



UNIVERSITAS INDONESIA

**REKAYASA ALAT UNTUK PURIFIKASI UDARA DARI
POLUTAN ASAP ROKOK MENGGUNAKAN KATALIS
KOMPOSIT TiO₂-KARBON AKTIF**

SKRIPSI

**MUHAMMAD IBADURROHMAN
04 05 06 04 07**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
DESEMBER 2008**



UNIVERSITAS INDONESIA

**REKAYASA ALAT UNTUK PURIFIKASI UDARA DARI
POLUTAN ASAP ROKOK MENGGUNAKAN KATALIS
KOMPOSIT TiO_2 -KARBON AKTIF**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**MUHAMMAD IBADURROHMAN
04 05 06 04 07**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
DESEMBER 2008**

Universitas Indonesia

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Muhammad Ibadurrohman
NPM : 04 05 06 04 07
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Rekayasa Alat untuk Purifikasi Udara dari Polutan
Asap Rokok Menggunakan Katalis Komposit TiO₂-
Karbon Aktif

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Slamet, M.T. ()
Penguji : ()
Penguji : ()
Penguji : ()

Ditetapkan di :

Tanggal :

HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS

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

Nama : Muhammad Ibaurohman

NPM : 04 05 06 04 07

Tanda Tangan :

Tanggal : 16 Desember 2008

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala, karena berkat rahmat dan petunjuk-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ungkapan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir Slamet, M.T selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini;
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI;
3. Bapak Ir. Yuliusman, M.Eng selaku kordinator skripsi Teknik Kimia FTUI;
4. Bapak Sutrasno Kartohardjono, Phd selaku pembimbing akademis;
5. Renda, Sylvi, Sirhan, Dickson, Ryan, Tari, Arif, Afrizul dan Dinan sebagai rekan grup penelitian yang telah banyak membantu dalam berbagi informasi, diskusi dan pencarian sumber-sumber referensi;
6. Alfian Ferdiansyah (Teknik Metalurgi '05), Lifinia Anggun (Teknik Kimia '05) dan M Haikal Nur (Teknik Kimia '05) yang telah memberikan banyak bantuan teknis dalam penyusunan laporan skripsi;
7. Orang tua dan keluarga di rumah yang selalu memberikan dukungan moral dan material sehingga skripsi ini dapat selesai;

Akhirnya penulis berharap agar skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 16 Desember 2008

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Muhammad Ibadurrohman
NPM : 04 05 06 04 07
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

Rekayasa Alat untuk Purifikasi Udara dari Polutan Asap Rokok Menggunakan Katalis Komposit TiO₂-Karbon Aktif

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 16 Desember 2008
Yang menyatakan

ABSTRAK

Nama : M Ibadurrohman
 Program Studi : Teknik Kimia
 Judul : Rekayasa Alat untuk Purifikasi Udara dari Polutan Asap Rokok Menggunakan Katalis Komposit TiO₂-Karbon Aktif

Rekayasa dan uji kinerja alat purifikasi udara dari asap rokok yang menggabungkan fotokatalis (TiO₂) dan adsorben (karbon aktif) telah dilakukan. Polutan yang digunakan sebagai model adalah CO murni, CO yang berasal dari asap rokok, campuran metanol-formaldehida, dan asetaldehida. Hasil uji kinerja alat menunjukkan bahwa CO dapat terkonversi sebesar 75-90% menjadi CO₂ dalam 10 menit. Hasil uji kinerja alat juga menunjukkan bahwa penambahan karbon aktif pada TiO₂ tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap hasil uji degradasi CO. Untuk degradasi formaldehida dan asetaldehida, sebagai model polutan organik, uji kinerja alat menunjukkan bahwa proses degradasi lebih didominasi oleh adsorpsi dan proses fotokatalisisnya menghasilkan senyawa *intermediate*.

Kata kunci:

Asap rokok, fotokatalis, TiO₂, adsorben, karbon aktif

ABSTRACT

Name : M Ibadurrohman
 Study Program : Chemical Engineering
 Title : Device Prototyping for Air Purification from Cigar Smoke Pollutant Using Composite Catalyst TiO₂ and Activated Carbon

Device Prototyping and Performance Test for Air Purification from Cigar Smoke Pollutant Using Composite Catalyst TiO₂ and Activated Carbon was done. Pure CO and that contains in cigar smoke, formaldehyde and acetaldehyde were used as pollutants in degradation purpose. The test result showed that CO can be converted to CO₂ with 75-90% conversion in 10 minutes. The test result also showed that addition of activated carbon in TiO₂ did not affect the CO degradation result significantly. In the other hand, result of degradation test of formaldehyde and acetaldehyde, as organic pollutant model, showed that the process was dominated by adsorption and the photocatalytic process resulted intermediate substances.

Key words:

Cigar smoke, photocatalyst, TiO₂, adsorbent, activated carbon

DAFTAR ISI

| | |
|---|----------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| LEMBAR PENGESAHAN..... | ii |
| LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS | iii |
| KATA PENGANTAR | iv |
| LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH | v |
| ABSTRAK | vi |
| DAFTAR ISI | vii |
| DAFTAR GAMBAR | ix |
| DAFTAR TABEL | xi |
| 1. PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1. Latar belakang | 1 |
| 1.2. Perumusan masalah | 3 |
| 1.3. Tujuan penelitian..... | 3 |
| 1.4. Batasan masalah | 3 |
| 1.5. Sistematika penulisan | 3 |
| 2. TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1. Asap Rokok..... | 5 |
| 2.1.1 Karbon Monoksida | 6 |
| 2.1.2 Pyridine | 8 |
| 2.1.3 Nikotin | 9 |
| 2.1.5 Asetaldehida | 11 |
| 2.2. Proses Fotokatalisis | 11 |
| 2.3. Fotokatalis TiO ₂ | 13 |
| 2.4 Adsorpsi..... | 17 |
| 2.4.1 Adsorpsi Fisika (Adsorpsi Van der Waals) | 18 |
| 2.4.2 Adsorpsi kimia | 18 |
| 2.5 Adsorben..... | 19 |
| 2.5.1 Karbon Aktif | 19 |
| 2.5.2 Zeolit..... | 21 |
| 2.6 Adsorben Sebagai Penyangga Fotokatalis..... | 22 |
| 2.7 Penelusuran Paten yang Terkait | 25 |
| 2.7.1 Photocatalytic Air Treatment Sistem and Method, Pub. No. US 0251812 A1 (Hayman, 2007)..... | 25 |
| 2.7.2 Photocatalyst, Methods for Deodorizing, and Methods for Making a Deodorizer Sistem, Pub. No. US 0050272 A1 (Carrey, 2008)..... | 26 |

| | |
|--|-----------|
| 2.7.3 Gas Treating Device, Pub. No. US 7, 332,020 B2 (Tanaka et.al., 2008) | 27 |
| 3. METODE PENELITIAN | 29 |
| 3.1 Diagram Alir Percobaan | 29 |
| 3.1.1 Diagram Alir Preparasi Katalis | 30 |
| 3.1.2 Diagram Alir Pembuatan Prototipe Alat..... | 31 |
| 3.1.3 Diagram Alir Uji Kinerja Alat | 32 |
| 3.2 Peralatan Penelitian | 32 |
| 3.2.1 Peralatan Preparasi Katalis AFT | 32 |
| 3.2.2 Peralatan Pembuatan Prototipe Alat | 33 |
| 3.2.3 Peralatan Uji Kinerja Alat..... | 33 |
| 3.3 Bahan Penelitian | 33 |
| 3.3.1 Bahan Preparasi Katalis | 34 |
| 3.3.2 Bahan Uji Kinerja Alat | 34 |
| 3.4 Prototipe Alat | 34 |
| 3.5 Prosedur Penelitian..... | 35 |
| 3.5.1 Prosedur Preparasi Katalis | 35 |
| 3.5.2 Prosedur Pembuatan Prototipe Alat..... | 36 |
| 3.5.3 Prosedur Uji Kinerja Alat | 36 |
| 3.5.4 Analisis Polutan Terdegradasi..... | 37 |
| 3.6 Parameter yang Divariasikan | 37 |
| 3.7 Data Penelitian dan Cara Pengambilan Data | 37 |
| 3.8 Pengolahan Data Penelitian | 37 |
| 4. HASIL DAN PEMBAHASAN..... | 39 |
| 4.1 Konfigurasi alat..... | 39 |
| 4.1.1 Intensitas cahaya sebagai inisiator reaksi | 39 |
| 4.1.2 Luas kontak polutan dan katalis | 40 |
| 4.1.3 Keceragaman Aliran Polutan (Turbulensi) dan Pressure Drop | 40 |
| 4.1.4 Kemudahan Penggunaan Alat | 41 |
| 4.2 Uji Kinerja Degradasi Polutan | 42 |
| 4.2.1 Uji Degradasi CO murni | 42 |
| 4.2.2 Uji Degradasi CO dalam Asap Rokok..... | 46 |
| 4.2.3 Uji Degradasi Larutan Metanol-Formaldehida | 51 |
| 4.2.4 Uji Degradasi Asetaldehida | 54 |

| | |
|------------------------------------|-----------|
| 5.KESIMPULAN DAN SARAN..... | 59 |
| 5.1 Kesimpulan | 59 |
| 5.2 Saran..... | 59 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 60 |



DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2.1 Kandungan Asap rokok | 5 |
| Gambar 2.2 Struktur kimia karbon monoksida (Wikipedia, 2008) | 6 |
| Gambar 2.3 Struktur kimia pyridine (Wikipedia, 2008) | 8 |
| Gambar 2.4 Struktur kimia nikotin (Wikipedia, 2008)..... | 10 |
| Gambar 2.5 Struktur kimia asetaldehida (Wikipedia, 2008)..... | 11 |
| Gambar 2.6 Fenomena foto-eksitasi elektron pada suatu semikonduktor (Linsebigler, 1995)..... | 12 |
| Gambar 2.7 Perspektif struktur kristal Anatase (Licciuli, 2002) | 14 |
| Gambar 2.8 Perspektif struktur kristal Rutile (Licciuli, 2002) | 14 |
| Gambar 2.9 Gambar daerah energi pada semikonduktor (Amemiya, 2004) | 15 |
| Gambar 2.10 Energi celah, posisi pita valensi (bawah), konduksi (atas), dan potensial redoks dari berbagai semikonduktor (Linsebigler, 1995)..... | 16 |
| Gambar 2.11 Struktur karbon aktif (Figuredo, 1986)..... | 19 |
| Gambar 2.12 Mekanisme reaksi fotokatalisis dengan adsorben sebagai penyangga (Torimoto, 2007)..... | 22 |
| Gambar 2.13 Mekanisme reaksi fotokatalisis di dalam pori zeolit (Torimoto, 2007)..... | 23 |
| Gambar 2.14 Skema Alat <i>Air Treatment</i> (Hayman, 2007) | 26 |
| Gambar 2.15 Skema Alat <i>Deodorizer System</i> Carey, 2008) | 27 |
| Gambar 2.16 Skema Alat Gas Treatment (Tanaka et al., 2007)..... | 28 |
| Gambar 3.1 Diagram alir penelitian | 29 |
| Gambar 3.2 Diagram alir preparasi atalis AFT | 30 |
| Gambar 3.3 Diagram alir pembuatan prototipe alat | 31 |
| Gambar 3.4 Diagram alir uji kinerja alat | 32 |
| Gambar 3.5 Prototipe alat putrifikasi dan deodorisasi udara | 35 |
| Gambar 4.1 Visualisasi Alat deodori sasi dan purifikasi udara dari polutan asap rokok | 41 |
| Gambar 4.2 Degradasi CO dan produksi CO ₂ oleh fotokatalis TiO ₂ tanpa karbon aktif | 43 |
| Gambar 4.3 Degradasi CO oleh fotokatalis TiO ₂ dengan karbon aktif | 44 |
| Gambar 4.4 Perbandingan kinerja degradasi fotokatalitik antara TiO ₂ dan TiO ₂ - karbon aktif | 46 |
| Gambar 4.5 Degradasi asap rokok dan produksi CO ₂ oleh fotokatalis TiO ₂ tanpa karbon aktif | 47 |
| Gambar 4.6 Degradasi asap rokok dan produksi CO ₂ oleh fotokatalis TiO ₂ dengan karbon aktif | 48 |
| Gambar 4.7 Perbandingan kinerja degradasi fotokatalitik antara TiO ₂ dan TiO ₂ - karbon aktif | 51 |
| Gambar 4.8 Ilustrasi skematis proses adsorpsi dan fotokatalitik pada katalis TiO ₂ - karbon aktif (Liu Jian-Hua, 2006) | 52 |
| Gambar 4.9 Kurva oksidasi larutan methanol-formaldehida | 52 |
| Gambar 4.10 Kurva degaradasi asetaldehida menggunakan TiO ₂ | 54 |
| Gambar 4.11 Kurva adsorpsi asetaldehida oleh karbon aktif di dalam alat..... | 55 |
| Gambar 4.12 Degradasi asetaldehida dengan katalis TiO ₂ -karbon aktif | 56 |

Gambar 4.13 Kurva pembentukan intermediet pada degradasi asetaldehida57



DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2.1 <i>Properties</i> karbon monoksida..... | 6 |
| Tabel 2.2 Bahaya yang ditimbulkan oleh karbon monoksida..... | 7 |
| Tabel 2.3 <i>Properties</i> Pyridine pada 1 atm dan 25°C..... | 8 |
| Tabel 2.4 <i>Properties</i> nikotin..... | 10 |
| Tabel 2.5 Perbandingan antara adsorpsi fisika dan adsorpsi Kimia..... | 18 |
| Tabel 2.6 Ukuran pori karbon aktif..... | 20 |
| Tabel 2.7 Ukuran rongga dan rasio Si/Al berbagai jenis zeolit..... | 22 |



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar belakang

Dengan semakin dekatnya era globalisasi, maka perhatian terhadap masalah lingkungan harus lebih intensif. Berbagai jenis polutan, baik pada air, tanah maupun udara, sangat potensial merusak lingkungan dan merugikan kesehatan manusia. Asap rokok merupakan salah satu polutan udara yang sangat berbahaya baik bagi perokok aktif maupun perokok pasif (Susana, 2003; Bazemore, 2006; Shapiro, 2000).

Gangguan kesehatan yang ditimbulkan asap rokok bagi yang menghirupnya dapat berupa bronkitis kronis, emfisema, kanker paru, larink, mulut, faring, esofagus, kandung kemih, penyempitan pembuluh nadi dan lain-lain. Selain berbahaya bagi kesehatan, rokok juga menimbulkan bau yang tidak sedap baik bagi udara di sekitarnya maupun nafas si perokok itu sendiri (Bazemore, 1996).

Senyawa kimia yang paling berbahaya yang terdapat di dalam asap rokok adalah karbon monoksida (EPA, 2000). Mengingat dampaknya yang sangat berbahaya bagi kesehatan, berbagai usaha telah dilakukan untuk mendegradasi karbon monoksida. Salah satunya adalah dengan menggunakan reaksi katalitik menggunakan katalis logam seperti kobalt. Namun metode ini dinilai kurang efektif karena rendahnya aktivitas katalis dan konversi reaksi.

Secara umum, degradasi polutan biasanya dilakukan dengan adsorpsi. Kendalanya, adsorben hanya memindahkan polutan tetapi tidak menghancurkannya. Sehingga sampai suatu waktu tertentu, adsorben akan mengalami kejenuhan dan tidak dapat mengadsorpsi 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, 2003; Slamet, 2007).

Proses katalisis terjadi pada fasa teradsorpsi (Richardson, 1989). Demikian pula halnya dengan proses fotokatalisis. 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 ditopang dengan suatu adsorben sebagai penyangga (Canela, 1999; El-Maazawi, 2000). Dengan menggabungkan fotokatalis dan adsorben diharapkan kontak fotokatalis dengan polutan menjadi lebih efektif. 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 pyridine (Sampath, 1994), 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, penelitian untuk degradasi dengan kombinasi proses ini masih belum banyak dikembangkan. Dengan adanya penelitian ini diharapkan akan ditemukan sebuah unit purifikasi dan deodorisasi udara ruangan dari asap rokok dengan kombinasi proses tersebut sehingga masalah pencemaran udara di dalam ruangan yang disebabkan oleh asap rokok dapat ditekan secara signifikan.

Penelitian ini dimaksudkan untuk merencanakan sebuah alat yang bekerja berdasarkan kombinasi proses adsorpsi dan fotokatalisis yang dapat berfungsi sebagai unit purifikasi dan deodorisasi udara polutan asap rokok. Untuk tujuan itu, fotokatalis TiO_2 dimodifikasi dengan bahan adsorben dan diintegrasikan dengan suatu sistem sirkulasi udara yang dilengkapi dengan lampu UV sedemikian rupa sehingga udara dengan kadungan asap rokok yang masuk akan dipurifikasi dan dideodorisasi oleh alat tersebut dan menghasilkan udara keluar yang bersih dan bebas bau asap rokok.

1.2. Perumusan masalah

Yang menjadi masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana memodifikasi alat dengan konfigurasi yang efektif serta bagaimana memodifikasi fotokatalis dengan bahan adsorben untuk mendapatkan katalis dengan aktivitas yang tinggi.

1.3. Tujuan penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan prototipe alat purifikasi deodorisasi udara dari polutan asap rokok yang berbasis material adsorben-TiO₂ dengan adsorben karbon aktif.
2. Mengetahui kinerja alat yang telah dibuat dengan uji degradasi polutan.
3. Melihat pengaruh penambahan karbon aktif ke dalam fotokatalis TiO₂ terhadap proses degradasi polutan.

1.4. Batasan masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini menggunakan katalis yang merupakan modifikasi fotokatalis dengan adsorben sebagai penyangga fotokatalis.
2. Senyawa yang digunakan sebagai model untuk uji kinerja alat adalah CO, formaldehida, asetaldehida dan asap rokok.
3. Basis konsentrasi asap rokok adalah konsentrasi CO yang terdapat di dalam asap rokok.
4. TiO₂ yang digunakan adalah TiO₂ komersial Degussa-P25.
5. Karbon aktif yang digunakan adalah karbon aktif komersial dari tempurung kelapa.

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 asap rokok dan karbon monoksida, proses fotokatalisis secara umum, fotokatalis TiO_2 , adsorpsi, adsorben karbon aktif, serta adsorben sebagai penyangga fotokatalis.

BAB III : METODE PENELITIAN

Menjelaskan tentang diagram alir penelitian, peralatan penelitian, bahan penelitian, visualisasi prototipe alat, prosedur penelitian, parameter yang divariasikan, data penelitian dan cara pengambilan data.

BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN

Menjelaskan tentang hasil yang didapat selama penelitian, terdiri dari : Konfigurasi prototipe alat, uji kinetika degradasi CO, formaldehida, asetaldehida dan asap rokok

BAB V : KESIMPULAN DAN SARAN

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

BAB 2

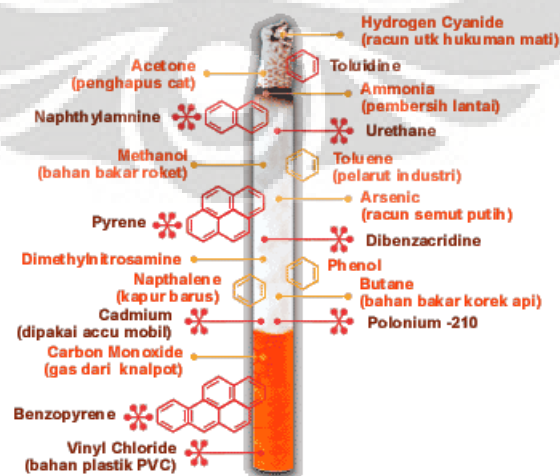
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. 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 sebagai berikut (Susana, 2003):

1. Bronkitis kronis
2. Emfisema
3. Kanker
4. Penyempitan pembuluh darah
5. Pneumonia
6. Asma

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 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). Senyawa kimia yang terdapat di dalam satu batang rokok mencapai 4000 jenis senyawa (Yu, 2006). Sebagiannya dapat dilihat pada gambar 2.1.

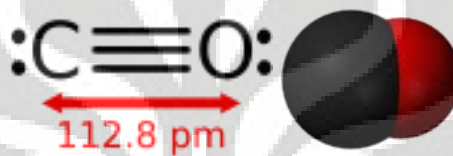


Gambar 2.1 Kandungan Asap Rokok

2.1.1 Karbon Monoksida

Salah satu polutan yang paling berbahaya sekaligus yang mendominasi kandungan asap rokok adalah karbon monoksida sebagai hasil pembakaran tidak sempurna persenyawaan organik yang terdapat di dalam asap rokok.

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, 2008)



Gambar 2.2 Struktur kimia karbon monoksida (Wikipedia, 2008)

Tabel 2.1 Properties karbon monoksida

| SIFAT | KETERANGAN |
|---------------------|---|
| Rumus molekul | CO |
| Wujud | Gas tak berwarna dan tak 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

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, 2008)

Tabel 2.2 Bahaya yang ditimbulkan oleh karbon monoksida

| Jenis Kontak | Bahaya |
|--------------|--|
| Dimakan | Dapat menyebabkan rasa mual dan muntah-muntah |
| Dihirup | Tingkat sekitar 100-800 ppm menyebabkan sakit kepala yang keparahannya bervariasi. Tingkat yang lebih tinggi dapat menyebabkan pusing kepala, rasa mual, ketidak sadaran, kerusakan otak dan kematian. |
| Kulit | Penghirupan dapat menyebabkan sakit kulit. Hindari kontak dengan cairan kriogenik |
| Mata | Penghirupan dapat menyebabkan masalah jangka-panjang dengan penglihatan. |

Sumber : Wikipedia

Karbon monoksida dapat terbentuk dari berbagai sumber dengan konsentrasi yang bervariasi. Di bawah ini adalah berbagai sumber karbon monoksida beserta konsentrasinya (Wikipedia, 2008) :

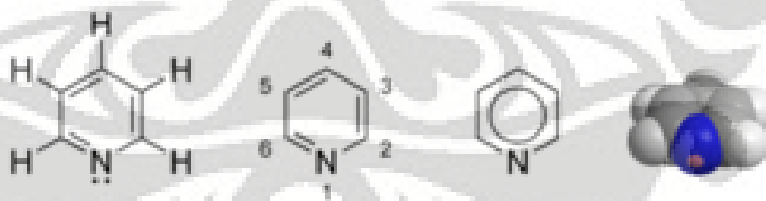
- 0.1 ppm – Tingkat alami pada udara atmosfer
- 0.5 to 5 ppm – Rata-rata pada rumah tangga
- 5 to 15 ppm – Konsentrasi pada gas perapian
- 100-200 ppm – Daerah padat kendaraan
- 5,000 ppm – Cerobong asap pada pembakaran kayu rumah tangga
- 7,000 ppm – Gas buang kendaraan tanpa konverter katalitik
- 30,000 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 permanent 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 ter-deionisasi. Untuk keperluan skala lab, pengukuran kandungan CO biasa menggunakan *Gas Chromatography*.

2.1.2 Pyridine

Dari sekian banyak senyawa yang terkandung di dalam asap rokok, senyawa yang paling bertanggung jawab dalam menimbulkan bau tak sedap adalah persenyawaan pyrrole, pyrazine dan pyridine. 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 penyebab bau adalah pyridine (Bazemore, 2006). Senyawa-senyawa yang merupakan polutan penyebab bau pada asap rokok yang juga sekaligus turunan pyridine antara lain 2-etilpyridine; 3-metilpyridine; 2,3,5-trimetilpyridine; 2,5-dimetilpyrazine; 2-etil-3,5-dimetilpyridine dan nikotin (Yu, 2006; Bazemore, 2006).

Pyridine adalah senyawa kimia dengan rumus kimia C_5H_5N dan struktur kimia seperti pada gambar 2.1. Pyridine memiliki aroma yang tak sedap dan menyengat. Pyridine merupakan salah satu senyawa organik aromatik heterosiklik. Struktur pyridine memiliki hubungan yang dekat dengan benzena dimana satu grup CH pada cincin benzene digantikan oleh sebuah atom nitrogen. Pyridine juga digunakan sebagai ligan pada kimia koordinasi. Sebagai ligan, pyridine memiliki unsur “py” dalam penamaannya (Wikipedia, 2008).



Gambar 2.3 Struktur kimia pyridine (Wikipedia, 2008)

Tabel 2.3 Properties Pyridine pada 1 atm dan 25°C

| SIFAT | KETERANGAN |
|---------------|---------------------|
| Rumus molekul | C_5H_5N |
| Wujud | Cairan tak berwarna |
| Berat molekul | 79.101 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 |

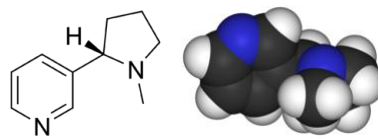
Sumber : Wikipedia

Pada reaksi organik, pyridine bersifat seperti amina tersier yaitu mengalami protonasi, alkilasi, asilasi dan n-oksidasi. Selain itu, pyridine juga bersifat seperti senyawa aromatik yaitu mengalami substitusi nukleofilik. Pyridine adalah nukleofil yang baik. Senyawa ini mudah diserang oleh *alkylating agents* menghasilkan garam *N*-alkylpyridinium (Wikipedia, 2008).

Pyridine bersifat volatil dan bisa diserap oleh kulit. Data eksperimen menunjukkan pyridine bersifat karsinogenik. Dosis kecil 2-etilpyridine dan 3-etilpyridine serta dosis besar pyridine dapat menghambat pertumbuhan sel pembuluh darah pusat (Yu, 2006). Dampak lain dari pyridine antara lain pusing, sakit kepala, sakit perut, penyumbatan paru-paru, mual dan anorexia (Wikipedia, 2008). Analisis biasanya dilakukan dengan mengkonsentrasikan pyridine 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)

2.1.3 Nikotin

Nikotin merupakan senyawa alkaloid dan turunan pyridine yang membentuk 0,3-6% kandungan tembakau basis kering (Islandcounty, 2000). Nikotin bersifat higroskopis dan berwujud cairan berminyak yang *miscible* dengan air. 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, 2008).



Gambar 2.4 Struktur kimia nikotin (Wikipedia, 2008)

Tabel 2.4 Properties nikotin (Wikipedia, 2008)

| SIFAT | KETERANGAN |
|---------------|----------------------|
| Rumus molekul | $C_{10}H_{14}N_2$ |
| Wujud | Cairan berminyak |
| Berat molekul | 162.26 g/mol |
| Titik beku | $-79^{\circ}C$ |
| Titik didih | $247^{\circ}C$ |
| Densitas | 1.01 g/cm^3 |

Sumber : Wikipedia

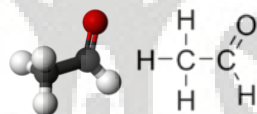
Pada konsentrasi yang rendah, nikotin dapat bekerja sebagai stimulan bagi terbentuknya berbagai senyawa kimia didalam tubuh seperti *acetylcholine*, *norepinephrine*, *epinephrine*, *vasopressin*, *arginine*, *dopamine*, dan *beta-endorphin*. Senyawa-senyawa tersebut dapat mengakibatkan dampak psikoaktif 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, 2008)

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, 2008; 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).

2.1.5 Asetaldehida

Asetaldehida merupakan senyawa dari golongan aldehyd dengan rumus molekul C_2H_4O dan massa molar 44,05 g/mol. Asetaldehida merupakan cairan tak berwarna dan berbau tajam dengan densitas $0,788 \text{ g cm}^{-3}$, titik leleh $-123,5^\circ\text{C}$ dan titik didih $20,2^\circ\text{C}$. Asetaldehida dikenal sebagai polutan yang berasal dari asap rokok dan asap kendaraan. Rumus molekulnya dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.5 Struktur kimia asetaldehida (Wikipwdia, 2008)

2.2. Proses Fotokatalisis

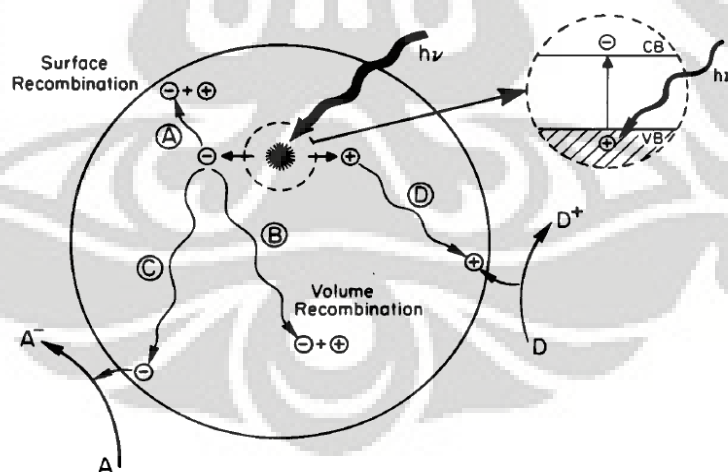
Sejak ditemukannya efek *photosensitization* dari elektroda TiO_2 dalam proses elektrolisis air menjadi H_2 dan O_2 oleh Honda dan Fujishima pada tahun 1972, fotokatalisis dengan semikonduktor TiO_2 telah banyak mencuri perhatian para peneliti dan dipelajari secara luas dalam rangka mendapatkan efisiensi optimum untuk mengkonversi energi surya menjadi energi kimia yang berguna (Anpo, 2002). 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 2.6. 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 hole dan elektron yang tereksitasi adalah sebagai berikut (Gunlazuardi, 2001; Yasumori, 2001; Catherine, 2001; Kopf, 2000; Jacoby, 1996):

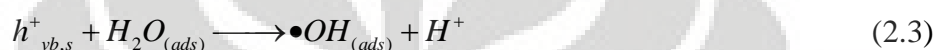
1. Rekombinasi antara *hole* dan elektron ter-fotoeksitasi, baik di permukaan (jalur A) atau didalam *bulk* partikel (jalur B).
2. Pasangan e^- dan h^+ dapat bertahan sampai pada permukaan semikonduktor (jalur C dan D), dimana h^+ dapat menginisiasi reaksi oksidasi dan di lain pihak e^- akan menginisiasi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



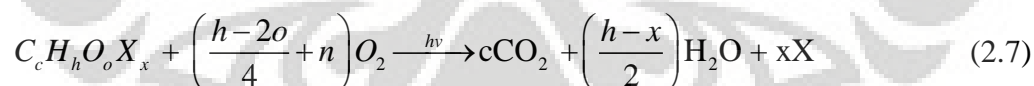
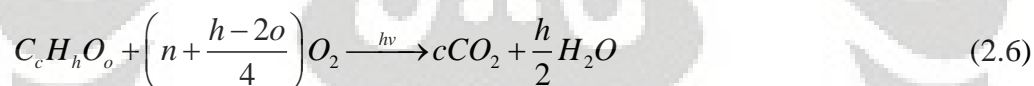
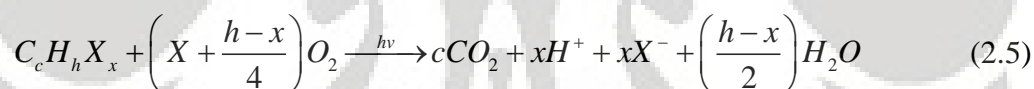
Gambar 2.6 Fenomena foto-eksitasi elektron pada suatu semikonduktor (Linsebigler, 1995)

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). Mekanisme reaksi proses fotokatalisis 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 :



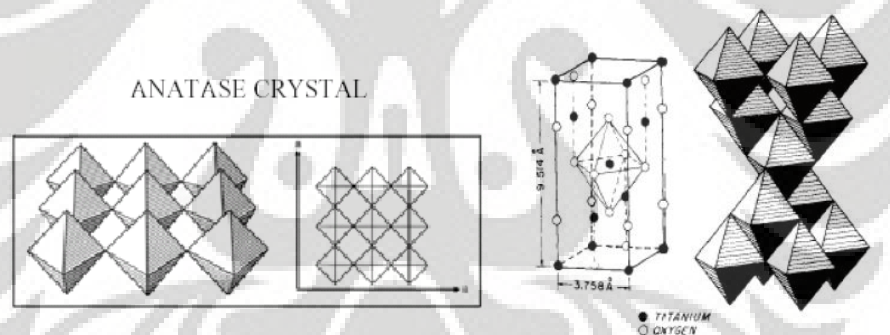
2.3. Fotokatalis TiO₂

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):

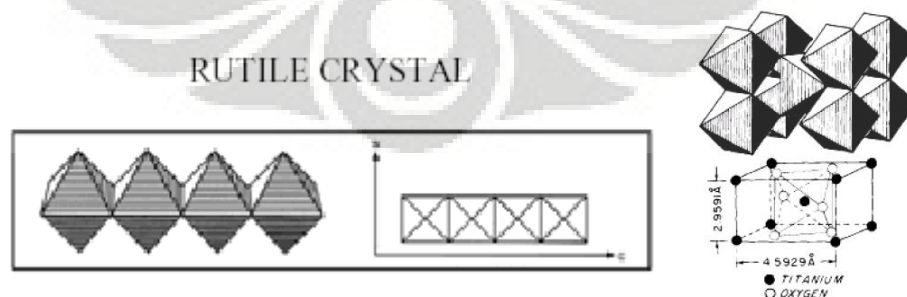
1. Indeks refraktif tinggi (sifat optis)
2. Transmittansi baik pada daerah infra merah dan cahaya tampak (sifat optis)
3. Konstanta dielektrik tinggi (sifat elektrik)

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 $700\text{ }^\circ\text{C}$), 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 2.7 dan 2.8 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 2.7 Perspektif struktur kristal Anatase (Licciuli, 2002)

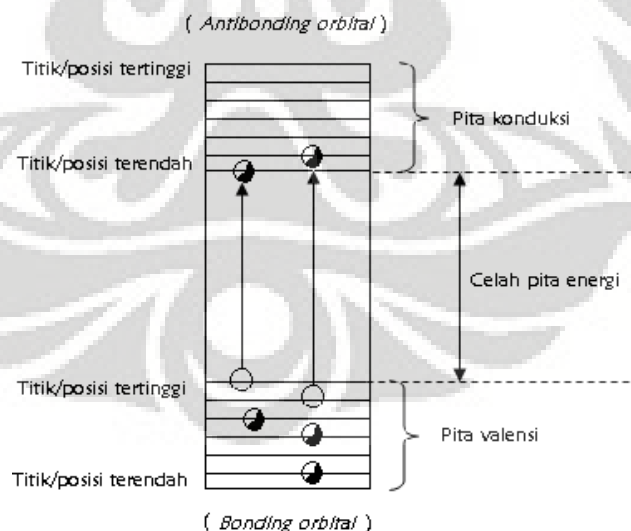


Gambar 2.8 Perspektif struktur kristal Rutile (Licciuli, 2002)

Anatase secara termodinamika kurang stabil daripada rutil 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 rutil 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 rutil, sedangkan *valence band* (VB : tingkat energi hasil hibridisasi dari kulit 2p oksigen) anatase dan rutil 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 *hole* dan elektron untuk berekombinasi semakin besar. Sehingga kedua aspek ini perlu dipertimbangkan dalam pemilihan fasa semikonduktor TiO_2 .

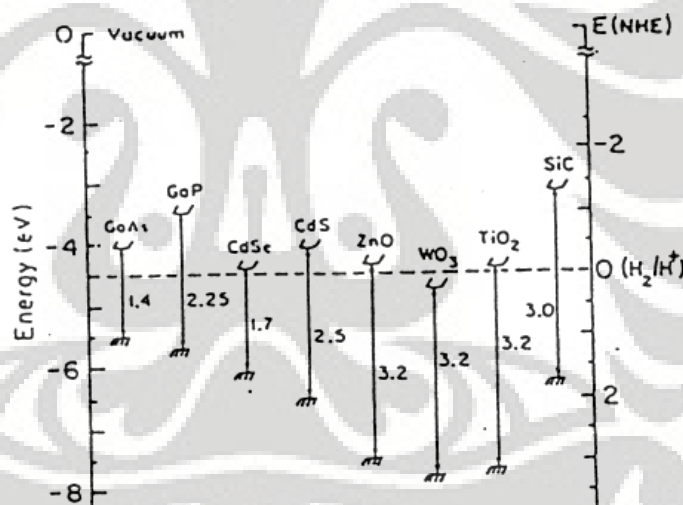


Gambar 2.9 Gambar daerah energi pada semikonduktor (Amemiya, 2004)

TiO₂ anatase bersifat metastabil dan cenderung bertransformasi menjadi rutile pada suhu tinggi (sekitar 915°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 TiO₂ (V₂O₅ meningkatkan transformasi anatase-rutile sedangkan keberadaan SO₄²⁻ dan SiO₂ menurunkan kinetika reaksi)
- Komposisi gas di sekitar katalis selama reaksi katalitik

Fasa rutile TiO₂ 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 2.10 Energi celah, posisi pita valensi (bawah), konduksi (atas), dan potensial redoks dari berbagai semikonduktor (Linsebigler, 1995)

Dari Gambar 2.10 terlihat TiO₂ mempunyai energi celah sebesar 3,2 eV. Hal ini mengindikasikan bahwa h⁺ pada permukaan TiO₂ merupakan spesi oksidator kuat, karenanya 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 pH =1 mempunyai potensial sebesar 2,8 V, dan kebanyakan zat

organik mempunyai potensial redoks yang lebih kecil dari potensial tersebut (Gunlazuardi, 2001).

2.4 Adsorpsi

Adsorpsi adalah sebuah proses yang terjadi manakala sejumlah gas atau cairan terkonsentrasi pada suatu permukaan padatan atau cairan, membentuk lapisan molekular ataupun atomik. 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 mengadsorp substansi disebut adsorben. Adsorben yang saat ini dikenal antara lain: karbon aktif, alumina aktif, silica gel dan zeolit (Yang, 1987).

Adsorpsi biasanya dinyatakan dalam isotherm, suatu istilah yang menyatakan jumlah adsorbat yang diserap oleh adsorben yang dinyatakan dalam tekanan (untuk gas) dan konsentrasi (untuk cairan). Banyaknya adsorbat gas yang diserap oleh adsorben padat dipengaruhi oleh hal-hal berikut (Maron, 1941; Ruthven):

1. Jenis adsorben
2. Gas adsorbat
3. Luas permukaan adsorben
4. Temperatur gas
5. Tekanan gas

Secara umum, adsorpsi dapat dibedakan menjadi dua jenis (Maron, 1941):

1. Adsorpsi Fisika
2. Adsorpsi Kimia

2.4.1 Adsorpsi Fisika (Adsorpsi Van der Waals)

Pada adsorpsi fisika, yang memegang peranan dalam teradsorbnya adsorbat adalah gaya Van der Waals yang terbentuk secara lemah tanpa ada reaksi kimia (Ruthven). Proses adsorpsi berlangsung cepat, reversible dan dikategorikan berenergi rendah (Maron, 1941).

2.4.2 Adsorpsi kimia

Adsorpsi kimia adalah adsorpsi yang melibatkan reaksi kimia dengan membentuk ikatan ionik dan kovalen. Proses adsorpsi ini berlangsung secara irreversible dan dikategorikan berenergi tinggi (Maron, 1941).

Pada kebanyakan proses adsorpsi, seringkali yang terjadi adalah kombinasi antara adsorpsi fisik dan adsorpsi kimia (Maron, 1941). Perbedaan yang mendasar antara kedua jenis adsorpsi ini dapat dilihat pada table 2.6 (Ruthven; Maron, 1941; Yang, 1987).

Tabel 2.5 Perbandingan antara adsorpsi fisika dan adsorpsi 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 (Slamet, 2007):

1. Jenis Adsorbat

Rongga tempat terjadinya adsorpsi dapat dicapai melalui ukuran yang sesuai, sehingga molekul-molekul yang dapat diadsorpsi adalah molekul-molekul yang berdiameter sama atau lebih kecil dari diameter pori adsorben. Apabila berdiameter sama, molekul-molekul polar lebih kuat diadsorpsi daripada molekul-

molekul yang kurang polar, sehingga molekul-molekul yang lebih polar bisa menggantikan molekul-molekul yang kurang polar yang telah diserap.

2. Sifat Adsorben

Semakin murni suatu adsorben dan semakin besar luas permukaannya, proses adsorpsi akan semakin baik.

3. Temperatur

Adsorpsi merupakan proses eksotermis sehingga dengan bertambahnya temperatur, laju adsorpsi akan menurun.

4. Tekanan

Pada adsorpsi fisika, kenaikan tekanan adsorbat mengakibatkan kenaikan jumlah adsorbat. Sedangkan pada adsorpsi kimia, tekanan adsorbat yang meningkat justru menurunkan laju adsorpsi.

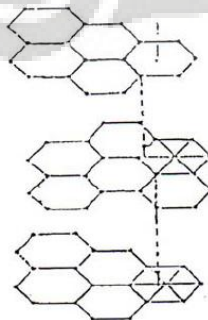
2.5 Adsorben

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa suatu bahan yang dapat mengadsorpsi senyawa lain disebut adsorben. Di antara adsorben yang dikenal sekarang dan jumlahnya melimpah di Indonesia adalah karbon aktif dan zeolit.

2.5.1 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 2.11) mengandung mikrokrystalit dari grafit, akan tetapi mikrokrystalit ini terkumpul pada arah yang acak. Ruang antar kristal inilah yang membentuk pori mikro (Ruthven; Yang, 1987).



Gambar 2.11 Struktur karbon aktif (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, 2008):

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 akivasinya. Properti dari karbon aktif dapat dilihat pada tabel 2.6 (Ruthven):

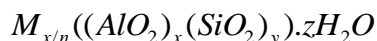
Tabel 2.6 Ukuran pori karbon aktif

| | Mikropori | Mesopori | Makropori |
|---|-----------|----------|-----------|
| Diameter (Angstrom) | <20 | 20-500 | >500 |
| Volume pori (cm ³ /g) | 0.15-0.5 | 0.02-0.1 | 0.2-0.5 |
| Luas permukaan (cm ² /g) | 100-1000 | 10-100 | 0.5-2 |
| (Densitas partikel 0.6-0.9 g/cm ³ ; porositas 0.4-0.6) | | | |

Sumber : Ruthven

2.5.2 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. Unit sel dari berbagai jenis zeolit dapat dilihat pada gambar di bawah ini (Ruthven).

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 molecular 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).

Molekul-molekul zat dengan diameter tertentu akan dapat melewati dan menempati pori-pori dan rongga dari zeolit, 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 dan bersifat hidrofilik, ternyata dapat menyerap zat organik maupun anorganik. Kemampuan zeolit menyerap zat organik maupun anorganik ini, bergantung dari rasio Si/Al dalam zeolit. Rasio Si/Al biasanya berkisar antara 1 sampai 5 (Ruthven). Makin rendah rasio Si/Al maka zeolit akan lebih mudah menyerap senyawa polar, sebaliknya makin tinggi Si/Al maka zeolit akan lebih mudah untuk menyerap senyawa-senyawa non polar (Slamet, 2007).

Tabel 2.7 Ukuran rongga dan rasio Si/Al berbagai jenis zeolit

| Jenis Zeolit | Ukuran Rongga (A) | 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 | | |

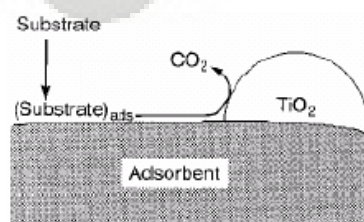
Sumber : Sutarti, 1994

Zeolit alam Malang dan Lampung memiliki jenis yang berbeda. Zeolit Alam Malang memiliki struktur mordenit yang dominan sedangkan Zeolit Alam Lampung memiliki struktur klinoptilolit yang dominan.

2.6 Adsorben Sebagai Penyangga Fotokatalis

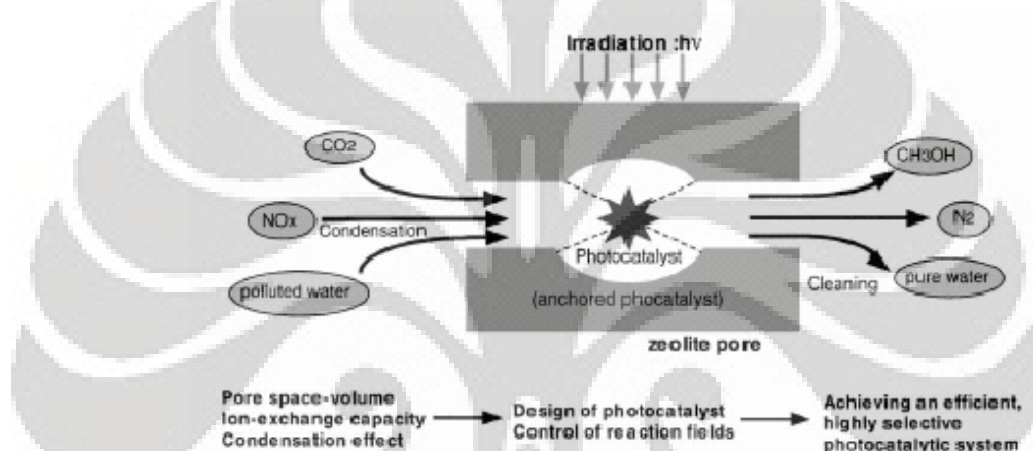
Proses fotokatalisis terjadi pada fasa teradsorpsi (Fogler, 1992). Hal ini menjadi masalah bagi proses fotokatalisis karena kebanyakan semikonduktor yang digunakan sebagai fotokatalis memiliki daya adsorpsi yang lemah. Untuk menutupi kekurangan tersebut, maka proses fotokatalisis oleh fotokatalis semikonduktor 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 2.12 menunjukkan mekanisme reaksi kombinasi fotokatalisis dan adsorpsi.



Gambar 2.12 Mekanisme reaksi fotokatalisis dengan adsorben sebagai penyangga (Torimoto, 2007)

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 2.13.



Gambar 2.13 Mekanisme reaksi fotokatalisis di dalam pori zeolit (Torimoto, 2007)

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 intermediet 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, 2000). 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 TiO₂ berbentuk oktahedral. Ternyata koordinat TiO₂ yang berbentuk oktahedral ini kurang aktif dalam fotodegradasi CO₂ dan NO_x. Koordinat TiO₂ yang berbentuk tetrahedral memungkinkan adanya interaksi TiO₂ dengan substansi yang akan didegradasi, sehingga ketika diberi cahaya foton TiO₂ dapat langsung mengoksidasi substansi polutan tersebut. Pada struktur koordinat TiO₂ yang berbentuk oktahedral hanya ada interaksi antar TiO₂ sehingga TiO₂ tidak aktif berfungsi sebagai fotokatalis (Slamet, 2007).

2.7 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*).

2.7.1 Photocatalytic Air Treatment Sistem and Method, Pub. No. US 0251812 A1 (Hayman, 2007)

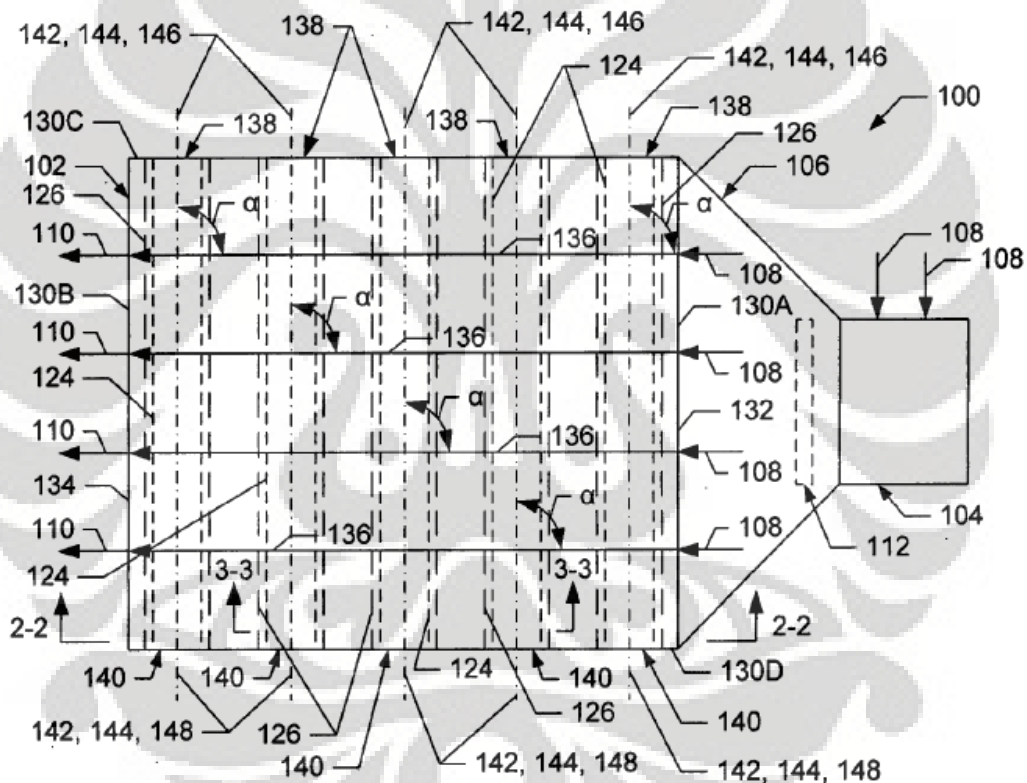
Dalam usaha untuk mendapatkan udara yang bersih dan sehat dari bakteri, jamur, maupun polutan-polutan organik, berbagai usaha telah dilakukan. Salah satunya adalah menggunakan lampu UV. Prinsipnya, udara dihantarkan secara konveksi baik alami maupun paksa ke dalam sinar UV. Sinar ini akan menghasilkan foton yang membuat mikroorganisme terjebak di dalamnya, dan energi yang dimiliki oleh foton akan memanaskan mikroorganisme dan berpotensi membunuhnya. Namun waktu pemaparan sinar pada mikroorganisme umumnya cepat sehingga mikroorganisme akan keluar lebih dulu sebelum mati.

Untuk polutan organik, terutama VOC (*Volatile Organik Compounds*), alat yang telah digunakan untuk proses mineralisasi organik adalah ozonasi yang dapat menghasilkan radikal bebas hidroksil yang dapat mengoksidasi polutan.

Paten yang dibahas kali ini adalah paten dalam pembuatan alat untuk sterilisasi dan mineralisasi bakteri, jamur, mikroorganisme dan VOC. Alat yang dimaksud adalah sebuah reaktor bed yang dilengkapi dengan substrat yang dicoating dengan fotokatalis sebagai tempat terbentuknya radikal bebas hidroksil

sebagai agen oksidasi. Untuk menghantarkan udara ke dalam reaktor bed, digunakan semacam *air-handling* di dalam alat tersebut. Dan untuk mengurangi kelembaban udara yang dapat memicu pertumbuhan mikroorganisme, ditambahkan pemanas di dalam alat. Selain itu, sumber lampu UV juga dipasangkan semacam sarung untuk mengakomodasi penggantian lampu tanpa merusak fotokatalis.

Skema alat seperti dijelaskan di atas dapat meningkatkan jumlah situs reaksi pada substrat yang juga berarti dapat meningkatkan kemampuan alat untuk membunuh dan/atau memineralisasi bakteri, virus, jamur, berbagai mikroorganisme lain dan VOC.

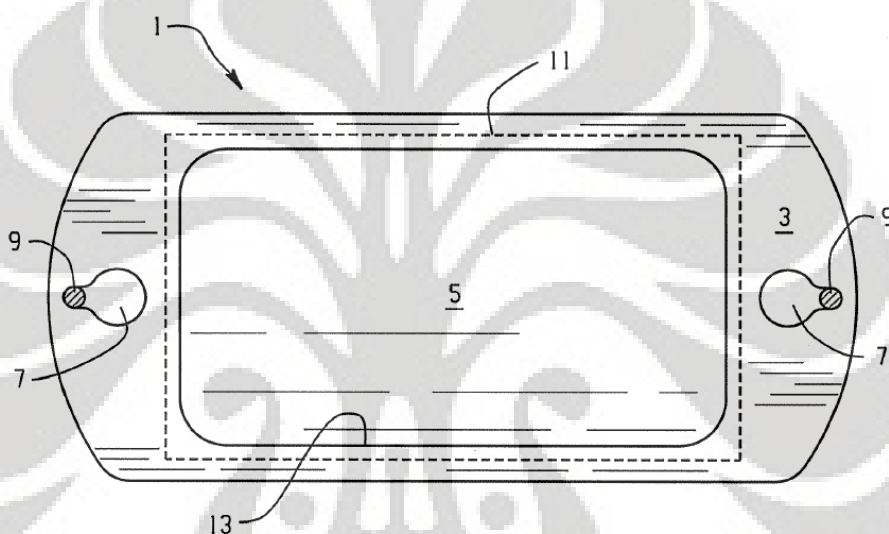


Gambar 2.14 Skema Alat *Air Treatment* (Hayman, 2007)

2.7.2 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 2.15 Skema *Deodorizer System* (Carey, 2008)

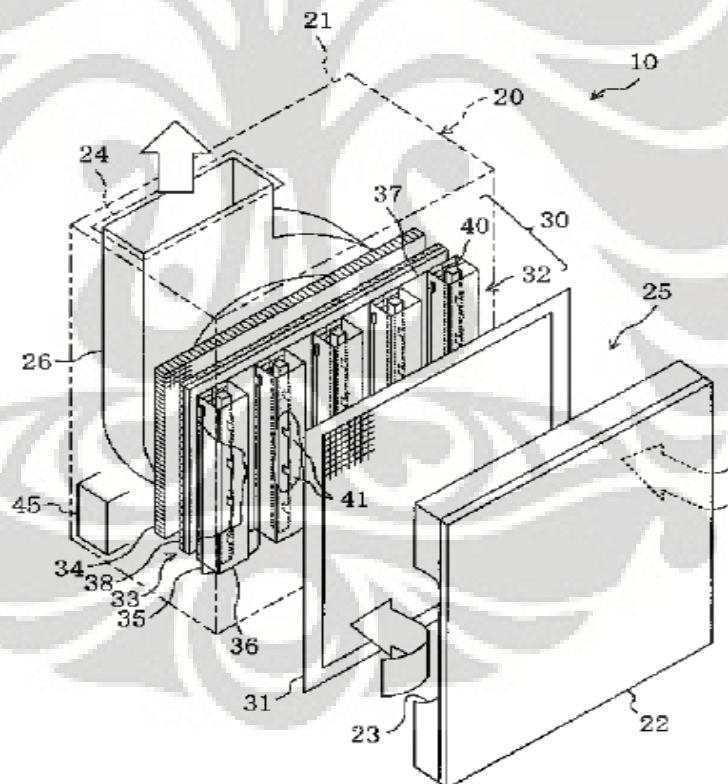
Keterangan Gambar :

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

2.7.3 Gas Treating Device, Pub. No. US 7, 332,020 B2 (Tanaka et.al., 2008)

Patent ini menerangkan mengenai alat yang digunakan untuk treatment terhadap gas berbahaya. Alat yang dimaksud adalah alat yang secara elektronik

dapat mengumpulkan debu dan mendekomposisi senyawa berbau dan material lain menggunakan alat pembangkit plasma yang terintegrasi dengan sistem ionisasi pada casing. Sistem ionisasi memiliki jalur ionisasi dan porsi kolom dari sebuah elektroda negative. Alat pembangkit plasma terdiri dari melibatkan pembebasan elektroda yang bersamaan elektroda lain yang berlawanan di sepanjang jalur ionisasi. Selama proses, debu-debu yang berukuran kecil pada udara ruangan diserang secara elektrik oleh pelepasan electrode diantara jalur ionisasi dan electrode yang berlawanan. Sebuah filter elektrik menangkap dan mengakumulasi debu yang telah diserang secara elektrik tadi. Plasma suhu rendah dibangkitkan energi pelepasan antara electrode yang dilepaskan dengan electrode yang berlawanan. Substansi-substansi berbahaya dan berbau pada udara ruang didekomposisi oleh spesi aktif yang terkandung pada plasma suhu rendah yang dibangkitkan.



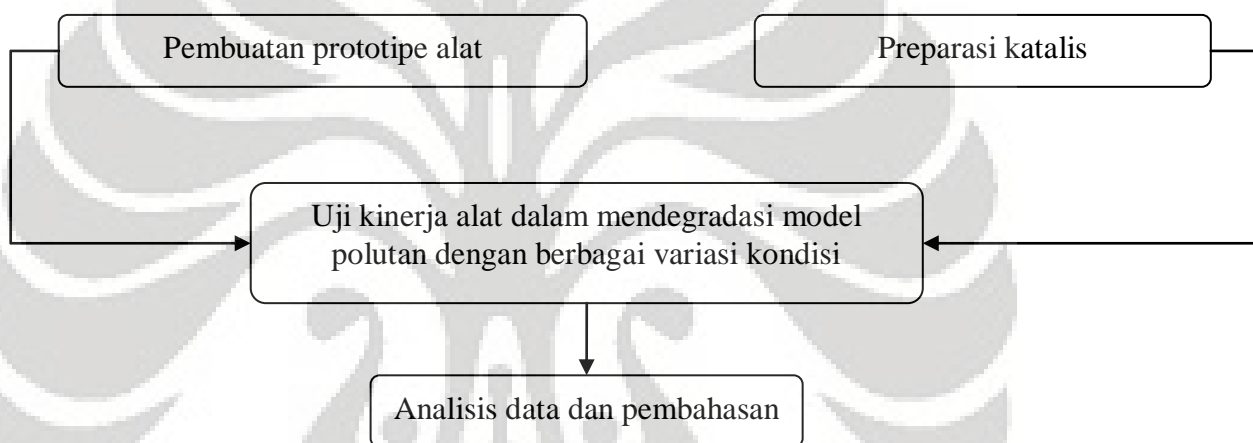
Gambar 2.16 Skema Alat *Gas Treatment* (Tanaka et.al., 2008)

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Percobaan

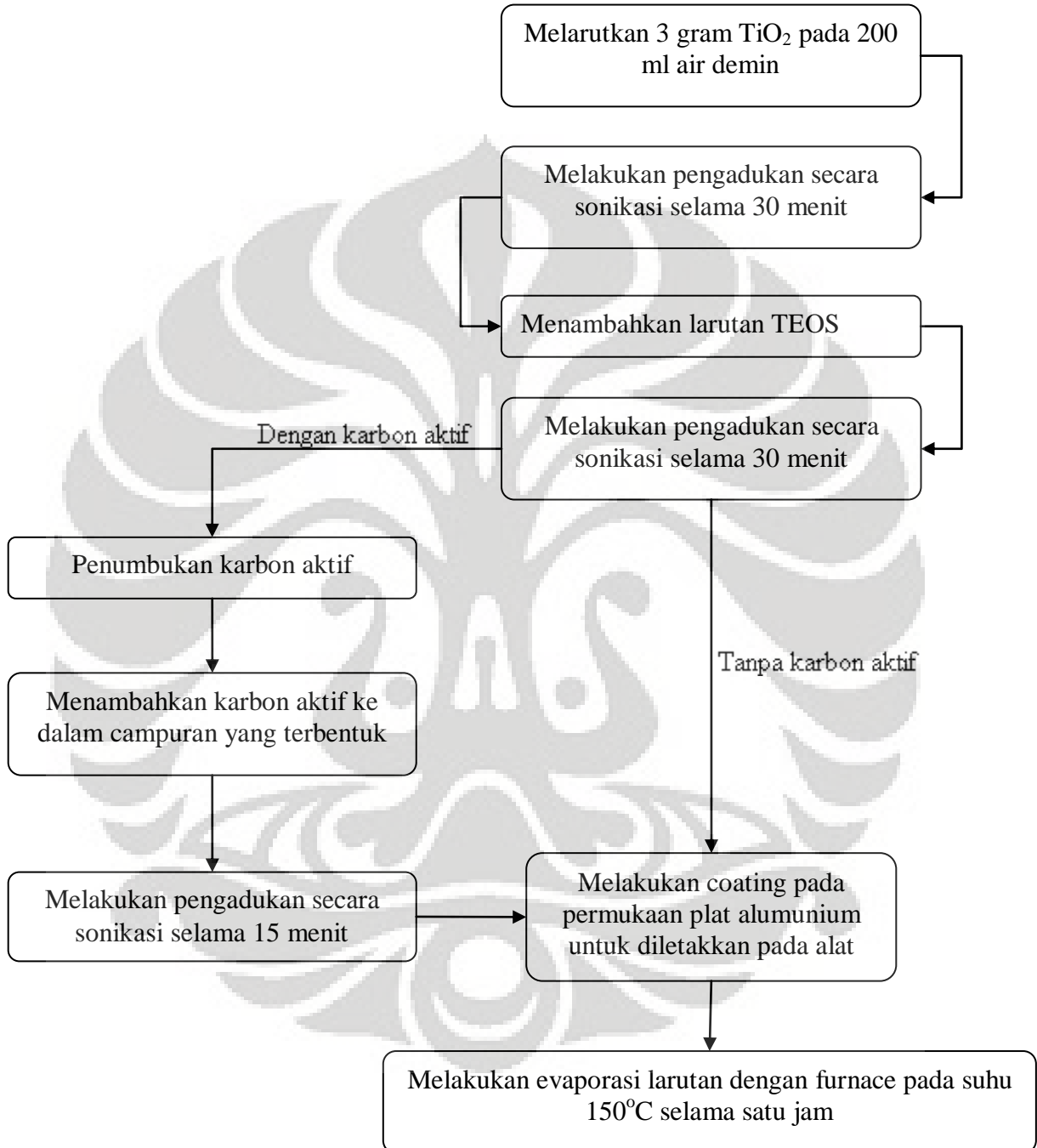
Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (RPKA) Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok. Penelitian diawali dengan pembuatan prototipe alat, yang dilaksanakan secara simultan dengan preparasi katalis. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1.1 Diagram Alir Preparasi Katalis

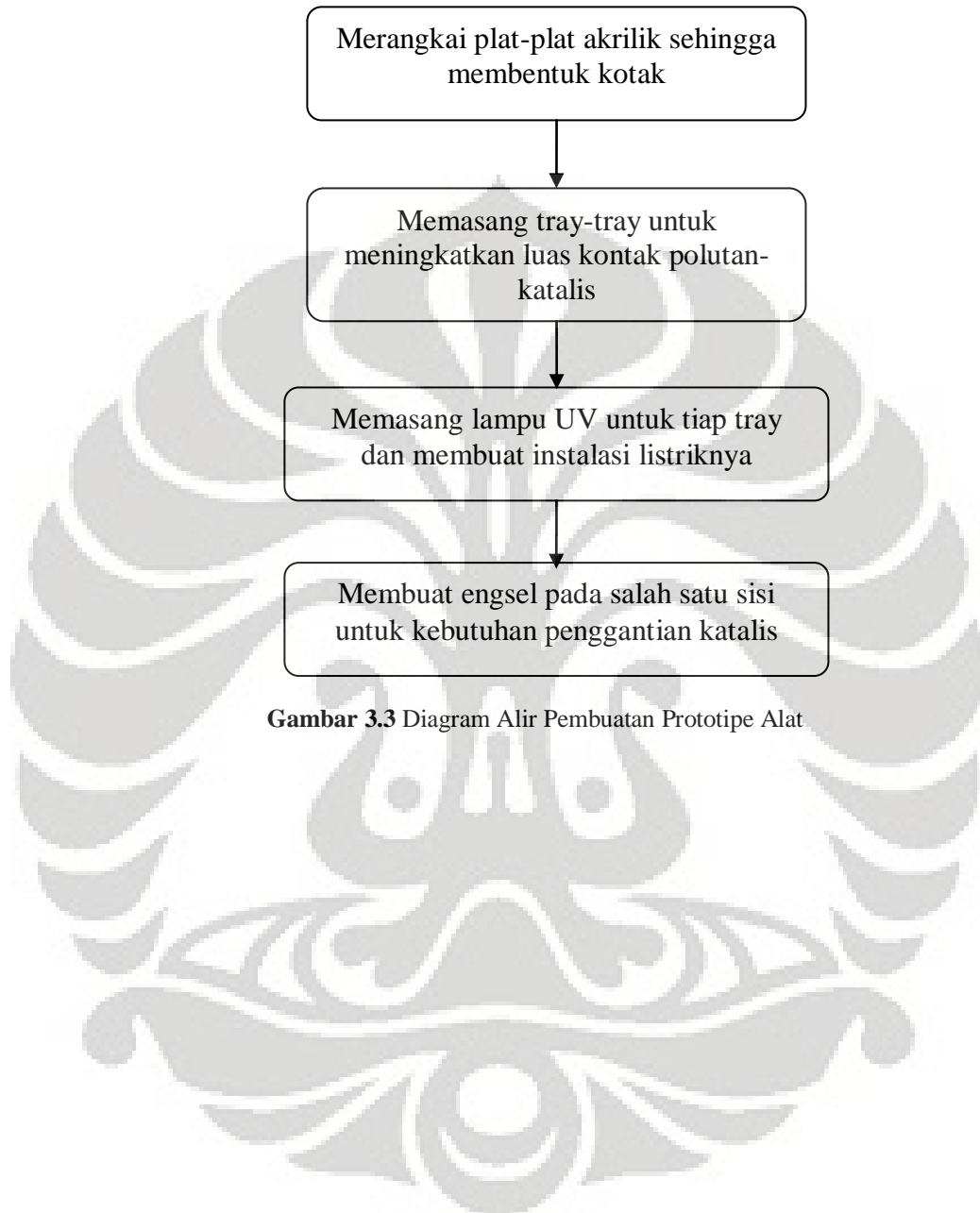
Diagram alir preparasi katalis ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram Alir Preparasi Katalis

3.1.2 Diagram Alir Pembuatan Prototipe Alat

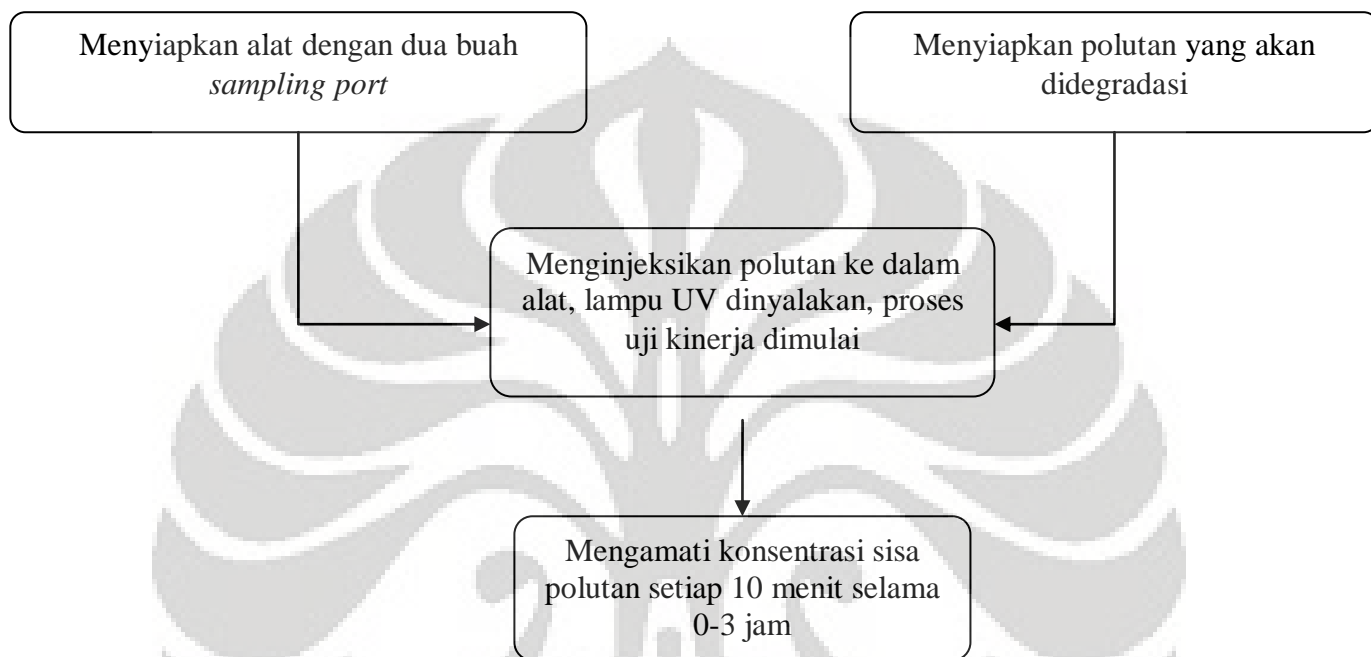
Diagram alir pembuatan prototipe alat ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Diagram Alir Pembuatan Prototipe Alat

3.1.3 Diagram Alir Uji Kinerja Alat

Uji kinerja alat dilakukan dengan menyiapkan alat yang telah dibuat dan dimulai setelah polutan dimasukkan dan lampu UV dinyalakan. Diagram Alir Uji Kinerja Alat ditunjukkan pada Gambar 3.4



Gambar 3.4 Diagram Alir Uji Kinerja Alat

3.2 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini dibagi berdasarkan jenis aktivitas penelitian. Di bawah ini adalah peralatan yang digunakan dalam penelitian berdasarkan aktivitasnya.

3.2.1 Peralatan Preparasi Katalis AFT

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

1. Beaker glass 300 ml
2. Gelas ukur 100 ml
3. Labu Erlenmeyer
4. Cawan petri steril (15 x 100mm)

5. Burner dan bunsen untuk sterilisasi alat
6. *Ultrasonic bath*
7. *Atmospheric furnace*
8. Cawan evaporasi
9. Batang pengaduk
10. Kaca arloji
11. Pengaduk elektrik
12. Timbangan

3.2.2 Peralatan Pembuatan Prototipe Alat

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

1. *Blower*
2. Kotak *Casing*
3. Enam buah Lampu UV-A 4 Watt
4. Enam buah Trafo 10 Watt
5. Enam buah starter lampu
6. Kabel dan saklar
7. Engsel dan mur baut

3.2.3 Peralatan Uji Kinerja Alat

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

1. Prototipe alat yang telah dibuat
2. *Sampling tube*
3. Syringe
4. Botol sampel
5. Stopwatch
6. GC TCD-FID

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

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

1. Serbuk TiO₂ komersial Degussa P-25 (79,23% anatase, 20,77% rutil, luas permukaan: 53,6 m²/g).
2. Karbon Aktif komersial dari tempurung kelapa
3. Air demin
4. HNO₃ 65%
5. TEOS 98% (Aldrich)

3.3.2 Bahan Uji Kinerja Alat

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

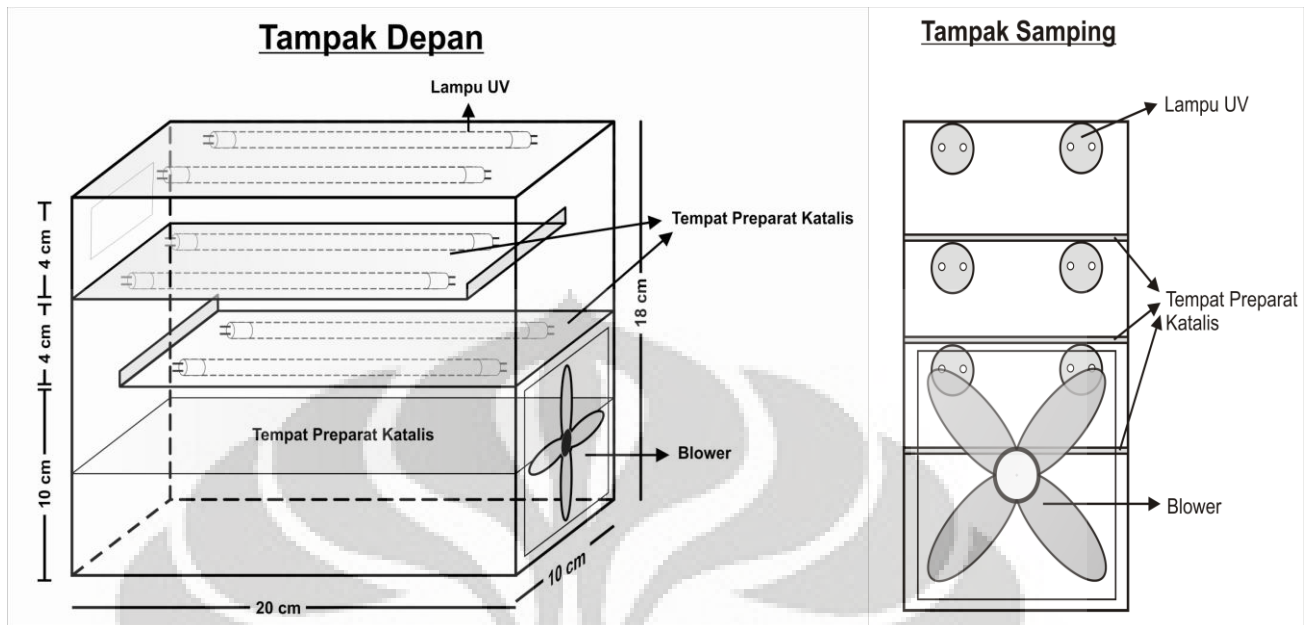
1. Udara
2. CO
3. Asap rokok
4. Larutan Metanol 10%-Formaldehida 37%
5. Asetaldehida

3.4 Prototipe Alat

Rekayasa dalam hal konfigurasi alat dilakukan untuk mendapatkan konfigurasi yang efektif dalam mendegradasi polutan organik. Di bawah ini adalah dimensi dan visualisasi dari prototipe alat yang telah dibuat:

- Bentuk geometri : kotak balok
- Dimensi : 20 cm x 10 cm x 18 cm
- Volume : 3,6 L
- Bahan : kaca akrilik
- Perekat : lem '*power glue*' dan '*rubber silicon*'
- Instalasi : sebuah blower, 6 buah lampu beserta fittingnya

Visualisasi alat dapat dilihat pada gambar 3.5 di bawah ini :



Gambar 3.5 Prototipe alat purifikasi dan deodorisasi udara

3.5 Prosedur Penelitian

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

3.5.1 Prosedur Preparasi Katalis

Preparasi katalis terdiri dari tiga aktivitas utama, yaitu :

3.5.1.1 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 dikeringkan dengan dryer
3. Karbon aktif kemudian ditumbuk dan diayak untuk menghasilkan mesh yang sesuai

3.5.1.2 Preparasi Katalis

1. Sebanyak 3 gram TiO_2 Degussa P-25 dilarutkan dalam 3000 ml air demin dan diaduk secara sonikasi selama 30 menit.
2. Larutan TiO_2 ditambahkan TEOS (Tetra etil ortosilikat) dan kemudian disonikasi lagi selama 30 menit. TEOS merupakan sumber SiO_2 yang

berfungsi sebagai perekat antara TiO_2 dan adsorben. Larutan TEOS dibuat dengan mencampurkan 3,715 ml TEOS; 33,35 ml etanol; 0,059 ml HNO_3 dan 0,6 ml air demin.

3. Menambahkan karbon aktif sehingga didapatkan loading TiO_2 dalam katalis sebesar 85%. Larutan kemudian disonikasi selama 15 menit.
4. Mengevaporasikan campuran pada temperatur 100°C sampai tidak mengandung air.

3.5.1.3 *Spray Coating*

1. Memotong plat alumunium dengan ukuran yang sama dengan ukuran alas alat.
2. Memasukkan katalis yang telah dibuat ke dalam alat spray coating.
3. Mengeset kompresor dan alat spray coating untuk menghasilkan hasil coating yang baik
4. Melakukan coating katalis pada plat alumunium secara merata di seluruh permukaan plat.
5. Memanaskan plat yang telah dicoating di dalam atmospheric furnace dengan suhu 150°C selama 1 jam
6. Mengulangi point 4 dan 5 sebanyak lima kali untuk setiap jenis katalis

3.5.2 **Prosedur Pembuatan Prototipe Alat**

Langkah-langkah dalam pembuatan prototipe alat adalah sebagai berikut :

1. Menyambungkan plat-plat kaca akrilik sehingga membentuk balok berukuran 20 cm x 18 cm x 10 cm.
2. Memasang tray sebanyak tiga buah sebagai tempat peletakkan preparat katalis dan lampu UV. Adanya tray ini juga dimaksudkan untuk meningkatkan waktu tinggal polutan di dalam alat.
3. Memasang *blower* untuk menyedot udara dan polutan sampel.
4. Memasang dua buah sampling port untuk menginjeksi polutan dan mengambilnya kembali untuk selanjutnya dianalisis.

3.5.3 **Prosedur Uji Kinerja Alat**

Uji kinerja alat dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Menyiapkan polutan.

2. Menyiapkan alat yang telah dibuat.
3. Menyalakan lampu UV.
4. Menginjeksikan polutan sampel ke dalam model alat.
5. Menghitung konsentrasi sisa polutan setiap setengah jam selama 0-3 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 murni, CO dalam asap rokok, campuran methanol-formaldehida, dan asetaldehida. Analisis dilakukan untuk melihat konsentrasi akhir polutan setelah memasuki skema alat berisi katalis dalam suatu selang waktu tertentu.

3.6 Parameter yang Divariasikan

➤ Jenis katalis

Jenis katalis yang digunakan adalah TiO_2 dan komposit TiO_2 -karbon aktif. Loading TiO_2 yang digunakan adalah tetap sebesar 15% berat, merujuk pada nilai optimal yang didapatkan pada degradasi fenol yang merupakan senyawa organik dan diasumsikan berperilaku sama dengan model polutan asap rokok.

➤ Jenis Polutan

Jenis Polutan yang digunakan adalah CO murni, CO di dalam asap rokok, campuran methanol-formaldehida dan asetaldehida. Pemilihan polutan didasarkan pada kandungannya dalam asap rokok dan perbedaan perilaku adsorpsi terhadap karbon aktif.

3.7 Data Penelitian dan Cara Pengambilan Data

- Data perubahan konsentrasi polutan ditentukan dengan GC dalam setiap selang waktu tertentu
- Waktu reaksi dihitung dengan menggunakan stopwatch

3.8 Pengolahan Data Penelitian

Data konsentrasi polutan terdegradasi didapat dengan melihat *peak area* pada GC dan waktu reaksi dicatat untuk setiap kali pengambilan sampel.

Kemudian dibuatkan plot grafik antara waktu vs *peak area* untuk melihat kecenderungan proses degradasi fotokatalitik.



BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Konfigurasi alat

Alat yang dibuat adalah sebuah alat yang berfungsi untuk mendegradasi asap rokok pada udara ruang yang bekerja dengan sistem fotokatalitik. Menurut Almquist (2001), laju generasi elektron dan *hole* yang menginisiasi reaksi fotokatalitik dipengaruhi oleh sifat absorpsi dan sifat fisik TiO_2 , konfigurasi dan volume reactor, intensitas cahaya yang diterima fotokatalis, dan konsentrasi fotokatalis.

Berangkat dari parameter-parameter tadi, rekayasa alat dilakukan untuk bekerja secara efektif dalam mendegradasi asap rokok dan polutan organik lainnya seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.5. Berikut ini adalah parameter-parameter alat yang dinilai perlu beserta dengan usaha untuk mengakomodasi parameter-parameter tersebut:

4.1.1 Intensitas cahaya sebagai inisiator reaksi

Kemampuan katalis (TiO_2 atau $\text{TiO}_2\text{-AC}$) dalam menghasilkan radikal hidroksil sebagai agen oksidator sangat ditentukan oleh intensitas cahaya yang diterima oleh fotokatalis. Apabila intensitas cahaya UV yang sampai ke permukaan fotokatalis semakin besar maka semakin banyak pula radikal hidroksil yang bisa dihasilkan secara statistik dari proses tereksitasinya elektron dari pita valensi ke pita konduksi fotokatalis.

Intensitas cahaya yang diterima oleh fotokatalis sangat ditentukan oleh jarak lampu yang digunakan dengan katalisnya. Lampu UV yang digunakan pada alat adalah lampu UV black light 4 W. Lampu diletakkan dengan jarak 1,5 cm dari katalis. Untuk meningkatkan intensitasnya, digunakan reflektor pada bagian-bagian tertentu pada alat. Bagian-bagian alat yang dilapisi dengan reflektor antara lain:

- a. Sandaran lampu dengan menggunakan alumunium foil
- b. Preparat katalis berupa plat alumunium
- c. Bagian luar alat dengan menggunakan kertas putih

4.1.2 Luas kontak polutan dan katalis

Konversi dalam suatu reaksi kimia sangat ditentukan oleh luas kontak polutan dengan katalis di dalam reaktor. Semakin besar luas kontak reaktan dengan katalis, akan semakin banyak pula reaktan yang bereaksi menghasilkan produk.

Untuk meningkatkan luas kontak polutan dan katalis di dalam alat, desain alat dibuat sedemikian sehingga dapat mengakomodasi katalis dalam jumlah yang besar. Sampath (1994) telah membuktikan bahwa semakin banyak fotokatalis yang digunakan akan semakin baik proses fotokatalitik yang terjadi. Namun banyaknya jumlah katalis mensyaratkan dispersi yang tinggi. Pada alat, katalis dicoating pada plat aluminium dengan menggunakan metode *spray coating* untuk menghasilkan persebaran katalis yang merata. Persebaran katalis yang merata akan menghasilkan dispersi yang tinggi karena rasio jumlah katalis yang aktif terhadap jumlah katalis keseluruhan akan semakin besar. Semakin banyak polutan yang kontak dengan katalis, maka akan semakin banyak pula reaktan yang dapat didegradasi.

Alat ini dibagi menjadi tiga segmen. Tiap-tiap segmen dibatasi dengan sekat. Dengan skema seperti pada gambar 3.5, aliran gas diharapkan dapat mengikuti bentuk jalur yang telah diatur 'berliku-liku'. Selain mengatur aliran gas polutan, bagian atas sekat digunakan untuk meletakkan preparat katalis dan bagian bawahnya digunakan untuk meletakkan lampu UV yang akan menyinari katalis yang berada di bawahnya.

4.1.3 Keseragaman Aliran Polutan (Turbulensi) dan Pressure Drop

Untuk mendapatkan hasil degradasi yang baik, aliran polutan di dalam alat haruslah homogen dan turbulen. Untuk menyedot polutan masuk, meningkatkan turbulensi, dan mengurangi pressure drop, di bagian bawah alat dipasangkan blower. Blower yang digunakan adalah blower berbentuk kotak dengan ukuran 10 cm x 10 cm.

Selain dari aspek fluida polutan yang masuk, aspek katalis pun turut memegang peranan dalam menjaga aliran fluida dan menghindari pressure drop. Fenomena channeling diusahakan tidak terjadi, hal ini bertujuan untuk memudahkan kontrol terhadap reaksi tersebut. *Rule of thumb* rasio reaktor dan diameter partikel

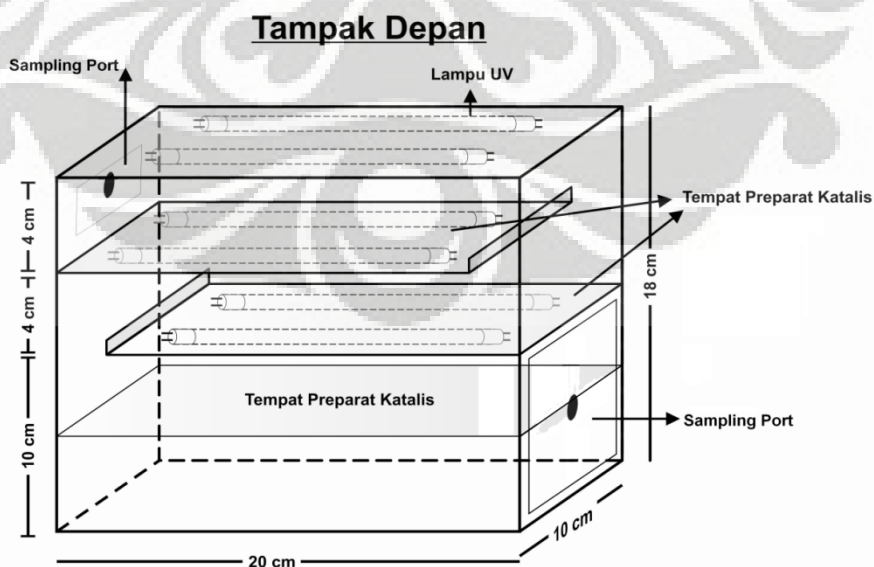
antara 5 sampai 10 dengan panjang minimal 50-1000 kali lebih besar dari diameter partikel untuk memastikan aliran tetap turbulen dan seragam (Richardson, 1989). Dan untuk menghindari pressure drop, maka digunakan katalis berbentuk film.

4.1.4 Kemudahan Penggunaan Alat

Prototipe alat dibuat dengan ukuran yang relatif kecil dan mudah dibawa (*portable*). Dengan aplikasi untuk purifikasi udara dari polutan asap rokok dapat dilakukan dengan fleksibel dan mobilitas yang cukup tinggi.

Rancangan awal penelitian uji degradasi polutan asap rokok adalah dengan meletakkan alat di dalam kotak uji berukuran 1,2 m x 0,8 m x 0,8 m yang diharapkan dapat merepresentasikan ruangan. Namun timbul kendala dalam hal distribusi partikel gas dan sifat hidrodinamika gas polutan. Oleh karena itu, untuk keperluan uji degradasi polutan dan untuk melihat efektivitas alat dalam mendegradasi polutan, dilakukan perubahan terhadap konfigurasi alat.

Blower yang tadinya digunakan untuk menyedot polutan masuk ke dalam alat digantikan oleh dua buah injection port untuk keperluan injeksi sampel. Dengan begitu, homogenitas gas dapat dicapai dengan lebih cepat. Namun dengan adanya perubahan ini, alat harus benar-benar berada dalam kondisi terisolasi sempurna untuk menghindari kebocoran gas, terlebih gas yang digunakan umumnya memiliki kadar toksisitas yang cukup tinggi. Konfigurasi alat yang telah mengalami perubahan dapat dilihat pada gambar 4.1 berikut ini.



Gambar 4.1 Visualisasi Alat deodorisasi dan purifikasi udara dari polutan asap rokok

4.2 Uji Kinerja Degradasi Polutan

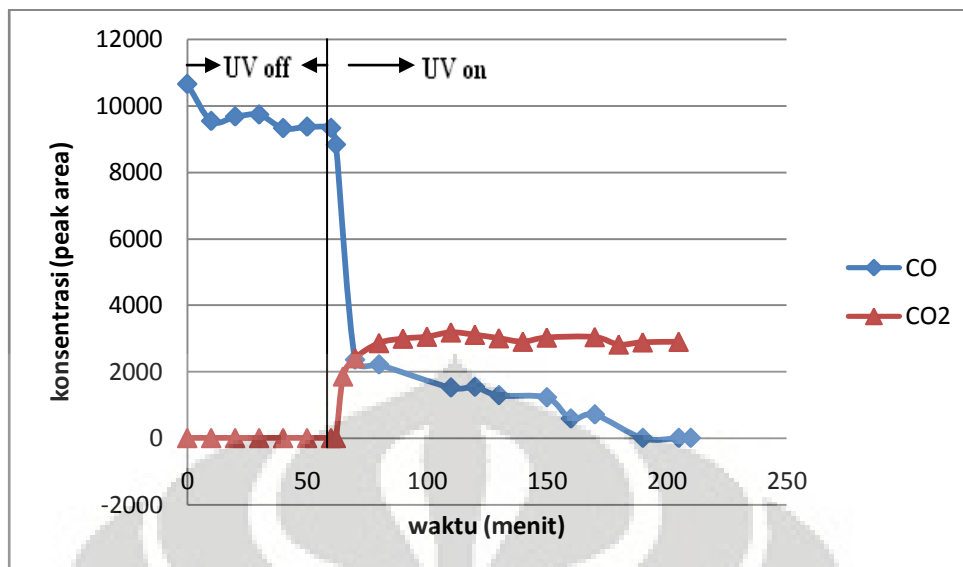
Efektivitas alat dalam bekerja sebagai unit *purifier* udara dari polutan asap rokok dilakukan dengan menguji kinerjanya dalam mendegradasi polutan asap rokok. Dalam penelitian ini, digunakan beberapa model polutan di dalam asap rokok selain asap rokok itu sendiri. CO murni dan CO yang terkandung di dalam asap rokok dianggap cukup mewakili asap rokok sebenarnya, sedangkan methanol-formaldehida dan asetaldehida dianggap cukup mewakili kandungan polutan organik yang terkandung di dalam asap rokok.

4.2.1 Uji Degradasi CO murni

Uji ini dimaksudkan untuk melihat seberapa besar efektivitas alat dalam mendegradasi polutan CO. Efektivitas alat dilihat dari seberapa besar polutan yang terkonversi selama selang waktu tertentu serta berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk dapat menyelesaikan reaksinya (pada penelitian ini, reaksi dianggap selesai apabila polutan CO sudah terdeteksi lagi di GC).

Pengkondisian polutan di dalam alat dilakukan dengan menginjeksikan sejumlah tertentu polutan CO murni dari *sampling tube* ke dalam alat. Konsentrasi CO yang dimasukkan ke dalam alat didasarkan pada volume yang diinjeksikan ke dalam alat terhadap volume total alat.

Kontribusi asap rokok pada jumlah emisi polutan CO di udara mencapai 20.000 ppm dan merupakan sumber terbesar CO di udara melebihi asap kendaraan bermotor. Untuk memodelkan kondisi ini, CO yang diinjeksikan ke dalam sampel adalah sebesar 80 ml. Dengan volume alat sebesar 3.600 ml, injeksi CO sebesar itu menghasilkan konsentrasi CO di dalam alat sebesar 22.222,22 ppm. Nilai ini dibuat lebih besar dari nilai rata-rata CO di dalam asap rokok dikarenakan sumber CO yang digunakan di dalam penelitian tidaklah 100% murni namun tercampur dengan udara. Maka dari itu, sebagai pendekatan digunakan volume polutan yang menghasilkan konsentrasi lebih tinggi di dalam alat. Gambar 4.2 menunjukkan grafik penurunan CO terhadap waktu penyinaran lampu terhadap katalis.



Gambar 4.2 Degradasi CO dan produksi CO₂ oleh fotokatalis TiO₂ tanpa karbon aktif

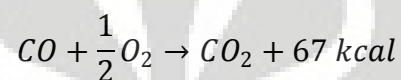
Dari gambar di atas, terlihat bahwa pada 20 menit pertama penyinaran UV terhadap TiO₂ tanpa karbon aktif, reaksi degradasi berlangsung sangat cepat. Hal ini dikarenakan laju reaksi akan tinggi apabila konsentrasi reaktan tinggi. Pada menit ke-10, konsentrasi polutan CO telah berkurang sebanyak 75% dari konsentrasi awalnya. Laju reaksi mulai berkurang dari menit ke-20 sampai menit ke-110 dan pada menit ke-130 kandungan CO di dalam alat sudah mencapai level dimana GC tidak dapat lagi mendeteksi kandungan CO. Hal ini berarti TiO₂ yang terdapat di dalam alat sangat aktif di dalam mendegradasi CO karena dalam waktu yang relatif singkat, CO yang terkandung di dalam alat sudah terdegradasi secara signifikan.

Proses degradasi senyawa organik dengan proses fotokatalitik merupakan proses oksidasi yang menghasilkan CO₂, air dan senyawa mineral. Namun pada kebanyakan proses oksidasi senyawa organik, produknya tidak selalu karbon dioksida karena sangat mungkin produk yang dihasilkan adalah intermediet dari proses oksidasi itu. Oleh karena itu, untuk kepentingan analisis hasil reaksi senyawa organik, kita tidak bisa menggunakan data CO₂ yang terbentuk di akhir reaksi.

Namun pada proses oksidasi CO, produk hasil reaksinya bisa dipastikan berupa CO₂. Keberadaan senyawa CO₂ membuktikan bahwa berkurangnya kandungan CO bukanlah karena alat yang bocor atau adsorpsi oleh penyangga.

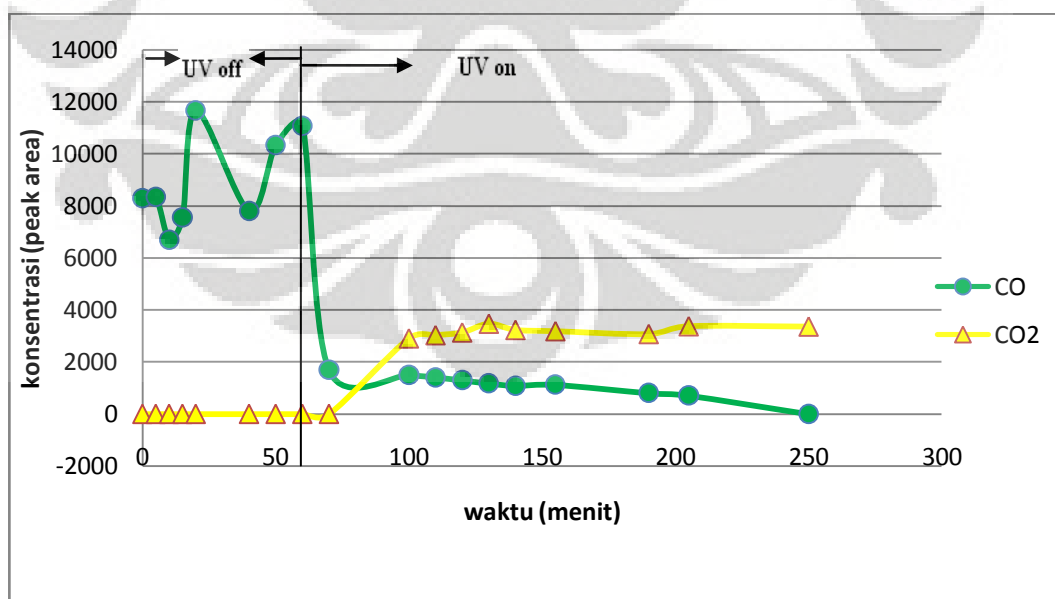
Gambar 4.2 juga memperlihatkan CO₂ yang terbentuk selama proses degradasi fotokatalitik dengan fotokatalis TiO₂ tanpa penyangga.

Secara stoikiometris, setiap 1 mol CO yang terdegradasi akan menghasilkan 1 mol CO₂. Gambar 4.2 menunjukkan penurunan konsentrasi CO yang sangat signifikan pada rentang waktu 0-40 menit. Pada rentang waktu yang sama, konsentrasi CO₂ mengalami peningkatan yang cukup signifikan pula. Jika diperhatikan, kurva penurunan konsentrasi CO identik dengan kurva peningkatan konsentrasi CO₂. Sebagaimana diketahui pada stoikiometri reaksi oksidasi CO, satu mol CO yang teroksidasi akan menghasilkan satu mol CO₂ menurut reaksi:



Dari Gambar 4.2, terlihat bahwa sampai menit ke-30, laju produksi CO₂ berlangsung sangat cepat. Hal ini dapat dibuktikan dengan peak area CO₂ yang dihasilkan telah mencapai nilai 3000 pada rentang waktu tersebut. Dari data ini bisa disimpulkan bahwa alat bekerja secara baik dan optimal sampai menit ke-20 dan menghasilkan produk CO₂ yang identik dengan CO yang didegradasi.

Untuk melihat pengaruh penambahan adsorben sebagai penyangga fotokatalis, dalam hal ini karbon aktif, dilakukan pula uji degradasi CO dengan konsentrasi yang sama. Gambar 4.3 menunjukkan grafik penurunan konsentrasi CO oleh katalis TiO₂-karbon aktif terhadap waktu.



Gambar 4.3 Degradasi CO oleh fotokatalis TiO₂ dengan karbon aktif

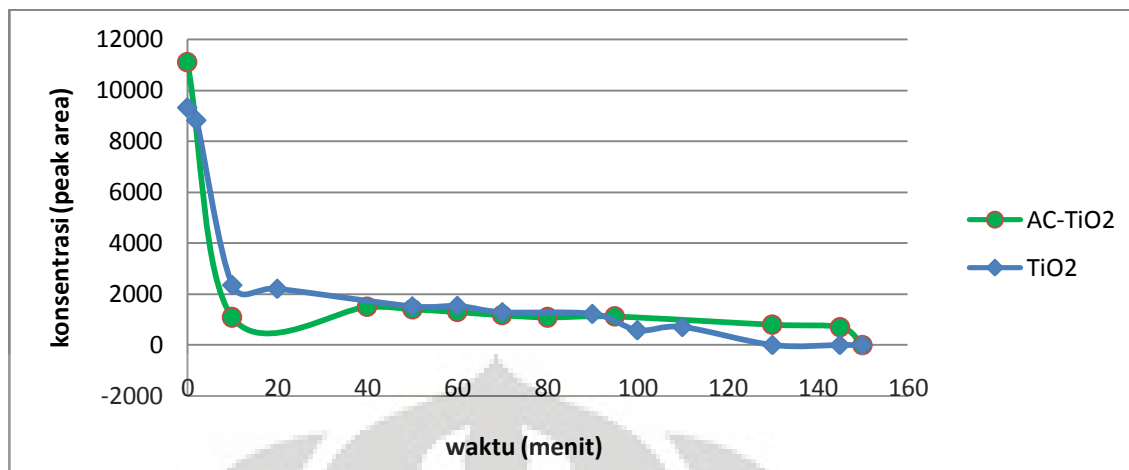
Kombinasi katalis TiO_2 dan karbon aktif diharapkan dapat meningkatkan kinerja fotokatalitik dari aspek adsorpsi dan luas permukaan katalis. Semakin besar luas permukaan katalis yang disediakan penyangga adsorben karbon aktif, maka akan semakin banyak inti aktif TiO_2 yang tersedia untuk kebutuhan proses fotokatalitik.

Proses degradasi CO dengan menggunakan kombinasi TiO_2 -karbon aktif diawali dengan melihat pengaruh adsorpsi dari karbon aktif. Hal ini dilakukan dengan memulai penghitungan waktu tanpa menyalakan lampu UV. Pengujian proses adsorpsi ini dilakukan untuk melihat proses mana yang lebih dominan antara adsorpsi dan fotokatalitik dalam proses degradasi CO.

Uji adsorpsi dilakukan selama 60 menit pertama proses degradasi. Diharapkan dari proses ini, kandungan CO akan turun akibat sebagian molekulnya teradsorb ke permukaan preparat katalis. Dari grafik terlihat bahwa pada 60 menit awal proses degradasi, tidak terdapat kecenderungan menurun yang sebelumnya diduga akan terjadi. Hasil uji menunjukkan bahwa konsentrasi CO di dalam alat berfluktuasi yang menandakan bahwa gas CO masih menuju kondisi homogen dan proses adsorpsi kurang dominan karena adanya perbedaan sifat antara karbon aktif dan CO dari aspek kepolaran.

Setelah 60 menit uji adsorpsi, lampu UV dinyalakan dan proses fotokatalisis dimulai. Dari grafik terlihat bahwa pada 10 menit pertama setelah penyalakan lampu, laju degradasi berlangsung sangat cepat. Hal ini terbukti dengan berkurangnya kandungan CO di dalam alat sebanyak 90% dari konsentrasi awalnya. Cepatnya laju degradasi awal dikarenakan masih tingginya konsentrasi polutan CO di dalam alat. Setelah 10 menit, laju degradasi berkurang dikarenakan telah berkurangnya konsentrasi CO di dalam alat. Kandungan CO di dalam alat mencapai level dimana tidak terdeteksi lagi di dalam GC setelah penyinaran selama 150 menit. Hal ini juga berarti kombinasi antara TiO_2 dan karbon aktif cukup efektif dalam mendegradasi polutan CO.

Gambar 4.4 menunjukkan perbandingan kinerja degradasi fotokatalitik CO dengan menggunakan TiO_2 dan karbon aktif secara grafis.



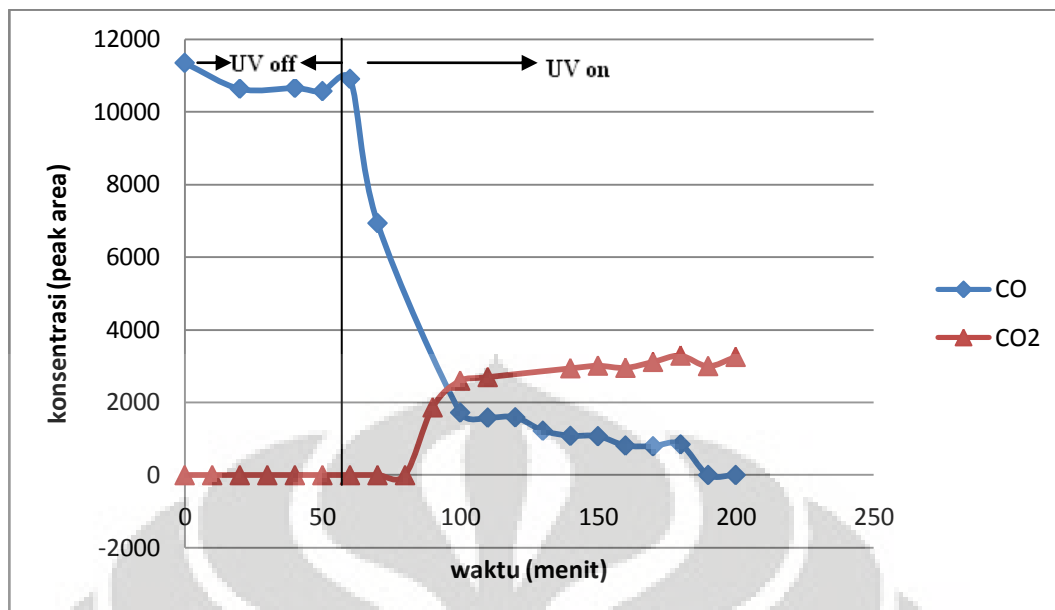
Gambar 4.4 Perbandingan kinerja degradasi fotokatalitik antara TiO₂ dan TiO₂-karbon aktif

Gambar 4.4 menggambarkan bahwa proses fotokatalitik menggunakan TiO₂ dengan penyangga karbon aktif menghasilkan laju degradasi yang tidak jauh berbeda relatif terhadap TiO₂ tanpa penyangga. Hal ini terlihat dari hasil uji adsorpsi katalis komposit yang menunjukkan hasil yang tidak dominan. Hasil ini menunjukkan bahwa CO tidak teradsorpsi secara sempurna oleh karbon aktif. Hasil ini juga identik dengan hasil yang didapatkan oleh Ao (2004) dimana kinerja penyisihan NO menjadi NO₂ dengan fotokatalis komposit TiO₂ tidak menunjukkan hasil yang jauh berbeda relative terhadap penggunaan fotokatalis TiO₂ saja. Hal ini dimungkinkan karena kepolaran yang berbeda antara adsorben (karbon aktif) dan polutan adsorbat (CO dan NO).

4.2.2 Uji Degradasi CO dalam Asap Rokok

Sebelum mengawali uji ini, asap rokok murni diinjeksikan ke dalam GC. Terdapat dua buah peak yang paling besar. Peak terbesar adalah milik udara dan peak besar lainnya adalah milik CO. Data ini menunjukkan bahwa CO murni yang digunakan pada uji kinetika sebelumnya cukup representatif dalam memodelkan asap rokok.

Jumlah asap rokok yang diinjeksikan ke dalam alat adalah sebanyak 80 ml, jumlah yang sama seperti pada uji kinetika degradasi CO. Data konsentrasi yang dijadikan basis untuk melihat penurunan konsentrasi asap rokok adalah konsentrasi CO. Gambar 4.5 menggambarkan kurva penurunan konsentrasi CO dalam asap rokok dan peningkatan konsentrasi CO₂ terhadap waktu penyinaran.



Gambar 4.5 Degradasi CO dalam asap rokok dan produksi CO₂ oleh fotokatalis TiO₂ tanpa karbon aktif

Dari gambar di atas, terlihat bahwa pada 10 menit pertama penyinaran UV terhadap TiO₂ tanpa karbon aktif, reaksi degradasi asap rokok berlangsung sangat cepat. Pada menit ke-10, konsentrasi polutan asap rokok telah berkurang sebanyak 40% dari konsentrasi awalnya dan pada menit ke-40, konsentrasi asap rokok telah berkurang sebanyak 85%. Laju reaksi mulai berkurang setelah menit ke-20 dan pada menit ke-120 kandungan asap rokok di dalam alat sudah mencapai level dimana GC tidak dapat lagi mendeteksi kandungan asap rokok. Hal ini berarti TiO₂ yang terdapat di dalam alat sangat aktif di dalam mendegradasi asap rokok karena dalam waktu yang relatif singkat asap rokok yang terkandung di dalam alat sudah terdegradasi secara signifikan.

Basis yang digunakan dalam penghitungan konsentrasi asap rokok adalah kandungan CO yang terkandung di dalamnya. Oleh karena itu, untuk memastikan penurunan konsentrasi CO di dalam asap rokok adalah hasil dari oksidasi fotokatalitik, Gambar 4.5 juga menunjukkan kurva peningkatan CO₂ di dalam alat sebagai produk hasil oksidasi CO.

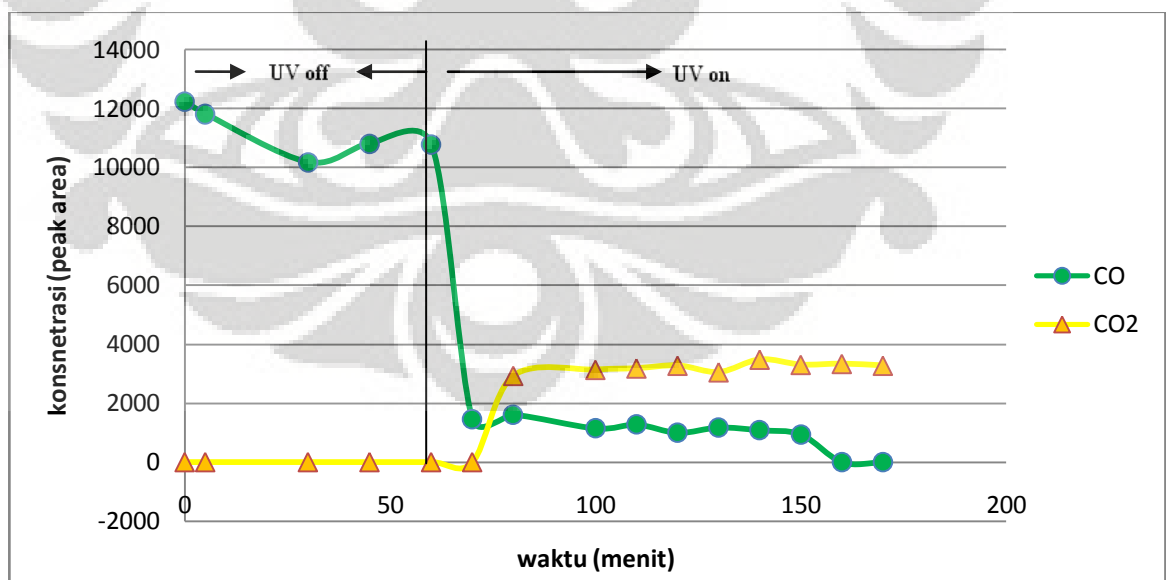
Grafik di atas memperlihatkan bahwa sampai pada menit ke-40, laju produksi CO₂ berlangsung sangat cepat. Hal ini dibuktikan bahwa peak area CO₂ yang dihasilkan telah mencapai nilai 2800 pada menit ke-40. Dari data ini bisa

disimpulkan bahwa alat bekerja secara baik dan optimal sampai pada menit ke-40 dan menghasilkan produk CO_2 yang identik dengan CO yang didegradasi.

Pada degradasi CO sebelumnya, indikasi keberhasilan uji degradasi hanya didasarkan pada konsentrasi CO yang terdegradasi atau konsentrasi CO_2 yang terbentuk dari hasil oksidasi CO. Secara fisik dan pengamatan panca indera sulit untuk melihat hasil degradasi CO dikarenakan baik CO maupun CO_2 merupakan gas yang tidak berwarna dan tidak berbau.

Namun berbeda halnya dengan asap rokok. 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. Proses degradasi fotokatalitik yang telah dilakukan terbukti dapat menghilangkan warna keruh di dalam alat dan juga menghilangkan bau tak sedap yang menyengat dari asap rokok setelah proses degradasi selesai.

Sebagaimana pada uji degradasi dengan polutan CO, uji degradasi dengan polutan asap rokok juga dilakukan dengan memvariasikan jenis katalis yang digunakan. Gambar 4.6 menunjukkan grafik penurunan konsentrasi asap rokok oleh katalis TiO_2 -karbon aktif terhadap waktu reaksi.

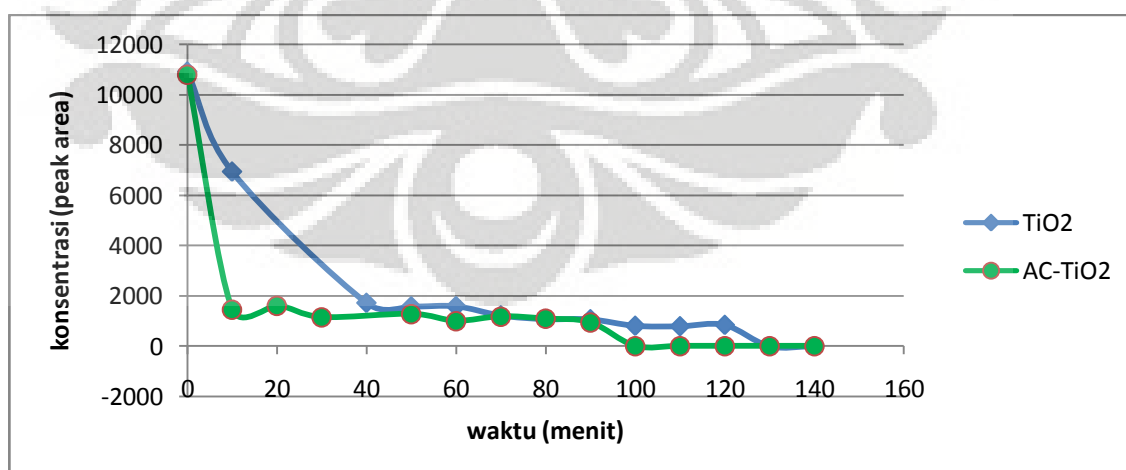


Gambar 4.6 Degradasi asap rokok dan produksi CO_2 oleh fotokatalis TiO_2 dengan karbon aktif

Uji adsorpsi dilakukan pada 60 menit pertama reaksi. Hasil yang diperoleh dari hasil uji adsorpsi ini adalah nilai yang fluktuatif namun memiliki kecenderungan konstan di 30 menit terakhir. Hal ini berarti proses adsorpsi dalam uji ini kurang dominan. Kemungkinan lain yang terjadi yang menyebabkan konsentrasi asap rokok berfluktuasi pada rentang waktu itu adalah belum meratanya distribusi asap rokok di dalam alat.

Setelah 60 menit melihat pengaruh adsorpsi, lampu UV dinyalakan. Hasil degradasi menunjukkan bahwa pada 10 menit pertama, konsentrasi CO di dalam asap rokok telah berkurang sebanyak 85% dari konsentrasi awal dan CO₂ sudah mulai banyak terbentuk. Konversi 100% dicapai setelah penyinaran selama 100 menit. Hal ini berbeda dengan hasil yang didapat pada degradasi CO murni dimana penambahan karbon aktif tidak terlalu mempengaruhi kinerja alat.

Kenaikan efektivitas katalis ini disebabkan oleh karena pori katalis yang cukup besar. Secara umum, katalis dengan ukuran pori yang besar lebih dipilih pada suatu reaksi karena tingkat keseragaman yang lebih baik dan besarnya waktu kontak sehingga selektivitas juga akan meningkat. (Richardson, 1989) . Selain itu, keberadaan karbon aktif juga dapat mencegah terbentuknya intermediet seperti yang dijelaskan oleh Liu Jian-Hua (2006). Gambar 4.7 memberikan gambaran yang lebih jelas tentang perbandingan antara kinerja alat menggunakan katalis TiO₂ dengan atau tanpa karbon aktif.

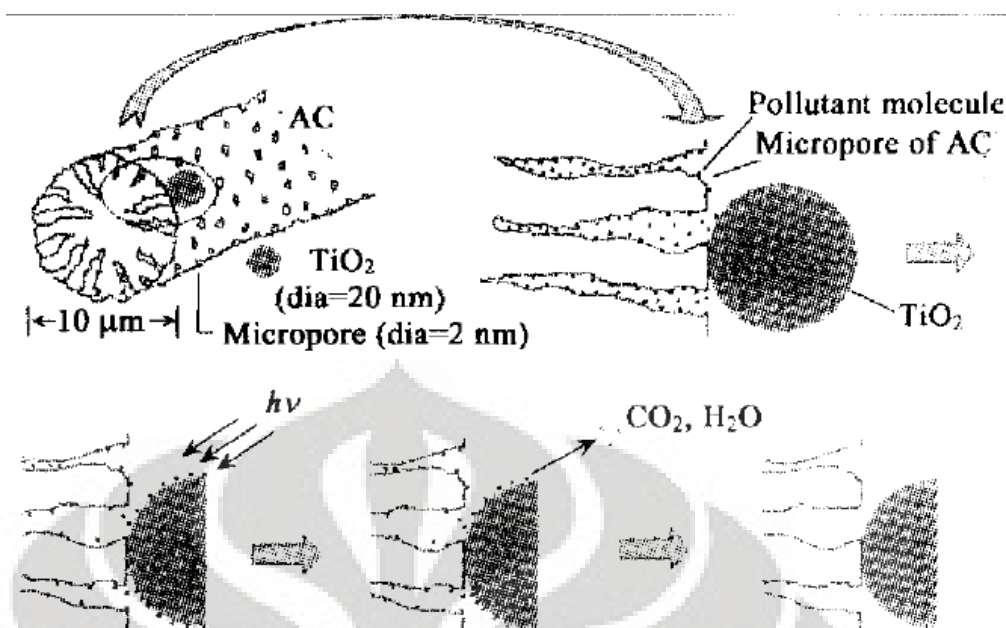


Gambar 4.7 Perbandingan kinerja degradasi fotokatalitik antara TiO₂ dan TiO₂-karbon aktif

Grafik di atas menunjukkan bahwa penggunaan karbon aktif sebagai penyangga fotokatalis TiO_2 memberikan setidaknya dua keuntungan:

1. Laju reaksi awal yang lebih cepat. Ini terlihat dari konversi yang dicapai oleh penggunaan katalis dengan karbon aktif yang mencapai 85% pada 10 menit pertama. Nilai ini jauh lebih besar dari nilai konversi asap rokok apabila menggunakan fotokatalis tanpa penyangga dimana pada 10 menit pertama, konversi CO di dalam asap rokok hanya 40% dan membutuhkan waktu sampai 40 menit untuk mencapai konversi yang sama seperti yang dicapai oleh katalis karbon aktif- TiO_2 .
2. Waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan konversi 100% yang lebih singkat. Ini terlihat dari grafik dimana pada penggunaan TiO_2 tanpa karbon aktif dibutuhkan waktu reaksi selama 130 menit untuk mencapai konversi 100%. Di sisi lain, pada penggunaan TiO_2 dengan penyangga karbon aktif hanya dibutuhkan waktu 90 menit saja untuk menghasilkan konversi 100%.

Hasil yang ditunjukkan pada gambar 4.7 membuktikan bahwa laju degradasi CO dengan katalis kombinasi TiO_2 dan karbon aktif lebih besar relatif terhadap TiO_2 tanpa karbon aktif. Hal ini terjadi karena kekuatan adsorpsi dari katalis berpenyangga karbon aktif lebih besar jika dibandingkan dengan TiO_2 tanpa penyangga. Hasil di atas analog dengan hasil yang didapat dari proses fotodegradasi benzene oleh Jacoby (1996), methyl orange oleh Youji Li (2005) dan toluene oleh Liu Jian-hua (2006) dimana laju degradasi polutan dengan TiO_2 berpenyangga menunjukkan nilai yang lebih besar dari TiO_2 tanpa penyangga. Gambar 4.8 menunjukkan skema adsorpsi, fotokatalitik dan regenerasi katalis TiO_2 -karbon aktif.



Gambar 4.8 Ilustrasi skematis proses adsorpsi dan fotokatalitik pada katalis TiO₂-karbon aktif (Liu Jian-Hua, 2006)

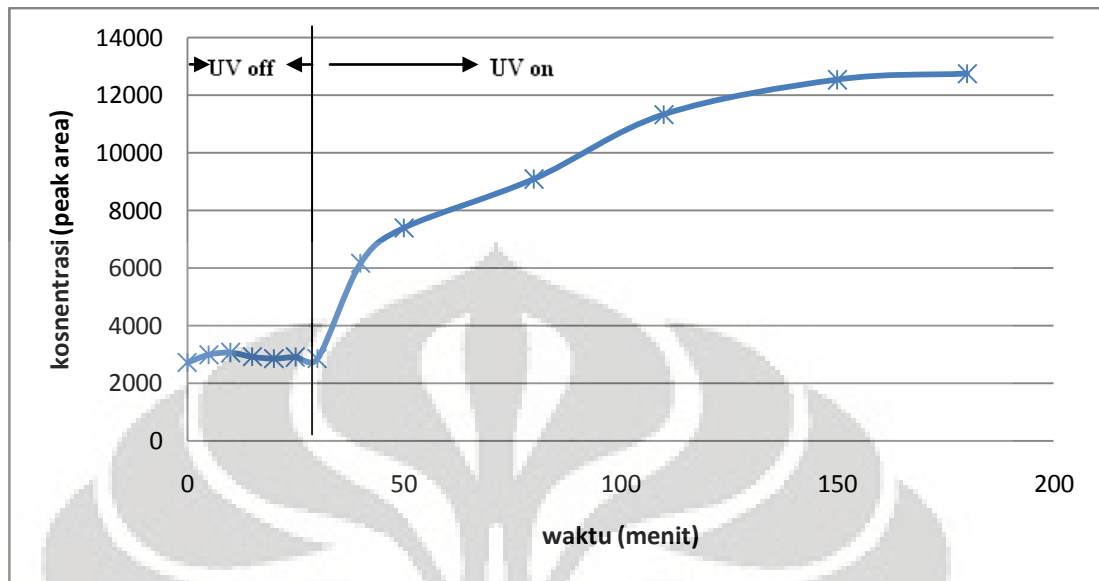
Gambar 4.8 menggambarkan kinerja karbon aktif dan TiO₂ yang bekerja secara simultan. Gambar di atas menunjukkan bahwa Partikel TiO₂ terdispersi di permukaan eksternal dari karbon aktif. Gambar di atas juga menunjukkan bahwa luas permukaan karbon aktif yang sangat besar tidak rusak akibat perlakuan awal pada suhu tinggi. Titik-titik yang terdapat di dalam pori karbon aktif adalah polutan yang teradsorb oleh karbon aktif. Setelah penyinaran, polutan terkonversi menjadi CO₂ dan H₂O yang kemudian terdesorpsi keluar dari pori karbon aktif.

4.2.3 Uji Degradasi Larutan Metanol-Formaldehida

Formaldehida yang digunakan di dalam penelitian adalah larutan formaldehida p.a. Formaldehida p.a mengandung 10% methanol dan 37% formaldehida. Formaldehyde yang diinjeksikan ke dalam alat adalah sebesar 10 ppm. Katalis yang digunakan dalam penelitian ini adalah TiO₂ sebagai fotokatalis tanpa penambahan karbon aktif.

Berbeda dengan degradasi CO pada proses oksidasi fotokatalitik, proses oksidasi formaldehida tidak bisa didasarkan pada pembentukan CO₂. Hal ini dikarenakan oksidasi senyawa organik hidrokarbon seperti formaldehida tidak selalu menghasilkan CO₂ sebagai produk akhir oksidasi. Intermediet reaksi justru seringkali terjadi pada proses oksidasi senyawa hidrokarbon seperti formaldehida.

Gambar 4.9 menunjukkan proses degradasi formaldehida dengan menggunakan fotokatalis TiO_2 .



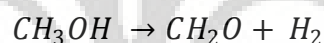
Gambar 4.9 Kurva oksidasi larutan methanol-formaldehida

Hipotesis awal dari penelitian ini adalah mendapatkan kecenderungan konsentrasi formaldehida yang menurun. Penurunan itu terjadi karena formaldehida teroksidasi menghasilkan CO_2 atau intermediet. Namun data penelitian menunjukkan hasil yang sangat kontradiktif dengan hipotesis awalnya. Pada 30 menit pertama lampu UV tidak dinyalakan. Pada rentang waktu itu, konsentrasi formaldehida cenderung konstan. Hal ini membuktikan bahwa tidak terjadi adsorpsi formaldehida pada permukaan TiO_2 dan tidak ada kebocoran di dalam alat.

Setelah 30 menit, lampu UV dinyalakan dan proses degradasi fotokatalitik dimulai. Dari gambar di atas, dapat dilihat bahwa kurva degradasi formaldehida yang diharapkan turun justru mengalami peningkatan yang sangat signifikan dari konsentrasi awalnya. Pada 10 menit pertama, konsentrasi formaldehida mengalami peningkatan sampai 2 kali dari konsentrasi awalnya. Sampai pada menit ke-150, peningkatan konsentrasi formaldehida mencapai 4 kali dari konsentrasi awalnya. Dan setelah menit ke-150 konsentrasi formaldehida mulai konstan yang menandakan proses oksidasi larutan formaldehida telah mencapai kesetimbangan.

Hasil ini didapatkan karena larutan formaldehida yang digunakan tidak 100% murni namun terdiri dari pelarut berupa methanol. Keberadaan methanol ini menyebabkan radikal hidroksil sebagai *oxidizing agent* yang dihasilkan dari proses penyorotan fotokatalis TiO_2 , justru menyerang methanol untuk akhirnya dioksidasi. Secara organik, oksidasi methanol menghasilkan intermediet berupa persenyawaan aldehid dan asam karboksilat. Dalam hal ini, oksidasi methanol menghasilkan formaldehida. Hal inilah yang menyebabkan konsentrasi formaldehida meningkat dari konsentrasi sebelum lampu UV dinyalakan.

Hasil ini analog dengan hasil yang didapatkan oleh Pillai (2002). Hasil fotooksidasi dari alcohol alifatik menghasilkan aldehide alifatik dengan jumlah rantai yang identik. Reaksi oksidasi fotokatalitik dari alcohol alifatik membentuk aldehid terjadi dengan selektivitas yang sangat tinggi mencapai 95%. Reaksi yang terjadi adalah:



atau



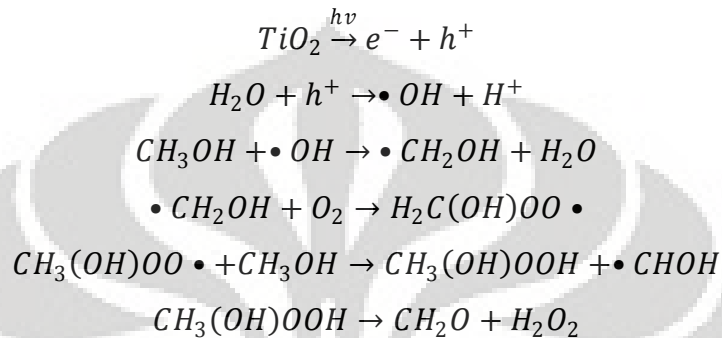
Formaldehide yang dihasilkan dari reaksi di atas dapat teroksidasi lebih lanjut membentuk CO_2 dan H_2O untuk oksidasi sempurna atau CO dan H_2 apabila oksidasi yang terjadi adalah oksidasi parsial. Blount (2001) juga menjelaskan bahwa proses oksidasi fotokatalitik alcohol alifatik menghasilkan rasio produk H_2/CO_2 yang sangat besar mencapai 50-90. Hal ini berarti produk hasil reaksi oksidasi fotokatalitik alcohol lebih banyak menghasilkan intermediet aldehid dari pada CO_2 .

Aldehide sendiri mengalami oksidasi untuk membentuk CO_2 , H_2O dan mungkin intermediet dari golongan asam karboksilat. Namun alcohol jauh lebih reaktif terhadap reaksi oksidasi jika dibandingkan dengan aldehide. Fessenden (1982) mengusulkan urutan menurun oksidasi berbagai senyawa organik berdasarkan golongannya:

Alkana \rightarrow Alkena, Alkohol, Haloalkana \rightarrow Alkuna, Aldehide \rightarrow Asam Karboksilat $\rightarrow CO_2$

Urutan oksidasi ini menjelaskan mengapa konsentrasi formaldehida (dengan kandungan methanol 10%) justru bertambah selama proses degradasi fotokatalitik.

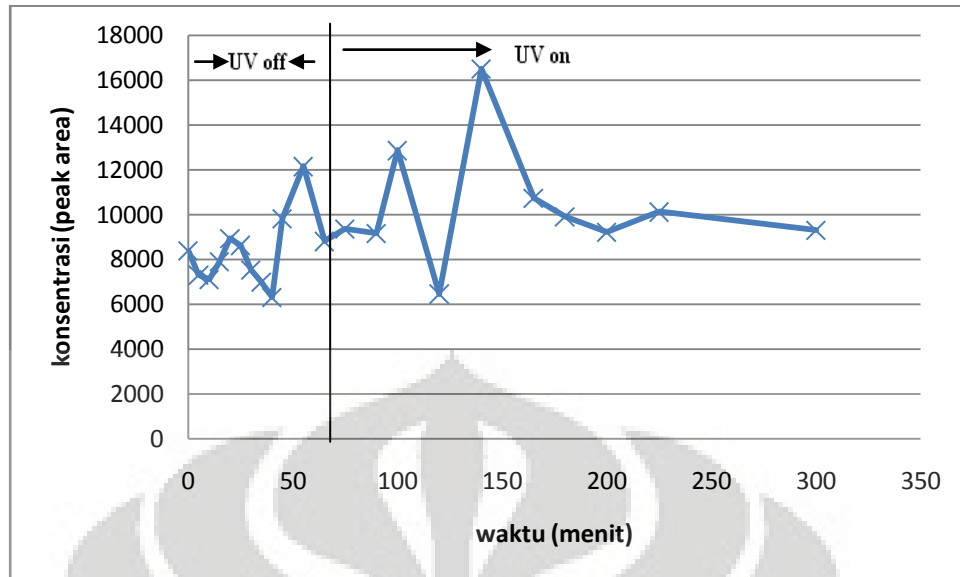
Fujishima (2000) mengusulkan jalan reaksi oksidasi alcohol dengan inisiator radikal hidroksil dari proses fotokatalisis menghasilkan senyawa intermediet:



Jalur reaksi di atas memperlihatkan bahwa oksidasi methanol yang diinisiasi oleh radikal hidroksil menghasilkan intermediet berupa formaldehid dan peroksida. Peroksida merupakan senyawa yang sangat mudah membentuk radikal hidroksil (Fessenden, 1982). Sehingga apabila radikal hidroksil terbentuk dari peroksida tersebut, akan menginisiasi kembali reaksi oksidasi. Jadi sumber hidroksil sekarang adalah dari hasil fotokatalitik dan produk hasil reaksi oksidasi methanol.

4.2.4 Uji Degradasi Asetaldehida

Asetaldehida diinjeksikan ke dalam alat sebesar 10 ppm untuk dilakukan uji degradasi. Kurva degradasi asetaldehida menggunakan TiO_2 dapat dilihat pada Gambar 4.10.

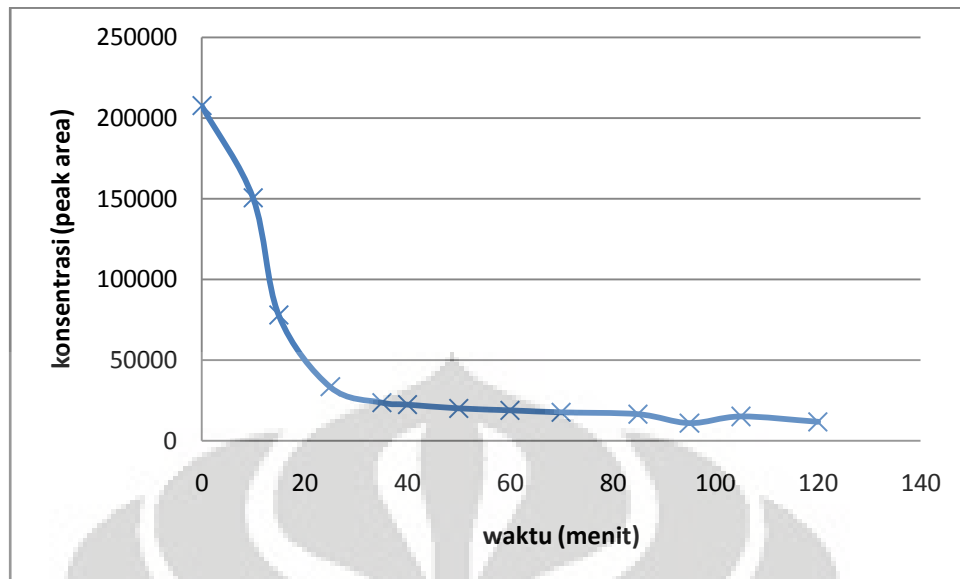


Gambar 4.10 Kurva degradasi asetaldehida menggunakan TiO_2 .

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa proses degradasi fotokatalitik asetaldehida memiliki kecenderungan yang fluktuatif selama prosesnya. Hal ini jauh berbeda dengan yang didapat dari proses degradasi CO yang sangat reaktif terhadap proses fotokatalisis. Hal ini mungkin terjadi karena perilaku asetaldehida sebagai senyawa organik yang berbeda dengan CO.

Untuk melihat pengaruh penambahan karbon aktif di dalam TiO_2 , dilakukan pula uji degradasi asetaldehida menggunakan katalis komposit TiO_2 -karbon aktif.

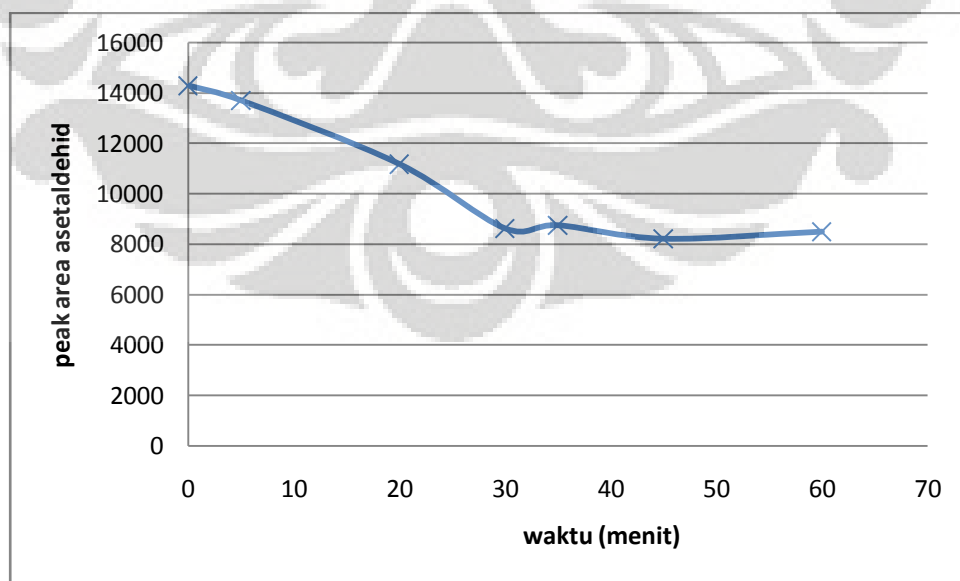
Untuk menguji adsorpsi oleh katalis terhadap polutan, dilakukan uji adsorpsi selama 2 jam. Hasil uji adsorpsi katalis terhadap asetaldehida dapat dilihat pada gambar 4.10.



Gambar 4.11. Kurva adsorpsi asetaldehida oleh karbon aktif di dalam alat

Grafik di atas menunjukkan bahwa karbon aktif yang terkandung di dalam paduan katalis TiO_2 -karbon aktif cukup menunjukkan aktivitas yang sangat tinggi, dimana selama 40 menit, konsentrasi asetaldehida di dalam alat telah turun secara signifikan sebanyak 90% dari konsentrasi awalnya. Hal ini menunjukkan proses adsorpsi cukup dominan di dalam proses degradasi ini.

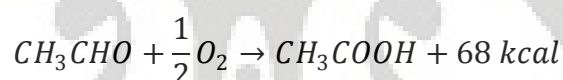
Setelah konsentrasi di dalam alat telah mencapai kesetimbangan dari aspek adsorpsi, lampu UV dinyalakan dan proses degradasi fotokatalitik dimulai. Kurva degradasi fotokatalitik asetaldehida dapat dilihat pada gambar 4.11 di bawah ini.



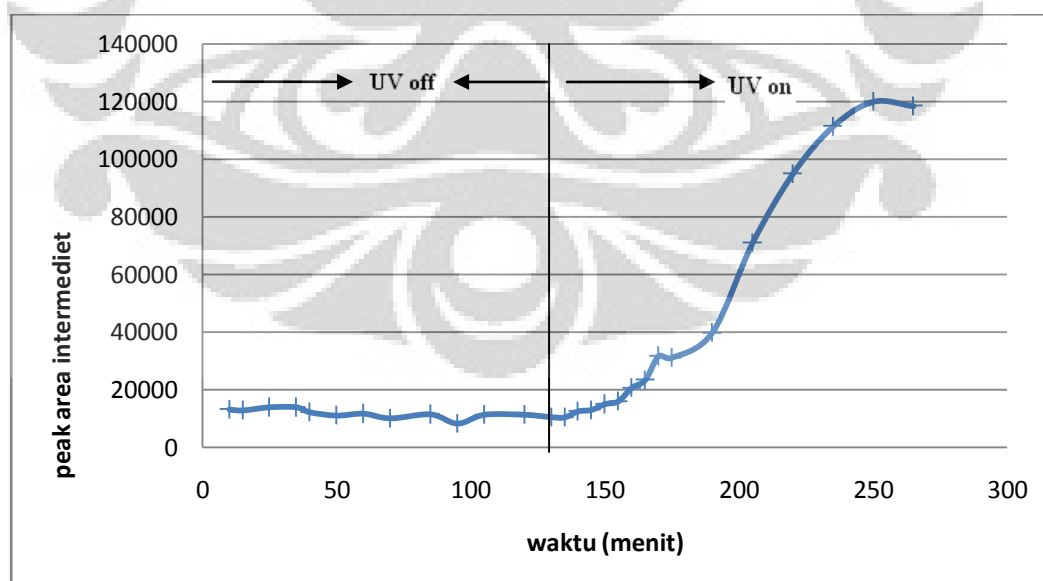
Gambar 4.12. Degradasi asetaldehida dengan katalis TiO_2 -karbon aktif

Gambar di atas menunjukkan bahwa proses degradasi fotokatalitik asetaldehida tidak terlalu menunjukkan dominasi proses bila dibandingkan dengan adsorpsinya. Dari gambar dapat dilihat bahwa aktivitas fotokatalisis hanya tampak pada 30 menit pertama dengan penurunan konsentrasi asetaldehida sekitar 45% dari konsentrasi awal asetaldehida tepat sebelum lampu UV dinyalakan. Proses fotodegradasi asetaldehida berlangsung dengan laju yang rendah. Hal ini dikarenakan terbentuknya senyawa intermediet selama proses degradasi seperti yang dijelaskan oleh Liu Jian-Hua (2006). Karena alasan ini pula, perhitungan konversi asetaldehida tidak bisa diwakili dengan jumlah pembentukan CO_2 .

Dalam penelitian ini, didapatkan juga sebuah peak yang konstan pada GC selama proses blanko namun mengalami peningkatan yang sangat signifikan setelah mengalami penyinaran. Meskipun belum diketahui secara pasti, namun senyawa tersebut diduga merupakan produk intermediet dari proses oksidasi asetaldehida. Dugaan yang paling kuat adalah bahwa senyawa tersebut merupakan asam asetat menurut reaksi:



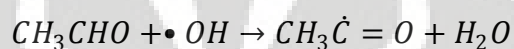
Proses terbentuknya intermediet pada proses ini ditunjukkan oleh gambar 4.13 di bawah ini.



Gambar 4.13 Kurva pembentukan intermediet pada degradasi asetaldehida

Dari gambar di atas, dapat dilihat bahwa selama uji adsorpsi sejumlah senyawa intermediet yang telah berada di dalam kotak atau di dalam larutan asetaldehida itu sendiri menunjukkan nilai yang konstan. Namun setelah penyinaran UV selama kurang lebih 100 menit, konsentrasi senyawa tersebut telah mencapai nilai sebesar 6 kali dari konsentrasi awalnya. Hal ini menunjukkan bahwa selama penyinaran proses degradasi fotokatalitik yang terjadi pada asetaldehid menghasilkan senyawa *intermediate*.

Fujishima (2000) dan Fessenden (1982) mengusulkan jalan reaksi oksidasi aldehida dengan inisiator radikal hidroksil menghasilkan senyawa intermediet:



Takeda et al. (1998) menjelaskan bahwa proses fotokatalisis heterogen terdiri dari 5 langkah esensial:

1. Reaktan berdifusi ke permukaan katalis
2. Reaktan mengalami adsorpsi kimia 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. Karena itu, ketika TiO₂ dikombinasikan dengan peyangga dengan luas permukaan yang besar seperti karbon aktif, polutan akan teradsorpsi secara selektif pada peyangga dan mengonsentrasikan polutan di sekitar TiO₂. Polutan yang teradsorpsi kemudian berdifusi ke dalam katalis dan terdekomposisi dengan laju reaksi yang tergantung dari kekuatan adsorpsinya. Setelah produk yang dihasilkan terdesorpsi, katalis mengalami regenerasi (Amjad, 2004).

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang bisa diambil dari penelitian ini adalah:

1. Untuk dapat membuat alat purifikasi udara dengan kinerja yang efektif, parameter yang harus diperhatikan adalah intensitas cahaya, luasan kontak polutan-katalis, *pressure drop*, dan turbulensi (keseragaman aliran fluida).
2. Alat purifikasi udara dari polutan asap rokok menunjukkan kinerja yang cukup baik dalam mendegradasi polutan CO dan polutan organik.
3. Degradasi CO murni dan CO yang terkandung di dalam asap rokok menghasilkan produk CO₂ dengan konversi sebesar 75-90% selama 10 menit.
4. Penggunaan karbon aktif dalam katalis komposit TiO₂-karbon aktif tidak mempengaruhi kinerja degradasi CO secara signifikan.
5. Degradasi polutan organik dengan proses fotokatalitik menghasilkan senyawa intermediet.
6. Proses yang dominan selama proses degradasi polutan organik adalah proses adsorpsi sehingga penambahan karbon aktif dalam katalis komposit TiO₂-karbon aktif memiliki pengaruh yang sangat signifikan terhadap proses degradasi polutan organik.

5.2 Saran

Hal-hal yang direkomendasikan untuk dilakukan pada penelitian berikutnya antara lain:

1. Menggunakan pyridine, nikotin dan toluena untuk model polutan asap rokok dari aspek bau sehingga alat dapat berfungsi sebagai *deodorizer* udara dari polutan asap rokok.
2. Melakukan variasi konsentrasi untuk polutan-polutan yang sudah diujikan.
3. Menggunakan jenis adsorben lain yang memiliki karakteristik berbeda dengan karbon aktif seperti zeolit.

DAFTAR PUSTAKA

- _____, (1992), “*Toxological Profile for Pyridine*”, U.S. Public Health Service.
- _____, (2000), <http://www.epa.org/co> pada tanggal 15 April 2008
- _____, (2008), http://en.wikipedia.org/wiki/activated_carbon pada tanggal 15 April 2008
- _____, (2008), <http://en.wikipedia.org/wiki/co> pada tanggal 15 April 2008
- _____, (2008), <http://en.wikipedia.org/wiki/nicotine> pada tanggal 15 April 2008
- _____, (2008), <http://en.wikipedia.org/wiki/pyridine> pada tanggal 15 April 2008
- _____, (2008), <http://www.chem-is-try.org/hplc> pada tanggal 17 Mei 2008
- Almquist, C.B., Biswas, P., (2001). The Photo-oxidation of Cyclohexane on Titanium Dioxide: An Investigation of Competitive Adsorption and Its Effects on Product Formation and Selectivity, *Applied Catal. A General*, 214, 259-271.
- Amemiya, S., (2004). Three Bond Technical News. *Titanium-Oxide Photocatalyst*, pp. 1-8.
- Amjad, H.E., Alan, P.N., Hafid, A., (2004). Deposition of anatase on the surface of activated carbon, *J. Surf Coat Technol.*, 187, 284-292.
- Anpo, M., Takeuchi, M., (2003). The design and development of highly reactive titanium oxide photocatalysts operating under visible light irradiation. *J. of Catal.*, 216, 505–516.
- Ao, C.H., Lee, C.S., Combination effect of activated carbon with TiO₂ for the photodegradation of binary pollutants at typical indoor air level., *J. of Photochem. and Photobio.*, 161, 131-140.
- Bazemore, R., Harrison, C., Greenberg, M., (2006). Identification of Components Responsible for the Odor of Cigar Smoker's Breath, *J. Agric. Food Chem.*, 54 497 -501.
- Blount, C., M., Bucholz, J., A., Falconer, L., J., (2001). Photocatalytic Decomposition of Aliphatic Alcohols, Acids, and Ester. *J. of Catal.* 197, 303-314.
- 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, 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, 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.*, 191,138–146.
- Fessenden, R., J., Fessenden, J., S., (1982). *Kimia Organik*, (edisi ketiga). Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Figuredo, J.L., Moulijn, J.A., (1986). Carbon and Coal Gasification Science Technology, *Martinus Nijhoff Publisher*, Boston.
- Fogler, H.S., (1992). *Element of Chemical Reaction Engineering*, (2nd ed.) .USA: Prentice Hall, Inc.
- Fujishima, A., Rao, T.,N., Tryk, D.,A., Titanium Dioxide Photocatalysis, *J. of Photochem. and Photobio.*, 1-21.
- Gunlazuardi, J., (2001). Fotokatalisis pada permukaan TiO₂ : Aspek Fundamental dan Aplikasinya, Prosiding Seminar Nasional Kimia Fisika II, Jakarta.
- Hayman, J.J., (2007). Photocatalytic Air Treatment Sistem and Method, *US Application Publication*, Pub. No. US 2007/0251812 A1
- 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, 891-898.
- 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, 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., 650-655.

- Linsebigler, A.L., (1995). Photocatalysis on TiO₂ surfaces : Principles, Mechanism, and Selected Results, *Chem. Rev.*, 95, 735-758.
- Litter, M.I, Navio, J.A., (1996). Photocatalytic properties of iron-doped titania semiconductors”, *J. of Photochem. and Photobiology A: Chemistry*, 98, 171–181.
- Liu Jian-Hua, Yang R., Li Song-Mei., Preparation and Application of Efficient TiO₂/ACFs Photocatalyst, *J. of Envi. Sci*, 5, 979-982
- Maron, S.H., Lando, J. (1965). *Fundamental of Physical Chemistry* (3rd ed). London: Macmillan Publishing Co. Inc.
- 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, 225-252.
- Othmer, K., (1994). *Encyclopedia of Chemical Technology* (vol. 25). 4th ed. Singapore: 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, 1568-1569.
- Pillai, R., U., and Sahle-Demessie, E., (2002). Selective Oxidation of Alcohols in Gas Phase Using Light-Activated Titanium Dioxide, *J. of Catal.* 211, 434-444.
- Puma, G.L., Yue, P L., (2001), The modeling of a fountain photocatalytic reactor with a parabolic profile, *Science Direct*, 721-726.
- Richardson, James T. 1989. *Principles of Catalyst Development*. New York: Plenum Press
- Ruthven, D.M., *Principles of Adsorption and Adsorption Process*, Singapore: Willey-Interscience Publication.
- Sampath, S., Uchida, H., dan Yoneyama, H., (1994). Photocatalytic Degradation of Gaseous Pyridine over Zeolite-Supported Titanium Dioxide, *J. of Catal.*, 149, 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), 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 1.1. Kirkland., (1980). *Introduction to Modern Liquid Chromatography* (2nd ed). Nw York: John Willey and Sons.
- Sutarti, M., (1994), “ Zeolit Tinjauan Litelatur”, Pusat Dokumentasi dan Informasi Ilmiah LIPI Jakarta
- Takeda, N., Iwata, N., Torimoto, T. et.al., (1998). Influence of carbon black as an adsorbent used in TiO₂ photocatalyst films on photodegradation behaviors of propyzamide, *J. of Catal.*, 177, 255-263.
- 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, 81-91.
- Torimoto, T., Ito, S., Kuwabata, S., dan Yoneyama, H., (1996). Effects of Adsorbent Used as Supports for Titanium Dioxide Loading on Photocatalytic Degradation of Propyzamide, *Environ. Sci. Technol.*, 30, 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, 416-419.
- Yamashita, H., Kawasaki, S., Ichihashi, Y., Harada, M., Takeuchi, M., Anpo, M., Stewart, G., Fox, M.A., Louis, C., Che, M., (1998). “Characterization of Titanium- Silicon Binary Oxide Catalysts Prepared by the Sol-Gel Method and Their Photocatalytic Reactivity for the Liquid-Phase Oxidation of 1-Octanol“, *J. Phys. Chem. B.*, 102, 870-875.
- Yang, R.T. (1987). *Gas separation by adsorption processes*. Stoneham: Butterworth Publisher.
- 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, 1253 – 1257

Youji Li, Xiaodong Li, Junwen Li, Jing Yin, Photocatalytic degradation of methyl orange in a spranged tube with TiO₂-coated activated carbon composites, *Catalysis communication*, 6, 650-655

Yu, R., Wu, Lin, S., Talbot, P., (2006), Cigarette Smoke Toxicants Alter Growth and Survival of Cultured Mammalian Cells, *Toxilogical Science*, 93, 82–95.

