



UNIVERSITAS INDONESIA

**DEGRADASI POLUTAN UDARA RUANGAN
MENGUNAKAN LAMPU HIAS DENGAN PENUTUP
BERLAPIS KATALIS TiO_2 TERMODIFIKASI**

SKRIPSI

**WINDA JAYANTHI SARAGIH
0706270131**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**DEGRADASI POLUTAN UDARA RUANGAN
MENGUNAKAN LAMPU HIAS DENGAN PENUTUP
BERLAPIS KATALIS TiO_2 TERMODIFIKASI**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

WINDA JAYANTHI SARAGIH

0706270131

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Winda Jayanthi Saragih

NPM : 0706270131

Tanda Tangan : 

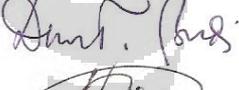
Tanggal : 28 Juni 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Winda Jayanthi Saragih
NPM : 0706270131
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Degradasi Polutan Udara Ruangan Menggunakan Lampu Hias dengan Penutup Berlapis Katalis TiO₂ Termodifikasi

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 : Prof. Dr. Ir. Slamet, MT. ()
Penguji : Ir. Dewi Tristantini, MT., PhD ()
Penguji : Bambang Herususanto, ST., MT. ()
Penguji : Dra. Ridhawati Syam, M.S. DA&E ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 28 Juni 2011

KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH

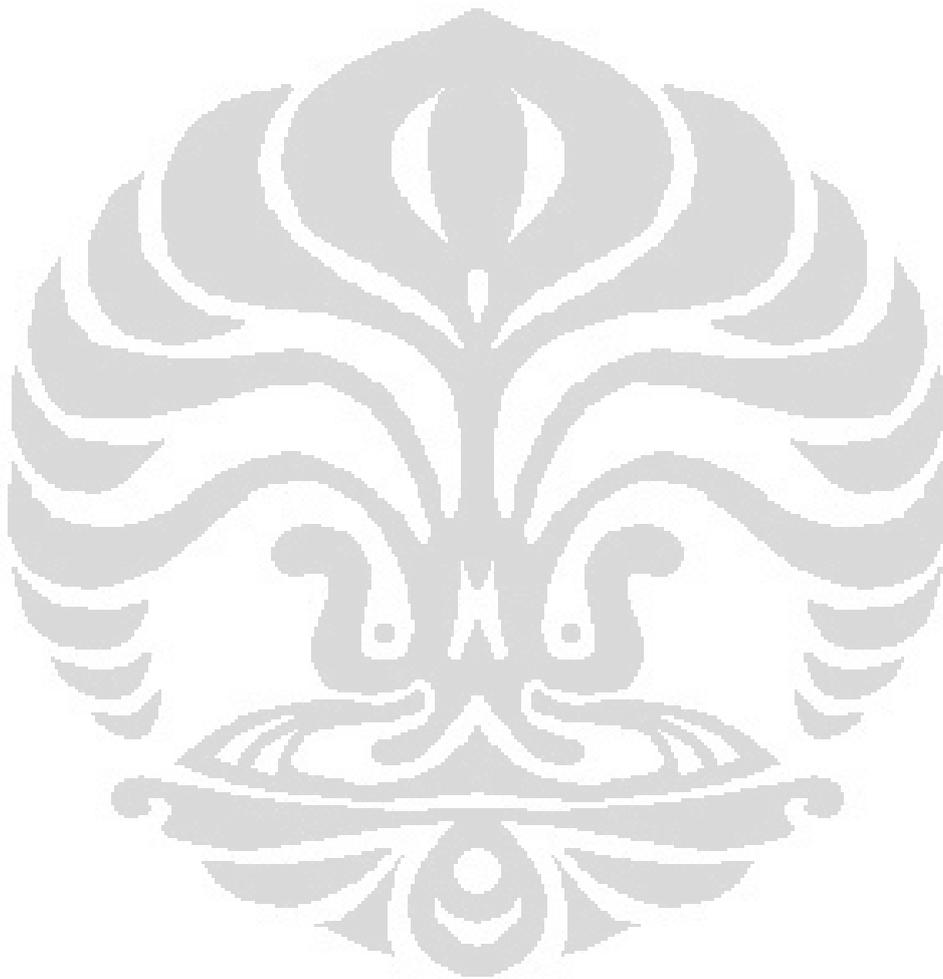
Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Departemen Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Bapak Prof. Dr. Ir. Slamet, MT. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia;
- (3) Bapak Ir. Yuliusman, M. Eng selaku Koordinator Skripsi Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia;
- (4) Bapak Dr. Heri Hermansyah, S.T., M. Eng selaku pembimbing akademis;
- (5) Kang Jajat, Mang Ijal, dan Mas Eko yang sudah banyak memberikan bantuan dalam hal teknis selama penelitian di laboratorium;
- (6) Orang tua dan keluarga yang telah memberikan bantuan moral dan material;
- (7) Sahabat-sahabatku, Kiki Mutiara dan Novita Debora, yang selalu memberikan dukungan moral dan hiburan di saat-saat tersulit;
- (8) Edi, Ikha, Valentina, dan Angela sebagai rekan penelitian fotokatalisis yang sudah banyak membantu dalam berbagi informasi, diskusi, dan pencarian sumber-sumber referensi;
- (9) Ayuko, Muthia, Suci, Eka, Wilda Y. P., Ani, Zay, Ryan, dan Gondang sebagai rekan penelitian di laboratorium RPKA yang sudah banyak membantu dan memberikan dukungan moral selama penelitian; dan
- (10) Dhinda, Sukma, Dedek (Rizki Fitria), Wilda N. P., dan Alien, yang telah banyak memberikan bantuan teknis dalam penyelesaian penelitian;

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

Depok, Juni 2011

Penulis



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

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

Nama : Winda Jayanthi Saragih
NPM : 0706270131
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

**Degradasi Polutan Udara Ruangan Menggunakan Lampu Hias dengan
Penutup Berlapis Katalis TiO₂ Termodifikasi**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 28 Juni 2011

Yang menyatakan



(Winda Jayanthi Saragih)

ABSTRAK

Nama : Winda Jayanthi Saragih
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Degradasi Polutan Udara Ruangan Menggunakan Lampu Hias dengan Penutup Berlapis Katalis TiO₂ Termodifikasi

Modifikasi terhadap lampu hias dengan melapiskan katalis TiO₂ termodifikasi ke penutup lampu yang terbuat dari bahan kain katun untuk mendegradasi polutan udara ruangan yang dimodelkan oleh CO dari asap rokok dan formaldehida telah dilakukan. Hasil uji kinerja degradasi menunjukkan hasil bahwa CO dapat terkonversi sebesar 24% dan formaldehida sebesar 38% dalam waktu 180 menit dengan konsentrasi awal polutan tertentu. Katalis TiO₂ yang dimodifikasi dengan penambahan TEOS dan urea mampu memiliki kinerja degradasi polutan di bawah sinar tampak.

Kata kunci:
sinar tampak, TiO₂, TEOS, urea, fotokatalis, asap rokok, formaldehida

ABSTRACT

Name : Winda Jayanthi Saragih
Study Programme : Chemical Engineering
Title : Indoor Pollutants Degradation Using Decorative Lamp with Lampshade Coated Modified TiO₂ Catalyst

Modification of decorative lamp with lampshade coated modified TiO₂ catalyst to degrade indoor pollutants which are modeled with CO from cigarette smoke and formaldehyde have been conducted. The degradation test results showed that CO can be converted by 24% and 38% formaldehyde in 180 minutes with certain initial concentration. TiO₂ catalyst which modified with addition of TEOS and urea could degrade pollutants under visible light.

Key words:
visible light, TiO₂, TEOS, urea, photocatalyst, cigarette smoke, formaldehyde

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR/UCAPAN TERIMA KASIH	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vii
ABSTRAK	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Sistematika Penulisan.....	4
2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Polutan Udara Ruangan.....	6
2.1.1. Formaldehida.....	6
2.1.2. Karbon monoksida	7
2.2. Proses Fotokatalitik	9
2.3. Fotokatalis TiO ₂	11
2.4. Penambahan Dopan N dan SiO ₂	12
2.5. Metode Sol-Gel	14
2.6. Karakterisasi Katalis.....	17
2.6.1. Difraksi X-Ray (XRD).....	17
2.6.2. Scanning Electron Microscopy (SEM)	18
2.6.3. Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS).....	20
2.7. Penelusuran Paten (Air Purification Wall Pub. No. US 7,582,256 (Laurent, 2009))	21
3. METODE PENELITIAN	22
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	22
3.2. Pembuatan Lampu Hias.....	23
3.3. Peralatan Penelitian	23
3.3.1. Peralatan Preparasi dan Pelapisan Katalis.....	23
3.3.2. Peralatan Pembuatan Lampu Hias	24
3.3.3. Peralatan Uji Kinerja Lampu Hias	24
3.4. Bahan Penelitian.....	25
3.4.1. Bahan Preparasi dan Pelapisan Katalis	25
3.4.2. Bahan Uji Kinerja Lampu Hias.....	26
3.5. Prosedur Penelitian.....	26
3.5.1. Prosedur Preparasi Katalis	26
3.5.2. Prosedur Pelapisan Katalis.....	27
3.5.3. Prosedur Pembuatan Lampu Hias dan Uji Kinerja Lampu Hias.....	28
3.5.4. Analisis Polutan Terdegradasi.....	29
3.6. Variabel Penelitian	30

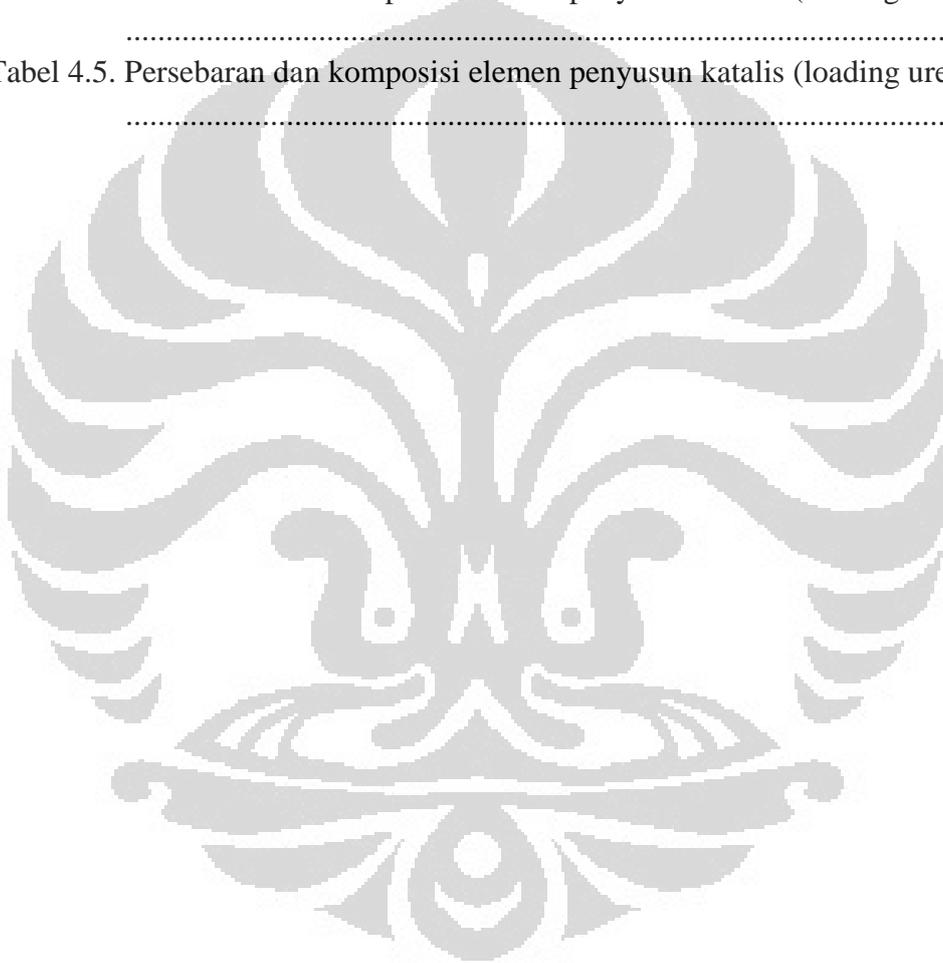
3.6.1.	Variabel Bebas	30
3.6.2.	Variabel Terikat	30
3.6.3.	Variabel Tetap	30
3.7.	Data Penelitian dan Cara Pengambilan Data	30
3.8.	Pengolahan Data Penelitian	31
4.	HASIL DAN PEMBAHASAN	32
4.1.	Karakterisasi Katalis	32
4.1.1.	Karakterisasi DRS	32
4.1.2.	Karakterisasi EDX	34
4.1.3.	Karakterisasi SEM	37
4.1.4.	Karakterisasi XRD	38
4.2.	Konfigurasi Lampu Hias Pendegradasi Polutan	39
4.3.	Uji Kinerja Degradasi Polutan	40
4.3.1.	Uji Kinerja pada Gas CO (Asap Rokok)	41
4.3.2.	Uji Degradasi Formaldehida	44
5.	KESIMPULAN DAN SARAN	48
5.1.	Kesimpulan	48
5.2.	Saran	48
	DAFTAR REFERENSI	49
	Lampiran A: Dokumentasi Penelitian	52
	Lampiran B: Perhitungan Band Gap Energy Katalis	54
	Lampiran C: Kalibrasi Konsentrasi Formaldehida	56
	Lampiran D: Hasil Karakterisasi EDX	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Ilustrasi proses fotokatalisis (Colmenares, 2009)	9
Gambar 2.2. Perspektif struktur kristal TiO ₂ (a) anatase; (b) rutil (Licciulli, 2002)	11
Gambar 2.3. Gambar daerah energi pada semikonduktor (Amemiya, 2004)	12
Gambar 2.4. Diagram alat difraksi sinar-X.....	17
Gambar 2.5. Skema diagram <i>Scanning Electron Microscope</i> (www.purdue.edu) 19	
Gambar 2.6. Skema alat Air Purification Wall (Laurent, 2009)	21
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.....	22
Gambar 3.2. Lampu hias dengan penutup lampu yang dilapisi katalis.....	23
Gambar 3.3. Diagram alir preparasi katalis	27
Gambar 3.4. Diagram alir pelapisan katalis	28
Gambar 4.1. Absorbansi katalis TiO ₂ termodifikasi dengan variasi loading urea	33
Gambar 4.2. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 15%	35
Gambar 4.3. Hasil SEM pada permukaan kain katun berlapis katalis	37
Gambar 4.4. Pola hasil XRD (a) TiO ₂ termodifikasi loading urea 15%;.....	38
Gambar 4.5. Degradasi gas CO menggunakan katalis TiO ₂	41
Gambar 4.6. Penurunan konsentrasi gas CO di bawah sinar tampak.....	42
Gambar 4.7. Persentase kemampuan konversi gas CO.....	43
Gambar 4.8. Degradasi formaldehida menggunakan katalis TiO ₂	45
Gambar 4.9. Degradasi formaldehida di bawah sinar tampak	45
Gambar 4.10. Persentase kemampuan degradasi gas formaldehida	46

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Perbandingan beberapa metode preparasi katalis	14
Tabel 4.1. Nilai <i>bandgap energy</i> TiO ₂ termodifikasi dengan berbagai variasi loading urea	34
Tabel 4.2. Persebaran dan komposisi elemen penyusun katalis (loading urea 0%)	35
Tabel 4.3. Persebaran dan komposisi elemen penyusun katalis (loading urea 5%)	36
Tabel 4.4. Persebaran dan komposisi elemen penyusun katalis (loading urea 10%)	36
Tabel 4.5. Persebaran dan komposisi elemen penyusun katalis (loading urea 15%)	36



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A.1. Katalis TiO ₂ termodifikasi dengan variasi loading urea 0%, 5%, 10%, 15%	52
Lampiran A.2. Pengujian degradasi polutan di dalam kotak uji	52
Lampiran A.3. <i>Portable gas analyzer</i> tipe TPI 708 yang digunakan untuk analisis gas CO	53
Lampiran A.4. GC FID dan recorder yang digunakan untuk analisis formaldehida	53
Lampiran B.1. Grafik perhitungan <i>bandgap energy</i> katalis TiO ₂ termodifikasi (loading urea 0%)	54
Lampiran B.2. Grafik perhitungan <i>bandgap energy</i> katalis TiO ₂ termodifikasi (loading urea 5%)	54
Lampiran B.3. Grafik perhitungan <i>bandgap energy</i> katalis TiO ₂ termodifikasi (loading urea 10%)	55
Lampiran B.4. Grafik perhitungan <i>bandgap energy</i> katalis TiO ₂ termodifikasi (loading urea 15%)	55
Lampiran C.1. Tabel kalibrasi data peak area formaldehida menjadi konsentrasi (ppm)	56
Lampiran D.1. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 0% (area 1).....	57
Lampiran D.2. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 0% (area 2)	57
Lampiran D.3. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 0% (area 3)	58
Lampiran D.4. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 5% (area 1)	58
Lampiran D.5. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 5% (area 2)	59
Lampiran D.6. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 5% (area 3)	59
Lampiran D.7. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 10% (area 1)	60
Lampiran D.8. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 10% (area 2)	60
Lampiran D.9. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 10% (area 3)	61
Lampiran D.10. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 15% (area 1)	61
Lampiran D.11. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 15% (area 2)	62
Lampiran D.12. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 15% (area 3)	62

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Udara merupakan kebutuhan penting dalam hidup manusia. Kualitas udara yang baik sudah menjadi perhatian banyak orang sejak beberapa dekade terakhir. Namun, dewasa ini tingkat pencemaran udara oleh manusia justru semakin meningkat. Aktivitas manusia di bidang industri, transportasi, perkantoran, bahkan di perumahan memberikan kontribusi besar terhadap pencemaran udara. Akibatnya, udara yang dihirup oleh manusia banyak yang sudah tercemar dengan zat-zat beracun dan berbahaya bagi kesehatan.

Salah satu permasalahan di dalam pencemaran udara adalah bahwa konsentrasi polutan lebih banyak terdapat di dalam rumah (*indoor*) daripada di luar ruangan (*Department of Health Minnesota, 2009*). Jika di dalam rumah tidak terdapat sirkulasi udara yang baik, maka polutan yang dihasilkan oleh aktivitas manusia di dalam ruangan akan terus terperangkap di dalam rumah (ruangan). Padahal, hampir 90% hidup manusia dihabiskan di dalam ruangan (*Susanna, 2008*). Hal ini tentu menyebabkan udara yang dihirup di dalam ruangan tidak memiliki kualitas yang baik.

Polutan udara ruangan dapat diemisikan oleh berbagai produk yang digunakan atau kegiatan yang dilakukan di dalam rumah seperti produk pembersih lantai, pembersih karpet, bahan-bahan kosmetik, cat, asap rokok, dan asap dapur. Jika terpapar oleh polutan tersebut dan mencapai konsentrasi tertentu, maka polutan tersebut akan bersifat karsinogenik bagi tubuh manusia yang dapat menyebabkan penyakit seperti infeksi saluran pernapasan, iritasi, pusing, gangguan pencernaan, bahkan dapat memicu pertumbuhan kanker dan menyebabkan kematian. Oleh karena itu, permasalahan polusi udara di dalam ruangan merupakan salah satu permasalahan penting di dalam kehidupan manusia dan perlu ditangani secara khusus.

Untuk mengatasi permasalahan pencemaran udara tersebut, sudah banyak diterapkan berbagai teknologi untuk mengurangi tingkat polusi di dalam udara ruangan. Salah satu teknologi yang berpotensi besar dalam menanggulangi

permasalahan tersebut adalah teknologi fotokatalisis. Aplikasi teknologi fotokatalisis sudah banyak dikembangkan sejak beberapa tahun terakhir. Selain untuk purifikasi udara, aplikasinya sudah banyak diterapkan pada pengolahan limbah, purifikasi air, swa-bersih, anti kabut, dan disinfeksi bakteri. Salah satu cara degradasi polutan yang kini banyak dikembangkan adalah dengan menggunakan semikonduktor TiO_2 . Semikonduktor TiO_2 merupakan semikonduktor yang banyak digunakan sebagai fotokatalis dalam proses fotokatalisis karena keunggulannya dibandingkan dengan semikonduktor-semikonduktor yang lain (Slamet, 2009).

Aplikasi teknologi fotokatalisis sebagai purifikasi udara sangat menjanjikan untuk dikembangkan. Tidak seperti metode tradisional dalam purifikasi udara seperti proses adsorpsi yang hanya mengubah polutan fasa gas menjadi fasa solid, proses fotokatalisis dapat mengubah polutan menjadi CO_2 dan H_2O yang lebih aman bagi kesehatan (Ao, 2004). Beberapa penelitian mengenai teknologi fotokatalis untuk purifikasi udara telah dilakukan sebelumnya seperti yang telah dilakukan oleh Yuan (2006). Penelitian ini dilakukan dengan mengaplikasikan TiO_2 pada bahan keramik di dalam sebuah reaktor dan ke dalam reaktor dialirkan gas formaldehida dengan kecepatan yang berbeda-beda dan hasil pengujian diperoleh degradasi formaldehida mencapai di atas 90% untuk gas formaldehida yang statis.

Proses fotokatalisis menggunakan katalis TiO_2 hanya dapat aktif jika diradiasi dengan sinar UV. Hal ini menjadi masalah ketika aplikasinya digunakan pada proses degradasi polutan di dalam udara ruangan dimana sumber sinar UV sangat kecil sekali. Untuk menutupi kekurangan tersebut, maka katalis TiO_2 didopan dengan ion non-logam untuk menghasilkan katalis yang dapat aktif di bawah sinar tampak (Asahi, 2001; Huang, 2007). Banyak publikasi telah menunjukkan dengan adanya dopan non-logam seperti nitrogen, karbon, dan sulfur dapat menghasilkan fotokatalis yang aktif di bawah sinar tampak. Di antara semua dopan non-logam tersebut, nitrogen merupakan dopan yang paling baik dalam menghasilkan aktivitas fotokatalis yang aktif di bawah sinar tampak (Huang, 2007; Zhang, 2010).

Penambahan oksida logam kedua seperti SiO_2 , ZrO_2 , atau Al_2O_3 , dan lain-lain juga ditemukan sebagai cara yang efektif untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik dan stabilitas termal dari TiO_2 . Dari semua oksida logam tersebut, SiO_2 adalah material yang paling banyak diteliti dan terbukti bahwa dengan penambahan SiO_2 , aktivitas fotokatalitik menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan TiO_2 murni (Thi, 2010). Penambahan oksida logam SiO_2 ke dalam TiO_2 juga meningkatkan stabilitas termal pada transformasi fasa partikel TiO_2 dari anatase menjadi rutil (Duy, 2010).

Pada penelitian ini, dilakukan modifikasi katalis TiO_2 dengan melakukan penambahan urea dan TEOS yang diharapkan sebagai sumber dopan N dan SiO_2 . Aplikasi fotokatalisis dilakukan dengan melapiskan katalis pada penutup lampu yang akan dipasang pada lampu hias untuk mendegradasi polutan udara ruangan. Katalis TiO_2 yang sudah dimodifikasi dilapiskan ke permukaan penutup lampu yang terbuat dari kain katun. Alasan pemilihan lampu hias digunakan sebagai media dalam aplikasi fotokatalisis ini adalah karena selama ini lampu hias hanya digunakan sebagai alat penerangan dan tujuan dekoratif saja, sedangkan jika diterapkan teknologi fotokatalisis maka nilai manfaat dari lampu ini dapat ditingkatkan. Selain itu, lampu merupakan salah satu barang kebutuhan masyarakat sehingga ketersediaannya banyak di pasaran.

Dengan penelitian yang akan dilakukan, diharapkan dapat dihasilkan sebuah lampu hias yang dapat membersihkan udara di dalam ruangan sehingga dihasilkan udara keluar yang lebih bersih dan aman bagi kesehatan. Walaupun tidak dapat menanggulangi masalah pencemaran udara, tetapi diharapkan alat ini dapat mengurangi kadar polutan yang masuk ke dalam tubuh manusia melalui udara di dalam ruangan.

1.2. Perumusan Masalah

Hal yang menjadi fokus utama di dalam penelitian ini adalah bagaimana membuat lampu hias yang berlapis katalis TiO_2 termodifikasi pada penutup lampunya untuk mendegradasi polutan udara ruangan serta menentukan kinerja optimum dari katalis tersebut dalam mendegradasi polutan.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan sebuah lampu hias dengan penutup lampu dari bahan kain katun yang berlapis katalis TiO_2 termodifikasi sehingga memiliki fungsi pendegradasi polutan udara ruangan serta aktif di bawah sinar tampak.

Adapun tujuan khusus dari penelitian ini adalah:

1. Melihat kinerja katalis TiO_2 termodifikasi terhadap degradasi polutan udara ruangan yang dimodelkan dengan CO dan formaldehida.
2. Melihat pengaruh penambahan urea dengan beberapa variasi loading terhadap kinerja degradasi katalis di bawah sinar tampak.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. TiO_2 yang digunakan adalah TiO_2 Degussa P-25.
2. Urea digunakan sebagai sumber nitrogen dan TEOS sebagai sumber SiO_2 .
3. Katalis dipreparasi dengan menggunakan metode sol-gel.
4. Uji degradasi polutan dilakukan di dalam kotak uji aktivitas.
5. Polutan yang digunakan dalam penelitian adalah gas formaldehida dan gas CO yang berasal dari asap rokok.
6. Bahan yang dilapisi adalah penutup lampu yang terbuat dari bahan kain katun.
7. Metode pelapisan fotokatalis adalah dengan *spray coating*.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan pada makalah ini adalah:

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan tinjauan pustaka yang menjadi dasar penelitian meliputi prinsip dasar fotokatalisis, fotokatalis TiO_2 ,

penambahan dopan N, penambahan oksida logam SiO₂, polutan udara ruangan, formaldehida, karbon monoksida, metode sol-gel, karakterisasi katalis, serta penelusuran paten yang terkait.

BAB 3 METODE PENELITIAN

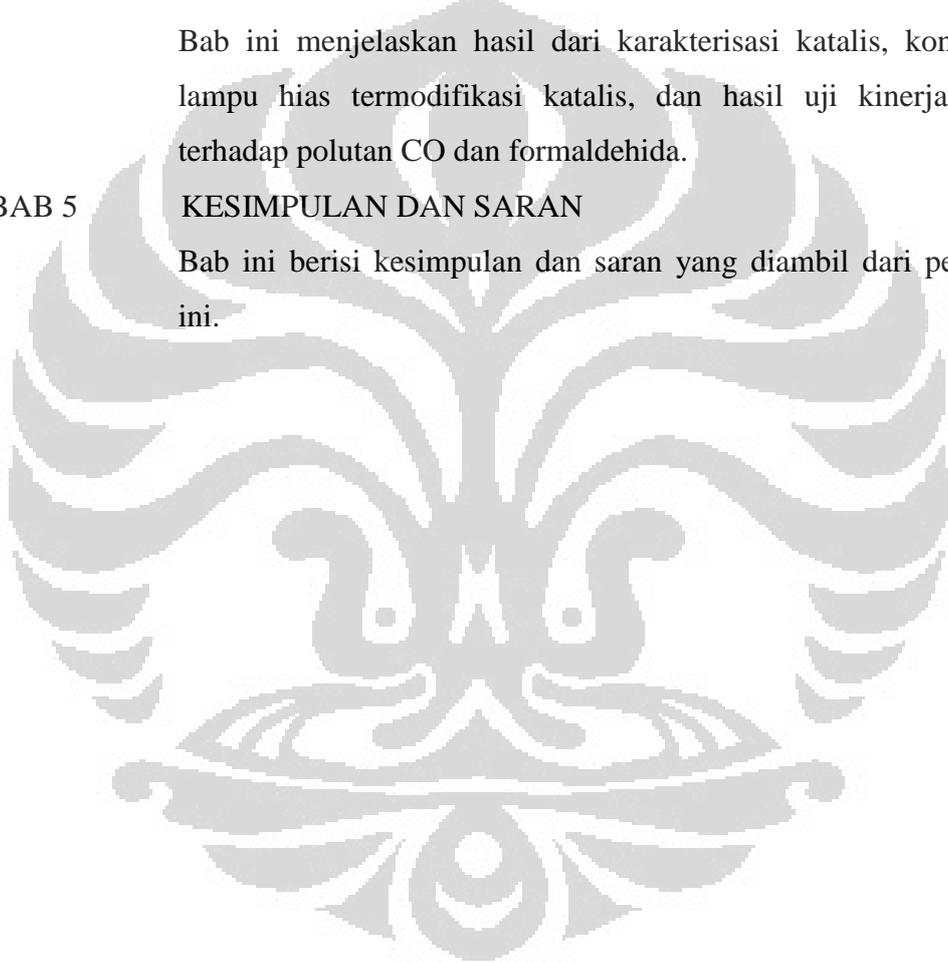
Bab ini menjelaskan diagram alir penelitian, modifikasi lampu hias, peralatan percobaan, bahan percobaan, prosedur yang dilakukan dalam penelitian, pengambilan data, dan analisis data.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan hasil dari karakterisasi katalis, konfigurasi lampu hias termodifikasi katalis, dan hasil uji kinerja katalis terhadap polutan CO dan formaldehida.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dan saran yang diambil dari penelitian ini.



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Polutan Udara Ruangan

Kualitas udara dalam ruangan (*indoor air quality*) merupakan masalah yang perlu mendapat perhatian karena akan berpengaruh terhadap kesehatan manusia. Timbulnya kualitas udara dalam ruangan yang buruk umumnya disebabkan oleh beberapa hal, yaitu kurangnya ventilasi udara (52%), adanya sumber kontaminasi di dalam ruangan (16%), kontaminasi dari luar ruangan (10%), mikroba (5%), bahan material bangunan (4%), dan lain-lain (13%) (Departemen Kesehatan Republik Indonesia, 2010).

Keberadaan polutan di dalam udara ruangan dapat menyebabkan gangguan pada kesehatan baik dalam jangka panjang atau jangka pendek. Sumber pencemaran udara dapat berasal dari aktifitas rumah tangga dari dapur, asap rokok, penggunaan cat, produk-produk pembersih, pestisida, bahan-bahan bangunan, mesin fotokopi, printer, lem, dan lain-lain.

Gangguan kesehatan yang dapat disebabkan oleh polutan tersebut adalah infeksi saluran pernapasan akut (ISPA), iritasi mata, hidung, dan tenggorokan, sakit kepala, kehilangan kemampuan koordinasi tubuh, mual, kerusakan liver, ginjal, dan sistem pusat saraf. Beberapa senyawa dapat menyebabkan kanker pada binatang dan beberapa diketahui menyebabkan kanker pada manusia.

2.1.1. Formaldehida

Formaldehida adalah salah satu *volatile organic compounds* yang sangat berbahaya. Formaldehida memiliki titik didih -21°C , mempunyai bau asam yang sangat kuat, mudah terbakar, dan sangat sensitif terhadap udara dan cahaya serta larut di dalam air. Gas formaldehida ini bersifat karsinogenik.

Saat ini masyarakat menggunakan formaldehida sebagai bahan pengawet. Produk formaldehida komersial yang terdapat di pasaran memiliki kandungan yang tidak sampai 100%, yaitu sekitar 37% formaldehida dan 10% methanol.

Dalam kehidupan sehari-hari, formaldehida sering digunakan sebagai bahan pengawet dan sebagai disinfektan karena dapat membunuh sebagian besar

bakteri. Formaldehida yang dikenal juga dengan nama formalin dimanfaatkan sebagai pembersih lantai untuk membasmi bakteri. Selain terdapat pada produk pembersih lantai, formaldehida juga dapat ditemukan pada asap pembakaran tembakau.

Produk-produk yang mengandung formaldehida sudah luas digunakan oleh masyarakat. Selain untuk membasmi bakteri, penggunaan formaldehida juga terdapat pada produk-produk lain. Umumnya formaldehida tersebut digunakan sebagai bahan pembuatan atau bahan campuran pada produk-produk yang digunakan oleh rumah tangga. Penggunaan formaldehida tersebut dapat ditemukan pada produk-produk seperti pembasmi lalat atau serangga, bahan pembuatan parfum, bahan pengawet produk kosmetik dan pengeras kuku, cairan pencuci piring, pelembut kulit, perawatan sepatu, dan pembersih karpet.

Produk-produk yang telah disebutkan di atas berpotensi untuk mengemisikan polutan organik formaldehida (gas) pada udara di dalam ruangan. Formaldehida dalam bentuk gas bersifat karsinogenik dan berbahaya bagi tubuh jika terhirup pada konsentrasi tertentu. Jika terpapar oleh formaldehida dalam konsentrasi yang kecil dapat menyebabkan iritasi yang menyebabkan keluarnya air mata, pusing, tenggorokan terasa terbakar, dan kegerahan. Sedangkan jika terpapar formaldehida dalam konsentrasi yang tinggi dapat menyebabkan kematian. Di dalam tubuh, formaldehida diubah menjadi asam format yang dapat meningkatkan keasaman darah dan menyebabkan tarikan nafas menjadi pendek dan sering, hipotermia, koma, dan menyebabkan kematian (*An Introduction to Indoor Air Quality*, 1997).

2.1.2. Karbon monoksida

Karbon monoksida, dengan rumus kimia CO, merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa. Sumber CO dari dalam ruang (*indoor*) dapat merupakan hasil aktifitas memasak yang menghasilkan asap. Selain itu asap rokok juga mengandung CO. Kadar CO akan lebih tinggi bila ruangan tempat alat masak tersebut bekerja tidak memadai ventilasinya. Namun umumnya pemaparan yang berasal dari kegiatan memasak dalam ruangan kadarnya lebih kecil

dibandingkan dari kadar CO hasil pemaparan asap rokok (Departemen Kesehatan Republik Indonesia, 2010).

Karakteristik biologik yang paling penting dari CO adalah kemampuannya untuk berikatan dengan haemoglobin, pigmen sel darah merah yang mengangkut oksigen keseluruh tubuh. Sifat ini menghasilkan pembentukan karboksahaemoglobin (HbCO) yang 200 kali lebih stabil dibandingkan oksihemoglobin (HbO₂). Penguraian HbCO yang relatif lambat menyebabkan terhambatnya kerja molekul sel pigmen tersebut dalam fungsinya membawa oksigen keseluruh tubuh. Kondisi seperti ini bisa berakibat serius, bahkan fatal, karena dapat menyebabkan keracunan. Selain itu, metabolisme otot dan fungsi enzim intra-seluler juga dapat terganggu dengan adanya ikatan CO yang stabil tersebut. Dampak keracunan CO sangat berbahaya bagi orang yang telah menderita gangguan pada otot jantung atau sirkulasi darah perifer yang parah.

Beberapa studi yang dilakukan terhadap sejumlah sukarelawan berbadan sehat yang melakukan latihan berat (studi untuk melihat penyerapan oksigen maksimal) menunjukkan bahwa kesadaran hilang pada kadar HbCO 50%, dengan latihan yang lebih ringan, kesadaran hilang pada HbCO 70% selama 5-60 menit. Gangguan tidak dirasakan pada HbCO 33%, tetapi denyut jantung meningkat cepat dan tidak proporsional. Studi dalam jangka waktu yang lebih panjang terhadap responden yang bekerja selama 4 jam dengan kadar HbCO 5-6% menunjukkan pengaruh yang serupa terhadap denyut jantung. Hasil studi tersebut menunjukkan bahwa paling sedikit untuk para bukan perokok, ternyata ada hubungan yang linier antara HbCO dan menurunnya kapasitas maksimum oksigen (Departemen Kesehatan Republik Indonesia, 2010).

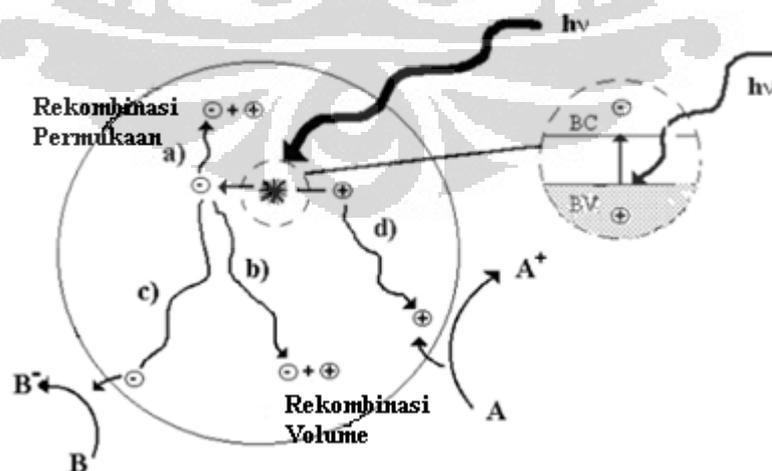
Pada penelitian ini, asap rokok digunakan sebagai model polutan untuk gas CO karena polutan ini merupakan salah satu polutan yang umum ditemukan di dalam ruangan. Selain itu, asap rokok merupakan salah satu penyumbang terbesar polutan gas CO di dalam ruangan karena konsentrasi gas CO di dalam asap rokok cukup besar.

2.2. Proses Fotokatalitik

Fotokatalisis merupakan suatu kombinasi antara proses fotokimia dan katalisis. Proses fotokimia merupakan proses transformasi secara kimiawi dengan melibatkan cahaya sebagai pemicunya, dimana dalam proses ini juga terjadi perubahan materi. Sedangkan katalis adalah suatu zat yang dapat mempengaruhi laju reaksi dengan jalan mengubah mekanisme reaksi tersebut sehingga diperoleh kembali di akhir reaksi. Katalis yang digunakan pada proses ini mempunyai kemampuan menyerap energi foton.

Pada umumnya proses fotokatalisis terbagi menjadi dua jenis, yaitu fotokatalisis homogen dan heterogen. Fotokatalisis homogen adalah proses fotokatalisis dengan bantuan zat pengoksidasi seperti ozon dan hidrogen peroksida dan terjadi pada fasa yang sama. Fotokatalisis heterogen adalah suatu teknologi yang didasarkan pada iradiasi fotokatalis semikonduktor dan terjadi antara dua fasa atau lebih. Pada tahap akhir reaksi proses fotokatalisis heterogen dihasilkan pasangan *electron-hole* di permukaan bahan semikonduktor yang diiluminasi dengan cahaya pada tingkat energi yang sesuai.

Secara garis besar, ketika katalis semikonduktor diiluminasi dengan foton yang memiliki energi yang sama atau lebih tinggi dari *bandgap energy* ($h\nu \geq E_G$), maka foton akan diabsorpsi dan terbentuk pasangan elektron (e^-) dan hole (h^+) yang akan dipisahkan menjadi fotoelektron bebas pada pita konduksi dan fotohole pada pita valensi.



Gambar 2.1. Ilustrasi proses fotokatalisis (Colmenares, 2009)

Jika suatu semikonduktor tipe n dikenai cahaya ($h\nu$) dengan energi yang sesuai, maka elektron pada pita valensi akan pindah ke pita konduksi dan meninggalkan lubang positif (hole^+ , h^+) pada pita valensi. Sebagian besar pasangan e^- dan h^+ ini akan terekombinasi kembali, baik di permukaan (jalur a) atau di dalam bulk partikel (jalur b). Sementara itu sebagian pasangan e^- dan h^+ yang bertahan sampai pada permukaan semikonduktor (jalur c dan d), dimana h^+ dapat menginisiasi reaksi oksidasi dan e^- dapat menginisiasi reaksi reduksi zat kimia yang ada di sekitar permukaan semikonduktor (Gunlazuardi, 2001).

Reaksi oksidasi pada permukaan semikonduktor dapat berlangsung melalui donasi elektron substrat ke h^+ dan menghasilkan radikal pada substrat yang akan menginisiasi reaksi berantai. Jika 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 pengoksidasi yang kuat yang memiliki potensial redoks sebesar 2,8 volt (relatif terhadap elektroda hidrogen Nerst). Potensial sebesar ini cukup kuat mengoksidasi kebanyakan polutan udara dalam konsentrasi rendah menjadi air, asam mineral dan karbon dioksida (Gunlazuardi, 2001).

Berikut adalah mekanisme aktivasi dari TiO_2 (Tseng, 2010):



Pada reaksi ini, h^+ dan e^- masing-masing adalah agen oksidasi dan reduksi yang sangat kuat. Adanya uap air di udara akan mempengaruhi aktivitas fotokatalis. Uap air tersebut merupakan sumber radikal hidroksil dari fotokatalis sehingga dapat memiliki kemampuan oksidasi yang tinggi. Molekul air dapat bertransformasi menjadi radikal hidroksil ketika bereaksi dengan h^+ atau radikal superoksida yang ada di permukaan fotokatalis sesuai dengan reaksi berikut:



Radikal hidroksil yang terbentuk oleh oksidasi dari air yang teradsorb merupakan agen oksidasi yang berperan secara dominan dalam mendegradasi polutan udara

Reaksinya dengan senyawa VOC adalah sebagai berikut:

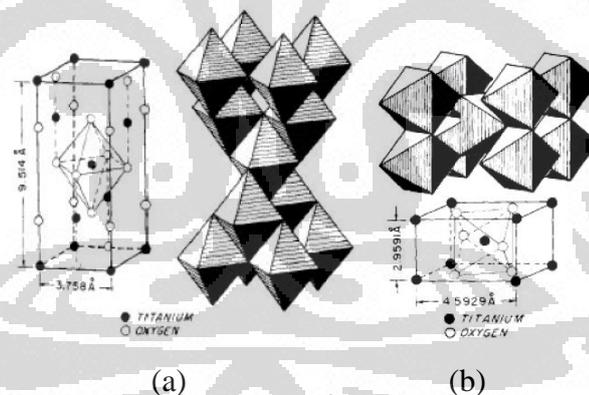


2.3. Fotokatalis TiO₂

Titanium dioksida (TiO₂) adalah material *nontoxic* dan sudah banyak diaplikasikan untuk perawatan lingkungan seperti pemurnian air dan udara, serta disinfeksi dan sterilisasi air. TiO₂ dipilih karena memiliki aktivitas fotokatalitik yang kuat, stabilitas kimia yang baik, tidak beracun, dan harganya relatif murah.

Titanium dioksida terdiri dari tiga bentuk kristal, yaitu anatase, rutil, dan brookite. Bentuk kristal ini akan mempengaruhi aktivitas TiO₂ sebagai fotokatalis. Rutil adalah tipe yang paling stabil dibanding yang lain dan terbentuk pada temperatur tinggi (mulai terbentuk pada temperatur 700°C). Tipe yang biasa digunakan sebagai fotokatalis adalah tipe anatase dan rutil karena keberadaannya cukup stabil.

Berikut adalah perspektif struktur kristal TiO₂:

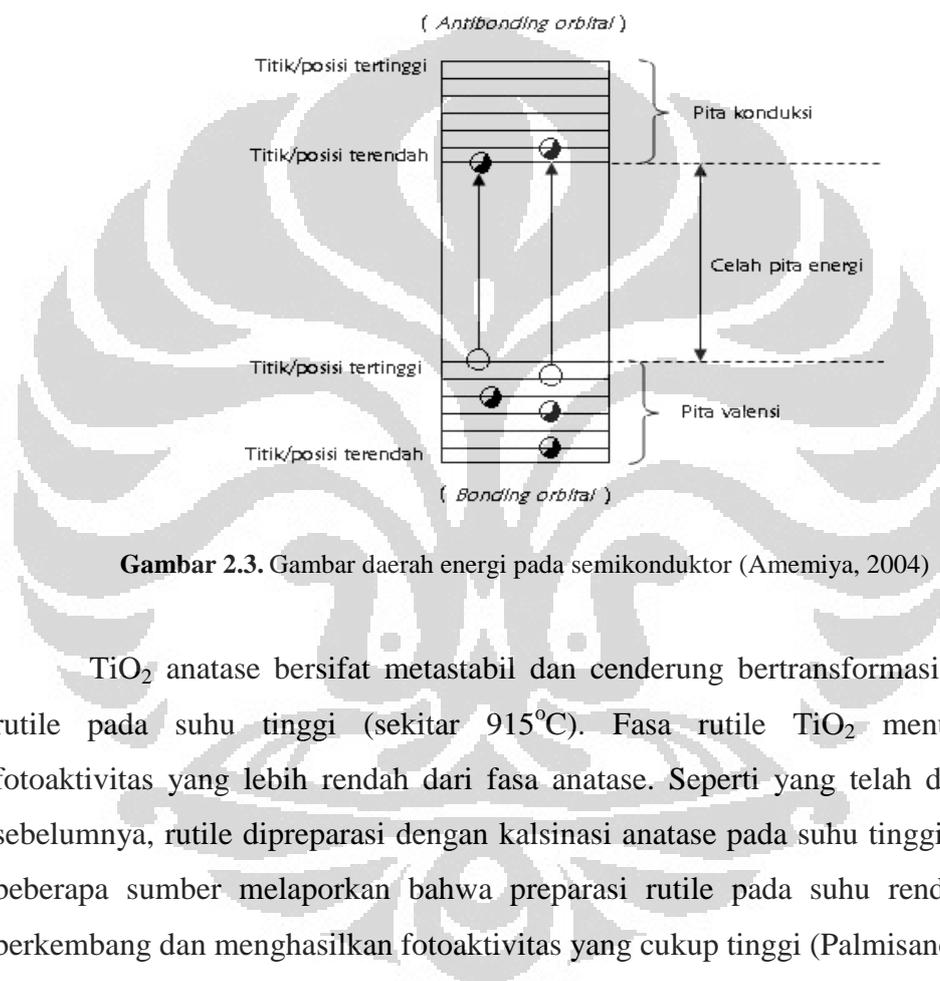


Gambar 2.2. Perspektif struktur kristal TiO₂ (a) anatase; (b) rutil (Licciulli, 2002)

Anatase merupakan tipe yang paling aktif karena memiliki *band gap* energi sebesar 3,20 eV (dekat ke sinar UV) sedangkan rutil memiliki *band gap* sebesar 3,05 eV (dekat ke sinar violet). Perbedaan ini membuat letak *conduction band* (CB) pada anatase lebih jauh daripada rutil sehingga anatase lebih mampu dalam 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 kecil

band gap, kemungkinan *hole* dan elektron untuk berekombinasi semakin besar. Sehingga kedua aspek ini perlu dipertimbangkan dalam pemilihan fasa semikonduktor TiO₂.

Anatase secara termodinamika kurang stabil daripada rutil tetapi pembentukannya yang terjadi pada temperatur <600°C membuatnya memiliki luas permukaan yang lebih besar dan densitas permukaan aktif yang lebih tinggi untuk adsorpsi dan katalisis (Slamet, 2007).



Gambar 2.3. Gambar daerah energi pada semikonduktor (Amemiya, 2004)

TiO₂ anatase bersifat metastabil dan cenderung bertransformasi menjadi rutil pada suhu tinggi (sekitar 915°C). Fasa rutil TiO₂ menunjukkan fotoaktivitas yang lebih rendah dari fasa anatase. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, rutil dipreparasi dengan kalsinasi anatase pada suhu tinggi. Namun beberapa sumber melaporkan bahwa preparasi rutil pada suhu rendah telah berkembang dan menghasilkan fotoaktivitas yang cukup tinggi (Palmisano, 2007).

2.4. Penambahan Dopan N dan SiO₂

Salah satu yang menjadi masalah dalam penggunaan fotokatalis TiO₂ adalah bahwa katalis tersebut harus diiluminasi dengan sinar UV karena *bandgap* energinya (anatase 3,2 eV, rutil 3,0 eV) yang lebih mendekati ke sinar UV sehingga hanya dapat mengabsorb cahaya UV dengan panjang gelombang 380 – 410 nm (Xing, 2009; Tseng, 2010). Hal ini menjadi permasalahan dalam

pengaplikasian dari katalis TiO_2 karena keterbatasan dalam pemanfaatan sinar matahari sebagai sumber cahaya UV atau penggunaan lampu UV dalam aplikasi TiO_2 secara praktis. Ketika dalam aplikasinya akan digunakan lampu sebagai sumber cahaya tampak dengan panjang gelombang di atas 400 nm, maka TiO_2 dengan *bandgap* energi sebesar 3,2 eV tidak dapat mengabsorb cahaya tampak sebagai sumber foton.

Peningkatan fotoaktivitas dari katalis TiO_2 dapat dilakukan dengan melakukan penambahan dopan pada katalis. Hal ini ditujukan untuk memperkecil *bandgap* dari katalis TiO_2 sehingga dapat mengabsorb cahaya tampak dengan panjang gelombang di atas 400 nm dan dapat aktif di bawah sinar tampak (Tseng, 2010; Zhang, 2010). Penambahan dopan yang sudah banyak dikembangkan adalah penambahan dopan non-logam. Dopan non-logam akan memodifikasi pita valensi sehingga *bandgap*-nya menjadi lebih pendek dan dapat mengabsorb cahaya dengan panjang gelombang di atas 400 nm. Publikasi-publikasi mengenai keuntungan menggunakan dopan non-logam seperti nitrogen, karbon, sulfur, dan boron yang dapat membuat katalis aktif pada daerah dengan panjang gelombang cahaya tampak telah banyak dilakukan. Dari semua dopan non-logam tersebut, nitrogen merupakan dopan yang paling baik menghasilkan katalis dengan aktivitas fotokatalisis yang tinggi di bawah radiasi cahaya tampak (Huang, 2007; Zhang, 2010).

Penambahan oksida logam untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik TiO_2 sudah banyak diteliti sebelumnya. Oksida logam yang sudah banyak diteliti antara lain adalah SiO_2 , ZrO_2 , Al_2O_3 , dan SnO_2 . Dari penelitian-penelitian tersebut ditemukan bahwa penambahan oksida logam tersebut merupakan sebuah cara yang efektif dalam meningkatkan aktivitas fotokatalitik dari TiO_2 murni. Dari kesemuanya, SiO_2 adalah oksida logam yang paling banyak diteliti dan sistem SiO_2 - TiO_2 menunjukkan aktivitas fotokatalitik yang lebih tinggi dari TiO_2 murni (Duy, 2010; Thi, 2010).

Adanya penambahan SiO_2 dapat meningkatkan stabilitas termal dari TiO_2 karena kehadiran SiO_2 menekan pertumbuhan kristal TiO_2 pada saat kalsinasi sehingga menghambat transformasi (perubahan) partikel TiO_2 dari fase anatase menjadi rutil (Sikong, 2010). Penambahan SiO_2 juga dapat meningkatkan luas

permukaan katalis dan volume pori-pori katalis (Duy, 2010) yang menjadi salah satu faktor meningkatnya kinerja fotokatalitik dari TiO_2 . Selain itu, aktivitas fotokatalitik yang tinggi juga diperoleh dari sistem $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ karena meningkatnya kemampuan adsorpsi katalis terhadap reaktan sebagai akibat dari kehadiran SiO_2 (Kyeong, 1999).

2.5. Metode Sol-Gel

Untuk membuat TiO_2 dalam bentuk kristal anatase, telah dikembangkan beberapa metode seperti presipitasi, hidrotermal, elektrodeposisi, microwave, dan metode sol-gel. Namun, metode sol-gel adalah salah satu metode yang paling sukses dalam mempersiapkan material logam oksida yang memiliki aktivitas fotokatalitik tinggi.

Tabel 2.1. Perbandingan beberapa metode preparasi katalis TiO_2 (Henderson, 2011)

Metode	Keterangan
Sol-gel	<ul style="list-style-type: none"> - Suspensi atau sol diperoleh dengan proses hidrolisis dan polimerisasi - Pada kondisi yang tepat, dapat diperoleh material dengan porositas tinggi - Memberikan kontrol yang lebih baik terhadap luas permukaan, volume pori, dan distribusi pori
Presipitasi	<ul style="list-style-type: none"> - Proses yang dilakukan adalah melarutkan asam dan basa untuk memperoleh presipitat solid (endapan) - pH larutan selama reaksi harus dikontrol - Hidroksida dan karbonat adalah presipitat intermediate yang diharapkan sebelum proses co-presipitasi dilanjutkan
Hidrotermal	<ul style="list-style-type: none"> - Dilakukan di dalam bejana steel bertekanan (autoclave) - Tekanan dan temperatur harus dikontrol - Dapat memberikan produk dalam ukuran nano
Elektrodeposisi	<ul style="list-style-type: none"> - Biasanya digunakan untuk menghasilkan lapisan pada sebuah permukaan benda padat (logam) - Dilakukan dengan reaksi reduksi pada katoda
Microwave	<ul style="list-style-type: none"> - Menggunakan gelombang elektromagnetik frekuensi tinggi - Waktu yang dibutuhkan untuk preparasi katalis cukup singkat - Biasanya digunakan pada skala industri

Kelebihan-kelebihan metode sol-gel dalam mempreparasi katalis dibandingkan dengan metode lain adalah (Tseng, 2010):

1. Menghasilkan homogenitas yang lebih baik.
2. Menghasilkan tingkat kemurnian yang lebih baik.
3. Preparasi dilakukan pada temperatur yang lebih rendah
4. Pencampuran yang baik untuk sistem multi-komponen.
5. Memberikan kontrol yang lebih efektif terhadap ukuran partikel, bentuk, dan sifat.
6. Memberikan produk yang lebih baik terutama dalam bentuk gel.
7. Dapat menghasilkan produk dalam bentuk film.
8. Dapat menghasilkan padatan non-kristalin baru di luar rentang pembentukan padatan yang umum.
9. Pengaturan selektivitas kromatografik yang baik dengan kemungkinan pembuatan material hybrid organik-anorganik.
10. Kemudahan dalam mendesain struktur dan sifat material melalui pemilihan prekursor sol-gel yang diinginkan.
11. Memiliki kemungkinan untuk meningkatkan stabilitas pada fasa *stationary*.

Dalam proses sol-gel, prekursor mengalami proses hidrolisis dan polimerisasi untuk membentuk suspensi koloidal (sol). Proses selanjutnya sol mampu menghasilkan bahan keramik dalam bentuk yang berbeda menjadi wet gel. Dengan perlakuan pengeringan dan pemanasan, gel dikonversi menjadi keramik atau gelas. Jika cairan dalam gel basah dihilangkan pada kondisi superkritikal, maka akan diperoleh bahan yang memiliki porositas tinggi dan densitas rendah yang disebut aerogel.

Sol koloid yang terbentuk dapat langsung diaplikasikan untuk melapisi penyangga dengan cara mencelupkan (*dip coating*) atau dengan cara memutar (*spin coating*), yang setelah dikalsinasi menghasilkan lapisan film pada penyangga tersebut. Proses pelapisan yang lain dapat dilakukan dengan cara menyemprotkan sol (*spray coating*) kepada bahan yang ingin dilapisi.

Penambahan larutan organik pada sol akan menghasilkan gel berbentuk bola, yang setelah dikalsinasi akan berbentuk bubuk. Dengan menambahkan

senyawa lain untuk mendehidrasi sol maka akan dihasilkan dua jenis gel bergantung perlakuan yang diberikan yaitu aerogel dan xerogel. Aerogel merupakan padatan berpori yang diperoleh dari proses pengeringan superkritikal gel. Sedangkan xerogel merupakan padatan gel yang kering dan mudah dibentuk dimana proses pemanasan berlangsung lebih lambat. Xerogel yang dikalsinasi lebih lanjut akan menghasilkan keramik padat (*dense ceramics*).

Tahapan proses sol-gel dapat dijelaskan seperti berikut:

1. Hidrolisis

Pada tahap pertama logam prekursor (alkoksida) dilarutkan dalam alkohol dan terhidrolisis dengan penambahan air pada kondisi asam, netral atau basa menghasilkan sol koloid. Hidrolisis menggantikan ligan (-OR) dengan gugus hidroksil (-OH) dengan reaksi sebagai berikut:



Faktor yang berpengaruh terhadap proses hidrolisis adalah rasio air/prekursor dan jenis katalis hidrolisis yang digunakan. Peningkatan rasio pelarut/prekursor akan meningkatkan reaksi hidrolisis. Reaksi berlangsung cepat sehingga waktu gelasi lebih cepat.

2. Kondensasi

Pada tahapan ini terjadi proses transisi dari sol menjadi gel. Reaksi kondensasi melibatkan ligan hidroksil untuk menghasilkan polimer dengan ikatan M-O-M. Pada berbagai kasus, reaksi ini juga menghasilkan produk samping berupa air atau alkohol dengan persamaan reaksi secara umum ialah:



3. Pematangan (*aging*)

Setelah reaksi hidrolisis dan kondensasi, dilanjutkan dengan proses pematangan *gel* yang terbentuk. Proses ini lebih dikenal dengan nama proses *aging*. Pada proses pematangan ini, terjadi reaksi pembentukan jaringan *gel* yang lebih kaku, kuat dan menyusut di dalam larutan.

4. Pengeringan

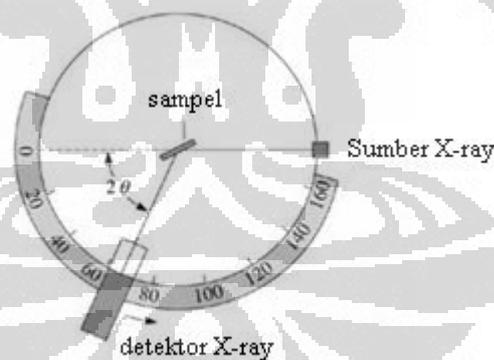
Tahap terakhir ialah proses penguapan larutan dan cairan yang tidak diinginkan untuk mendapatkan struktur *sol gel* yang memiliki luas permukaan yang tinggi.

2.6. Karakterisasi Katalis

2.6.1. Difraksi X-Ray (XRD)

Difraksi X-ray adalah sebuah teknik analitik yang digunakan untuk memperoleh informasi tentang struktur kristal, komposisi kimia, dan sifat fisik dari suatu material. Teknik ini didasarkan pada pengamatan terhadap intensitas scattered dari sinar X-ray yang membentur suatu sampel yang ingin diamati.

Prinsip dari X-ray *Diffraction* (XRD) adalah difraksi gelombang sinar X yang mengalami *scattering* setelah bertumbukan dengan atom kristal. Pola difraksi yang dihasilkan merepresentasikan struktur kristal. Dari analisa pola difraksi dapat ditentukan parameter kisi, ukuran kristal, identifikasi fasa kristalin. Jenis material dapat ditentukan dengan membandingkan hasil XRD dengan katalog hasil difraksi berbagai macam material.



Gambar 2.4. Diagram alat difraksi sinar-X

Metode yang biasa dipakai adalah memplot intensitas difraksi XRD terhadap sudut difraksi 2θ . Intensitas akan meninggi pada nilai 2θ yang terjadi difraksi. Intensitas yang tinggi tersebut dalam grafik terlihat membentuk puncak-puncak pada nilai 2θ tertentu.

Pelebaran puncak bisa diartikan material yang benar-benar amorph, butiran yang sangat kecil dan bagus, atau material yang memiliki ukuran kristal

sangat kecil melekat dengan struktur matriks yang amorph. Dari lebar puncak pada grafik XRD, ukuran kristal yang terbentuk dapat dihitung menggunakan persamaan Scherrer.

$$L = \frac{\kappa\lambda}{(\beta \cos \theta)} \quad (2.9)$$

dengan :

L = ukuran kristal (nm)

λ = panjang gelombang radiasi sinar X-Ray (Cu K α = 0.154118 nm)

K = 0.89

β = lebar dari setengah puncak gelombang tertinggi

θ = sudut pengukuran (sudut difraksi)

Sedangkan komposisi antara kristal rutil dan anatase dihitung dengan persamaan 2 (Suryanarayana, 1998).

$$X = \left(1 + \frac{0,8I_A}{I_R} \right) \quad (2.10)$$

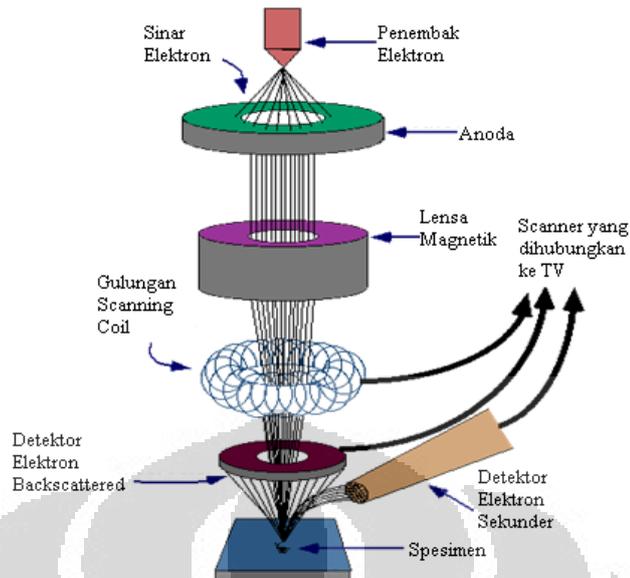
dengan:

X = fraksi berat rutil dalam serbuk katalis

I_A dan I_R = intensitas X-Ray pada puncak anatase dan rutil (kcps)

2.6.2. Scanning Electron Microscopy (SEM)

SEM adalah sejenis mikroskop elektron yang dapat mencitrakan permukaan sampel yang ingin dikarakterisasi dengan melakukan *scanning* pada sampel menggunakan sinar elektron yang berenergi tinggi dan medan elektromagnetik sebagai lensanya. Elektron akan berinteraksi dengan atom dari sampel sehingga sampel menghasilkan sinyal yang mengandung informasi tentang topografi permukaan sampel. Susunan rangkaian yang digunakan pada karakterisasi SEM pada umumnya adalah seperti dibawah ini:



Gambar 2.5. Skema diagram *Scanning Electron Microscope* (www.purdue.edu)

Elektron diemisikan dari katoda (*electron gun*) melalui efek foto listrik dan dipercepat menuju anoda. Filamen yang digunakan biasanya adalah tungsten atau lanthanum hexaboride (LaB₆). *Scanning coil*, akan mendefleksikan berkas elektron menjadi sekumpulan array (berkas yang lebih kecil), disebut *scanning beam* dan lensa obyektif (magnetik) akan memfokuskannya pada permukaan sampel.

Elektron kehilangan energi pada saat tumbukan dengan atom material, akibat *scattering* dan absorpsi pada daerah interaksi dengan kedalaman 100 nm sampai 2 μm . Ini membuat material akan meradiasikan emisi meliputi sinar-X, elektron Auger, *back-scattered electron* dan *secondary electron*. Pada SEM, sinyal yang diolah merupakan hasil deteksi dari *secondary electron* yang merupakan elektron yang berpindah dari permukaan sampel (*Scanning Electron Microscope*, 2011).

SEM dipakai untuk mengetahui struktur mikro suatu material meliputi tekstur, morfologi, komposisi dan informasi kristalografi permukaan partikel. Morfologi yang diamati oleh SEM berupa bentuk, ukuran dan susunan partikel. EDX (Energy Dispersive X-ray), merupakan karakterisasi material menggunakan sinar-X yang diemisikan ketika material mengalami tumbukan dengan elektron. Sinar-X di emisikan dari transisi elektron dari lapisan kulit atom, karena itu tingkat energinya tergantung dari tingkatan energi kulit atom. Setiap elemen di

dalam tabel periodik atom memiliki susunan elektronik yang unik, sehingga akan memancarkan sinar-X yang unik pula. Dengan mendeteksi tingkat energi yang dipancarkan dari sinar-X dan intensitasnya, maka dapat diketahui atom-atom penyusun material dan persentase massanya.

2.6.3. *Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS)*

Bahan semikonduktor, salah satu bahan yang digunakan sebagai katalis dalam proses fotokatalitik, memiliki dua buah pita utama yaitu pita valensi dan pita konduksi. Pita yang lebih rendah, yaitu pita valensi, memiliki tingkat energi yang diisi oleh elektron yang dipisahkan oleh energi E_R dengan pita kedua yang ada di atasnya. Pita kedua ini kosong dan berada pada tingkat yang lebih tinggi yang disebut pita konduksi karena elektron dari pita ini cukup bebas untuk berpindah dengan bantuan elektrik yaitu konduksi. Diantara keduanya terdapat celah energi kosong (*void energy region*) yang disebut celah pita atau *band gap*, dimana tidak tersedia level-level energi untuk mempromosikan rekombinasi elektron dan *hole* yang diproduksi oleh suatu fotoaktivasi dalam bahan semikonduktor.

Penentuan nilai energi celah pita dari fotokatalis ini dilakukan dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut:

$$f(R) = \frac{K}{S} = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (2.11)$$

dengan:

- f (R) = faktor Kubelka-Munk
- K = koefisien absorpsi
- S = koefisien Scattering
- R = nilai reflektan yang diukur

Nilai f memiliki hubungan dengan energi foton melalui persamaan berikut:

$$f(R) = A(h\nu - E_g)^{m/2} \quad (2.12)$$

dengan:

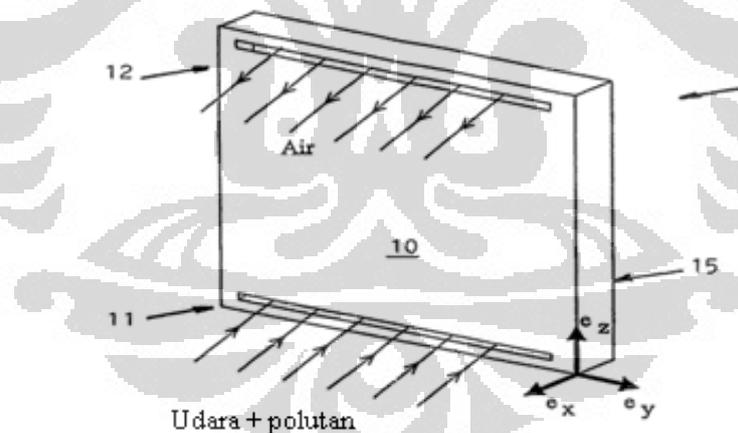
- A = Konstanta proporsional
- E_g = Energi celah (band gap)

$m = 1$ untuk transisi langsung yang diperoleh dengan memplot $f(R)$ terhadap $h\nu$ dan ekstrapolasi daerah liniernya, maka dapat ditentukan nilai $h\nu$ pada $f(R) = 0$, yang tidak lain adalah nilai energi celah dari spesi pengabsorpsi.

2.7. Penelusuran Paten (*Air Purification Wall* Pub. No. US 7,582,256 (Laurent, 2009))

Di berbagai sumber, telah ada paten-paten yang berhubungan dengan pemurnian udara dengan berbagai metode. Paten-paten tersebut menghasilkan alat yang berfungsi sebagai unit purifikasi udara berbasis fotokatalisis. Berikut adalah salah satu paten yang menjelaskan tentang sebuah alat yang digunakan untuk purifikasi udara berbasis fotokatalisis.

Paten ini menjelaskan sebuah alat yang digunakan dengan menggunakan proses fotokatalisis untuk pemurnian udara ruangan secara kontinu. Pada alat tersebut dilapisi film TiO_2 yang dilengkapi dengan lampu UVA sebagai sumber energi foton dan di dalamnya dilengkapi dengan kipas yang berfungsi untuk sirkulasi udara.



Gambar 2.6. Skema alat Air Purification Wall (Laurent, 2009)

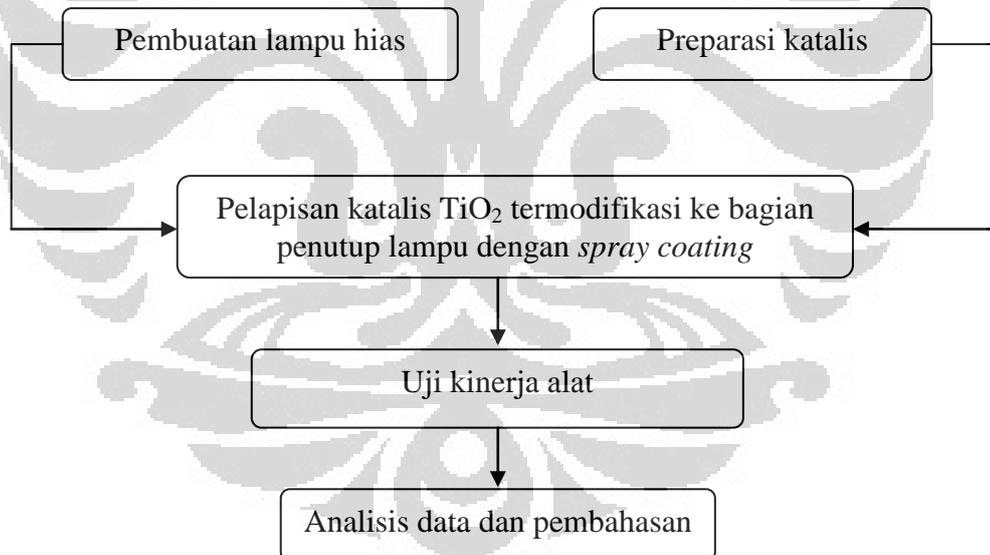
Alat ini terbuat dari baja dimana udara bersama dengan polutan akan masuk melalui bagian bawah dan udara keluar melalui bagian atas. Di dalam alat tersebut, terdapat filter yang telah dilapisi oleh TiO_2 dan diiluminasi dengan lampu UVA. Proses fotokatalisis berlangsung di dalam alat dimana terdapat lapisan film TiO_2 dan udara akan disirkulasikan secara alamiah dan secara paksa dengan menggunakan kipas.

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian dimulai dengan melakukan pembuatan lampu hias kemudian preparasi katalis yang akan digunakan, dilanjutkan dengan melakukan karakterisasi terhadap katalis yang telah dibuat dengan XRD, SEM/EDX, dan DRS. Karakterisasi XRD digunakan untuk mengetahui struktur kristal dan, karakterisasi SEM/EDX dilakukan untuk mengetahui morfologi dari komposit dan komposisinya, sedangkan karakterisasi DRS untuk mengetahui daya absorpsi katalis terhadap sinar dan menghitung energi band fotokatalis. Tahap berikutnya adalah melakukan uji kinerja alat yang dibuat dalam mendegradasi polutan udara ruangan.

Secara umum diagram alir penelitian ini ditunjukkan dalam gambar berikut:



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

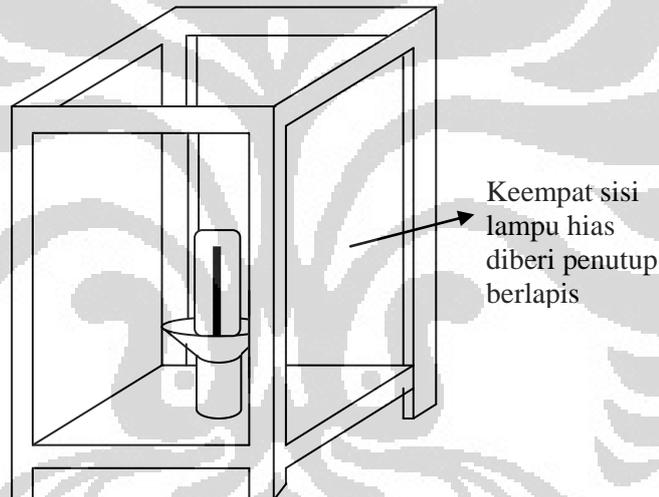
Penelitian akan dilaksanakan di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (RPKA) Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok.

3.2. Pembuatan Lampu Hias

Pada penelitian ini akan dibuat sebuah lampu hias dilengkapi penutup lampu yang dilapisi katalis TiO_2 termodifikasi. Adapun dimensi dari lampu hias yang akan dibuat adalah sebuah kotak dengan ukuran:

Panjang	= 30 cm
Lebar	= 30 cm
Tinggi	= 35 cm

Penutup lampu akan dibuat dari bahan kain katun dan lampu yang digunakan adalah lampu jenis CFL (*compact fluorescent bulb*). Kain katun dipilih karena merupakan material yang cukup kuat dan mudah didapatkan. Kain katun berlapis katalis akan digunakan sebagai penutup keempat sisi dari kotak lampu hias.



Gambar 3.2. Lampu hias dengan penutup lampu yang dilapisi katalis

3.3. Peralatan Penelitian

Berikut ini adalah peralatan yang digunakan dalam penelitian berdasarkan aktivitasnya.

3.3.1. Peralatan Preparasi dan Pelapisan Katalis

Peralatan yang akan digunakan dalam preparasi dan pelapisan katalis adalah sebagai berikut:

1. Gelas beaker
2. Spatula

3. Cawan porselen
4. Magnetic stirrer
5. Furnace
6. Ultrasonik
7. Spray gun

3.3.2. Peralatan Pembuatan Lampu Hias

Peralatan yang akan digunakan dalam pembuatan lampu hias adalah:

1. Kain katun
2. Sebuah lampu CFL (*compact fluorescent bulbs*) sebesar 14 watt
3. Kabel dan saklar
4. Kayu sebagai kerangka lampu hias
5. Lem
6. Paku

3.3.3. Peralatan Uji Kinerja Lampu Hias

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

1. Lampu hias dengan penutup lampu yang dilapisi katalis.
2. Sebuah kotak uji yang dapat mewakili sebuah ruangan. Kotak uji tersebut terbuat dari bahan acrylic dengan dimensi:

Panjang = 50 cm

Lebar = 50 cm

Tinggi = 50 cm

3. Stopwatch
4. GC FID

Analisis konsentrasi gas formaldehida menggunakan teknik analisa kromatografi gas dengan *Gas Chromatography Flame Ionization Detector* (GC-FID) dan kolom PEG (*poly ethylene glycol*). GC-FID ini lebih sensitif dibandingkan dengan GC-TCD sehingga mampu menganalisa produk keluaran reaktor dalam fasa gas. Cara bekerjanya berdasarkan terbentuknya ion yang akan dianalisis sebagai hasil kontak

sampel dengan panas yang diperoleh dari pembakaran hidrogen dan udara. GC yang digunakan adalah jenis Shimadzu model GC-9A yang terdapat di laboratorium RPKA Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia. Kolom yang digunakan adalah PEG dengan nitrogen sebagai *carrier gas*.

5. Recorder

Recorder digunakan untuk menampilkan hasil dari analisis dari GC-FID. Keluarannya berupa peak dari sampel yang dianalisis. Data yang diperoleh adalah berupa *peak area* dan waktu retensi dari masing-masing senyawa dalam sampel.

6. Portable gas analyzer

Analisis konsentrasi gas CO dari asap rokok menggunakan alat *portable gas analyzer*. *Gas analyzer* yang digunakan adalah jenis TPI 708 *Flue Gas Analyzer* dengan kemampuan mengukur konsentrasi CO dalam range 0 – 10.000 ppm. Alat ini dapat mampu mendeteksi keberadaan gas CO hingga ketelitian 1 ppm dengan tingkat akurasi +/- 5 ppm.

3.4. Bahan Penelitian

Berikut adalah bahan-bahan yang digunakan untuk preparasi katalis dan uji kinerja alat.

3.4.1. Bahan Preparasi dan Pelapisan Katalis

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

1. TiO₂ Degussa P-25
2. Etanol
3. TEOS
4. Urea
5. Aquades
6. HCl 2 M

3.4.2. Bahan Uji Kinerja Lampu Hias

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

1. Formaldehida
2. Asap rokok

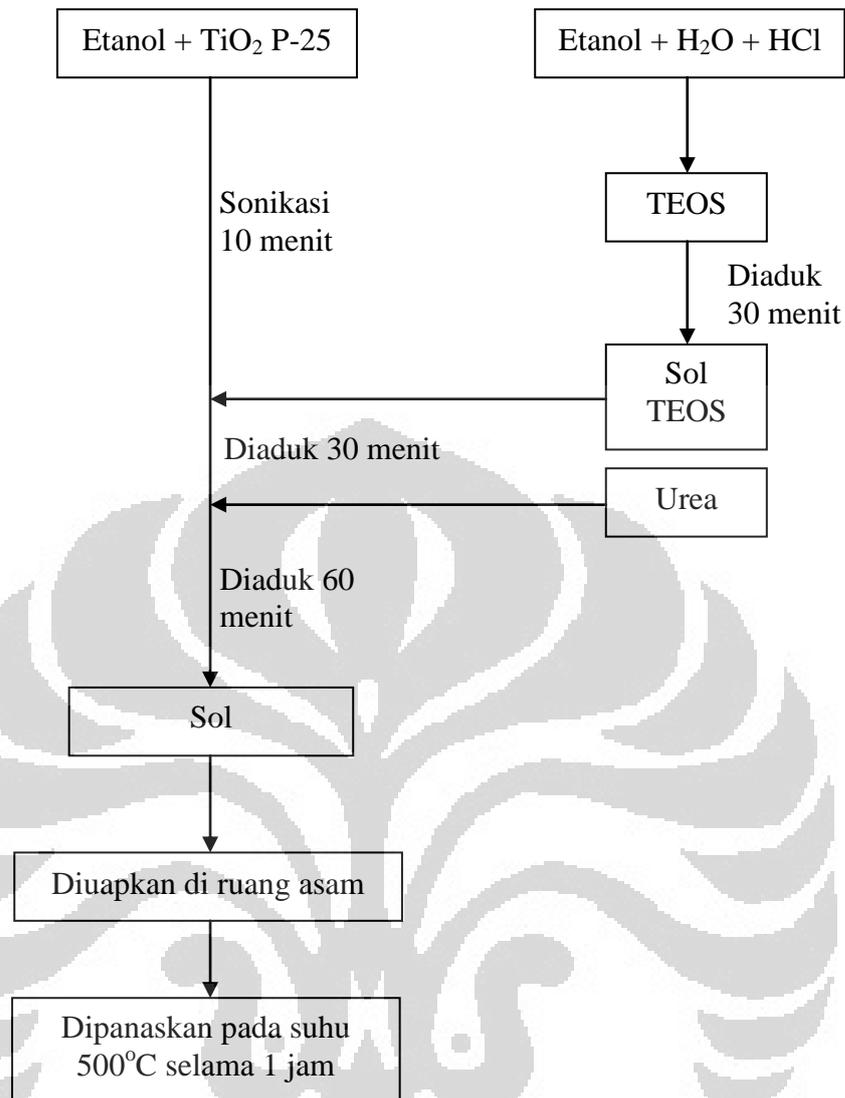
3.5. Prosedur Penelitian

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

3.5.1. Prosedur Preparasi Katalis

Katalis yang akan dibuat lebih difokuskan untuk menghasilkan fotokatalis yang memiliki aktivitas fotodegradasi polutan di bawah sinar tampak. Katalis yang akan dibuat adalah TiO_2 termodifikasi dengan variasi loading urea 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat TiO_2 . Langkah-langkah yang dilakukan dalam preparasi katalis dan pelapisan katalis adalah sebagai berikut:

1. Mencampurkan 5 gram TiO_2 Degussa P-25 ke dalam 70 mL etanol absolut dan dilanjutkan dengan proses sonikasi selama 10 menit.
2. Mencampurkan 10 mL etanol absolut, 10 mL aquades, 2 mL TEOS, dan HCl 2M sampai dicapai pH 2. Mengaduk campuran tersebut dengan magnetic stirrer selama 30 menit sampai terbentuk sol TEOS.
3. Memasukkan sol TEOS ke dalam campuran TiO_2 Degussa P-25 dan etanol, kemudian dilanjutkan dengan proses pengadukan dengan magnetic stirrer selama 30 menit.
4. Memasukkan urea ke dalam campuran sol TEOS dan TiO_2 dan diikuti dengan proses pengadukan dengan magnetic stirrer selama 60 menit. Variasi berat urea yang dimasukkan adalah 0, 0,25 gram, 0,5 gram, dan 0,75 gram.
5. Menguapkan sol pada suhu 70°C di ruang asam selama 1 jam.
6. Memanaskan sol di dalam furnace pada suhu 500°C selama 1 jam.



Gambar 3.3. Diagram alir preparasi katalis

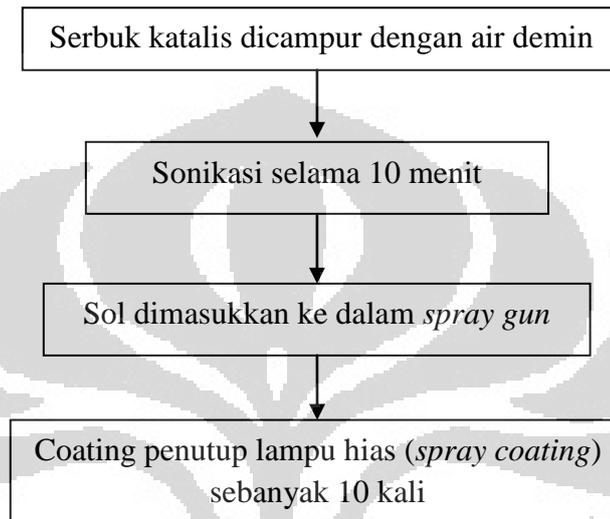
3.5.2. Prosedur Pelapisan Katalis

Katalis akan dilapiskan pada kain penutup keempat sisi kotak lampu hias dengan metode *spray coating*. Berikut adalah langkah-langkah pelapisan katalis:

1. Mencampurkan serbuk katalis dengan air demin lalu masonikasinya selama 10 menit.
2. Memasukkan sol ke dalam *spray gun* untuk kemudian melakukan proses *spray* (pelapisan katalis). Agar lapisan katalis yang terbentuk homogen dan memiliki kekuatan yang cukup maka penutup lampu dibiarkan selama 2 menit sejak pelapisan pertama. Untuk pelapisan berikutnya dilakukan hal yang sama yaitu dengan melakukan *spray*

pada penutup lampu dan membiarkannya selama 2 menit. Hal ini dilakukan berulang-ulang sesuai dengan jumlah lapisan yang diinginkan.

3. Mengeringkan penutup lampu dengan menggunakan *hair spray*.
4. Pelapisan katalis dilakukan sebanyak 10 kali.



Gambar 3.4. Diagram alir pelapisan katalis

3.5.3. Prosedur Pembuatan Lampu Hias dan Uji Kinerja Lampu Hias

Setelah katalis dilapiskan pada kain penutup lampu hias, maka langkah selanjutnya adalah membuat lampu hias dan melakukan uji kinerja dari lampu hias yang telah dibuat.

Pengujian kemampuan degradasi polutan ini dimaksudkan untuk menguji kemampuan dan keefektifan alat dalam mendegradasi polutan. Untuk pengujian tersebut, maka lampu hias dimasukkan ke dalam sebuah kotak uji yang dapat dianggap mewakili kondisi sebuah ruangan. Kotak uji tersebut harus tertutup dan bebas dari udara luar untuk menghindari adanya kontaminasi dari polutan lain. Lampu hias dinyalakan agar dapat menghasilkan sumber foton bagi katalis pada penutup lampu.

Ke dalam kotak uji kemudian diinjeksikan polutan yang dimodelkan oleh formaldehida dan gas CO (asap rokok). Setelah polutan diinjeksikan, maka

biarkan lampu hias dalam keadaan menyala sehingga reaksi fotokatalisis dapat berlangsung untuk mendegradasi gas polutan.

Konsentrasi awal dari gas polutan dicatat selama 1 jam pertama setelah diinjeksikan ke dalam kotak uji dengan mengambil sampel yang dilakukan setiap 30 menit untuk melihat apakah kotak uji mengalami kebocoran atau tidak. Selama uji kebocoran ini, lampu hias belum dinyalakan agar tidak terjadi reaksi fotodegradasi. Hal ini juga dimaksudkan untuk terjadinya homogenisasi polutan di dalam kotak uji.

Pengujian dilakukan selama selang waktu yang ditentukan (0 – 3 jam) dengan pengambilan data berupa konsentrasi sisa polutan setiap 30 menit sekali setelah dilakukan tes kebocoran/homogenisasi selama 1 jam pertama.

Adapun langkah-langkah pengerjaannya adalah sebagai berikut:

1. Membuat penutup lampu yang terbuat dari kain katun.
2. Memasang lampu CFL pada kerangka yang telah dibuat dan menghubungkan lampu dengan aliran listrik.
3. Memasang penutup lampu hias yang telah dilapisi katalis.
4. Menyiapkan polutan.
5. Memasukkan lampu hias ke dalam kotak uji.
6. Menginjeksikan polutan sampel ke dalam kotak uji.
7. Menyalakan lampu hias.
8. Menghitung konsentrasi sisa polutan dan gas yang terbentuk.

3.5.4. Analisis Polutan Terdegradasi

Tahapan ini bertujuan untuk melihat seberapa efektif kinerja lampu hias yang digunakan untuk mendegradasi polutan di dalam udara ruangan yang dimodelkan dengan menggunakan formaldehida dan gas CO (asap rokok). Analisis dilakukan untuk melihat konsentrasi akhir polutan setelah memasuki ruang pada lampu hias yang telah dilapisi katalis dalam suatu selang waktu tertentu.

Konsentrasi polutan formaldehida didapatkan dari hasil analisis menggunakan GC. Sedangkan untuk konsentrasi polutan CO didapatkan dengan menggunakan alat *portable gas analyzer*.

3.6. Variabel Penelitian

3.6.1. Variabel Bebas

1. Loading urea

Loading urea sebagai sumber dopan N divariasikan dari 0%, 5%, 10%, sampai 15%. Variasi loading urea dilakukan untuk melihat bagaimana kinerja katalis untuk berbagai macam loading.

2. Jenis polutan

Polutan yang digunakan adalah gas formaldehida dan gas CO dari asap rokok.

3. Waktu iradiasi

Waktu iradiasi akan divariasikan dari 0 – 3 jam untuk melihat waktu yang optimum bagi katalis untuk mendegradasi polutan pada konsentrasi yang ditetapkan.

3.6.2. Variabel Terikat

Dengan memvariasikan loading urea, jenis polutan, dan waktu iradiasi cahaya tampak, maka akan diperoleh laju degradasi yang berbeda untuk setiap variabel bebas sehingga dapat ditentukan kondisi optimum untuk degradasi polutan.

3.6.3. Variabel Tetap

Variabel yang ditetapkan sebagai variabel kontrol adalah jumlah *coating* katalis pada penyangga.

3.7. Data Penelitian dan Cara Pengambilan Data

1. Data perubahan konsentrasi formaldehida ditentukan dengan GC dalam setiap selang waktu tertentu. Sedangkan untuk gas CO, ditentukan dengan menggunakan alat *portable gas analyzer*.
2. Waktu iradiasi dihitung dengan menggunakan stopwatch.

3.8. Pengolahan Data Penelitian

Untuk mengetahui konsentrasi formaldehida dilakukan dengan membuat data konsentrasi senyawa standar untuk setiap sampel polutan dalam bentuk grafik. Grafik tersebut menghubungkan antara konsentrasi senyawa standar pada sumbu x dan *peak area* pada sumbu y . Grafik tersebut dilinierisasi hingga diperoleh persamaan $y = ax + b$. *Peak area* hasil GC untuk setiap sampel polutan kemudian diplotkan pada grafik standar sehingga dapat diketahui konsentrasi polutan dari tiap sampel tersebut. Untuk konsentrasi gas CO, alat *portable gas analyzer* sudah langsung menyediakan data konsentrasi dalam satuan ppm.

Waktu reaksi untuk setiap pengambilan sampel dicatat sehingga dapat dibuat grafik antara konsentrasi polutan terhadap waktu reaksi. Dengan demikian dapat dilihat kecenderungan proses degradasi fotokatalitik. Dari analisis data pada setiap variabel tersebut dan didukung oleh hasil karakterisasi material (DRS, SEM, dan XRD), maka dapat dioptimasi jenis katalis serta kondisi operasi yang mempunyai kinerja yang terbaik.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Karakterisasi Katalis

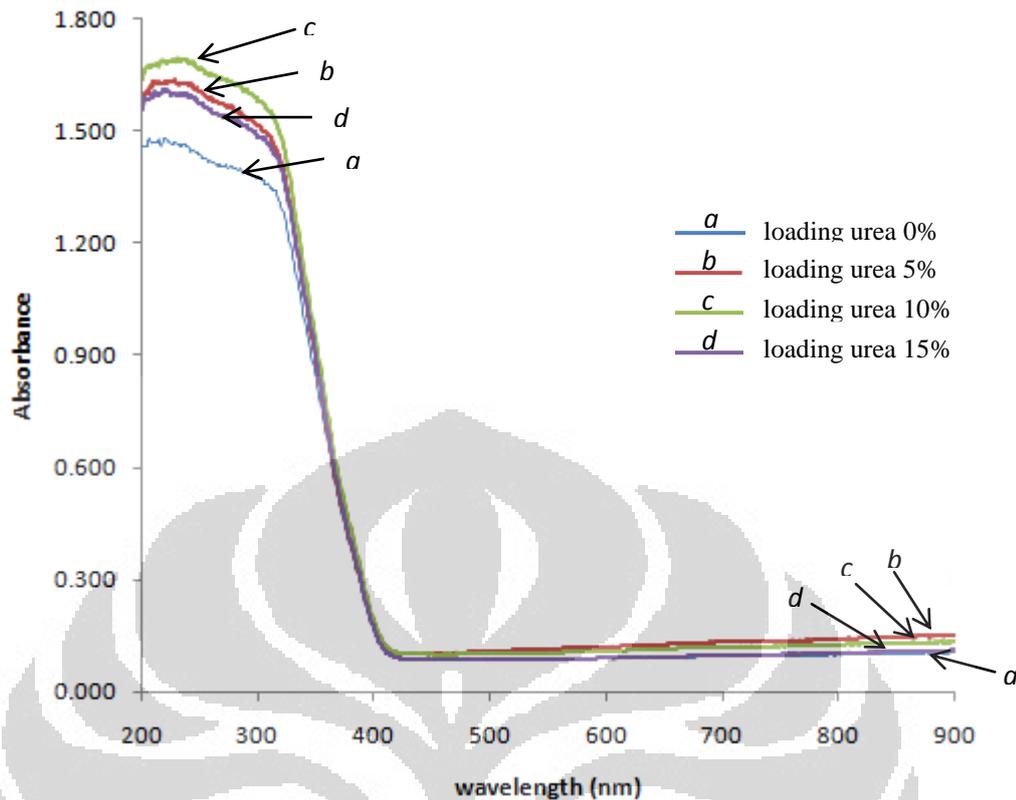
Karakterisasi katalis dilakukan untuk mengetahui karakter dari katalis yang telah dibuat. Dengan mengetahui karakter dari katalis, maka kinerja dari lampu hias berlapis katalis dalam mendegradasi polutan udara ruangan dapat dijelaskan dengan lebih baik. Pada penelitian ini dilakukan empat jenis karakterisasi, yaitu:

1. Karakterisasi DRS (*Diffuse Reflectance Spectroscopy*) untuk mengetahui absorbansi katalis terhadap cahaya.
2. Karakterisasi EDX untuk melihat bagaimana komposisi unsur penyusun katalis.
3. Karakterisasi SEM untuk mengetahui morfologi katalis yang telah dilapiskan (*coating*) ke permukaan kain katun penutup lampu hias.
4. Karakterisasi katalis XRD (*X-Ray Diffraction*) untuk melihat struktur kristal dari katalis.

4.1.1. Karakterisasi DRS

Hasil yang diperoleh dari karakterisasi DRS adalah daya absorbansi katalis terhadap cahaya dalam rentang panjang gelombang tertentu. Dengan mendapatkan data absorbansi katalis terhadap cahaya, dapat diketahui apakah *band gap energy* katalis telah mengalami penurunan sebagai akibat dari penambahan dopan N dari urea. *Bandgap energy* katalis akan dikatakan mengalami penurunan jika katalis telah dapat mengabsorb cahaya dengan panjang gelombang di atas 400 nm yang merupakan daerah panjang gelombang cahaya tampak.

Data hasil karakterisasi DRS berupa absorbansi katalis terhadap cahaya dapat dilihat pada Gambar 4.1. Data yang diambil berupa absorbansi katalis terhadap cahaya dengan panjang gelombang 200 – 900 nm. Dari data absorbansi tersebut, dapat dilihat bahwa daya absorbansi katalis pada panjang gelombang 350 nm mengalami penurunan dan absorbansi katalis pada panjang gelombang 400 nm sangat sedikit sekali.



Gambar 4.1. Absorbansi katalis TiO_2 termodifikasi dengan variasi loading urea

Untuk keempat katalis dengan variasi loading urea yang berbeda, tidak ditemukan adanya perbedaan yang signifikan. Namun, untuk variasi 10% loading urea, absorbansi katalis terhadap cahaya tampak sedikit lebih baik dibandingkan ketiga variasi lainnya. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa penambahan dopan N ke dalam TiO_2 belum berhasil dilakukan, tetapi penambahan TEOS dan urea sudah berhasil memodifikasi TiO_2 sehingga lebih responsif di bawah sinar tampak. Hal ini bisa saja disebabkan bahwa N sudah ada yang ter-dopan, tetapi dalam jumlah yang sangat kecil sehingga tidak berpengaruh secara signifikan terhadap absorbansi katalis terhadap sinar tampak. Hal ini juga dikonfirmasi oleh hasil karakterisasi EDX yang akan dibahas selanjutnya.

Selanjutnya, dari data absorbansi tersebut akan dihitung nilai *bandgap energy* dari masing-masing katalis dengan menggunakan persamaan Kubelka-Munk. Karena data hasil karakterisasi DRS adalah berupa absorbansi, maka terlebih dahulu dikonversi ke dalam persen reflektansi agar dapat digunakan ke

dalam persamaan Kubelka-Munk. Dari hasil perhitungan, diperoleh *bandgap energy* katalis dengan variasi loading urea sebagai berikut:

Tabel 4.1. Nilai *bandgap energy* TiO₂ termodifikasi dengan berbagai variasi loading urea

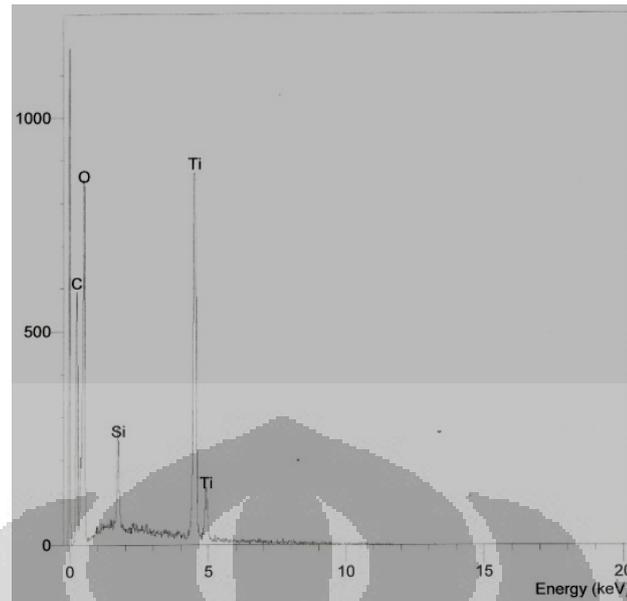
Variasi katalis	<i>Band gap energy</i> (eV)
loading urea 0%	3,19
loading urea 5%	3,19
loading urea 10%	3,18
loading urea 15%	3,19

Dari hasil perhitungan *band gap energy*, terlihat penurunan yang sangat kecil dan tidak signifikan. Penambahan dopan N memang dapat dikatakan belum berhasil dilakukan sehingga penurunan *band gap energy* tidak terjadi secara signifikan. Akan tetapi, penambahan urea dan TEOS dipastikan berhasil memodifikasi TiO₂ sehingga dapat mengabsorb cahaya tampak dan menurunkan sedikit *band gap energy*.

Ketidakterhasilan penambahan dopan N dapat disebabkan oleh kegagalan metode preparasi yang dipilih. Pada preparasi katalis, setelah urea ditambahkan diikuti dengan prosedur pengadukan selama 60 menit agar urea terhidrolisis menjadi NH₃ dan CO₂. Karena keberadaan air, maka akan terbentuk ion NH₄⁺ yang akan menempel pada permukaan TiO₂. Kemudian prosedur preparasi katalis dilanjutkan dengan pemanasan untuk mendekomposisi ikatan pada ion NH₄⁺ sehingga atom N dapat terlepas. Namun, proses pengadukan selama 60 detik ternyata tidak cukup untuk melakukan hal tersebut. Untuk metode sol gel di beberapa penelitian sebelumnya (Yu, 2007; Xin, 2008; Jae, 2009) proses penambahan dopan N melibatkan proses *aging* yang cukup lama (biasanya satu hari) sehingga dopan N benar-benar menempel di permukaan TiO₂.

4.1.2. Karakterisasi EDX

Hasil karakterisasi EDX ini digunakan untuk melihat bagaimana persebaran unsur-unsur penyusun katalis dan komposisinya. Grafik hasil dari analisis EDX untuk salah satu variasi katalis dapat dilihat dalam Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 15%

Dari hasil ini tidak terlihat peak unsur N yang muncul sehingga dapat dikatakan bahwa unsur N di dalam katalis tidak ada atau sangat sedikit dan tidak cukup banyak untuk dapat terdeteksi. Hal ini mengkonfirmasi hasil DRS yang menunjukkan kecilnya penurunan *band gap energy* yang terjadi. Dari grafik juga terlihat kehadiran unsur C yang dapat dipastikan berasal dari penambahan TEOS dan urea yang tidak terdekomposisi seluruhnya.

Berikut adalah komposisi dan persebaran unsur-unsur penyusun katalis untuk keempat variasi katalis yang ada pada tiga titik yang diuji.

Tabel 4.2. Persebaran dan komposisi elemen penyusun katalis (loading urea 0%)

Area pengujian	Elemen	Komposisi elemen (%)
Area 1	C	1,57
	O	60,87
	Si	3,19
	Ti	34,37
Area 2	C	1,00
	O	60,04
	Si	3,56
	Ti	35,40
Area 3	C	0,70
	O	46,51
	Si	3,47
	Ti	49,32

Tabel 4.3. Persebaran dan komposisi elemen penyusun katalis (loading urea 5%)

Area pengujian	Elemen	Komposisi elemen (%)
Area 1	C	0,32
	O	51,49
	Si	4,00
	Ti	44,18
Area 2	C	1,98
	O	58,01
	Si	3,04
	Ti	36,97
Area 3	C	0,51
	O	55,99
	Si	3,71
	Ti	39,78

Tabel 4.4. Persebaran dan komposisi elemen penyusun katalis (loading urea 10%)

Area pengujian	Elemen	Komposisi elemen (%)
Area 1	C	1,00
	O	56,99
	Si	3,29
	Ti	38,72
Area 2	C	2,71
	O	56,50
	Si	3,35
	Ti	37,44
Area 3	C	1,70
	O	61,57
	Si	3,43
	Ti	33,40

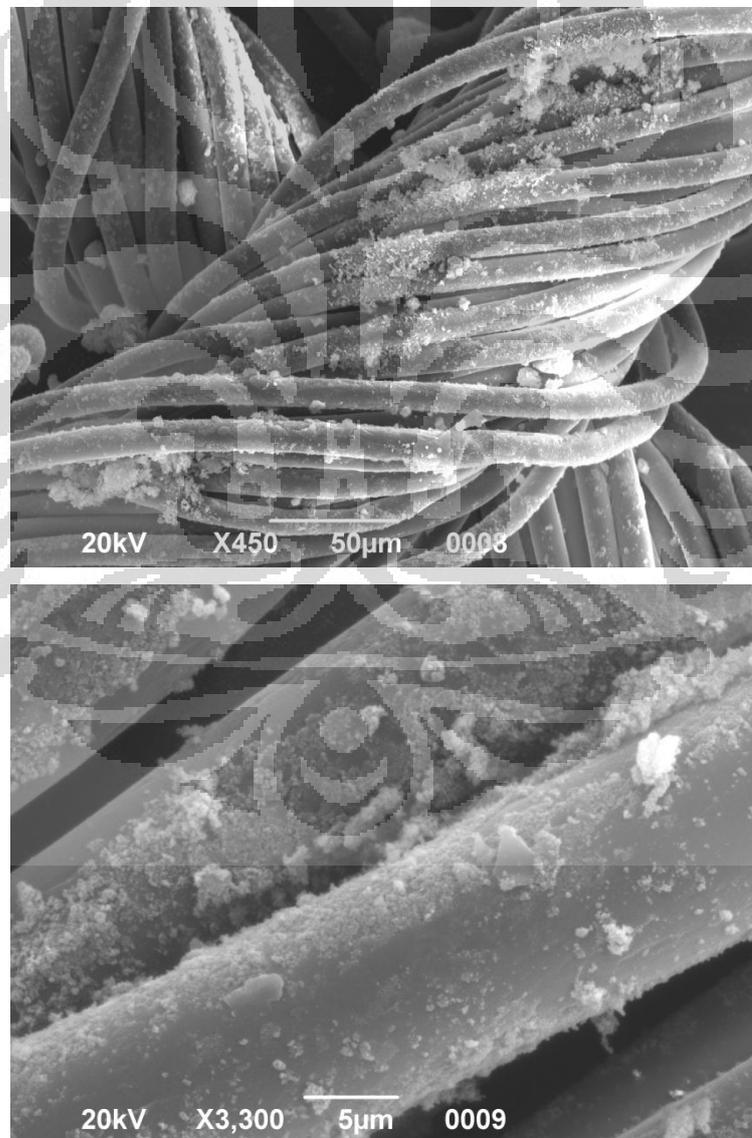
Tabel 4.5. Persebaran dan komposisi elemen penyusun katalis (loading urea 15%)

Area pengujian	Elemen	Komposisi elemen (%)
Area 1	C	0,97
	O	59,40
	Si	3,76
	Ti	35,87
Area 2	C	1,87
	O	59,81
	Si	3,38
	Ti	34,93
Area 3	C	1,09
	O	56,27
	Si	4,13
	Ti	38,51

Terlihat bahwa terdapat unsur Si di dalam katalis sebagai akibat dari penambahan TEOS. Dari tabel persebaran dan komposisi penyusun katalis di atas juga terlihat bahwa persebaran setiap unsur cukup merata di setiap titik sehingga kinerja katalis juga akan sama di setiap titik.

4.1.3. Karakterisasi SEM

Karakterisasi SEM dilakukan pada kain katun yang sudah dilapisi katalis dengan menggunakan metode *spray coating* untuk melihat bagaimana morfologi katalis yang ter-*coating* pada permukaan kain katun.

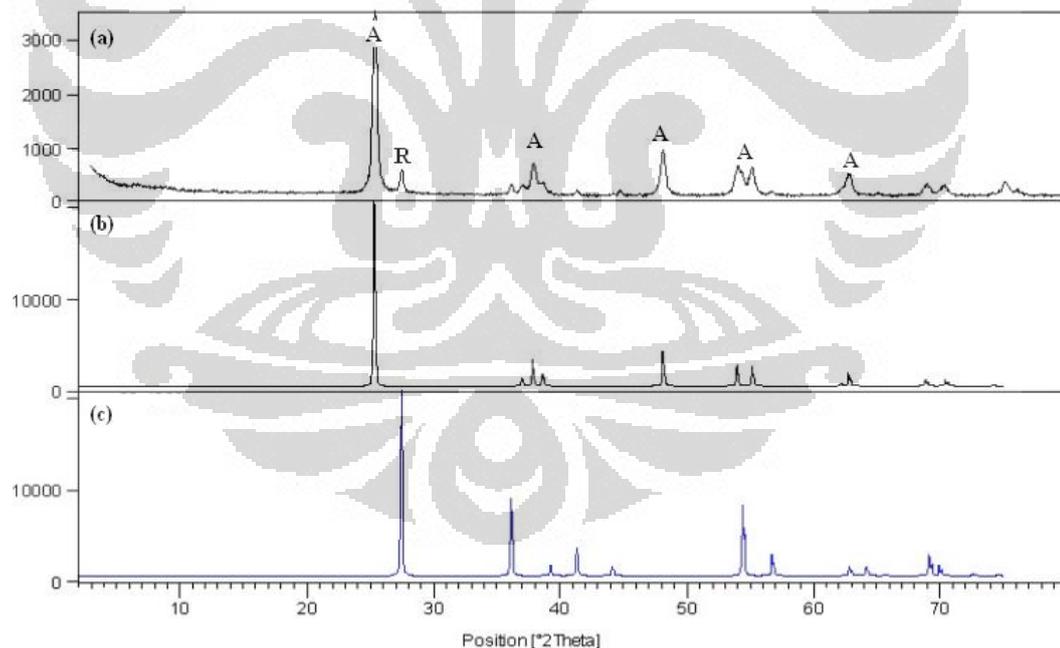


Gambar 4.3. Hasil SEM pada permukaan kain katun berlapis katalis

Hasil karakterisasi SEM menunjukkan bahwa katalis sudah dapat *coating* di permukaan kain katun yang digunakan sebagai penutup lampu hias. Namun, katalis tidak tersebar dengan merata dan hanya terdapat di permukaan bagian luar dari kain katun saja. Hal ini disebabkan oleh keterbatasan metode *coating* yang ada sehingga katalis tidak tersebar dengan merata di permukaan kain. Hal ini akan berpengaruh terhadap kinerja degradasi polutan dimana degradasi polutan tidak akan berlangsung dengan optimum karena luas kontak antara katalis dengan polutan berkurang sebagai akibat dari tidak meratanya keberadaan katalis di permukaan kain yang di-*coating*.

4.1.4. Karakterisasi XRD

Karakterisasi ini dilakukan untuk melihat bentuk kristal dari katalis yang dibuat. Bentuk kristal akan mempengaruhi aktivitas dari TiO_2 sebagai fotokatalis. Bentuk kristal yang diharapkan lebih banyak adalah anatase karena bentuk kristal ini lebih aktif dibandingkan dengan bentuk kristal yang lainnya.



Gambar 4.4. Pola hasil XRD (a) TiO_2 termodifikasi loading urea 15%; (b) kristal anatase; (c) kristal rutil

Hasil XRD menunjukkan bahwa kristal yang terbentuk adalah anatase dan rutil dengan intensitas peak anatase yang muncul lebih besar dari peak rutil.

Katalis komposit dibuat dari TiO_2 Degussa P-25 dengan komposisi 79,23% anatase dan 20,77% rutil sehingga kemungkinan untuk terbentuknya kristal anatase dan rutil juga sangat besar. Karakterisasi dilakukan untuk memastikan bahwa kristal anatase benar-benar terbentuk. Oleh karena itu, karakterisasi XRD tidak dilakukan untuk semua jenis katalis.

Dengan bentuk kristal anatase ini maka katalis TiO_2 dapat aktif digunakan untuk mendegradasi polutan. Dengan demikian, katalis dapat memiliki kinerja fotokatalitik sehingga dapat digunakan untuk mendegradasi polutan.

4.2. Konfigurasi Lampu Hias Pendegradasi Polutan

Bentuk lampu hias yang dipilih adalah bentuk yang umum bisa ditemukan di pasaran. Lampu hias berbentuk kotak dengan di keempat sisinya dipasang kain katun berlapis katalis. Lampu yang digunakan adalah adalah lampu CFL (*compact fluorescent bulbs*) 14 watt. Daya lampu sebesar ini sudah cukup untuk memberikan sumber foton untuk aktivasi katalis. Lampu ditempatkan pada jarak 11 cm dari kain penutup lampu. Jarak sebesar ini sudah dapat menangkap sinar dari lampu. Namun, dari hasil uji degradasi yang akan dibahas selanjutnya, jarak sebesar ini menyebabkan intensitas cahaya yang didapatkan oleh katalis kurang besar. Semakin besar intensitas cahaya yang diterima oleh permukaan katalis, semakin banyak pula radikal hidroksil yang terbentuk sebagai akibat dari proses tereksitasinya elektron dari pita valensi ke pita konduksi.

Pemilihan material kayu dan kain katun didasarkan kepada kemudahan mendapatkan dan membuatnya menjadi bentuk lampu hias. Kain katun adalah jenis kain yang mudah ditemukan di pasaran dan memiliki kekuatan yang cukup tinggi dan ketahanan terhadap panas dimana lampu akan menghasilkan panas yang cukup tinggi.

Dimensi lampu hias yang dibuat adalah 30 x 30 x 35 cm sehingga di setiap sisinya dapat dipasang kain penutup berlapis katalis dengan luas cukup besar. Semakin banyak katalis yang mengalami kontak dengan polutan, semakin baik proses fotokatalitik yang terjadi. Metode *spray coating* dipilih untuk melapiskan katalis ke permukaan kain katun karena metode ini dianggap mampu memberikan dispersi katalis yang merata di permukaan kain katun. Selain itu, metode ini

merupakan metode yang lebih sederhana dibandingkan dengan metode lain seperti *dip coating* atau *spin coating*. Untuk pengaplikasian pada kain dengan luas permukaan kain yang cukup besar, metode *coating* yang lain akan membutuhkan katalis yang banyak (*dip coating*) dan membutuhkan alat *coating* yang besar dan rumit pengoperasiannya (*spin coating*).

Kelemahan dari teknik *coating* yang digunakan pada penelitian ini adalah ketika katalis sudah dilapiskan ke kain penutup lampu hias, katalis tidak menempel ke permukaan kain sehingga dapat dengan mudah terkelupas dari permukaan kain. Oleh karena itu, sebaiknya (pada penelitian lain yang sejenis) dilakukan perbaikan pada teknik *coating* katalis, misalnya dengan menggunakan perekat yang tembus cahaya agar katalis dapat menempel di permukaan kain.

Lampu hias ini dirancang untuk diletakkan di lantai, bukan digantung atau diletakkan di meja seperti jenis lampu hias kebanyakan. Hal ini dilakukan karena umumnya berat molekul polutan udara ruangan lebih besar dari berat molekul udara sehingga polutan akan memiliki kecenderungan untuk terkonsentrasi di bagian bawah di dalam sebuah ruangan. Hal ini jugalah yang mendasari pemilihan lampu hias berbentuk kotak dengan bagian atas terbuka, bukan dengan kap penutup lampu, agar intensitas cahaya dari lampu hias cukup untuk menerangi ruangan. Selain itu, pemilihan bentuk ini juga didasarkan pada pertimbangan kemudahan pembuatan lampu hias tersebut dibandingkan dengan bentuk-bentuk lain.

4.3. Uji Kinerja Degradasi Polutan

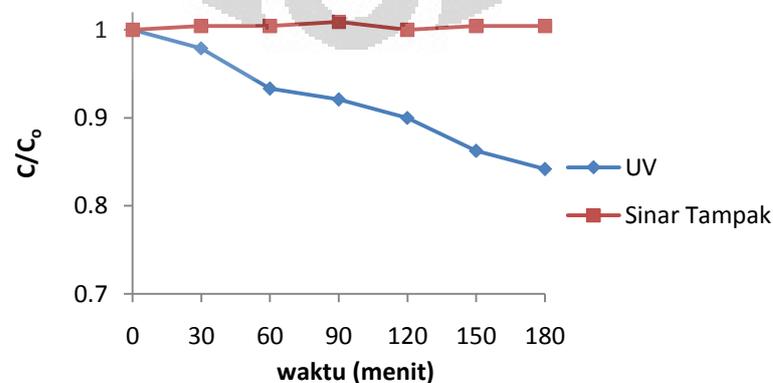
Keefektifan lampu hias ini dalam mendegradasi polutan dilihat dengan melakukan uji kinerja degradasi polutan. Uji kinerja degradasi polutan dilakukan dengan menggunakan dua model polutan yaitu gas CO dari asap rokok dan formaldehida. Asap rokok memiliki kandungan gas CO yang tinggi dan merupakan jenis polutan yang umum dapat ditemukan di dalam ruangan sehingga dianggap representatif digunakan sebagai model polutan. Sedangkan formaldehida merupakan polutan organik yang dapat ditemukan sebagai salah satu polutan udara ruangan yang konsentrasinya cukup besar di dalam ruangan.

Pada penelitian ini, tidak dilakukan analisis terhadap panas yang dikeluarkan lampu terhadap aktivitas katalis. Panas lampu dianggap sebagai faktor yang tidak berpengaruh terhadap aktivitas katalis karena katalis TiO_2 sendiri memiliki stabilitas termal yang cukup baik dimana katalis masih dapat aktif pada suhu tinggi (kristal anatase terbentuk pada suhu $<600^\circ\text{C}$). Sedangkan secara fisik, TiO_2 Degussa P-25 yang digunakan memiliki titik leleh sampai 1850°C .

4.3.1. Uji Kinerja pada Gas CO (Asap Rokok)

Pengujian ini dilakukan untuk melihat besar efektivitas lampu hias dalam mendegradasi gas CO dari asap rokok selama selang waktu tertentu (3 jam). Polutan yang diinjeksikan ke dalam kotak uji berasal dari asap rokok. Asap rokok terlebih dahulu ditampung di dalam wadah plastik dan kemudian dimasukkan ke dalam kotak uji. Untuk setiap pengujian, jumlah asap rokok yang dimasukkan diusahakan sama banyak yaitu dua kali wadah plastik agar kondisi pengujian untuk setiap katalis sama. Namun, untuk menjaga konsentrasi gas CO yang dimasukkan ke dalam kotak uji ternyata cukup sulit. Walaupun banyaknya asap rokok yang dimasukkan sama, kandungan CO di dalamnya berbeda sehingga sulit mengontrol konsentrasi awal dari polutan.

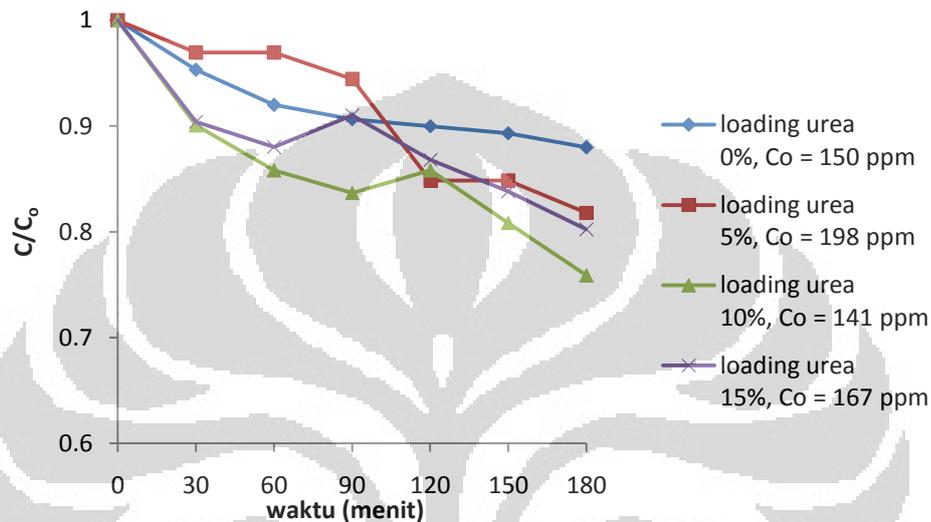
Asap rokok adalah gas yang memiliki warna dan bau. Ketika asap rokok dimasukkan ke dalam kotak uji, kondisi di dalam kotak uji langsung berubah menjadi agak keruh dan menimbulkan bau yang cukup menyengat. Oleh karena itu, jumlah asap rokok dianggap sudah cukup mendekati keadaan sebenarnya di dalam ruangan. Pengujian terlebih dahulu dilakukan dengan menggunakan TiO_2 murni untuk melihat bagaimana kinerjanya dalam mendegradasi polutan.



Gambar 4.5. Degradasi gas CO menggunakan katalis TiO_2

Dari grafik tersebut, terlihat bahwa TiO_2 pada lampu hias tidak mampu mengkonversi gas CO dengan menggunakan sinar tampak. Hal ini membuktikan bahwa perlu dilakukan modifikasi pada katalis agar dapat dihasilkan katalis yang aktif di bawah sinar tampak.

Hasil pengujian dengan menggunakan katalis TiO_2 termodifikasi dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 4.6. Penurunan konsentrasi gas CO di bawah sinar tampak

Hasil uji kinerja menunjukkan bahwa katalis termodifikasi pada lampu hias mampu menurunkan konsentrasi gas CO di dalam kotak uji. Penambahan TEOS yang diharapkan sebagai sumber SiO_2 juga dapat meningkatkan kemampuan adsorpsi katalis terhadap reaktan sehingga baik digunakan untuk mendegradasi polutan udara (Kyeong, 1999; Bellardita, 2010). Dari grafik dapat dilihat bahwa katalis termodifikasi dengan loading urea 10% memiliki kinerja yang lebih baik dalam mendegradasi gas CO. Hal ini sesuai dengan hasil karakterisasi DRS dimana katalis ini memiliki *bandgap energy* lebih kecil dibandingkan yang lainnya sehingga dapat mengabsorb sinar tampak lebih baik daripada yang lain.

Pada katalis TiO_2 termodifikasi dengan loading urea 0%, terlihat bahwa gas CO juga mengalami penurunan konsentrasi walaupun tidak mendapat penambahan urea. Adanya penambahan TEOS, yang diharapkan sebagai sumber SiO_2 , dapat meningkatkan adsorbansi katalis terhadap reaktan (Kyeong, 1999).

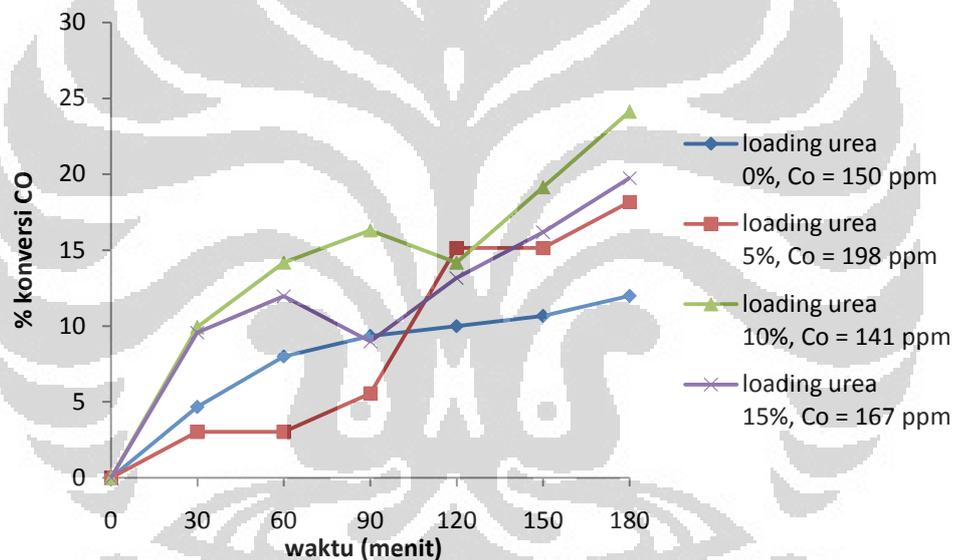
Dengan demikian, fenomena yang terjadi tidak hanya proses fotokatalitik, tetapi juga adsorpsi terhadap gas polutan.

Pada proses fotokatalitik, polutan akan teradsorb ke permukaan katalis dan kemudian terjadi reaksi oksidasi oleh hidroksil yang dihasilkan TiO_2 (Jiangyao, 2011). Reaksi oksidasi terhadap gas CO akan menghasilkan gas CO_2 sesuai dengan reaksi:



Namun pada pengujian ini, kenaikan konsentrasi gas CO_2 tidak dapat diukur karena keterbatasan alat analisis.

Kinerja dari lampu hias dengan penutup berlapis katalis dalam mengkonversi gas CO selama 180 menit dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



Gambar 4.7. Persentase kemampuan konversi gas CO

Selama 180 menit pengujian, katalis TiO_2 termodifikasi mampu mendegradasi gas CO sebesar 24% dengan konsentrasi awal 141 ppm. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan TEOS dan urea mampu memodifikasi TiO_2 sehingga memiliki kinerja di bawah sinar tampak dan dapat meningkatkan kemampuan adsorpsi katalis terhadap polutan. Kemampuan degradasi yang tidak terlalu besar ini merupakan akibat dari ketidakberhasilan melakukan penambahan dopan N sehingga katalis tidak memiliki kemampuan mengabsorb cahaya sinar tampak dengan baik. Walaupun ketidakberhasilan penambahan dopan N

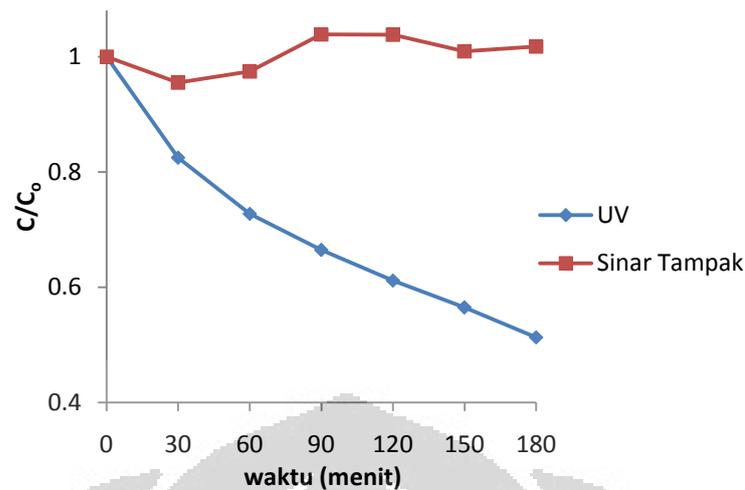
merupakan faktor utama dari rendahnya kinerja degradasi oleh katalis, ada penyebab lain yang dapat berperan terhadap rendahnya kinerja katalis tersebut. Faktor lain tersebut antara lain, konfigurasi lampu hias dimana lampu berjarak 11 cm dari kain penutup lampu berlapis katalis juga menyebabkan intensitas cahaya yang diterima oleh katalis kurang besar. Hasil SEM juga menunjukkan bahwa keterbatasan metode *coating* menyebabkan katalis hanya mampu ter-*coating* di bagian permukaan luar kain saja. Hal ini menyebabkan kinerja katalis tidak terlalu baik dalam mendegradasi gas CO.

4.3.2. Uji Degradasi Formaldehida

Pengujian kinerja degradasi formaldehida yang dilakukan sama seperti pengujian terhadap degradasi gas CO. Berbeda dengan CO yang berwujud gas, formaldehida terlebih dahulu harus diuapkan dengan pemanasan agar terbentuk gas formaldehida. Gas formaldehida kemudian dimasukkan ke dalam kotak uji dan dianalisis penurunan konsentrasinya menggunakan GC. Proses degradasi yang merupakan proses oksidasi formaldehida tidak bisa didasarkan pada pembentukan CO₂. Keberadaan CO₂ tidak dapat dideteksi karena keterbatasan dari alat analisis yang digunakan. Selain itu, proses oksidasi formaldehida tidak bisa didasarkan pada pembentukan CO₂ karena proses oksidasi dari senyawa organik tidak selalu menghasilkan CO₂ sebagai produk akhir oksidasi, tetapi senyawa intermediet yaitu asam karboksilat. Berikut adalah urutan oksidasi senyawa organik aldehida (Fessenden, 1986):

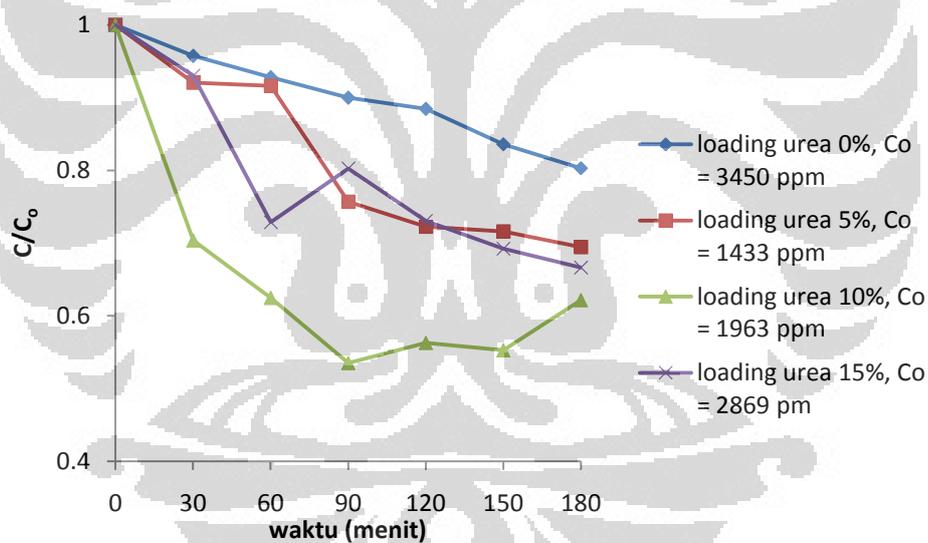


Sama seperti pengujian terhadap gas CO, terlebih dahulu dilakukan pengujian terhadap kinerja fotokatalis TiO₂ murni. Hasil yang sama seperti pada pengujian menggunakan gas CO (asap rokok) juga terlihat pada pengujian dengan menggunakan gas formaldehida. Pada penyinaran di bawah sinar ultraviolet, katalis mampu mendegradasi gas formaldehida. Namun pada penyinaran dengan cahaya tampak, katalis tidak mampu mengabsorb cahaya tampak sehingga tidak dapat menghasilkan h^+ yang akan menginisiasi reaksi oksidasi dari formaldehida.



Gambar 4.8. Degradasi formaldehida menggunakan katalis TiO₂

Hasil degradasi lampu hias termodifikasi katalis terhadap gas formaldehida dapat dilihat pada grafik berikut:

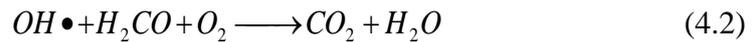


Gambar 4.9. Degradasi formaldehida di bawah sinar tampak

Hasil pengujian terhadap degradasi formaldehida juga menunjukkan hasil yang sama seperti pada pengujian gas CO, yaitu terjadi penurunan konsentrasi formaldehida selama 180 menit pengujian. Katalis TiO₂ termodifikasi juga menunjukkan kemampuan menurunkan konsentrasi formaldehida di dalam kotak uji dengan cahaya sinar tampak. Hasil yang konsisten dengan pengujian menggunakan asap rokok juga diperlihatkan pada pengujian ini dimana persentase

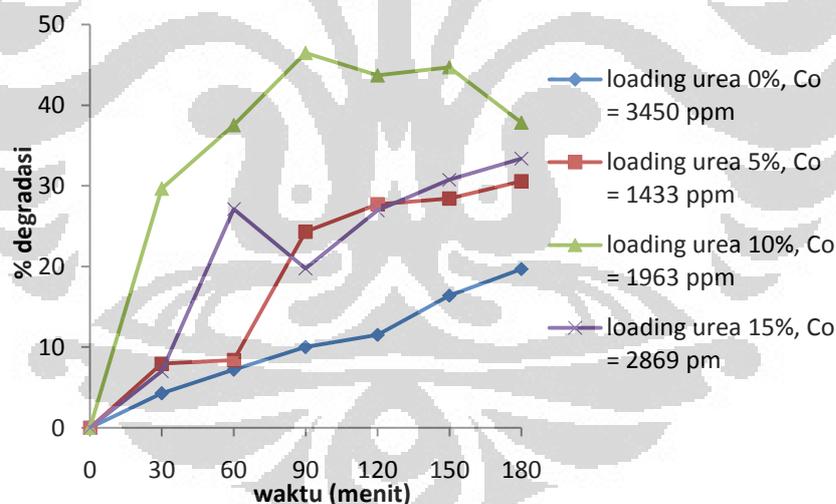
penurunan konsentrasi formaldehida lebih besar dengan menggunakan katalis variasi loading urea 10%.

Proses degradasi gas formaldehida dimulai dengan gas formaldehida teradsorb di permukaan fotokatalis (Bellardi, 2010). Kemudian, radikal hidroksil yang terbentuk dari reaksi h^+ dengan uap air di udara mulai mengoksidasi gas formaldehida menjadi CO_2 dan H_2O (Ting, 2010), sesuai dengan reaksi:



Karena keterbatasan alat pengujian yang digunakan, maka keberadaan gas CO_2 tidak dapat dideteksi.

Dari grafik terlihat bahwa setelah menit ke-90 terjadi kenaikan konsentrasi formaldehida. Hal ini dapat disebabkan ketidakhomogenan di dalam kotak uji karena sirkulasi di dalam kotak uji tidak dapat dikontrol. Selain itu, penyebab lain yang mungkin terjadi adalah formaldehida yang tadinya teradsorb di permukaan katalis mengalami desorpsi sehingga konsentrasi formaldehida yang terukur mengalami peningkatan.

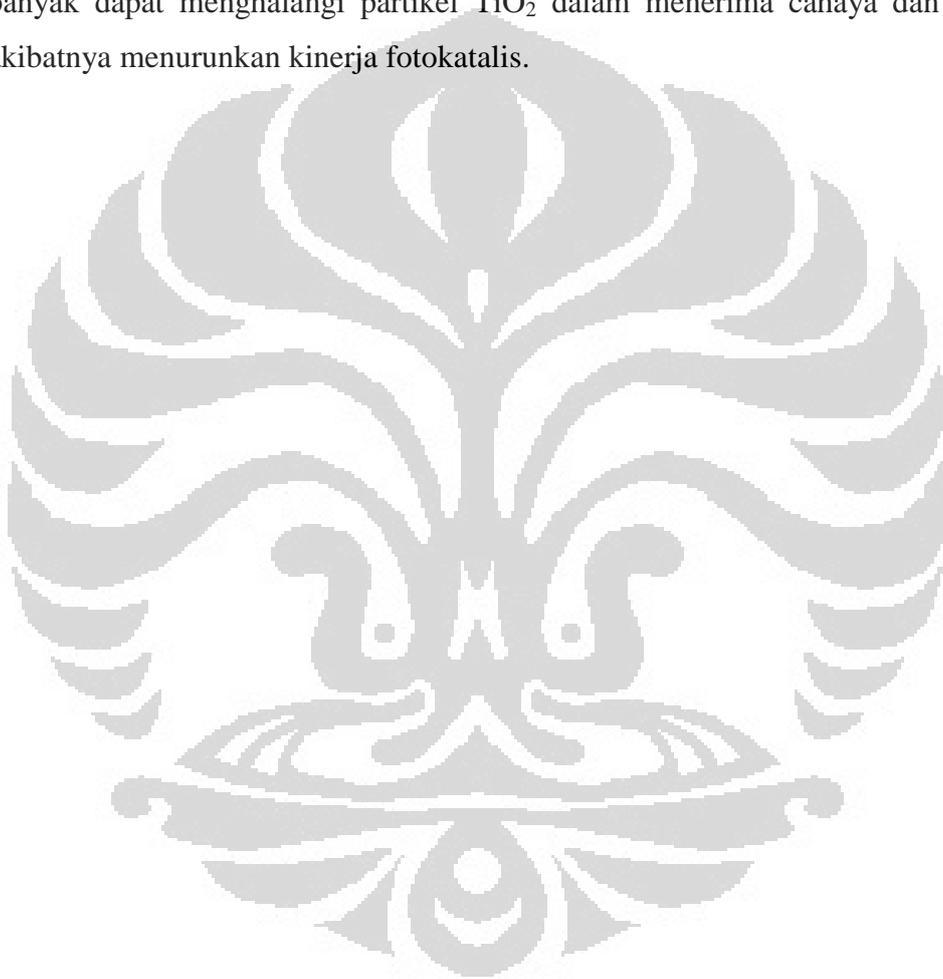


Gambar 4.10. Persentase kemampuan degradasi gas formaldehida

Persentase degradasi terhadap gas formaldehida selama 180 menit dapat dilihat pada Gambar 4.10. Katalis TiO_2 termodifikasi mampu mendegradasi gas formaldehida sampai 38% dengan konsentrasi awal formaldehida sebesar 1963 ppm. Dari hasil pengujian ini terlihat bahwa kemampuan degradasi fotokatalis terhadap gas formaldehida lebih baik daripada gas CO. Hal ini mungkin terjadi

karena adanya perbedaan perilaku dari gas formaldehida sebagai senyawa organik dengan gas CO.

Dari semua pengujian terlihat konsistensi dimana katalis termodifikasi dengan loading urea 10% menunjukkan kemampuan degradasi yang lebih baik dari yang lain. Hal ini juga didukung dengan hasil karakterisasi DRS. Penambahan loading urea lebih besar dari 10% justru menurunkan aktivitas fotokatalitik dari TiO₂. Hal ini dapat disebabkan oleh kehadiran urea yang lebih banyak dapat menghalangi partikel TiO₂ dalam menerima cahaya dan sebagai akibatnya menurunkan kinerja fotokatalis.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian degradasi polutan udara ruangan menggunakan lampu hias dengan penutup lampu berlapis katalis TiO₂ termodifikasi adalah:

1. Katalis TiO₂ yang dimodifikasi dengan penambahan TEOS dan urea mampu memberikan kinerja degradasi polutan di bawah sinar tampak.
2. Lampu hias dengan penutup lampu berlapis katalis TiO₂ termodifikasi mampu mendegradasi gas CO dari asap rokok sampai 24% dan gas formaldehida sampai 38% selama 180 menit pada konsentrasi awal polutan tertentu.
3. Katalis TiO₂ termodifikasi dengan loading urea 10% memberikan kinerja degradasi yang lebih baik dari variasi loading urea 0%, 5%, dan 15%.
4. Degradasi polutan dengan menggunakan katalis termodifikasi melibatkan proses fotokatalitik dan adsorpsi.

5.2. Saran

Hal-hal yang direkomendasikan untuk dilakukan pada penelitian sejenis adalah:

1. Memodifikasi metode preparasi katalis agar dihasilkan katalis dengan kinerja yang lebih baik.
2. Melakukan modifikasi pada konfigurasi alat sehingga intensitas cahaya yang diterima katalis dapat lebih optimal.
3. Menggunakan metode *coating* yang lain agar dapat menghasilkan morfologi yang merata di permukaan bahan yang di-*coating*.

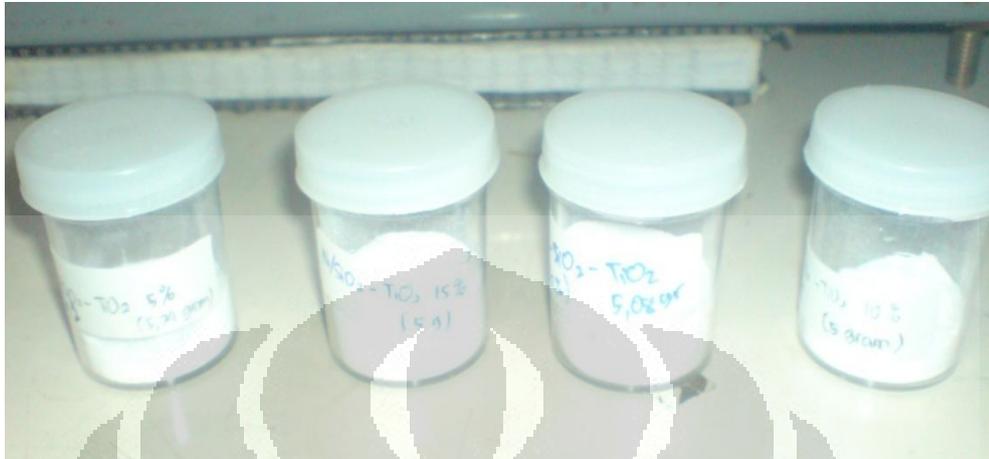
DAFTAR REFERENSI

- Ao, C. H., Lee, S. C. (2005). Indoor air purification by photocatalyst TiO₂ immobilized on an activated carbon filter installed in an air cleaner. *Chem. Eng. Sci.*, 60, 103-109.
- Ao, C. H., Lee, S. C., Yu, J. C. (2002). Photocatalyst TiO₂ supported on glass fiber for indoor air purification: effect of NO on the photodegradation of CO and NO₂. *J. of Photoch. Photobio A: Chem.*, 156, 171-177.
- Ao, C. H., Lee, S. C., Mak, C. L., Chan, L. Y. (2002). Photodegradation of volatile organic compounds (VOCs) and NO for indoor air purification using TiO₂: promotion versus inhibition effect of NO. *Appl. Catal. B: Environ.*, 42, 119-129.
- Amemiya, S. (2004). Titanium-Oxide Photocatalyst. *Three Bond Technical News*, 62, 1-8.
- Bellardita, M., Addamo, M., Di Paola, A., Marci, G., Palmisano, L., Cassar, L., Borsa, M. (2010) Photocatalytic activity of TiO₂/SiO₂ systems. *J. Hazard. Mater.*, 174, 707-713.
- Chen, X., Mao, S. (2007). Titanium dioxide nanomaterials: synthesis, properties, modifications, and applications. *Chem. Rev.*, 107, 2891-2959.
- Colmenares, J. C., Luque, R., Campelo, J. M., Colmenares, F., Karpinski, Z., and Romero, A. A. (2009). Nanostructured photocatalysts and their applications in the photocatalytic transformation of lignocellulosic biomass: An overview. *Mater.*, 2, 2228-2259.
- Cristallo, G., Roncari E., Rinaldo A., Trifirò F. (2001). Study of anatase–rutile transition phase in monolithic catalyst V₂O₅/TiO₂ and V₂O₅–WO₃/TiO₂. *Appl. Catal. A*, 209, 249–256.
- Departemen Kesehatan Republik Indonesia. (2010). *Parameter Pencemar Udara Dan Dampaknya Terhadap Kesehatan*. March 25, 2011. Departemen Kesehatan Republik Indonesia. <http://www.depkes.go.id/downloads/Udara.PDF>

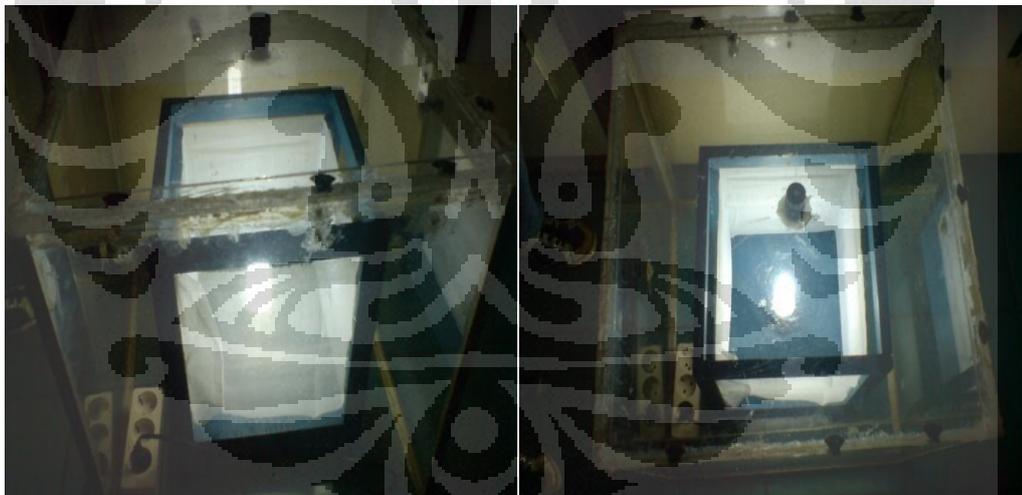
- Duy, D. L., Thi, M.D.D., Vinh, T. C., Mau, C.D. (2010). The fabrication of visible light responsive Ag-SiO₂ co-doped TiO₂ thin films by the sol-gel method. *Adv.Natur. Sci.: Nanosci.Nanotech.*, 1, 1-5.
- Environmental Protection Agency US. (1997). *An Introduction to Indoor Air Quality (IAQ)*. March 21, 2011. United States Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/iaq/formalde.html>
- Fujishima, A., Rao, T. N., Tryk, D. A. (2000). Titanium Dioxide Photocatalysis. *J. Photoch.Photobio C: Photoch. Rev.*, 1, 1-21.
- Gunlazuardi, J. (2001). *Fotokatalisis pada permukaan TiO₂: Aspek Fundamental dan Aplikasinya*. Prosiding Seminar Nasional Kimia Fisika II, Jakarta.
- Huang, Y., Xuxu, Z., Zhongyi, Y., Feng, T., Beibei, F., and Keshan H. (2007). Preparation of Nitrogen-doped TiO₂ Nanoparticle Catalyst and Its Catalytic Activity under Visible Light. *Chin. J. Chem. Eng.*, 15, 802-807.
- 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 Organic Compounds in Indoor Air. *J. Air Waste Manage*, 46, 891-898.
- Kyeong, Y. J., Seung, B. P. (2000). Enhanced photoactivity of silica-embedded titania particles prepared by sol-gel process for the decomposition of trichloroethylene. *Appl. Catal. B: Environ.* 25, 249-256.
- Laurent, G., Rene, W., Leila, D. (2009). *Air purification wall*. United States Patent and Trademark, Pub. No. 7,582,256
- Litter, M. I., Navio, J. A., (1996). Photocatalytic properties of iron-doped titania semiconductors. *J. of Photoch. and Photobio. A: Chem.*, 98, 171-181.
- Liu, W. X., Ma, J., Qu, X. G., Cao, W. B. (2009). Hydrothermal synthesis of (Fe, N) co-doped TiO₂ powders and their photocatalytic properties under visible light irradiation. *Res. Chem. Intermed.*, 35, 321-328.
- Minnesota Department of Health. (2009). *Volatile Organic Compounds (VOCs) in Your Home*. March 21, 2011. Minnesota Department of Health. <http://www.health.state.mn.us/divs/eh/indoorair/voc>
- 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.
- Schweitzer, J. (2011). *Scanning Electron Microscope*. June 27, 2011. Purdue University. <http://www.purdue.edu/rem/rs/sem.htm>
- Sikong, L., Kooptarnond, K., Niyomwas, S., Damchan, J. (2010). Photoactivity and hydrophilic property of SiO₂ and SnO₂ co-doped TiO₂ nano-composite thin films. *Songkl. J. Sci. Tech.*, 32, 413-418.
- Soewarno, S. (2009). *Kualitas Udara di dalam Gedung (KUG)*. March 23, 2010. <http://www.jurnalisinsihyurmesin.com/index.php>
- Su, C., Hong, B. Y. and Tseng, C. M. (2004) Sol-gel Preparation and Photocatalysis of Titanium dioxide. *Catal. Today.*, 96, 119-126.
- Susanna D., Fitria L., Wulandari R., Hermawati E. (2008). *Kualitas Udara dalam Ruang Perpustakaan Universitas "X" Ditinjau dari Kualitas Biologi, Fisik, dan Kimiawi*. Makara, Kesehatan, Vol. 12, 2, 77-83.
- Thi, M.D.D., Duy, D. L., Vinh, T. C., Mau, C.D. (2010). Visible-light photocatalytic activity of N/SiO₂-TiO₂ thin films on glass. *Adv. Natur. Sci.: Nanosci. Nanotech.*, 1, 1-5.
- Tseng, T. K., Lin, Y. S., Chen, Y. J., and Chu H. (2010). A review of photocatalysts prepared by sol-gel method for VOCs removal. *Int. J. Mol. Sci.*, 11, 2336-2361.
- Xing, M., Wu, Y., Zhang, J., and Chen, F. (2010). Effect of synergy on the visible light activity of B, N and Fe co-doped TiO₂ for the degradation of MO. *Nanoscale*, 2, 1233-1239.
- Yuan, Q., Feng, G., Guang, X. (2006). Non-thermal Plasma-Nanometer TiO₂ Photocatalyst for Formaldehyde Decomposition. *Max. Comfort: Temp., Humid., and IAQ*, 1, 3-5.
- Xin, Z., Qingquan, L. (2008). Visible-light-induced degradation of formaldehyde over titania photocatalyst co-doped with nitrogen and nickel. *Appl. Surf. Sci.*, 254, 4780-4785.
- Zhang, J., Wu. Y., Xing, M., Leghari, S. A. K., and Sajjad, S. (2010). Development of modified N doped TiO₂ photocatalyst with metals, nonmetals, and metal oxides. *Energy & Environ. Sci.*, 3, 715-726.

Lampiran A: Dokumentasi Penelitian



Lampiran A.1. Katalis TiO_2 termodifikasi dengan variasi loading urea 0%, 5%, 10%, 15%



Lampiran A.2. Pengujian degradasi polutan di dalam kotak uji

(lanjutan)

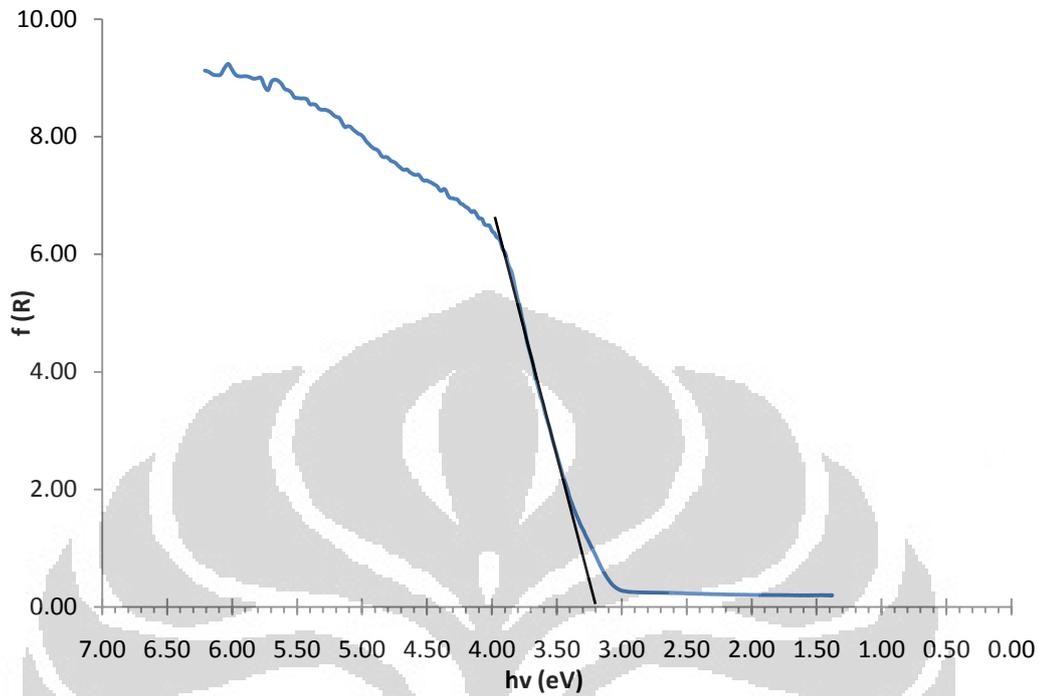


Lampiran A.3. Portable gas analyzer tipe TPI 708 yang digunakan untuk analisis gas CO

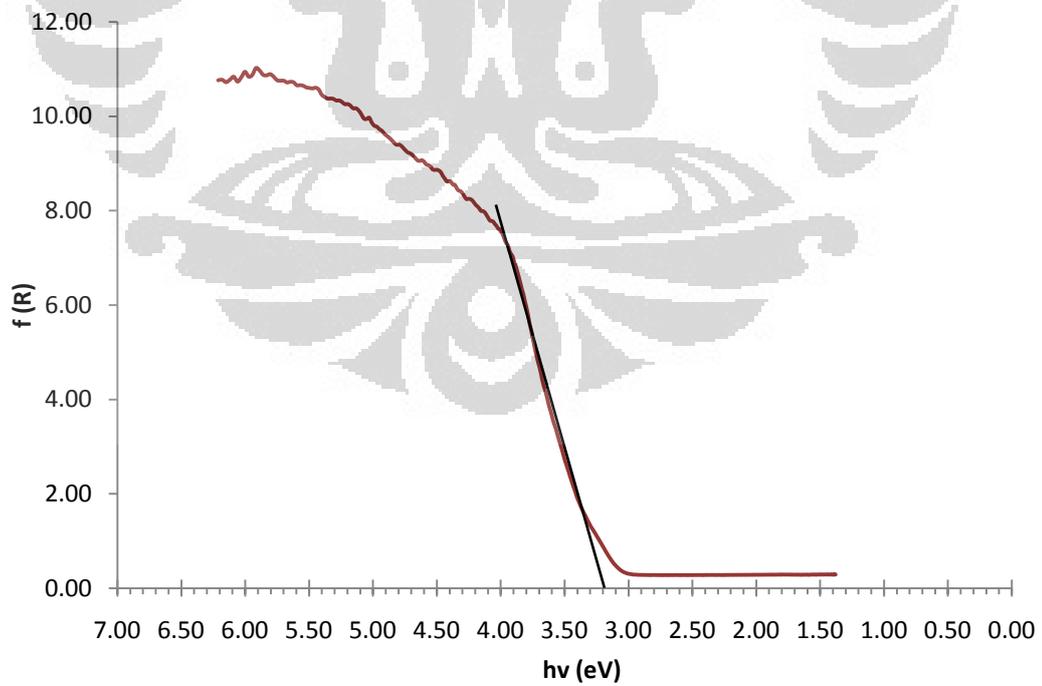


Lampiran A.4. GC FID dan recorder yang digunakan untuk analisis formaldehida

Lampiran B: Perhitungan *Band Gap Energy* Katalis

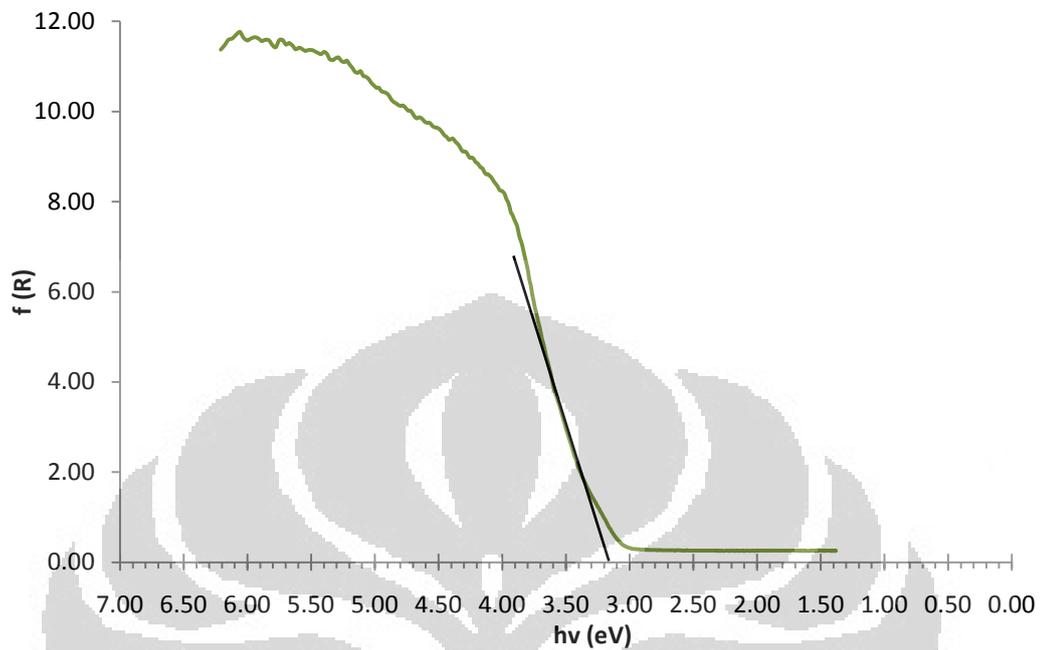


Lampiran B.1. Grafik perhitungan *bandgap energy* katalis TiO₂ termodifikasi (loading urea 0%)

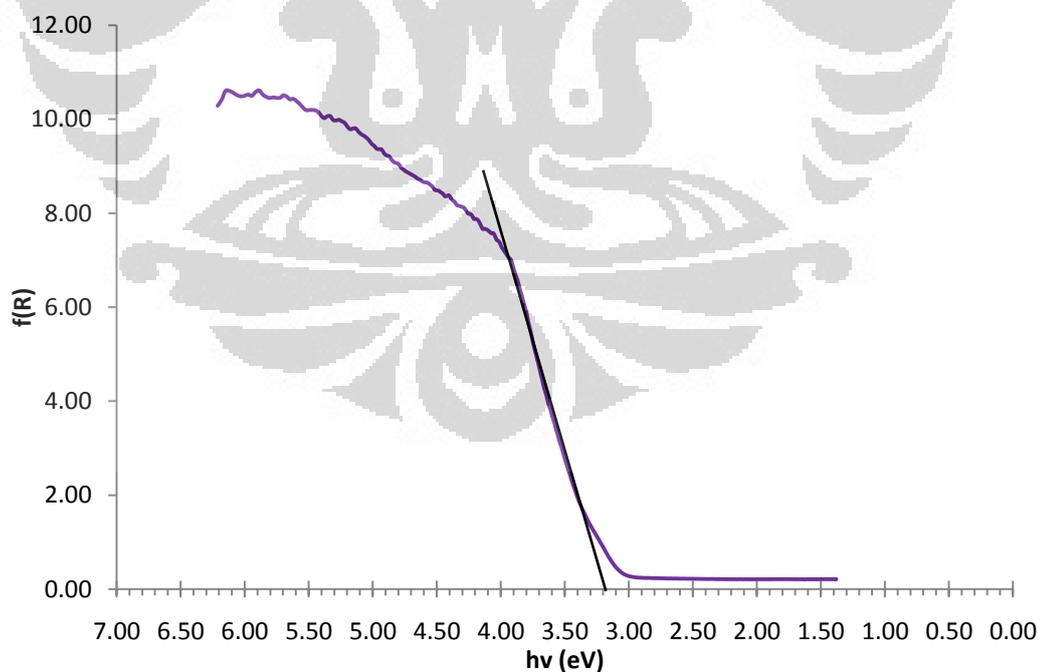


Lampiran B.2. Grafik perhitungan *bandgap energy* katalis TiO₂ termodifikasi (loading urea 5%)

(lanjutan)



Lampiran B.3. Grafik perhitungan *bandgap energy* katalis TiO₂ termodifikasi (loading urea 10%)



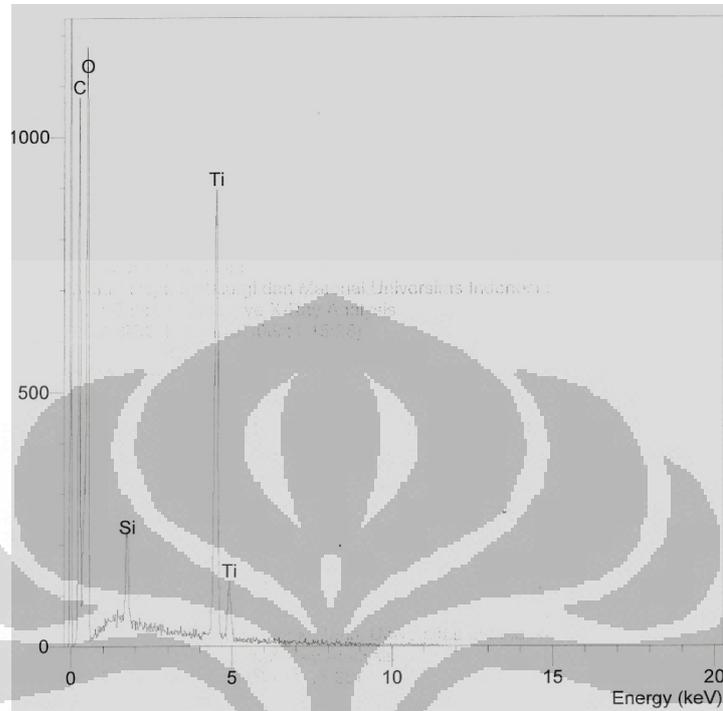
Lampiran B.4. Grafik perhitungan *bandgap energy* katalis TiO₂ termodifikasi (loading urea 15%)

Lampiran C: Kalibrasi Konsentrasi Formaldehida

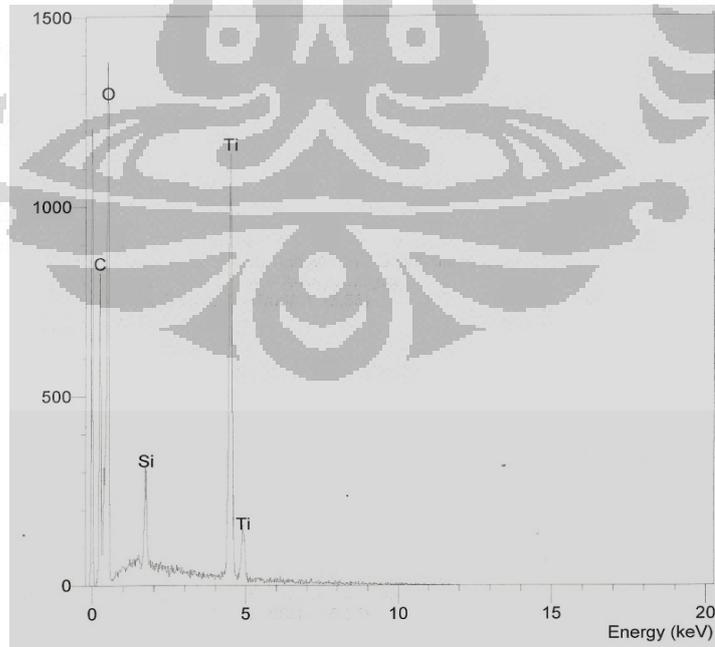
Lampiran C.1. Tabel kalibrasi data peak area formaldehida menjadi konsentrasi (ppm)

Volume (μL)	Peak Area	Konsentrasi (ppm)
0	0	0
100	212	363.64
200	357	727.27
300	531	1090.91
400	689	1454.55
500	880	1818.18
600	1037	2181.82
700	1475	2545.45
800	2012	2909.09
900	2847	3272.73
1000	3573	3636.36

Lampiran D: Hasil Karakterisasi EDX

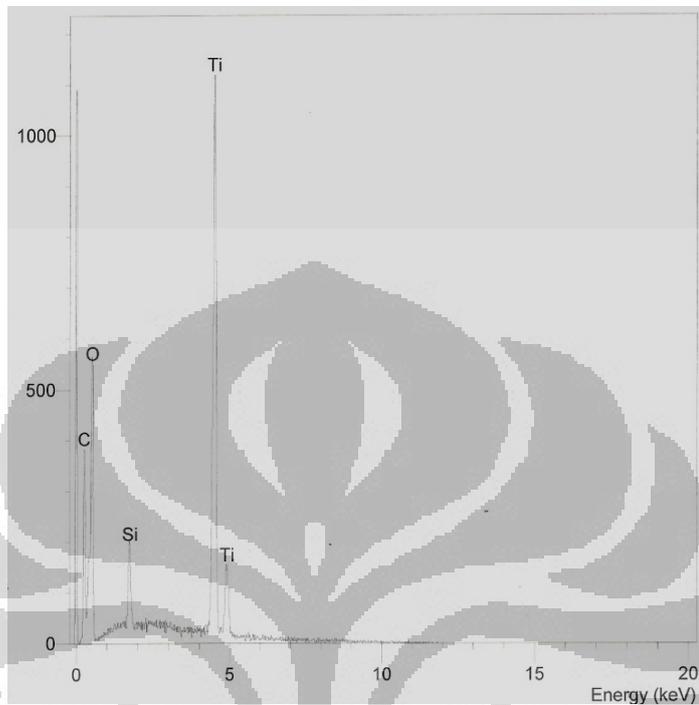


Lampiran D.1. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 0% (area 1)

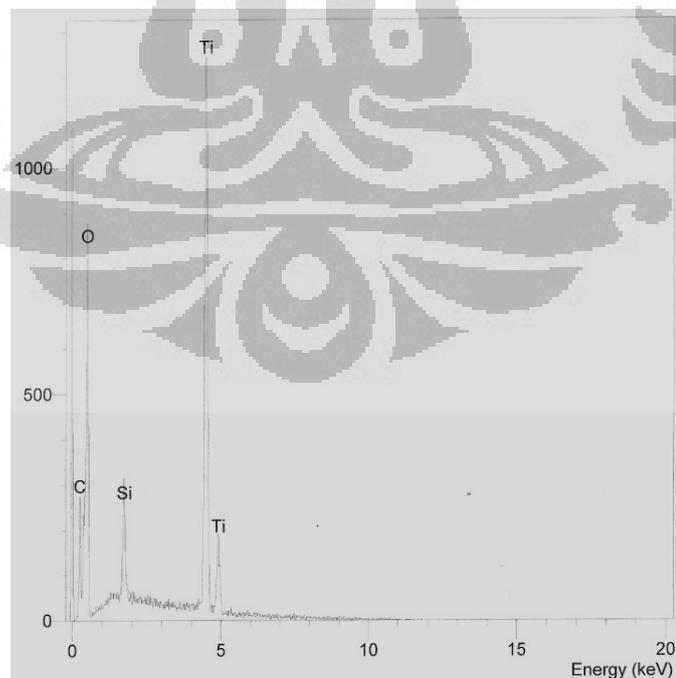


Lampiran D.2. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 0% (area 2)

(lanjutan)

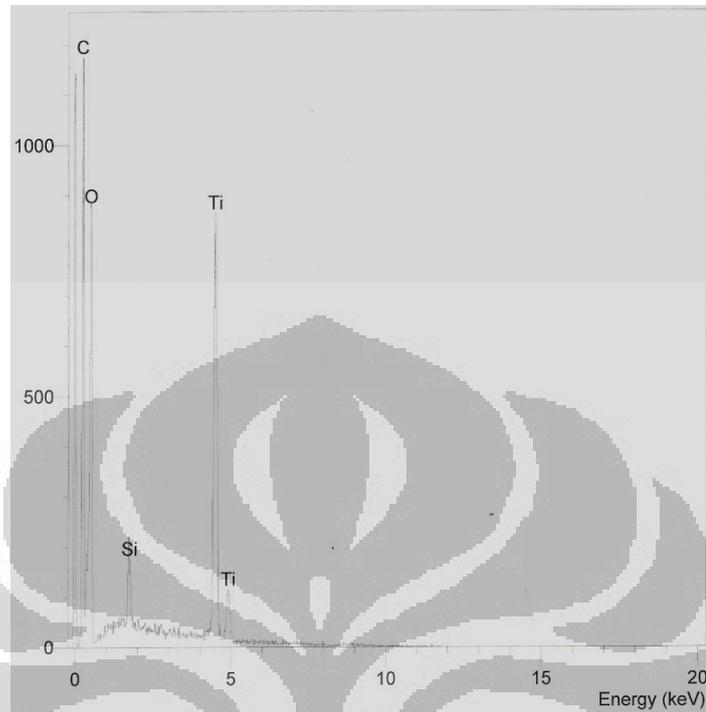


Lampiran D.3. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 0% (area 3)

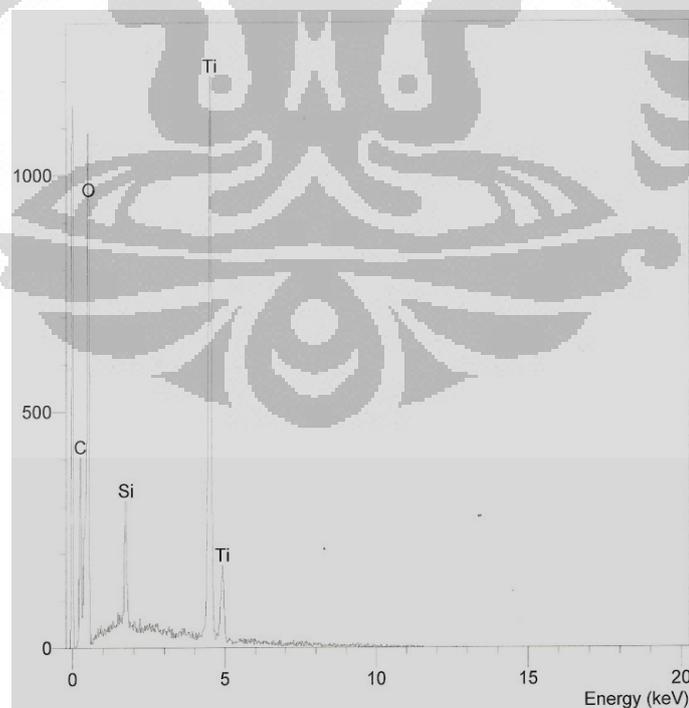


Lampiran D.4. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 5% (area 1)

(lanjutan)

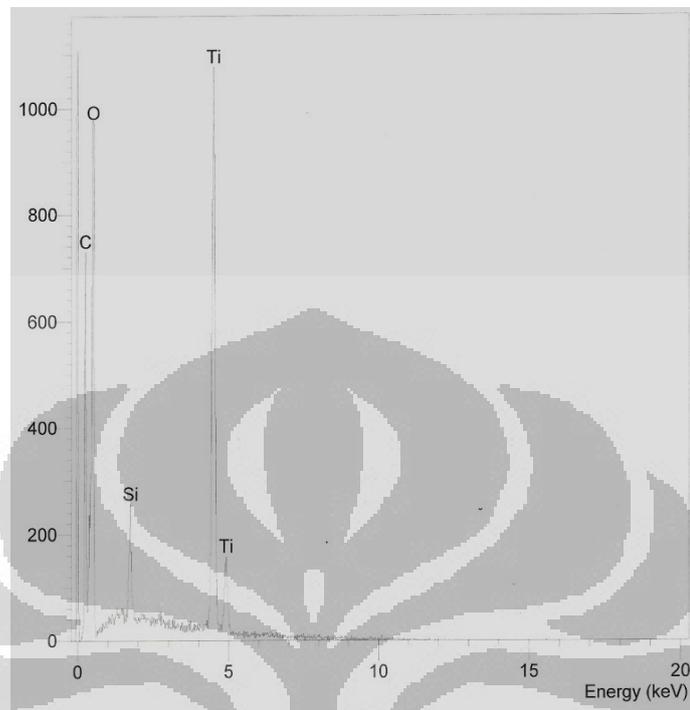


Lampiran D.5. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 5% (area 2)

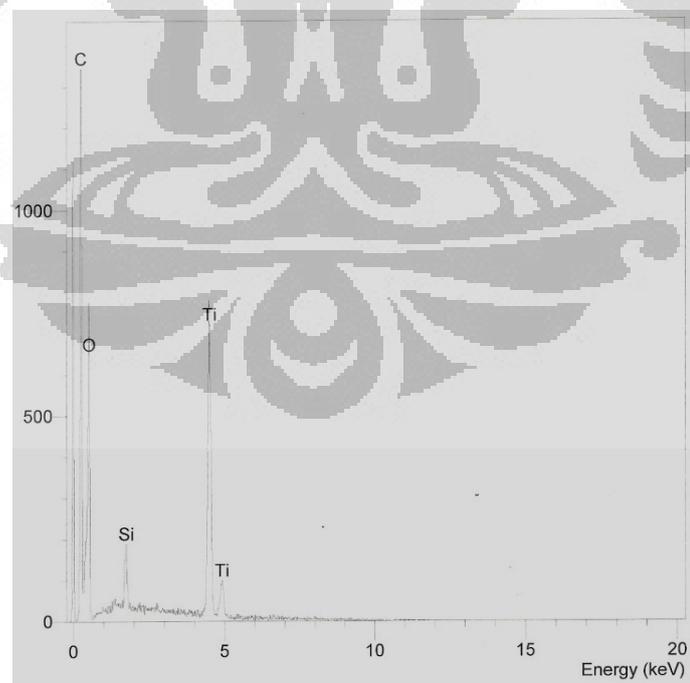


Lampiran D.6. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 5% (area 3)

(lanjutan)

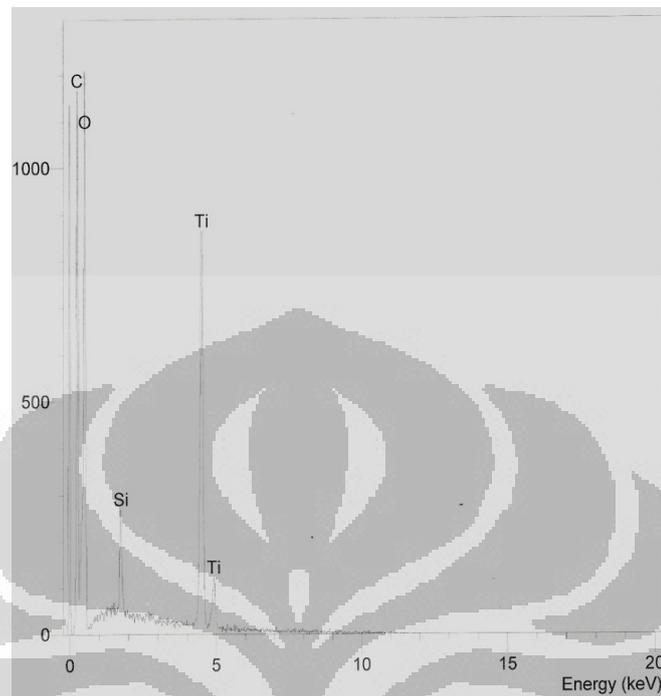


Lampiran D.7. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 10% (area 1)

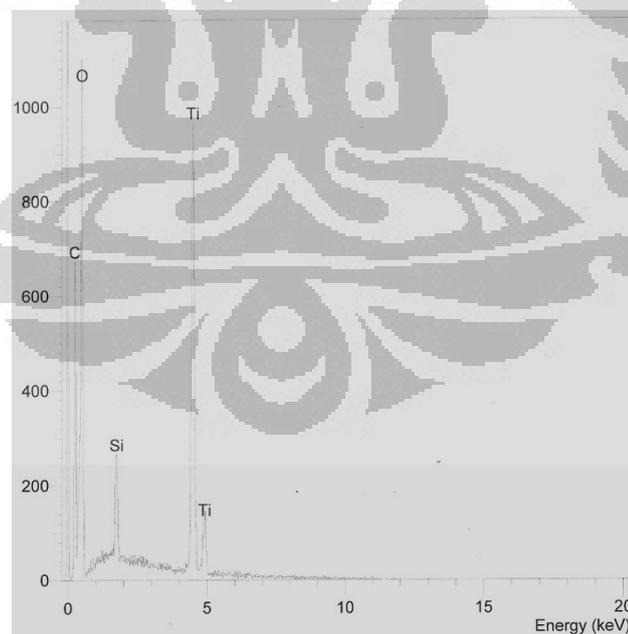


Lampiran D.8. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 10% (area 2)

(lanjutan)

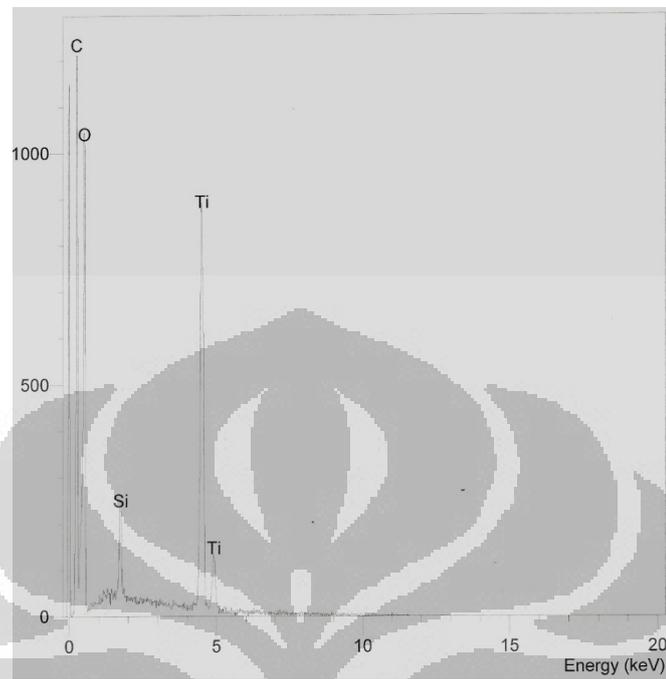


Lampiran D.9. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 10% (area 3)

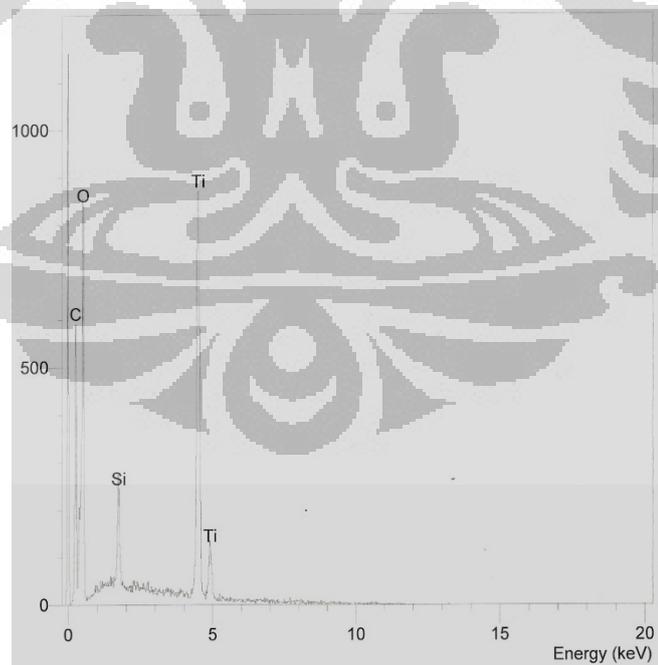


Lampiran D.10. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 15% (area 1)

(lanjutan)



Lampiran D.11. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 15% (area 2)



Lampiran D.12. Hasil karakterisasi EDX untuk katalis dengan variasi loading urea 15% (area 3)