*, 191: pp 138–146
- Fogler, H.S., (1992), "Element of Chemical Reaction Engineering", Second Ed. USA, Prentice Hall, Inc.
- Fujishima, Akira, *et al.*, (1999), "TiO₂ Photocatalysis, Fundamental and Applications". BKC, Inc. Tokyo.
- Gan S, Darmansjah I. (1987). Obat Ganglion. Dalam: Gan S, ed. Farmakologi Dan Terapi. ed. 3. Jakarta: Bagian Farmakologi FKUI: 97102
- Gosink, Tom. (1983). Geophysical institute university of Alaska fairbanks
- Gunlazuardi, J., (2001) "Fotokatalisis pada permukaan TiO₂ : Aspek Fundamental dan Aplikasinya", Prosiding Seminar Nasional Kimia Fisika II, Jakarta.
- Handoko, S., (2002), "Preparasi Katalis Cr/Zeolit Melalui Modifikasi Zeolit Alam", *Jurnal ILMU DASAR*, 3(1), hal. 15-23.
- Hashimoto, Keiji, *et al.*, (2000), "Photocatalytic Oxidation of Nitrogen Oxide Over Titania-Zeolite Composite Catalyst to Remove Nitrogen Oxides in The Atmosphere", *Appl. Catal. B: Environ* 30 (2001) : pp 429-436
- Hisanaga, Teruaki, *et al.*, (2002), "Photocatalytic Degradation of Benzene on Zeolite-Incorporated TiO₂ Film", *J. of Hazardous Materials.*, B93: pp 331–337
- Holmes, P.E., Rittenberg, Sydney C., and Knackmuss, H.J., (1971), "Synthesis Of 2,3,6-Trihydroxypyridine And Accumulation And Partial Characterization Of The Product Of 2,6-Dihydroxypyridine Oxidation", *J. Bacteriology*
- Ibadurrohman, M., (2008), "Rekayasa Alat Untuk Purifikasi dan Deodorasi Udara dari Polutan Asap Rokok Menggunakan TiO₂ yang Dimodifikasi dengan Bahan Adsorben", *Skripsi*, Universitas Indonesia.
- Jacoby, A.W, Blake, D.M, Fennell, J.A, Boulter, J.E., Vargo, L., George, M.C., Dolberg, S.K, (1996), "Heterogeneous Photocatalysis for Control of Volatile

- Organik Compounds in Indoor Air”, *Air and Waste Manage, Assac*, 46: pp 891-898
- Jansen J.C., dan Stocker, M., (1994), “Advanced Zeolite Science and Application”, Elsevier, vol 85.
- Kahn, A.Y., (2003), “Titanium Dioxide Coated Activated Carbon: A Regenerative Technology for Water Recofery”, *Thesis*, University of Florida.
- Kopf, P., Gilbert, E., Eberle, S.H., (2000), ”TiO₂ photocatalytic oxidation of monochloroacetic acid and pyridine: influence of ozone”, *J. of Photochem. and Photobiology A: Chemistry*, 136: pp 163–168
- Li, Y., Li, X., Li, J., dan Yin, J., (2005), “Photocatalytic Degradation of Methyl Orange in a Sparged Tube Reactor with TiO₂-coated Activated Carbon C”, *Catal. Commun.*, vol 6., pp.650-655
- Licciulli, A., Lisi, D. (2002). “*Self-Cleaning Glass*”, Universita Degli Studio Di Lecce,
- Linsebigler, A.L., (1995), “Photocatalysis on TiO₂ surfaces : Principles, Mechanism, and Selected Results”, *Chem. Rev.*, 95, : pp 735-758.
- Litter, M.I, Navio, J.A., (1996), ”Photocatalytic properties of iron-doped titania semiconductors”, *J. of Photochem. and Photobiology A: Chemistry*, 98: pp 171–181
- Maron, S.H., Lando, J., (1965).”*Fundamental of Physical Chemistry*”, Cetakan ketiga, Macmillan Publishing Co. Inc, London.
- Matsuoka, M., dan Anpo, M., (2003), “Local structures, excited states, and photocatalytic reactivities of highly dispersed catalyst constructed within zeolites”, *J. Photochem. and Photobiol. C: Photochem. Rev.*, 3, pp. 225-252.
- Murphy, S.E., Raulinaitis V., and Brown K.M., (2005) “Nicotine 5'-Oxidation And Methyl Oxidation By P450 2a Enzymes”, *J. of Pharmacology and Experimental therapeuticz*
- Othmer, K., (1994), “Encyclopedia of Chemical Technology”, vol. 25. 4th ed. Wiley Interscience.
- Palmisano, G., Yurdakal, S., Loddo, V., Augugliaro, V., Palmisano, L., (2008), ”Nanostructured Rutile TiO₂ for Selective Photocatalytic Oxidation of

- Aromatic Alcohols to Aldehydes in Water”, *J. AM. CHEM. SOC.*, 130: pp. 1568-1569
- Perry, R.H., Green, D.W., (1999), “*Perry’s Chemical Engineers Handbook*”, McGraw Hill, Inc.
- Puma, G.L., Yue, P L., (2001), “The modeling of a fountain photocatalytic reactor with a parabolic profile”, *Science Direct*: pp. 721-726
- R. Paul Beam et al. (2007). *Air Purifier with Control Sensors*. United States Patent.
- Ruthven, D.M., “Principles of Adsorption and Adsorption Process”, Wiley-Interscience Publication.
- Sampath, S., Uchida, H., dan Yoneyama, H., (1994) “Photocatalytic Degradation of Gaseous Pyridine over Zeolite-Supported Titanium Dioxide”, *J. of Catal.*, 149, pp. 189-194.
- Shapiro, J.A., Jacobs, E.J., Thun, M.J., (2000), “Cigar Smoking in Men and Risk of Death From Tobacco-Related Cancers”, *J. of the National Cancer Institute* 92(4): pp. 333-337
- Slamet, Bismo, S., Arbianti, R., (2007), ”Modifikasi Zeolit Alam dan Karbon Aktif dengan TiO₂ serta Aplikasinya sebagai Bahan Adsorben dan Fotokatalis untuk Degradasi Polutan Organik”, Laporan Hibah Bersaing
- Snyder, L.R. and I.I. Kirkland., (1980), “*Introduction to Modern Liquid Chromatography*”. 2nd edition: John Willey and Sons, New York.
- Susanna, D., Hartono, B., Fauzan, H., (2003) “Penentuan kadar nikotin dalam asap rokok”.
- Sutarti, M., (1994), “Zeolit Tinjauan Litelatur”, Pusat Dokumentasi dan Informasi Ilmiah LIPI Jakarta
- Tanaka, Toshio et.al., (2008), “Gas Treating Device”, *US Patent, Pub. No. US 7, 332,020 B2*
- Tjahjanto, R.T., dan Gunlazuardi, J., (2001), “Preparasi Lapisan Tipis TiO₂ sebagai Fotokatalisis: Keterkaitan antara Ketebalan dan Aktivitas Fotokatalisis”, *Jurnal Penelitian Universitas Indonesia*, 5:2, pp. 81-91.
- Toomey, (1984) “Electrochemical oxidation of pyridine bases”.

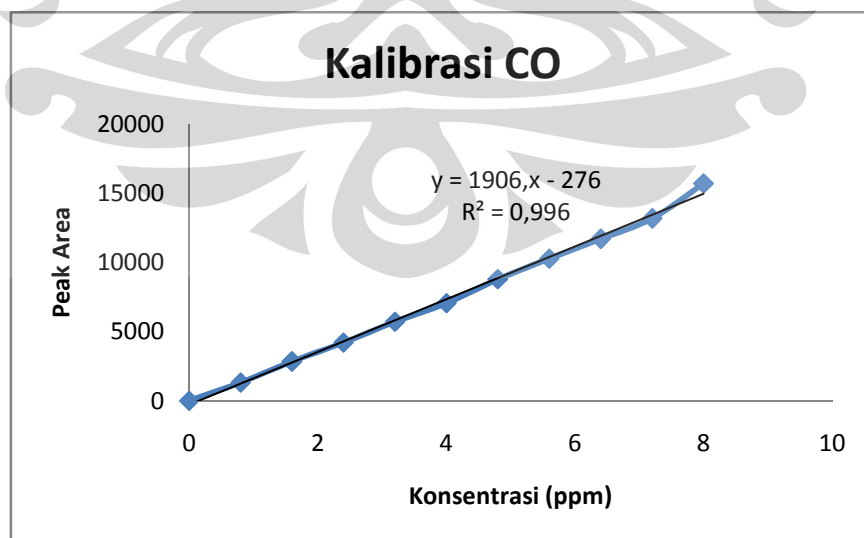
- Torimoto, T., Ito, S., Kuwabata, S., dan Yoneyama, H., (1996), "Effects of Adsorbent Used as Supports for Titanium Dioxide Loading on Photocatalytic Degradation of Propylamide", *Environ. Sci. Technol.*, 30, pp. 1275-1281.
- Wu, J.J., Yu, C.C., (2004), "Aligned TiO₂ Nanorods and Nanowalls", *The J. of Physic. Chem. B*, VOLUME 108
- Wu, W.C., Liao L.F., Chuang, C.C., Lin, J.L., (2000), "Adsorption and Photooxidation of Formamide on Powdered TiO₂", *J. of Catal.* 195: pp. 416-419
- Yasumori, A., Shinoda, H., Kameshima, Y., Hayashi S., Okada, K., (2001), "Photocatalytic and photoelectrochemical properties of TiO₂-based multiple layer thin film prepared by sol-gel and reactive-sputtering methods", *J. Mater. Chem.*, 11(4): pp. 1253 – 1257
- Yang, R.T., (1987). "Gas separation by adsorption processes", Butterworth Publisher, Stoneham.
- Yu, R., Wu, Lin, S., Talbot, P., (2006), "Cigarette Smoke Toxicants Alter Growth and Survival of Cultured Mammalian Cells", *TOXICOLOGICAL SCIENCES* 93(1): pp. 82–95
- Zander, A., Findlay P., Renner, T., and Sellergren B., (1998) "Analysis of Nicotine and Its Oxidation Products in Nicotine Chewing Gum by a Molecularly Imprinted Solid-Phase Extraction", *Anal. Chem.*, 70 (15): pp. 3304-3314, 1998. 10.1021/ac971272w S0003-2700(97)01272-9.



Lampiran 1 Kalibrasi CO

Volume peak (ml)	Peak Area
1	15720
0.9	13179
0.8	11700
0.7	10281
0.6	8793
0.5	7064
0.4	5716
0.3	4216
0.2	2843
0.1	1333
0	0

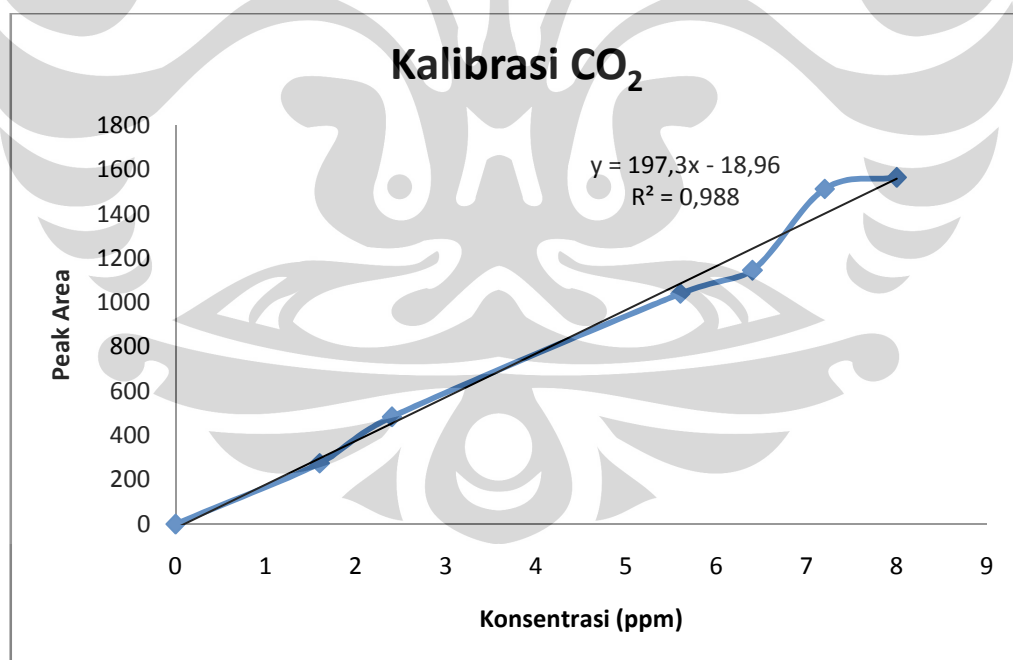
Konsentrasi (ppm)	Peak Area
8	15720
7.2	13179
6.4	11700
5.6	10281
4.8	8793
4	7064
3.2	5716
2.4	4216
1.6	2843
0.8	1333
0	0



Lampiran 2 Kalibrasi CO₂

Volume (ml)	Peak Area
1	1565
0.9	1514
0.8	1146
0.7	1041
0.3	484
0.2	275
0	0

Konsentrasi (ppm)	Peak Area
8	1565
7.2	1514
6.4	1146
5.6	1041
2.4	484
1.6	275
0	0



Lampiran 3 Data analisis CO murni dengan variasi konsentrasi ZAM

Waktu Uji (menit)	Peak Area			Konsentrasi (ppm)		
	TiO ₂ (100%)-ZAM (0%)	TiO ₂ (95%)-ZAM (5%)	TiO ₂ (85%)-ZAM(15%)	TiO ₂ (100%)-ZAM (0%)	TiO ₂ (95%)-ZAM (5%)	TiO ₂ (85%)-ZAM(15%)
0	140892	152378	140798	74.06506	80.09129	74.01574
10	144234	152839	144452	75.81847	80.33316	75.93284
20	142213	156338	142246	74.75813	82.16894	74.77545
30	141243	152830	140590	74.24921	80.32844	73.90661
40	143234	153802	143831	75.29381	80.83841	75.60703
50	141992	155527	141735	74.64218	81.74344	74.50735
60	139034	155932	139046	73.09024	81.95593	73.09654
61	135894	157197	139651	71.44281	82.61962	73.41396
65	131119	131792	109268	68.93757	69.29066	57.47324
70	87603	117006	87479	46.10651	61.53305	46.04145
75	94303	109028	57248	49.62172	57.34732	30.18048
80	85866	109422	58033	45.19517	57.55404	30.59234
85	57867	102806	50212	30.50525	54.0829	26.48898
90	35181	90762	42475	18.60283	47.7639	22.4297
100	27871	93514	35218	14.76758	49.20776	18.62225
110	20755	91551	18819	11.0341	48.17786	10.01836
120	14725	87934	13597	7.870409	46.28017	7.278594
150	6643	70635	12326	3.630115	37.20409	6.611752
180	0	57161	6250	0	30.13484	3.423924
210	6429	67455	0	3.517838	35.53568	0
240	0	49453	0	0	26.09077	0
270	0	42161	0	0	22.26495	0
300	0	41800	0	0	22.07555	0

Lampiran 4 Data analisis CO murni dengan variasi konsentrasi ZAL

Waktu Uji (menit)	Peak Area			Konsentrasi (ppm)		
	TiO ₂ (100%)-ZAL (0%)	TiO ₂ (95%)-ZAL (5%)	TiO ₂ (85%)-ZAL(15%)	TiO ₂ (100%)-ZAL (0%)	TiO ₂ (95%)-ZAL (5%)	TiO ₂ (85%)-ZAL(15%)
0	140892	145523	140798	74.06506	76.49475	74.01574
10	144234	145728	144452	75.81847	76.60231	75.93284
20	142213	145283	142246	74.75813	76.36884	74.77545
30	141243	144839	140590	74.24921	76.13589	73.90661
40	143234	144290	143831	75.29381	75.84785	75.60703
50	141992	144833	141735	74.64218	76.13274	74.50735
60	139034	145574	139046	73.09024	76.52151	73.09654
61	135894	144155	137673	71.44281	75.77702	72.37618
65	131119	132449	101156	68.93757	69.63536	53.21721
70	87603	122305	87843	46.10651	64.31322	46.23242
75	94303	117019	60793	49.62172	61.53987	32.0404
80	85866	115147	28426	45.19517	60.55771	15.05876
85	57867	102867	13325	30.50525	54.1149	7.135887
90	35181	88072	7944	18.60283	46.35257	4.312697
100	27871	73451	3209	14.76758	38.68153	1.828437
110	20755	64484	5102	11.0341	33.97692	2.821616
120	14725	58279	0	7.870409	30.72141	0
150	6643	43060	0	3.630115	22.73662	0
180	0	29384	0	0	15.56139	0
210	6429	21724	0	3.517838	11.5425	0
240	0	13034	0	0	6.983211	0
270	0	21069	0	0	11.19885	0
300	0	9531	0	0	5.145331	0

Lampiran 5 Data analisis CO murni dengan variasi jenis katalis

Waktu Uji (menit)	Peak Area				Konsentrasi (ppm)			
	TiO ₂	TiO ₂ (85%)-ZAM(15%)	TiO ₂ (85%)-ZAL(15%)	TiO ₂ (85%)-KA(15%)	TiO ₂	TiO ₂ (85%)-ZAM(15%)	TiO ₂ (85%)-ZAL(15%)	TiO ₂ (85%)-KA(15%)
0	140892	140798	140798	145372	74.06506	74.01574	74.01574	76.41553
10	144234	144452	144452	145677	75.81847	75.93284	75.93284	76.57555
20	142213	142246	142246	146728	74.75813	74.77545	74.77545	77.12697
30	141243	140590	140590	144563	74.24921	73.90661	73.90661	75.99108
40	143234	143831	143831	145673	75.29381	75.60703	75.60703	76.57345
50	141992	141735	141735	146778	74.64218	74.50735	74.50735	77.1532
60	139034	139046	139046	147583	73.09024	73.09654	73.09654	77.57555
61	135894	139651	137673	147233	71.44281	73.41396	72.37618	77.39192
65	131119	109268	101156	102151	68.93757	57.47324	53.21721	53.73924
70	87603	87479	87843	73056	46.10651	46.04145	46.23242	38.47429
75	94303	57248	60793	57949	49.62172	30.18048	32.0404	30.54827
80	85866	58033	28426	58655	45.19517	30.59234	15.05876	30.91868
85	57867	50212	13325	41908	30.50525	26.48898	7.135887	22.13221
90	35181	42475	7944	34117	18.60283	22.4297	4.312697	18.0446
100	27871	35218	3209	28513	14.76758	18.62225	1.828437	15.10441
110	20755	18819	5102	18868	11.0341	10.01836	2.821616	10.04407
120	14725	13597	0	18194	7.870409	7.278594	0	9.690451
150	6643	12326	0	19642	3.630115	6.611752	0	10.45016
180	0	6250	0	13404	0	3.423924	0	7.177335
210	6429	0	0	10476	3.517838	0	0	5.641133
240	0	0	0	7425	0	0	0	4.040399
270	0	0	0	0	0	0	0	0
300	0	0	0	0	0	0	0	0

Lampiran 6 Data analisis produksi CO₂

Waktu Uji (menit)	Peak Area				Konsentrasi (ppm)			
	TiO ₂ (85%)-ZAM (15%)	TiO ₂ (85%)-ZAL(15%)	TiO ₂	TiO ₂ (85%)-KA (15%)	TiO ₂ (85%)-ZAM (15%)	TiO ₂ (85%)-ZAL(15%)	TiO ₂	TiO ₂ (85%)-KA (15%)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0
61	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0
75	0	0	0	0	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0	0
85	0	0	0	0	0	0	0	0
90	0	1404	0	0	0	7.212164	0	0
100	3462	985	0	0	17.64298	5.088495	0	0
110	2584	1222	0	2541	13.192904	6.289711	0	12.97496
120	2168	3725	0	2323	11.08444	18.97598	0	11.87005
150	2868	6894	1333	2686	14.632337	35.03781	6.852306	13.70988
180	1433	7161	8009	2099	7.3591485	36.39108	40.6891	10.73472
210	12357	5127	14691	1844	62.726609	26.08191	74.55631	9.442271
240	15280	6211	16003	1454	77.541612	31.57608	81.20608	7.465585
270	13857	9627	14486	13222	70.329245	48.88981	73.51728	67.1108
300	15261	15871	15304	14987	77.445312	80.53705	77.66325	76.05656

Lampiran 7 Data degradasi CO pada asap rokok dengan katalis TiO₂(85%)-ZAL

Waktu Uji (menit)	Peak Area		Konsentrasi (ppm)	
	CO	CO ₂	CO	CO ₂
0	22322	0	11.85624	0
10	22933	0	12.17681	0
20	22733	0	12.07188	0
30	22844	0	12.13012	0
40	22338	0	11.86464	0
50	22378	0	11.88562	0
60	22237	0	11.81165	0
61	22237	0	11.81165	0
65	18465	0	9.832634	0
70	9106	0	4.92235	0
75	8722	0	4.720881	0
80	7075	0	3.856768	0
85	7494	0	4.0766	0
90	6494	0	3.551941	0
100	4309	794	2.405561	4.120426
110	4334	791	2.418678	4.10522
120	2871	1207	1.651102	6.213685
150	2832	513	1.63064	2.696199
180	0	484	0	2.549214
210	0	1041	0	5.372326
240	0	1146	0	5.904511
270	0	1514	0	7.769691
300	0	1565	0	8.02818

Lampiran 8 Data analisis degradasi piridin

TiO ₂ (85%)-ZAL(15%)	Waktu (menit)	Area	C/Co
	0	15819078	1
	30	5272789	0.333318
	60	4806728	0.303856
	90	4242693	0.268201

TiO ₂	Waktu (menit)	Area	C/Co
	0	15819078	1
	30	5214437	0.32963
	60	4401707	0.278253
	90	4234495	0.267683

TiO ₂ (85%)-ZAM(15%)	Waktu (menit)	Area	C/Co
	0	15819078	1
	30	14671129	0.927433
	60	12688513	0.802102
	90	9671368	0.611374

TiO ₂ (85%)-KA (15%)	Waktu (menit)	Area	C/Co
	0	15819078	1
	30	5631608	0,356001
	60	6970545	0,440642
	90	3787769	0,239443

Lampiran 9 Data analisis degradasi nikotin

TiO ₂ (85%)-ZAM(15%)	Waktu (menit)	Area	C/Co
	0	33217873	1
	30	14170219	0.426584
	60	17639608	0.531028
	90	20107347	0.605317

TiO ₂ (85%)-ZAL(15%)	Waktu (menit)	Area	C/Co
	0	33217873	1
	30	24640966	0.741798
	60	8981492	0.270381
	90	6339654	0.190851

TiO ₂	Waktu (menit)	Area	C/Co
	0	33217873	1
	30	4234938	0,12749
	60	2458453	0,07401
	90	2179213	0,065604

TiO ₂ (85%)-KA(15%)	Waktu (menit)	Area	C/Co
	0	33217873	1
	30	3037921	0,091454
	60	2680895	0,080706
	90	3797651	0,114326