



UNIVERSITAS INDONESIA

**SINTESIS DAN UJI KINERJA KATALIS KOMPOSIT
Ag/TiO₂ – ZEOLIT ALAM LAMPUNG – KARBON AKTIF
SERTA REKAYASA ALAT UNTUK
PURIFIKASI UDARA RUANG**

SKRIPSI

**ARIO GURITNO
0806332824**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**SINTESIS DAN UJI KINERJA KATALIS KOMPOSIT
Ag/TiO₂ – ZEOLIT ALAM LAMPUNG – KARBON AKTIF
SERTA REKAYASA ALAT UNTUK
PURIFIKASI UDARA RUANG**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**ARIO GURITNO
0806332824**

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

ii

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Ario Guritno

NPM : 08 06 33 28 24

Tanda Tangan : 

Tanggal : 4 Juli 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Ario Guritno
NPM : 08 06 33 28 24
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Sintesis dan Uji Kinerja Katalis Komposit
Ag/TiO₂ – Zeolit Alam Lampung – Karbon Aktif
serta Rekayasa Alat untuk Purifikasi Udara Ruang

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, M.T. (.....)
Penguji : M. Ibadurrohman, S.T, M.T, M.Sc.Eng (.....)
Penguji : Dr. Ir. Setiadi, M.Eng (.....)
Penguji : Dr. Muhamad Sahlan, S.Si, M.Eng (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Juli 2012

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah membimbing setiap detik hidup penulis dan menjadi sandaran serta tempat berkeluh kesah hingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, sangatlah sulit bagi untuk dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Slamet, M.T selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
2. Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI dan Ir. Yuliusman, M. Eng selaku koordinator mata kuliah spesial.
3. Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA selaku Pembimbing Akademis yang telah memberi masukan selama 4 tahun penulis menjalani masa perkuliahan.
4. Kang Jajat Sudrajat, Mang Wanizal, Mas Eko Anjang B., dan teknisi serta laboran lain yang telah banyak membantu proses penelitian di Laboratorium RPKA dan DPK DTK FTUI.
5. Ibu Ir. Irma Gusniani selaku Kepala Laboratorium TPL Departemen Teknik Sipil FTUI dan Mbak Sri Diah selaku laboran atas bantuan selama mengerjakan TPC untuk uji disinfeksi *E.coli*.
6. Bapak Dr. Ir. Sri Harjanto atas bantuan dan pinjaman alat *planetary ball mill* di Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI.
7. Ibu, Bapak, Adhi, dan Reza di Sragen yang selalu mendoakan, memberi semangat, dan dukungan dalam setiap usaha penulis. Semoga skripsi ini dapat menjadi hadiah kecil bagi perjuangan dan kasih sayang yang telah diberikan oleh orang tua kepada penulis.
8. Teman-teman satu bimbingan dan Laboratorium RPKA (Tania, Vina, Kenny, Harsono, Wisnu, Adit, Rickie, Mahandika, Bu Ratna, Pak Agung, dan yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu) atas segala masukan, bantuan,

pinjaman alat, hingga kesediaan menggilir GC-TCD selama beraktivitas di Lab. RPKA.

9. Rakhman yang setia mengirimkan semangat dan dorongan dari benua seberang. Teman-teman sepelingkaran; Mas Kiki, Mahar, Alvi, Luthfi, Waway yang selalu menjadi pengingat manisnya *ukhuwwah*.
10. Kawan-kawan kontrakan yang setia menjadi tempat mencari inspirasi dalam menulis skripsi; Bagas, Habib, Mada, Dhani, Afreza, Hilman, Ibnu, Illyin, Sungging, Sigit, Adibowo, Fikri, Rinus.
11. Ivan, Haafizh, Thariq, dan Andika sebagai *partner in crime* di SOSMA IMTK yang selalu memberi semangat dan dukungan; tetap *kerja keras, kerja ikhlas, kerja cerdas!*
12. Aziz dan Febrian Adhi yang seringkali direpotkan dan dipinjam motornya untuk mengantarkan penulis mencari alat dan bahan penelitian.
13. Teman-teman DTK dan FTUI 2008 yang selama 4 tahun setia menularkan semangat serta berbagi suka dan duka.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, oleh karena itu penulis dengan segala kerendahan hati menerima masukan dan kritik demi perbaikan ke depannya. Akhir kata semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 4 Juli 2012

Penulis

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

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

Nama : Ario Guritno
NPM : 08 06 33 28 24
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

**Sintesis dan Uji Kinerja Katalis Komposit
Ag/TiO₂ – Zeolit Alam Lampung – Karbon Aktif
serta Rekayasa Alat untuk Purifikasi Udara Ruang**

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 : 4 Juli 2012

Yang menyatakan



(Ario Guritno)

ABSTRAK

Nama : Ario Guritno
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Sintesis dan Uji Kinerja Katalis Komposit Ag/TiO₂ – Zeolit Alam Lampung – Karbon Aktif serta Rekayasa Alat untuk Purifikasi Udara Ruang

Sintesis dan uji kinerja katalis komposit Ag/TiO₂-zeolit alam lampung-karbon aktif serta rekayasa alat untuk purifikasi udara ruang telah dilakukan. Katalis komposit ini dilapiskan ke pelat aluminium dengan metode *spin coating* dan selanjutnya diintegrasikan ke dalam prototipe alat purifikasi udara. Model polutan yang digunakan adalah bakteri *E.coli* sebagai model polutan biologis dan karbon monoksida pada asap rokok sebagai model polutan kimiawi. Karakterisasi XRD menunjukkan ukuran kristal anatase, rutil, Ag, Ag₂O, dan AgO berturut-turut sebesar 20, 23, 16, 29, dan 23 nm. Hasil uji kinerja katalis menunjukkan disinfeksi bakteri mencapai 100% pada *loading* Ag 3,0wt% dan laju disinfeksi tertinggi pada *loading* 1,0wt%. Spesi ROS untuk disinfeksi dapat ditemukan pula pada udara, sehingga katalis aktif digunakan untuk purifikasi udara. Hasil uji kinerja katalis dan alat pada degradasi CO menunjukkan 80,25% CO murni pada konsentrasi tinggi terdegradasi. Produksi CO₂ belum dapat diamati karena belum terjadi desorpsi oleh adsorben.

Kata kunci: Adsorpsi, dopan Ag, *E.coli*, fotokatalis TiO₂, karbon aktif, karbon monoksida, purifikasi udara, zeolit alam lampung.

ABSTRACT

Name : Ario Guritno
Major : Chemical Engineering
Title : Synthesis and Performance Test of Ag/TiO₂ – Lampung Natural Zeolite – Activated Carbon Composite Catalyst and Device Prototyping for Indoor Air Purification

Synthesis and performance test of Ag/TiO₂-lampung natural zeolite-activated carbon and prototyping for indoor air purification has been done. The composite catalysts were coated to aluminium plate by using spin coating method and then being integrated to indoor air purification prototype. *E.coli* bacteria as biological pollutant model and carbon monoxide in cigar smoke as chemical pollutant model were used. XRD characterization shows crystallinity size of anatase, rutile, Ag, Ag₂O, dan AgO respectively 20, 23, 16, 29, dan 23 nm. Performance test of catalysts shows that bacteria disinfection up to 100% on 3,0wt% Ag loading with highest disinfection rate on 1,0wt% Ag loading. ROS specimen for disinfection can be found also in indoor air so the catalyst can be actively used for air purification. Performance test for catalyst and device shows that pure CO degradate up to 80,25% in high concentration. CO₂ production has not been observed because of it has not been desorb by the adsorbent.

Keywords: Activated carbon, adsorption, Ag doped, air purification, carbon monoxide, *E.coli*, lampung natural zeolite, TiO₂ photocatalyst.

DAFTAR ISI

Halaman Sampul	i
Halaman Judul.....	ii
Halaman Pernyataan Orisinalitas	iii
Halaman Pengesahan	iv
Kata Pengantar	v
Halaman Pernyataan Persetujuan Publikasi	vii
Abstrak	viii
Abstract	ix
Daftar Isi.....	x
Daftar Gambar.....	xiii
Daftar Tabel	xv
Daftar Lampiran	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Sistematika Penulisan	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Fotokatalisis	7
2.1.1 Proses Fotokatalisis	7
2.1.2 Fotokatalis TiO ₂	8
2.2 Adsorpsi	10
2.2.1 Adsorben Zeolit Alam Lampung (ZAL)	11
2.2.2 Adsorben Karbon Aktif.....	12
2.2.3 Kombinasi Proses Fotokatalisis-Adsorpsi.....	13
2.3 Dopan Logam.....	14
2.3.1 Penggunaan Dopan Logam pada Proses Fotokatalisis.....	15
2.3.2 Dopan Logam Perak (Ag)	16
2.3.3 Metode Preparasi Dopan Logam Ag.....	17
2.4 Model Polutan Udara Ruang.....	17
2.4.1 Asap Rokok; Karbon Monoksida (CO)	18
2.4.2 Mikroorganisme; Bakteri <i>Escherichia coli</i>	19
2.5 Proses Degradasi dan Disinfeksi Model Polutan Udara Ruang oleh Fotokatalisis	21
2.5.1 Karbon Monoksida (CO).....	21
2.5.2 Bakteri <i>Escherichia coli</i>	21
2.6 Penelusuran Paten Terkait Alat Purifikasi Udara Ruang.....	22
2.6.1 <i>Portable Indoor Air Purification System</i> , Patent No. US 7,674,436 B1 (Feldman, 2010)	23
2.6.2 <i>Air Purification Devices</i> , Patent No. US 8,003,058 B2 (Bergeron, 2011)	24

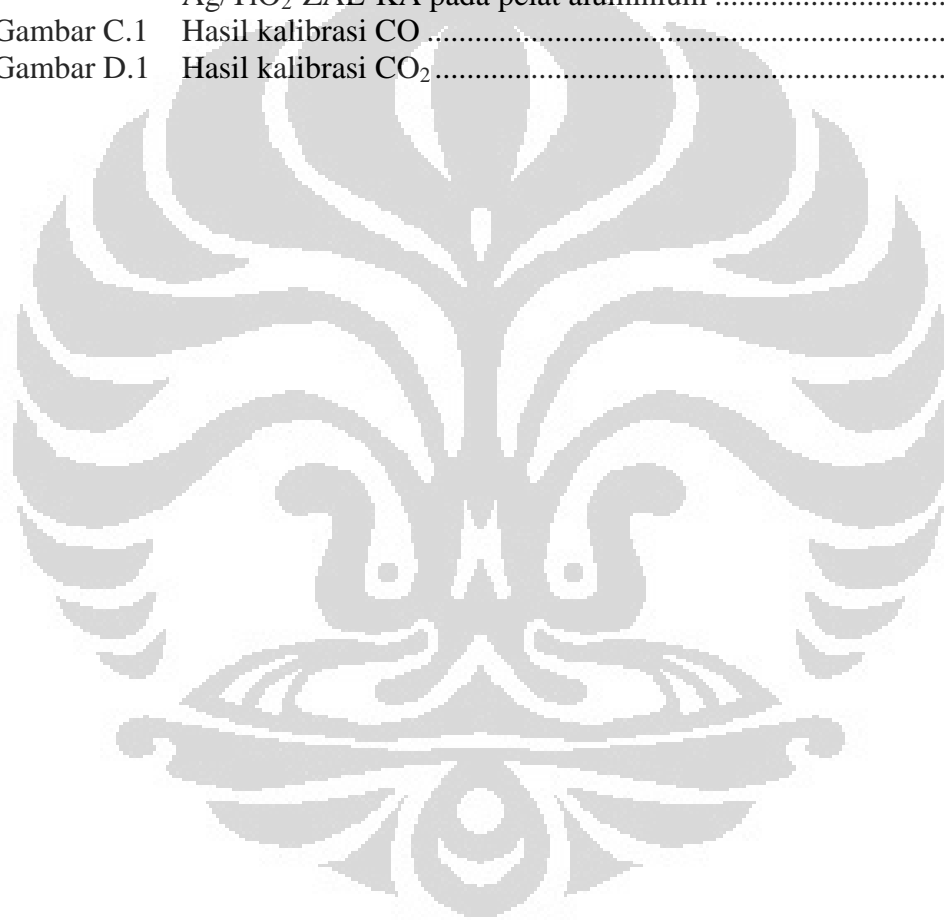
2.7	Karakterisasi Katalis	25
2.7.1	Karakterisasi XRD (<i>X-Ray Diffractometer</i>).....	25
2.7.2	Karakterisasi SEM (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)	26
2.7.3	Karakterisasi EDX (<i>Energy Dispersive X-Ray</i>)	27
2.8	Metode Pengujian Komponen Gas; <i>Gas Chromatography – Thermal Conductivity Detector</i>	27
2.9	Metode Perhitungan Koloni Bakteri; <i>Total Plate Count</i>	28
BAB 3 METODE PENELITIAN.....		30
3.1	Diagram Alir Penelitian	30
3.2	Peralatan Penelitian.....	32
3.2.1	Peralatan Sintesis Katalis Ag/TiO ₂ -ZAL-KA	32
3.2.2	Peralatan Pembuatan Prototipe Alat.....	32
3.2.3	Peralatan Uji Kinerja Alat dan Katalis.....	32
	1. Uji Degradasi CO	32
	2. Uji Disinfeksi Bakteri <i>E.coli</i>	33
3.2.4	Peralatan Karakterisasi dan Uji Kinerja Katalis Komposit....	33
3.3	Bahan Penelitian	33
3.3.1	Bahan Sintesis Katalis Ag/TiO ₂ -ZAL-KA.....	33
3.3.2	Bahan Uji Kinerja Alat dan Katalis	34
	1. Uji Degradasi CO	34
	2. Uji Disinfeksi Bakteri <i>E.coli</i>	34
3.4	Peralatan Uji Kinerja Katalis	34
3.4.1	Prototipe Alat Purifikasi Udara.....	34
3.4.2	<i>Portable Fotoreactor</i> Fasa Cair	37
3.5	Prosedur Penelitian	38
3.5.1	Prosedur Preparasi Awal Zeolit Alam Lampung (ZAL).....	38
	1. <i>Ball milling</i>	38
	2. Dealuminasi	39
3.5.2	Prosedur Preparasi Awal Karbon Aktif.....	39
	1. <i>Ball milling</i>	39
	2. Pencucian.....	40
3.5.3	Prosedur Sintesis Katalis Ag/TiO ₂	40
3.5.4	Prosedur Sintesis Katalis Ag/TiO ₂ -ZAL-KA.....	40
3.5.5	Prosedur Pembuatan Prototipe Alat Purifikasi Udara.....	41
	1. Pelapisan Katalis Komposit pada Pelat Aluminium.....	41
	2. Pembuatan Prototipe Alat Purifikasi Udara	42
3.5.6	Prosedur Uji Kinerja Alat dan Katalis	42
	1. Uji Degradasi CO	43
	2. Uji Disinfeksi Bakteri <i>E.coli</i>	43
3.6	Variabel Penelitian.....	44
3.6.1	Variabel Bebas	44
3.6.2	Variabel Terikat	45
3.6.3	Variabel Kontrol.....	45
3.7	Data Penelitian dan Teknik Pengolahan Data.....	45
3.8	Pengolahan Data Penelitian	46
3.8.1	Uji Degradasi CO	46
3.8.2	Uji Disinfeksi Bakteri <i>E.coli</i>	46

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	47
4.1 Karakterisasi Katalis Komposit	47
4.1.1 Karakterisasi XRD	47
4.1.2 Karakterisasi SEM-EDX.....	50
4.2 Uji Disinfeksi Bakteri <i>Escherichia coli</i>	52
4.2.1 Pengaruh Variasi <i>Loading</i> Dopan Logam Ag pada Pertumbuhan <i>E.coli</i> pada Kondisi Penyinaran UV	53
4.2.2 Perbandingan Kinerja Katalis Komposit TiO ₂ -ZAL-KA pada Kondisi Terang dan Gelap.....	56
4.2.3 Perbandingan Kinerja Katalis Komposit Ag/TiO ₂ -ZAL-KA pada Kondisi Terang dan Gelap.....	58
4.2.4 Mekanisme Disinfeksi Bakteri <i>E.coli</i> pada Media Cair dan Similaritas dengan Disinfeksi pada Udara	60
4.3 Uji Degradasi Karbon Monoksida (CO).....	62
4.3.1 Pengaruh Katalis Komposit TiO ₂ -ZAL-KA pada Prototipe Alat Purifikasi Udara untuk Degradasi Karbon Monoksida Murni.....	62
4.3.2 Uji Kualitatif Degradasi CO pada Asap Rokok	65
BAB 5 PENUTUP	69
5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	70
LAMPIRAN	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Fenomena fotoeksitasi elektron pada semikonduktor TiO ₂	8
Gambar 2.2	Perspektif struktur kristal TiO ₂	9
Gambar 2.3	Energi celah, posisi pita valensi, posisi pita konduksi, dan potensial redoks berbagai jenis fotokatalis semikonduktor.....	10
Gambar 2.4	Struktur stereotip klinoptilolit	12
Gambar 2.5	Struktur karbon aktif.....	13
Gambar 2.6	Mekanisme reaksi fotokatalisis dengan adsorben sebagai penyangga.....	14
Gambar 2.7	Efek antiseptik ion Ag ⁺	16
Gambar 2.8	Struktur ikatan molekul karbon monoksida	19
Gambar 2.9	Visualisasi bakteri <i>Escherichia coli</i>	20
Gambar 2.10	Ilustrasi skema oksidasi CO dengan bantuan katalis.....	21
Gambar 2.11	Mekanisme disinfeksi <i>E.coli</i> oleh fotokatalis.....	22
Gambar 2.12	Jumlah (estimasi) paten per tahun untuk purifikasi udara ruang dan purifikasi udara luar ruang berbasis proses fotokatalisis.....	22
Gambar 2.13	Paten alat purifikasi udara berbasis fotokatalisis dan sinar UV, Patent No.US 7,674,436 B1.....	23
Gambar 2.14	Paten alat purifikasi udara berbasis fotokatalisis, pengion, dan filter elektrostatis, Patent No. US 8,003,058 B2.....	24
Gambar 2.15	Diagram alat karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i>	25
Gambar 2.16	Komponen GC-TCD	28
Gambar 2.17	Prosedur pembacaan metode TPC.....	29
Gambar 3.1	Diagram alir keseluruhan penelitian.....	31
Gambar 3.2	Perancangan awal prototipe alat purifikasi udara.....	35
Gambar 3.3	Visualisasi alat purifikasi udara tampak samping	36
Gambar 3.4	Visualisasi prototipe alat purifikasi udara dalam ruang uji	37
Gambar 3.5	Visualisasi <i>portable fotoreactor</i> fasa cair.....	38
Gambar 4.1	Perbandingan hasil karakterisasi XRD untuk TiO ₂ dan 3,0wt% Ag/TiO ₂	49
Gambar 4.2	Hasil karakterisasi SEM pada perbesaran 20.000 kali	50
Gambar 4.3	Lokasi pengambilan data dan puncak hasil EDX.....	51
Gambar 4.4	Visualisasi koloni <i>E.coli</i> pada cawan petri dengan media <i>ENDO-Agar</i> dan perbandingan koloni <i>E.coli</i> dengan bakteri <i>coliform</i> lain.....	53
Gambar 4.5	Hasil uji disinfeksi bakteri <i>E.coli</i> untuk berbagai variasi <i>loading</i> dopan logam Ag pada kondisi penyinaran dengan sinar UV.....	54
Gambar 4.6	Persentase disinfeksi untuk berbagai variasi <i>loading</i> dopan logam Ag	56
Gambar 4.7	Perbandingan kinerja katalis komposit TiO ₂ -ZAL-KA pada kondisi terang dan gelap	56
Gambar 4.8	Perbandingan kinerja katalis komposit 3,0wt% Ag/TiO ₂ -ZAL-KA pada kondisi terang dan gelap	58

Gambar 4.9	Hasil degradasi CO pada katalis komposit TiO ₂ -ZAL-KA.....	63
Gambar 4.10	Produksi CO ₂ pada degradasi CO dengan katalis TiO ₂ (85%)-ZAL(15%) dan TiO ₂ (85%)-KA(15%).....	65
Gambar 4.11	Uji degradasi kualitatif CO dalam ruang uji.....	67
Gambar A.1	Puncak difraksi Ag (Ag ⁰) pada <i>database software Match!</i>	78
Gambar A.2	Puncak difraksi Ag ₂ O (Ag ⁺) pada <i>database software Match!</i> ..	78
Gambar A.3	Puncak difraksi AgO (Ag ²⁺) pada <i>database software Match!</i> ..	79
Gambar B.1	Hasil karakterisasi SEM untuk katalis komposit 3,0wt% Ag/TiO ₂ -ZAL-KA serbuk	80
Gambar B.2	Lokasi pengambilan sampel SEM untuk katalis komposit TiO ₂ -ZAL-KA pada pelat aluminium	81
Gambar B.3	Hasil karakterisasi SEM untuk katalis komposit 3,0wt% Ag/TiO ₂ -ZAL-KA pada pelat aluminium	82
Gambar C.1	Hasil kalibrasi CO	83
Gambar D.1	Hasil kalibrasi CO ₂	84



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Klasifikasi karbon aktif berdasarkan ukuran pori	13
Tabel 2.2	Karakteristik dopan logam perak	15
Tabel 2.3	Komponen dominan (unit mg/rokok) pada <i>secondhand tobacco smoke</i>	18
Tabel 2.4	Sifat fisika karbon monoksida.....	19
Tabel 2.5	Sistem taksonomi binomial bakteri <i>Escherichia coli</i>	20
Tabel 3.1	Ukuran tiap bagian rangka luar prototipe alat purifikasi udara.....	35
Tabel 3.2	Berat katalis dan adsorben untuk tiap variasi katalis komposit	41
Tabel 3.3	Data penelitian dan teknik pengambilan data	45
Tabel 4.1	Puncak hasil karakterisasi XRD.....	47
Tabel 4.2	Perbandingan persentase berat anatase dan ukuran kristal pada TiO ₂ Degussa P25 dan katalis komposit 3,0wt% Ag/TiO ₂	49
Tabel 4.3	Hasil EDX untuk katalis komposit pada kondisi serbuk dan terlapis pada pelat Al.....	53
Tabel 4.4	Mekanisme pembentukan ROS.....	61
Tabel C.1	Hasil kalibrasi CO	83
Tabel D.1	Hasil kalibrasi CO ₂	84
Tabel E.1	Data <i>Total Plate Count</i> untuk bakteri <i>Escherichia coli</i>	85
Tabel F.1	Data degradasi CO dan produksi CO ₂ untuk katalis komposit TiO ₂ -ZAL-KA.....	88

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A.	Perbandingan Hasil XRD dengan Katalog <i>Software Match!</i> ...	78
Lampiran B.	Hasil Karakterisasi SEM	80
Lampiran C.	Hasil Kalibrasi CO	83
Lampiran D.	Hasil Kalibrasi CO ₂	84
Lampiran E.	Data <i>Total Plate Count</i> untuk Bakteri <i>Escherichia coli</i>	85
Lampiran F.	Data Degradasi CO dan Produksi CO ₂	88



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Polusi udara saat ini telah menjadi suatu permasalahan global yang terus dicari solusinya, terutama dikaitkan dengan pemanasan global dan perubahan iklim. Berdasarkan lokasi sumber pencemar, polutan udara dibedakan menjadi polutan udara dalam dan luar ruang. Selama ini banyak anggapan polutan udara luar lebih banyak mengandung senyawa berbahaya dibandingkan polutan udara dalam ruang. Padahal sejak 1990, *Environmental Protection and Agency* (EPA) menempatkan polusi udara dalam ruang dalam daftar 18 peringkat teratas sumber risiko penyebab kanker. Risiko tertinggi akibat paparan polutan udara ruang dialami oleh para perokok, janin dan balita, orang tua, wanita hamil, penderita dengan masalah pernapasan dan jantung, serta buruh pabrik (Miller, 2008).

Masalah jangka pendek yang sering terjadi akibat akumulasi polutan udara ruang adalah keluhan akibat *sick building syndrome*, yang dialami tenaga kerja pada ruangan tertutup dan berpedingin ruangan. Keluhan dapat berupa sakit kepala, mata perih, dan mual. Hal ini menyebabkan produktivitas kerja menurun karena rata-rata manusia menghabiskan 90% waktu dalam ruangan (Kusnoputranto, 1996). Penyebab *sick building syndrome* terutama akibat polutan udara ruang terakumulasi dalam ruangan akibat sumber pencemar berada dalam ruangan atau ruangan tidak memiliki aliran udara yang baik.

Polutan udara ruang dapat berupa material biologis berupa bakteri, virus, atau jamur yang disebarkan melalui aliran udara. Sebagian besar mikroorganisme udara merupakan penyebab alergi atau penyakit saluran pernapasan, seperti asma, batuk, hingga kanker paru-paru. Beberapa jenis bakteri udara bersifat patogenik, misalnya *Aspergillus*, *Botrytis*, *Cladosporium*, dan *Scopulariopsis* (Kalogerakis, 2005). Komponen polutan udara ruang lain berupa senyawa kimia turut menyumbang polusi udara ruang. Senyawa kimia dapat berasal dari asap hasil pembakaran, pengharum ruangan, *volatile organic compound* (VOC), dan debu (Permanasari, 2010). Polutan udara ruang banyak ditemukan dari asap hasil

pembakaran yang mengandung karbon monoksida sebagai hasil pembakaran tidak sempurna, misal hasil proses memasak atau asap rokok. Untuk itu, diperlukan suatu teknologi yang mampu digunakan dan diterapkan dalam rangka mendegradasi polutan udara ruang dan mendisinfeksi mikroorganisme penyebab *sick building syndrome* dan berpotensi menyebabkan kanker.

Salah satu cara degradasi polutan yang dikembangkan adalah proses fotokatalisis dengan TiO_2 . Proses fotokatalitik merupakan teknologi yang menjanjikan dalam purifikasi udara ruang (Demeestere, 2008). TiO_2 merupakan semikonduktor yang banyak digunakan dalam aplikasi fotokatalitik karena keunggulannya dibandingkan jenis semikonduktor lain (Slamet, 2007). Di sisi lain, fotokatalis TiO_2 memiliki kekurangan, yaitu memiliki daya adsorpsi lemah, sehingga perlu ditopang dengan adsorben sebagai penyangga (El-Maazawi, 2000). Adsorben yang banyak digunakan sebagai penyangga adalah zeolit alam dan karbon aktif, di mana kombinasi TiO_2 -zeolit alam maupun TiO_2 -karbon aktif terbukti mampu mendegradasi senyawa organik, seperti toluena (Catherine, 2001), asetaldehida (Ichiura, 2002), benzena (Hisanaga, 2002), metilen biru (Fu, 2004), fenol (Slamet, 2007), dan VOC (*Volatile Organic Compound*) lain. Adsorben yang digunakan pada penelitian ini adalah zeolit alam lampung dan karbon aktif sebagai bahan lokal asli Indonesia yang ketersediaannya melimpah.

Untuk meningkatkan kemampuan fotokatalitik, dopan logam digunakan sebagai material tambahan pada fotokatalis. Peningkatan aktivitas fotokatalitik dikarenakan kemampuan inti dopan dalam menangkap pembawa muatan dan menurunkan laju rekombinasi antara e^- dan h^+ (Colón, 2006). Beberapa jenis logam telah dikembangkan sebagai dopan, misalnya Au, Pt, Cu, dan Ag (He, 2009). Pada penelitian ini digunakan dopan Ag dan dicari komposisi yang efektif untuk proses degradasi polutan udara ruang. Pemilihan dopan ini didasarkan pada pertimbangan biaya bahan baku yang relatif murah, ramah lingkungan, serta telah terbukti mampu mendegradasi beberapa senyawa organik. Penggunaan dopan Ag pada fotokatalisis terbukti mampu mendisinfeksi bakteri *E.coli* (Guin, 2007; Wang, 2009; Ashkarran, 2011), mendegradasi *rhodamine blue* (Sung-Suh, 2004), dan asam formiat (He, 2010).

Pada penelitian ini dikembangkan katalis komposit Ag/TiO₂-ZAL-KA untuk mendegradasi polutan udara ruang, dengan model CO dalam asap rokok dan bakteri *E.coli* sebagai model mikroorganisme. Penelitian sebelumnya menunjukkan komposit TiO₂(85%)-ZAL(15%) memiliki aktivitas degradasi paling baik di antara penyangga lain dengan waktu degradasi polutan dimulai pada menit ke-60 (Alfat, 2009). Penambahan dopan logam pada komposit katalis-adsorben diharapkan meningkatkan aktivitas degradasi dan disinfeksi polutan. Alat purifikasi udara untuk pengujian kinerja katalis memiliki struktur sekat bertingkat dengan pola aliran udara zig-zag yang bertujuan memperbesar area kontak antara polutan-katalis dan memperpanjang waktu tinggal polutan dalam alat. Katalis komposit dilapiskan pada sekat aluminium dan diaktivasi dengan sinar ultraviolet. Konsentrasi senyawa keluaran alat diuji pada fasa gas dan diukur dengan instrumen *Gas Chromatography – Thermal Conductivity Detector*. Sementara disinfeksi bakteri dilakukan pada fasa cair dan perhitungan koloni bakteri menggunakan metode *Total Plate Count*.

Penelitian ini akan menghasilkan prototipe alat purifikasi udara untuk degradasi polutan udara ruang dan disinfeksi mikroorganisme berbasis teknologi fotokatalisis. Adsorben yang digunakan merupakan bahan alam lokal, sementara bahan lain seperti fotokatalis TiO₂ dan dopan Ag telah digunakan secara luas. Dengan demikian, penelitian ini dapat dikembangkan hingga skala industri yang diharapkan mampu menaikkan nilai tambah bahan alam Indonesia. Potensi pengembangan masih sangat luas karena alat purifikasi udara yang berkembang saat ini masih memiliki beberapa kelemahan yang harus diperbaiki. Penggunaan alat purifikasi udara dapat membantu menurunkan konsentrasi senyawa kimia dan mikroorganisme berbahaya yang menyebabkan *sick building syndrome* dan berbagai penyakit berbahaya lain, seperti kanker. Hasil degradasi polutan dengan teknologi fotokatalisis adalah CO₂, uap air, dan senyawa tidak berbahaya lainnya, baik bagi kesehatan maupun lingkungan. Dengan lingkungan yang sehat dan bersih, diharapkan produktivitas kerja dapat ditingkatkan dan pada akhirnya dapat meningkatkan perekonomian nasional serta daya saing bangsa.

1.2 Perumusan Masalah

Penelitian ini mengembangkan alat purifikasi udara untuk purifikasi udara ruang berbasis katalis komposit dopan logam-fotokatalis TiO_2 -adsorben alam lokal. Dopan logam yang digunakan adalah logam perak (Ag), sementara adsorben yang digunakan adalah zeolit alam lampung dan karbon aktif. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan komposisi optimum dopan Ag untuk proses degradasi polutan udara ruang dan disinfeksi bakteri dengan menggunakan prototipe alat purifikasi udara yang dibuat.

Alat purifikasi udara yang dibuat memiliki struktur sekat bertingkat dengan pola aliran zig-zag yang bertujuan memperluas area kontak antara katalis komposit Ag/ TiO_2 -ZAL-KA dengan polutan udara dan memperpanjang waktu tinggal polutan dalam alat purifikasi udara. Sementara itu, aktivasi fotokatalis dibantu oleh lampu UV yang dipasang membujur terhadap pelat berlapis katalis komposit. Tantangan pada struktur ini adalah pelekatan katalis komposit Ag/ TiO_2 -ZAL-KA pada sekat aluminium dan penyinaran UV yang efektif menjangkau seluruh struktur sekat.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Mendapatkan komposisi dopan logam Ag yang optimum digunakan pada prototipe alat purifikasi udara ruang dalam upaya degradasi polutan kimia pada udara ruang dan disinfeksi bakteri;
- b. Mendapatkan prototipe alat purifikasi udara berbasis fotokatalis TiO_2 dengan dopan logam perak (Ag) dan disangga adsorben alam lokal berupa zeolit alam lampung dan karbon aktif untuk mendegradasi polutan kimia pada udara ruang dan mendisinfeksi mikroorganisme secara efektif.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Fotokatalis yang digunakan adalah TiO_2 Degussa P25.
- b. Adsorben alam lokal yang digunakan adalah zeolit alam lampung (yang selanjutnya disebut ZAL) dan karbon aktif (yang selanjutnya disebut KA) berbahan baku tempurung kelapa.
- c. Rasio berat TiO_2 : ZAL : KA untuk tiap variasi katalis sebesar 70 : 15 : 15.
- d. Dopan logam yang digunakan adalah dopan logam perak (Ag).
- e. Variasi katalis yang digunakan berturut-turut adalah sebagai berikut:
 - 1) TiO_2 (100%) sebagai variabel kontrol;
 - 2) TiO_2 -ZAL-KA;
 - 3) 0,5 wt% Ag/ TiO_2 -ZAL-KA;
 - 4) 1,0 wt% Ag/ TiO_2 -ZAL-KA;
 - 5) 3,0 wt% Ag/ TiO_2 -ZAL-KA.
- f. Purifikasi udara ruang dalam penelitian ini meliputi upaya degradasi polutan kimia berupa CO dalam asap rokok dan disinfeksi mikroorganisme berupa bakteri *Escherichia coli*.
- g. Rekayasa alat dilakukan terhadap komposisi dopan logam Ag pada katalis komposit dan bukan terhadap desain alat.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan pada penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

BAB 1: PENDAHULUAN

Bagian ini menjelaskan latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan yang digunakan pada penulisan skripsi.

BAB 2: TINJAUAN PUSTAKA

Bagian ini menjelaskan tinjauan pustaka mengenai konsep fotokatalisis dan adsorpsi secara umum beserta fotokatalis dan adsorben yang

digunakan, dopan logam, paten terkait alat purifikasi udara, serta polutan udara beserta model polutan udara digunakan pada penelitian.

BAB 3: METODE PENELITIAN

Bagian ini menjelaskan diagram alir penelitian secara keseluruhan, peralatan penelitian, bahan penelitian, prosedur penelitian, prototipe alat, variabel penelitian, data penelitian, teknik pengambilan data, dan pengolahan data penelitian.

BAB 4: HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menjelaskan hasil yang telah dicapai selama penelitian, meliputi hasil karakterisasi katalis komposit, hasil uji degradasi karbon monoksida pada asap rokok, dan hasil uji disinfeksi bakteri *E. coli* pada fasa cair. Berdasarkan hasil penelitian yang didapat, kemudian disusun pembahasan yang menjelaskan hasil penelitian yang didapatkan.

BAB 5: PENUTUP

Bagian ini menjelaskan kesimpulan dari penelitian yang telah dilaksanakan beserta saran yang dapat digunakan untuk kepentingan penelitian selanjutnya.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

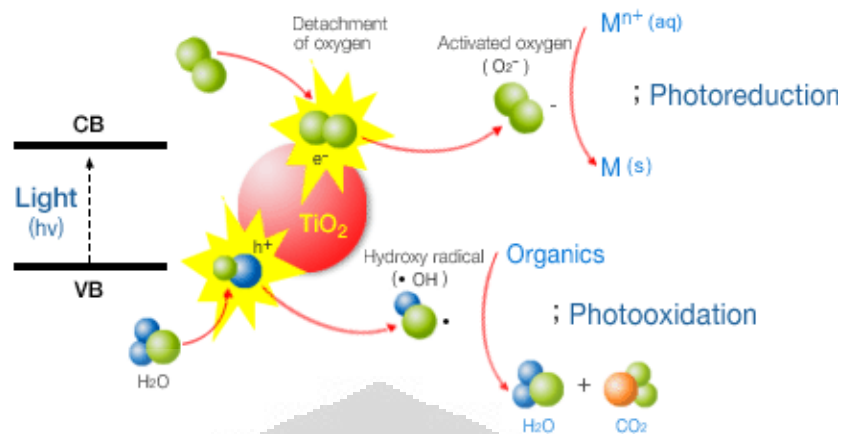
2.1 Fotokatalisis

Menurut IUPAC, fotokatalisis berarti reaksi katalitik yang berlangsung dengan mengabsorpsi cahaya dengan bantuan material katalis (Parmon, 2002). Perkembangan penelitian mengenai fotokatalisis meningkat setelah pada 1972 Akira Fujishima melaporkan fenomena pemecahan air menjadi O_2 dan H_2 menggunakan kristal TiO_2 dengan input sinar UV berenergi rendah (Slamet, 2011). Peningkatan penelitian ini dikarenakan H_2 diproyeksikan dapat menggantikan minyak bumi sebagai bahan bakar ramah lingkungan. Hingga saat ini, teknologi fotokatalisis telah mengalami kemajuan dan diterapkan pada berbagai aspek kehidupan. Beberapa di antaranya digunakan pada produk pembersih dan penjernih udara, kertas, tekstil antibakteri, pelapis material, semen, kaca, aspal, antena luar, dan banyak lagi (Anpo, 2000).

2.1.1 Proses Fotokatalisis

Fotokatalisis merupakan teknologi yang bersih dan efektif untuk degradasi berbagai jenis polutan. Proses fotokatalisis menggunakan material semikonduktor sebagai fotokatalis dan salah satunya adalah TiO_2 . Proses fotokatalisis pada permukaan semikonduktor dijelaskan melalui Gambar 2.1. Jika semikonduktor dikenai cahaya ($h\nu$) dengan energi sesuai, elektron (e^-) pada pita valensi akan mengalami fotoeksitasi ke pita konduksi dan meninggalkan lubang positif ($hole^+$, disingkat h^+) pada pita valensi. Kemungkinan yang terjadi pada h^+ dan e^- yang tereksitasi adalah sebagai berikut.

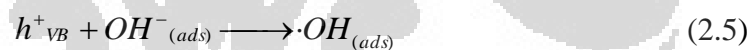
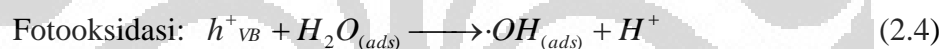
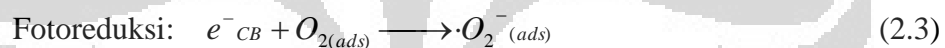
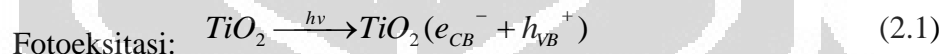
- a. Rekombinasi antara h^+ dan e^- , baik di permukaan (*surface recombination*) ataupun di dalam partikel semikonduktor (*volume recombination*).
- b. Pasangan e^- dan h^+ bertahan hingga permukaan semikonduktor; e^- menginisiasi reaksi reduksi dan h^+ menginisiasi reaksi oksidasi zat kimia di sekitar permukaan semikonduktor. Reaksi ini adalah tahap penentu laju reaksi reduksi dan oksidasi pada proses fotokatalitik (Gunlazuardi, 2001).



Gambar 2.1 Fenomena fotoeksitasi elektron pada semikonduktor TiO_2

Sumber: Korea International Trade Association, 2011

Reaksi yang terjadi pada Gambar 2.1 dijelaskan melalui persamaan reaksi berikut.



Berdasarkan tahapan reaksi di atas dihasilkan *oxydizing agent*, yaitu radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$) yang dapat menginisiasi proses degradasi berbagai jenis polutan. Radikal OH dihasilkan jika potensial oksidasi h^+ pada pita valensi cukup besar untuk mengoksidasi air dan/atau gugus OH pada permukaan partikel. Radikal OH adalah spesi pengoksidasi kuat dengan potensial redoks 2,8 V (relatif terhadap elektroda hidrogen Nernst) yang cukup kuat mengoksidasi kebanyakan polutan organik dalam konsentrasi rendah menjadi air, asam mineral, atau CO_2 .

2.1.2 Fotokatalis TiO_2

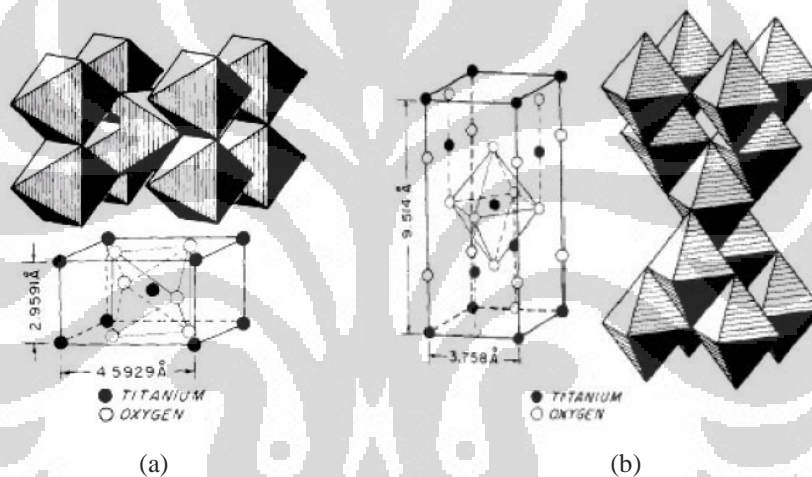
TiO_2 adalah semikonduktor yang paling sering digunakan dalam aplikasi reaksi fotokatalitik karena beberapa keunggulan berikut.

- Indeks refraksi dan transmitansi baik pada infra merah dan cahaya tampak;
- Stabilitas kimia dan cahaya baik;
- Tidak beracun dan aman bagi manusia;
- Harganya relatif terjangkau (Litter, 1996).

- e. Aktivitas terjaga pada konsentrasi uap air mirip kelembaban udara ruang;
- f. Sumber O_2 di alam melimpah (Tompkins, 2005).

Untuk aplikasi purifikasi udara ruang, sifat terpenting dari TiO_2 adalah tidak beracun. Partikel TiO_2 tidak menunjukkan asosiasi dengan risiko penyebab kanker paru-paru maupun penyakit pernapasan kronis lainnya (Blake, 1999).

Salah satu faktor yang mempengaruhi aktivitas TiO_2 sebagai fotokatalis adalah bentuk kristalnya. TiO_2 memiliki tiga struktur kristal, yaitu rutil, anatase, dan brookite (Slamet, 2007). Rutil dan anatase cukup stabil dan biasa digunakan pada proses fotokatalisis, sedangkan brookite hanya ditemukan pada mineral. Gambar 2.2 berikut menunjukkan struktur kristal rutil dan anatase TiO_2 .



Gambar 2.2 Perspektif struktur kristal TiO_2 ; (a) rutil dan (b) anatase

Sumber: Licciulli, 2002

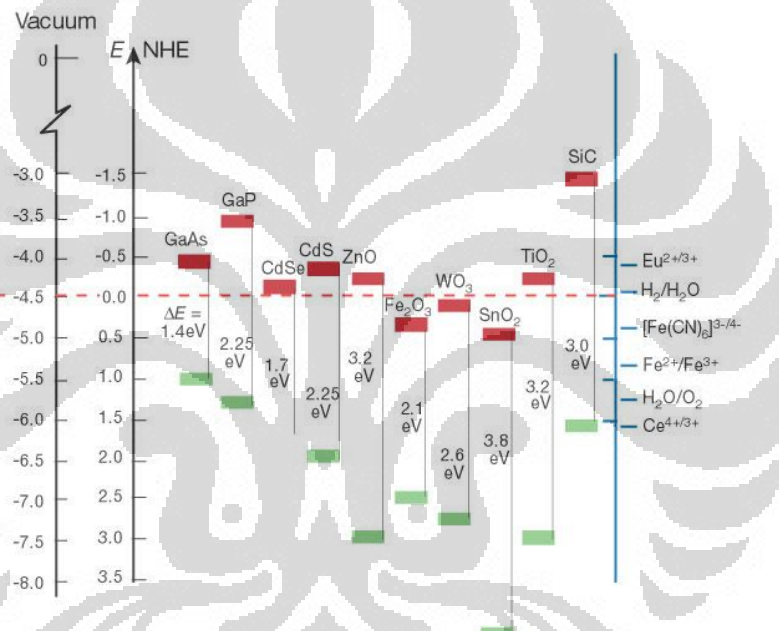
Struktur rutil lebih stabil pada suhu tinggi dan mulai terbentuk pada suhu $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rutil memiliki *bandgap energy* (energi celah yang menggambarkan energi cahaya minimum untuk mengeksitasi elektron) sebesar $3,0\text{ eV}$ yang lebih dekat ke sinar tampak dengan panjang gelombang maksimum 413 nm .

Sementara itu, kristal anatase memiliki luas permukaan lebih besar dan densitas permukaan aktif yang lebih tinggi untuk adsorpsi dan katalisis. Anatase merupakan tipe paling aktif karena memiliki *bandgap energy* sebesar $3,2\text{ eV}$ yang lebih dekat ke sinar ultraviolet dengan panjang gelombang maksimum 388 nm . Semakin kecil *band gap* maka akan semakin mudah fotokatalis menyerap foton, namun kemungkinan rekombinasi h^+ dan e^- juga semakin besar sehingga kedua aspek ini perlu diperhatikan dalam pemilihan katalis (Slamet, 2007). Fasa rutil

TiO₂ memiliki fotoaktivitas yang lebih rendah dari fasa anatase. Namun demikian, anatase cenderung bertransformasi menjadi rutile pada suhu tinggi sekitar 915°C dan hal ini diakibatkan faktor lain sebagai berikut (Cristallo, 2001).

- Adanya pengotor (*impurities*) pada bagian dalam dan/atau permukaan TiO₂ (V₂O₅ meningkatkan transformasi anatase-rutile, sedangkan SO₄²⁻ dan SiO₂ menurunkan kinetika reaksi).
- Komposisi gas di sekitar katalis selama reaksi katalitik.

Secara umum, TiO₂ mempunyai energi celah sebesar 3,2 eV seperti diberikan pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Energi celah, posisi pita valensi (di bawah garis putus-putus), posisi pita konduksi (di atas garis putus-putus), dan potensial redoks berbagai jenis fotokatalis semikonduktor

Sumber: Grätzel, 2001

2.2 Adsorpsi

Adsorpsi adalah proses saat sejumlah gas atau cairan terkonsentrasi pada permukaan suatu padatan atau cairan dan membentuk lapisan atom/molekular. Molekul-molekul zat padat ataupun cairan memiliki gaya molekular yang tidak stabil, sehingga permukaan padatan/cairan memiliki kecenderungan untuk tertarik ke arah dalam dan menarik zat lain yang kontak dengannya. Secara umum, peristiwa adsorpsi dibedakan menjadi dua jenis sebagai berikut (Maron, 1965).

- a. Adsorpsi fisika; berlangsung tanpa reaksi kimia, cepat, *reversible*, dan dikategorikan berenergi rendah. Adsorpsi fisik dapat terjadi karena gaya van der Waals dan elektrostatik.
- b. Adsorpsi kimia; melibatkan reaksi kimia, cenderung lambat atau tergantung pada laju reaksi, *irreversible*, dan dikategorikan berenergi tinggi.

Substansi yang teradsorb dinamakan *adsorbat*, sedangkan padatan atau cairan pengadsorb disebut *adsorben*. Adsorpsi biasanya dinyatakan pada keadaan isothermal karena antara fasa adsorbat dan adsorben tidak terdapat perbedaan suhu yang signifikan. Banyaknya gas adsorbat pada permukaan adsorben padat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain jenis adsorben dan adsorbat, sifat adsorben, luas permukaan adsorben, suhu, dan tekanan (Slamet, 2007). Adsorben yang digunakan pada penelitian ini adalah zeolit dengan jenis zeolit alam lampung dan karbon aktif berbahan dasar tempurung kelapa.

2.2.1 Adsorben Zeolit Alam Lampung (ZAL)

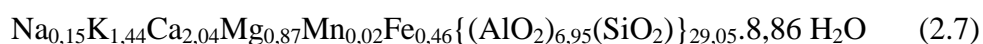
Zeolit adalah kristalin berpori yang tersusun atas komponen alumina-silika dari logam alkali dan alkali tanah yang diwakili stoikiometri berikut (Yang, 1987)



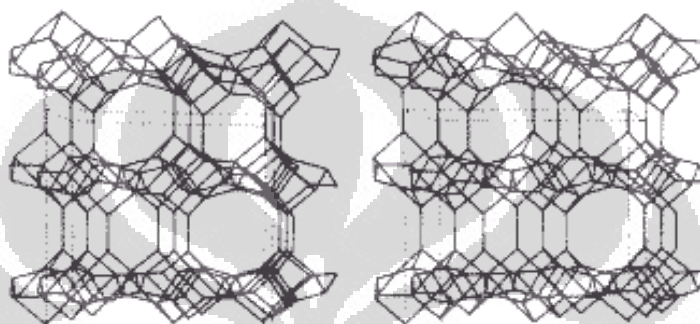
dengan n adalah valensi dari kation M, a dan b adalah jumlah tetrahedral alumina dan silika, serta c adalah jumlah molekul air. Rasio SiO_2/AlO_2 bervariasi antara 1-5. Kerangka zeolit terdiri atas molekul SiO_4 dan AlO_4 tetrahedral yang terhubung dengan atom-atom O membentuk pori dan pola geometris kristal dengan dimensi molekular yang memungkinkan molekul asing masuk ke dalamnya. Struktur demikian membuat zeolit dapat bertindak sebagai adsorben (Ruthven, *n.d.*).

Zeolit memiliki sifat *shape selectivity*, yaitu molekul berukuran lebih besar dari pori zeolit tertolak masuk ke dalam rongga (Matsuoka, 2003). Zeolit adalah adsorben polar, hidrofilik, dan dapat mengadsorp zat organik atau anorganik. Kemampuan zeolit menyerap suatu zat bergantung dari rasio Si/Al dalam zeolit; makin rendah rasio Si/Al, zeolit cenderung memilih molekul polar untuk diadsorpsi dan sebaliknya. Semakin rendah rasio Si/Al dalam zeolit akan timbul gradien medan elektronik yang makin besar, sehingga molekul polar berinteraksi lebih kuat dengan medan elektronik daripada molekul nonpolar (Handoko, 2002).

Zeolit dapat dimanfaatkan sebagai adsorben, penyangga katalis, maupun penukar ion. Pada penelitian ini, zeolit berfungsi sebagai adsorben dan penyangga katalis. ZAL dengan struktur klinoptilolit memiliki nilai kapasitas tukar kation (KTK) sebesar 2,6 meq/g (Sutarti, 1994) dengan unit bangun sekunder berupa $T_{10}O_{20}$ dan rumus kimia sebagai berikut (Las, 2011).



Struktur stereotip klinoptilolit pada ZAL diberikan pada Gambar 2.4 berikut.



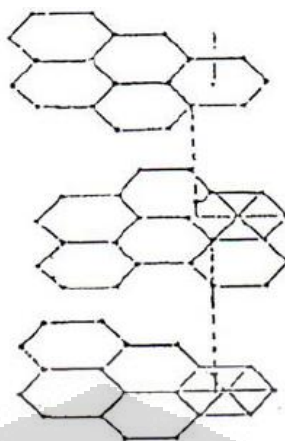
Gambar 2.4 Struktur stereotip klinoptilolit

Sumber: Las, 2011

Zeolit yang digunakan pada penelitian ini adalah zeolit alam lampung dengan struktur dominan klinoptilolit. Penelitian sebelumnya menunjukkan penggunaan ZAL dengan rasio TiO_2 : ZAL sebesar 85:15 mampu mendegradasi polutan lebih optimal dibandingkan penggunaan Zeolit Alam Malang dengan struktur dominan mordenit pada rasio yang sama (Alfat, 2009).

2.2.2 Adsorben Karbon Aktif

Karbon aktif biasanya dibuat dari material berkarbon dengan dekomposisi termal yang diikuti aktivasi dengan kukus atau CO_2 pada suhu tinggi. Struktur karbon aktif seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5 mengandung mikrokristalit dari grafit yang terkumpul pada arah yang acak. Ruang di antara mikrokristalit inilah yang membentuk pori mikro (Yang, 1987). Densitas partikel berkisar antara 0,6-0,9 g/cm^3 dan porositas antara 0,4-0,6. Sifat adsorpsi karbon aktif bergantung pada luas permukaan internalnya. Sementara distribusi pori dan luas pori total berhubungan dengan kondisi awal pirolisis dan prosedur aktivasinya. Adsorpsi terjadi karena adanya perbedaan konsentrasi polutan pada larutan dan pori-pori karbon aktif, sehingga polutan akan berpindah dari larutan ke pori-pori.



Gambar 2.5 Struktur karbon aktif

Sumber: Figuredo, 1986

Berdasarkan ukuran porinya, karbon aktif dibedakan atas tiga jenis sebagaimana diberikan pada Tabel 2.1 berikut (Ruthven, *n.d.*).

Tabel 2.1 Klasifikasi karbon aktif berdasarkan ukuran pori

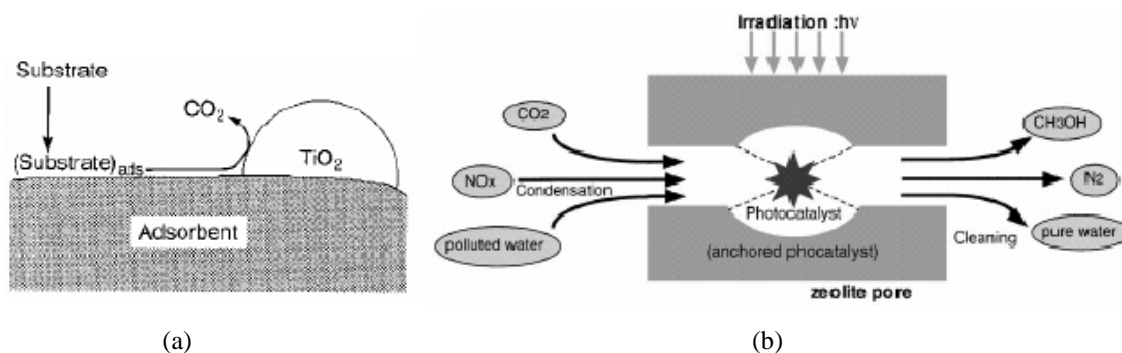
Parameter	Micropore	Mesopore (Transitional Pore)	Macropore
Diameter (Å)	<20	20-500	>500
Volume pori (cm ³ /g)	0,15-0,5	0,02-0,1	0,2-0,5
Luas permukaan (m ² /g)	100-1000	10-100	0,5-2

Sumber: Ruthven, *n.d.*

Pada penelitian ini adsorben karbon aktif yang digunakan adalah karbon aktif komersial berbahan baku tempurung kelapa.

2.2.3 Kombinasi Proses Fotokatalisis-Adsorpsi

Proses fotokatalisis terjadi jika antara fotokatalis dengan polutan terjadi kontak. Hal ini menjadi masalah karena kebanyakan semikonduktor fotokatalis, termasuk TiO₂, memiliki daya adsorpsi yang lemah. Untuk menutupi kekurangan ini, fotokatalis semikonduktor perlu dimodifikasi dengan adsorben sebagai penyangga. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diketahui bahwa penggunaan adsorben sebagai penyangga dapat meningkatkan laju fotodegradasi berbagai polutan (Torimoto, 1996). Adsorben yang digunakan merupakan media berpori, sehingga fotokatalis dapat pula masuk ke dalam pori atau menempel di permukaan adsorben. Gambar 2.6 di bawah ini menunjukkan mekanisme reaksi pada kombinasi proses fotokatalisis-adsorpsi.



Gambar 2.6 Mekanisme reaksi fotokatalisis dengan adsorben sebagai penyangga; (a) di permukaan adsorben dan (b) di dalam pori adsorben

Sumber: Torimoto, 1996

Fotokatalis dalam pori maupun pada permukaan adsorben secara aktif membantu reaksi fotokatalitik. Manfaat penggunaan adsorben sebagai penyangga proses fotokatalis antara lain sebagai berikut (Slamet, 2007).

- Meningkatkan konsentrasi polutan pada ruang sekitar fotokatalis, sehingga dapat meningkatkan laju reaksi.
- Mendispersikan fotokatalis, sehingga luas permukaan katalis menjadi lebih besar dan fotokatalis menjadi lebih aktif.
- Meningkatkan kemampuan adsorpsi katalis.

Kinerja kombinasi fotokatalisis-adsorpsi ditentukan oleh daya adsorpsi adsorben dan kemampuan difusi adsorbat ke fotokatalis TiO_2 (Torimoto, 1996). Semakin tinggi daya adsorpsi, maka laju degradasi polutan juga akan meningkat. Aktivitas juga akan semakin baik jika fotokatalis terdispersi merata ke seluruh permukaan adsorben (Matsuoka, 2003). Adsorben diregenerasi secara *insitu* oleh fotokatalis karena polutan teradsorpsi dapat langsung dioksidasi oleh fotokatalis menjadi CO_2 dan H_2O . Proses ini membuat adsorben membutuhkan waktu lama untuk menjadi jenuh, sehingga proses degradasi berlangsung lebih lama dan lebih efisien.

2.3 Dopan Logam

Dopan logam telah digunakan secara luas sebagai material yang dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kemampuan fotokatalitik. Peningkatan ini berhubungan dengan efisiensi dan kemampuan inti dopan dalam menangkap pembawa muatan (*electron trapping*) dan menurunkan laju rekombinasi antara e^-

dan h^+ . Efek penambahan dopan tergantung pada beberapa faktor, yaitu metode penambahan, tipe, dan *loading* dopan. Perbandingan antara metode penambahan yang satu dengan lainnya sulit dilakukan karena adanya perbedaan metode preparasi dan kondisi eksperimen (Colón, 2006).

2.3.1 Penggunaan Dopan Logam pada Proses Fotokatalisis

Logam ataupun logam oksida dapat ditambahkan ke dalam struktur TiO_2 dengan metode *doping*, *implanting*, dan *co-precipitating*. Sementara penambahan pada permukaan TiO_2 dilakukan dengan metode pelapisan atau fotodeposisi. Kebanyakan penggunaan dopan logam dilakukan untuk pemurnian air atau pengolahan limbah dengan dopan yang digunakan adalah dopan dengan biaya murah dan ramah lingkungan. Beberapa syarat yang harus dipenuhi suatu logam dapat menjadi dopan yang berfungsi sebagai *electron trapper* pada proses fotokatalisis adalah sebagai berikut (Somasundaram, 2006).

- Memiliki tingkat energi Fermi lebih kecil dari TiO_2 ; e^- berpindah dari pita konduksi ke dopan logam, sementara h^+ tetap berada pada pita valensi.
- Memiliki *electron work function* (energi minimum yang dibutuhkan untuk mengambil e^- dari permukaan padatan) lebih besar dari TiO_2 (sebesar 4,6 eV); semakin besar perbedaan *electron work function* antara fotokatalis dan dopan logam, maka efisiensi *electron trapping* akan semakin meningkat.
- Memiliki potensial redoks lebih positif dari pita konduksinya, sehingga perpindahan elektron lebih baik.

Pada penelitian ini digunakan dopan logam perak dan dicari komposisi optimum *loading* dopan untuk aktivitas fotokatalitik. Logam perak telah terbukti pula mampu mendukung aktivitas TiO_2 dalam mendegradasi senyawa organik maupun sebagai agen antibakteri. Persyaratan sebagai dopan logam juga dipenuhi oleh logam perak sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.2 sebagai berikut.

Tabel 2.2 Karakteristik dopan logam perak

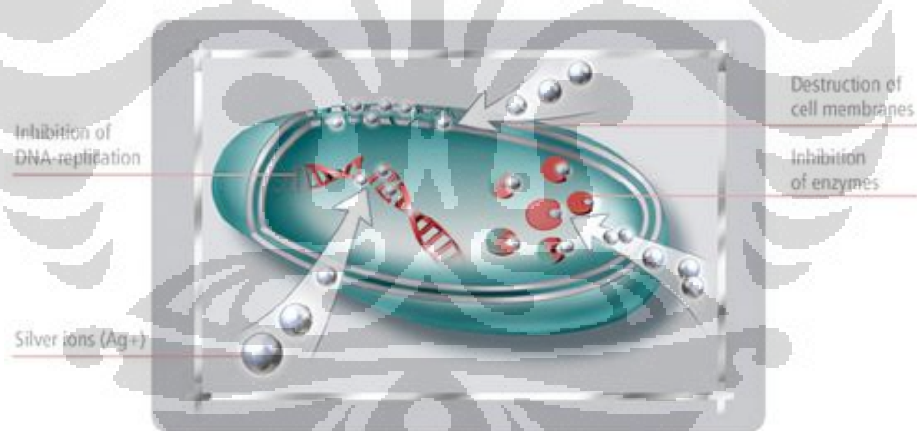
Parameter	Keterangan
Tingkat Energi Fermi	Lebih rendah dari TiO_2
<i>Energy work function</i>	Lebih tinggi dari TiO_2 (4,74 eV)
Potensial redoks	Lebih positif dari pita konduksi (0,8 V)

2.3.2 Dopan Logam Perak (Ag)

Penggunaan ion atau logam perak telah banyak digunakan pada dunia kesehatan, seperti pengobatan luka, tekstil, dan penjernihan air. Proses antibakteri menggunakan perak telah diuji pada *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, dan *Escherichia coli* (Rai, 2009). Jika dibandingkan dengan bahan antibakteri lain, ion atau logam perak memiliki beberapa kelebihan berikut.

- Efektif mengatasi kuman pada konsentrasi rendah dan jangka waktu yang lama (efek spektrum antiseptik luas).
- Tidak beracun dan menimbulkan efek samping bagi kulit (Beiersdorf, 2009).
- Memiliki tingkat volatilitas rendah dan stabilitas termal tinggi (Rai, 2009).

Ion perak juga dapat berinteraksi dengan dinding sel dan berikatan dengan DNA serta RNA bakteri (Beiersdorf, 2009). Pada kondisi ini, ion perak berlaku sebagai inhibitor proses replikasi bakteri. Hal ini menyebabkan bakteri kehilangan kemampuan bertahan hidup akibat tidak mampu melakukan respirasi dan replikasi sebagaimana terlihat pada Gambar 2.7 berikut.



Gambar 2.7 Efek antiseptik ion Ag^+

Sumber: Beiersdorf, 2009

Pada *E. coli*, ion perak menghambat pengambilan fosfat yang diperlukan pada proses respirasi dan mengeluarkan fosfat, manitol, suksinat, prolin, serta glutamin dari sel *E. coli* (Rai, 2009).

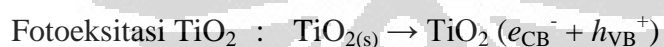
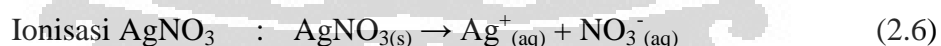
Senyawa perak yang telah digunakan sebagai agen antimikrobal, antara lain Ag-zeolit, AgNO_3 , $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Ag}$, nano-Ag (Rai, 2009), AgBr, dan AgCl (Wang, 2009). Ag/AgBr yang diimpregnasi pada P-25 TiO_2 tercatat memiliki kemampuan

adsorpsi bakteri yang tinggi dalam gelap dan aktivitas fotokatalitik yang tinggi pada cahaya tampak. Dopan logam Ag juga telah digunakan untuk mendegradasi beberapa senyawa organik, seperti *rhodamine blue* dan asam formiat (He, 2010). Penggunaan ion Ag^+ dalam mendukung proses fotokatalisis pada disinfeksi udara telah dibuktikan melalui penelitian Vohra menggunakan model bakteri udara *B.cereus*, *A.niger*, dan MS2 Bacteriophage (Vohra, 2006).

2.3.3 Metode Preparasi Dopan Logam Ag

Preparasi Ag/TiO_2 dapat dilakukan menggunakan beberapa metode, misal *precipitation deposition*, *incipient wet-impregnation*, *photoreduction under UV irradiation*, dan *sol-gel method* (Zhang, 2004). Melalui metode penyinaran dengan sinar UV, jumlah deposit logam dalam film TiO_2 dapat dikontrol dengan mengatur lamanya waktu penyinaran (He, 2010). Pada penelitian ini katalis Ag/TiO_2 dibuat dengan metode *photoassisted deposition* (PAD). Sumber Ag dari senyawa AgNO_3 yang diiradiasi sinar UV tanpa variasi lama penyinaran.

PAD adalah suatu metode deposisi ion dengan menggunakan hasil eksitasi dari fotokatalis, baik e^- atau h^+ . Fotoeksitasi TiO_2 akan menghasilkan pasangan e^- atau h^+ yang dapat lepas ke permukaan partikel. h^+ yang lepas membentuk radikal hidroksil dari air, kemudian membentuk anion format radikal, $\text{CO}_2^{\cdot-}$, yang berasal dari senyawa turunan alkohol. Kondisi ini meningkatkan probabilitas dari proses fotoreduksi ion logam dalam air (Somasundaram, 2006). Proses fotodeposisi Ag dari senyawa AgNO_3 dalam air dijelaskan melalui tahapan reaksi berikut.



Proses fotodeposisi berlangsung pada permukaan semikonduktor.

2.4 Model Polutan Udara Ruang

Polutan udara ruang merupakan campuran yang beragam, terdiri atas komponen biologis (bioaerosol; bakteri, fungi, allergen) dan non-biologis (debu, asap rokok, asap pembakaran, dan sebagainya). Berikut dijelaskan model polutan udara ruang yang digunakan pada penelitian ini.

2.4.1 Asap Rokok; Karbon Monoksida (CO)

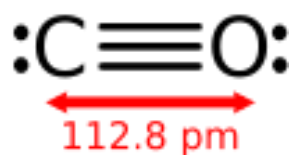
Asap rokok, yang banyak terdapat pada udara ruang, telah diklasifikasikan sebagai senyawa karsinogen oleh *International Agency for Research on Cancer* (IARC). Berdasarkan lokasi keluaran asap rokok terbagi atas dua jenis, yaitu *sidestream smoke* (SS) dari ujung rokok yang dibakar dan *mainstream smoke* (MS) yang keluar dari mulut perokok. Asap rokok yang dilepaskan ke lingkungan terdiri atas 11% MS dan 85% SS. MS merupakan komponen paling berbahaya yang terdiri atas gas campuran (CO_2 , CO, NO_x , dan dan komponen semi volatil) (Pieraccini, 2008). Campuran SS dan MS membentuk asap sekunder (*secondhand tobacco smoke/STS*) yang memapar manusia, baik perokok atau nonperokok. Tabel 2.3 berikut memberikan 10 komponen utama STS.

Tabel 2.3 Komponen dominan (unit mg/rokok) pada *secondhand tobacco smoke*

Komponen	Rentang	Rasio SS/MS
Karbon monoksida (CO)	31,5-54,1	1,87
Tar	10,5-34,4	0,91
Amonia	4,0-6,6	147
Nikotin	1,9-5,3	2,31
Asetaldehida	1,7-2,6	1,31
NO_x	1,0-1,6	2,79
Aseton	0,8-1,2	1,52
Formaldehida	0,5-1,0	14,78
Akrolein	3,4-5,2	2,53
Piridin	2,0-3,2	16,08

Sumber: Samet, 2002

Karbon monoksida (CO) menempati persentase terbesar pada STS dan pada kondisi ruang CO sangat mudah terdilusi (Samet, 2002). Pemaparan CO dapat menyebabkan kerusakan sistem saraf dan hati hingga berdampak buruk bagi janin. Konsentrasi kecil (100 ppm) menyebabkan sakit kepala, sementara konsentrasi lebih besar (~667 ppm) menyebabkan 50% hemoglobin terkonversi menjadi karboksi hemoglobin. Senyawa ini tidak dapat menghantarkan O_2 dengan baik, sehingga asupan bagi tubuh akan terganggu. (Wikipedia, 2009). Gambar 2.8 berikut menunjukkan struktur ikatan pada molekul CO.



Gambar 2.8 Struktur ikatan molekul karbon monoksida

Sumber: Wikipedia, 2009

Pada Tabel 2.4 berikut dijelaskan sifat-sifat fisika karbon monoksida.

Tabel 2.4 Sifat fisika karbon monoksida

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

Sumber: Wikipedia, 2009

Metode yang biasanya digunakan untuk mengukur konsentrasi CO di udara pada praktik lapangan didasarkan pada absorpsi radiasi infra merah oleh gas pada fotometer non-dispersif. Sementara pada skala laboratorium, pengukuran kandungan CO biasa menggunakan instrumen *Gas Chromatography*.

2.4.2 Mikroorganisme; Bakteri *Escherichia coli*

Komponen biologis pada udara (bioaerosol) kebanyakan berperan sebagai mikroorganisme patogenik dan menyebabkan alergi melalui saluran pernapasan. Bioaerosol yang biasanya mengganggu, antara lain bakteri, fungi, virus, dan benang sari (*pollen*). Ukuran partikel bervariasi antara 0,5-100 µm. Meningkatnya jumlah bioaerosol diiringi meningkatnya jumlah penyakit yang berhubungan dengan saluran pernapasan, seperti asma, batuk, hingga kanker paru-paru. Beberapa jenis bioaerosol penyebab alergi saluran pernapasan, misalnya *Cladosporium*, *Alternaria*, *Aspergillus*, dan *Fusarium*. Beberapa jenis bakteri pada udara yang bersifat patogenik, misalnya *Alternaria*, *Aspergillus*, *Botrytis*, *Cladosporium*, *Penicillium*, dan *Scopulariopsis* (Kalogerakis, 2005).

Pada penelitian ini digunakan bakteri *Escherichia coli* yang biasanya digunakan sebagai parameter pencemaran air. Bakteri ini bergerak dengan silia yang menjadi ciri khas bakteri yang hidup di media air, bukan dengan spora seperti bakteri yang hidup di udara. Penggunaan bakteri ini didasarkan pada kemudahan dalam analisis dan waktu replikasi yang tergolong cepat.

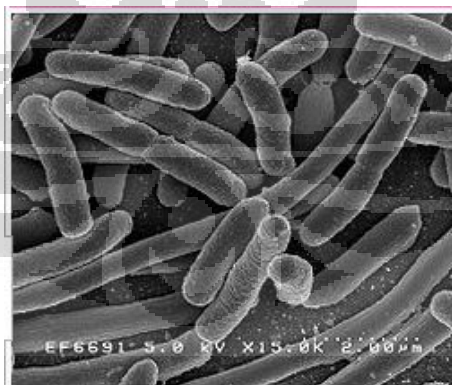
Tabel 2.5 Sistem taksonomi binomial bakteri *Escherichia coli*

Domain	Bacteria
Filum	Proteobacteria
Kelas	Gammaproteobacteria
Ordo	Enterobacteriales
Famili	Enterobacteriaceae
Genus	<i>Escherichia</i>
Species	<i>Escherichia coli</i>

Sumber: Wikipedia, 2012

Bakteri *E.coli* termasuk ke dalam bakteri Gram negatif, dengan bentuk tubuh batang dan panjang sekitar 2 μm serta diameter 0,5 μm .

Dari ratusan strain, hanya sebagian kecil *E.coli* yang diketahui bersifat patogenik. Sumber energi *E.coli* berasal dari hasil oksidasi senyawa kimia dan sumber karbon senyawa organik. Waktu replikasi bakteri selama 20 menit pada suhu 37°C. Gambar 2.9 di bawah menunjukkan visualisasi bakteri *E.coli*.



Gambar 2.9 Visualisasi bakteri *Escherichia coli*

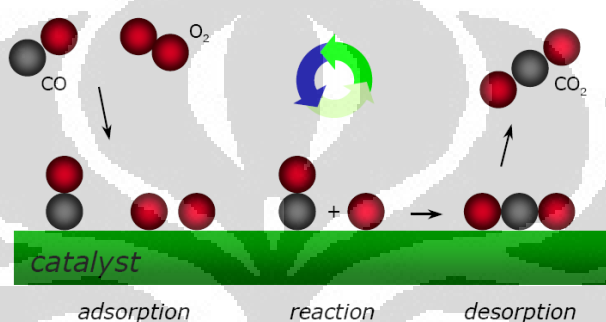
Sumber: Yalun, 2008

Komposisi utama dinding sel *E.coli* berupa peptidoglikan dan lipid, sementara membran luar terdiri atas liposakarida, fosfolipid, dan lipoprotein. Peptidoglikan dan membran luar berfungsi sebagai penjaga bentuk sel dan berpengaruh pada permeabilitas sel untuk mengatur keluar masuk molekul dari/ke sel (Yalun, 2006).

2.5 Proses Degradasi dan Disinfeksi Model Polutan Udara Ruang oleh Fotokatalisis

2.5.1 Karbon Monoksida (CO)

Degradasi CO menjadi CO₂ melibatkan peristiwa adsorpsi dan desorpsi pada permukaan fotokatalis TiO₂. Peristiwa desorpsi, yaitu pelepasan produk reaksi oleh katalis, adalah salah satu tahap penting proses fotokatalisis heterogen. Kemampuan desorpsi dipengaruhi jenis katalis dan produk dihasilkan. Mekanisme degradasi CO dengan bantuan fotokatalis dijelaskan melalui Gambar 2.10 berikut.



Gambar 2.10 Ilustrasi skema oksidasi CO dengan bantuan katalis

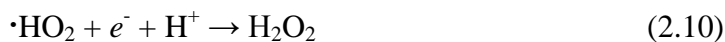
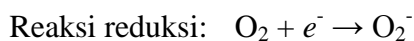
Sumber: Alfata, 2009

Dengan menduga skema mekanisme adsorpsi pada Gambar 2.10, maka persamaan reaksi oksidasi CO oleh katalis TiO₂ diperkirakan mengikuti mekanisme adsorpsi Langmuir-Hinshelwood. Model persamaan ini dianggap sebagai model yang paling mewakili proses fotokatalisis, di mana pada proses fotokatalisis terdapat pula proses adsorpsi yang mempengaruhi hasil secara signifikan (Perry, 1999).

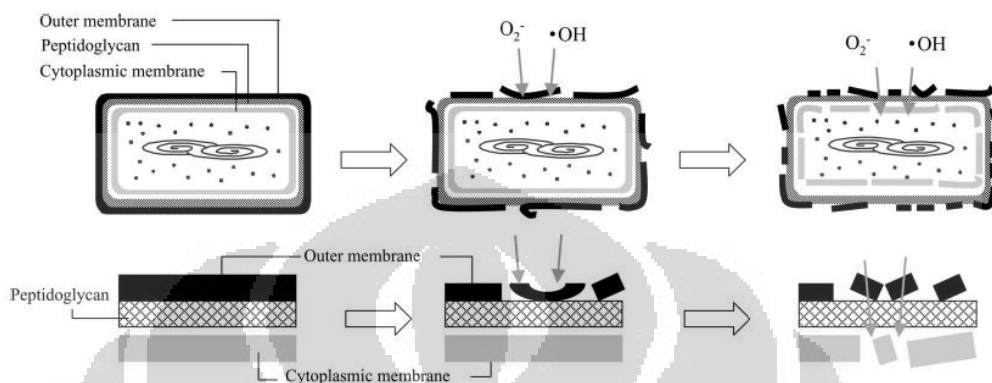
2.5.2 Bakteri *Escherichia coli*

Mekanisme reaksi disinfeksi bakteri *E.coli* dengan proses fotokatalisis diberikan oleh berbagai penulis. Sunada menyatakan bahwa fotokatalis dapat membunuh bakteri dengan menghancurkan dinding sel bakteri melalui reaksi oksidasi dengan $\cdot\text{OH}$ yang paling berperan dalam penghancuran dinding sel. Selanjutnya TiO₂ mendekomposisi endotoksin pada membran sel yang berisi lipopolisakarida, lipid A, dan rantai gula menggunakan H₂O₂ yang dihasilkan oleh reaksi oksidasi maupun reduksi sebagai berikut (Sunada, 1998).





Mekanisme disinfeksi *E.coli* dengan fotokatalisis digambarkan pada Gambar 2.11.



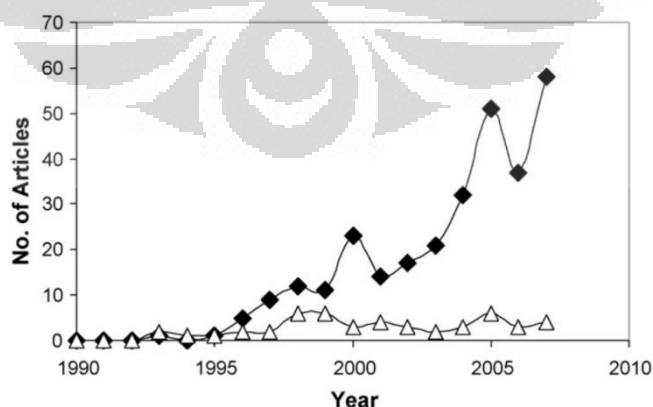
Gambar 2.11 Mekanisme disinfeksi *E.coli* oleh fotokatalisis

Sumber: Sunada, 2003

Kerusakan oksidatif yang terjadi semakin meningkatkan permeabilitas sel dan menyebabkan isi dalam sel mengalir keluar yang menyebabkan kematian sel.

2.6 Penelusuran Paten Terkait Alat Purifikasi Udara Ruang

Perkembangan paten alat purifikasi udara dengan fotokatalisis berkembang sejak 1997, meskipun penelitian lebih banyak difokuskan pada purifikasi air. Hingga 2012 paten alat purifikasi udara tercatat sebesar 53%, purifikasi air 38%, dan utilitas swabersih 9%. Paten terkait alat purifikasi udara terbagi ke dalam purifikasi udara ruang dan luar ruang yang ditunjukkan pada Gambar 2.12 berikut.



Gambar 2.12 Jumlah (estimasi) paten per tahun untuk purifikasi udara ruang (segiempat penuh) dan purifikasi udara luar ruang (segitiga kosong) berbasis proses fotokatalisis

Sumber: Paz, 2010

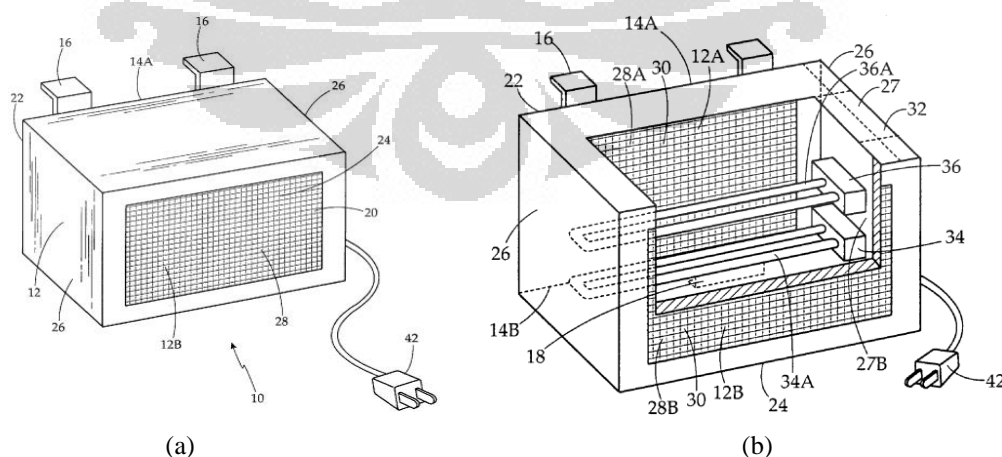
Berdasarkan tinjauan yang dilakukan Paz diketahui terdapat beberapa tantangan utama terkait rancang bangun alat purifikasi udara sebagai berikut (Paz, 2010).

- Perpindahan massa; terkait bagaimana polutan masuk ke dalam alat.
- Adsorpsi kontaminan; adsorpsi udara lebih kompleks dibandingkan cairan.
- Waktu tinggal; terkait berapa lama polutan mengalami kontak dengan katalis.
- Efek kelembaban; kelembaban udara lebih sulit dikontrol.
- Deaktivasi fotokatalis; dibutuhkan upaya untuk mencegah deaktivasi.
- Optimasi penggunaan foton; upaya yang dilakukan dapat berupa peningkatan efisiensi penggunaan foton atau mengurangi jumlah foton yang terbuang.
- Pelekatan fotokatalis ke substrat.

Beberapa alat purifikasi udara yang sudah dipatenkan, antara lain sebagai berikut.

2.6.1 *Portable Indoor Air Purification System, Patent No. US 7,674,436 B1 (Feldman, 2010)*

Patent ini menerangkan alat purifikasi udara berbasis fotokatalisis yang dipatenkan Vladimir Feldman dan Eduard Iskov pada 2010. Alat purifikasi udara yang dikembangkan merupakan integrasi fotokatalis, lampu UV-A (*blacklight blue lamp*), dan lampu UV-C (*germicidal UV lamp*). Sinar UV-C bersifat mutagenik bagi bakteri, virus, dan mikroorganisme di udara. Alat purifikasi udara ini bersifat *portable* dan digunakan terintegrasi dengan alat pembersih debu, pembersih uap, atau mesin pemanas untuk mengatur sirkulasi udara. Gambar 2.13 menunjukkan alat purifikasi udara yang dikembangkan oleh Feldman dan Iskov.



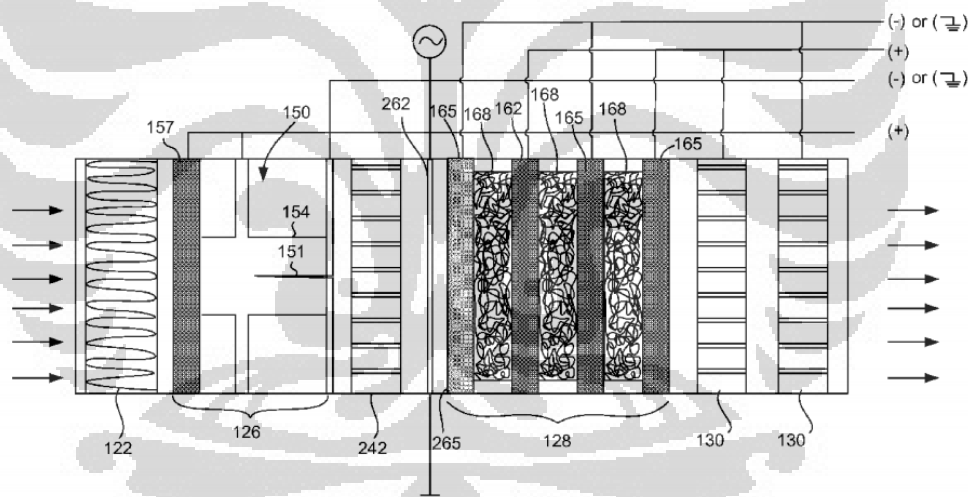
Gambar 2.13 Paten alat purifikasi udara berbasis fotokatalisis dan sinar UV, Patent No. US 7,674,436 B1; (a) tampak luar dan (b) tampak dalam

Sumber: Feldman, 2010

TiO₂ dilapiskan pada *aluminium mesh filter* pada bagian dalam alat. Pada bagian dalam terdapat 2 buah lampu, yaitu lampu UV-A (34) di bagian bawah dan lampu UV-C *germicidal* (36) pada bagian atas. Alat purifikasi udara digantungkan pada alat dengan pengatur sirkulasi udara menggunakan kait (16). Listrik dialirkan hingga lampu UV menyala untuk mengaktivasi TiO₂. Ketika alat pembersih debu dinyalakan akan terjadi sirkulasi udara, sehingga udara luar akan masuk ke dalam alat purifikasi udara. Bakteri dan virus yang masuk bersama dengan udara akan terdisinfeksi saat melalui filter yang sudah dilapisi TiO₂ dan lampu UV-C. Udara yang sudah bersih keluar melalui bagian belakang alat.

2.6.2 Air Purification Devices, Patent No. US 8,003,058 B2 (Bergeron, 2011)

Alat purifikasi udara yang dikembangkan Vance Bergeron dan Laurent Adrien Fullana dan ditunjukkan pada Gambar 2.14 menggunakan beberapa teknologi purifikasi udara, seperti pengion, filter elektrostatis, dan fotokatalis.



Keterangan:

122 = pre-filter	157 = elektroda reseptor
126 = plasma generator negatif	162 = elektroda berpori positif
128 = susunan filter elektrostatis	165 = elektroda berpori negatif
130 = ruang katalis	168 = bahan dielektrik berpori
150 = ruang elektroda negatif	242 = katalis oksidasi
151 = elektroda negatif	262 = sumber sinar UV
154 = dinding ruang elektroda negatif	265 = fotokatalis

Gambar 2.14 Paten alat purifikasi udara berbasis fotokatalisis, pengion, dan filter elektrostatis, Patent No. US 8,003,058 B2

Sumber: Bergeron, 2011

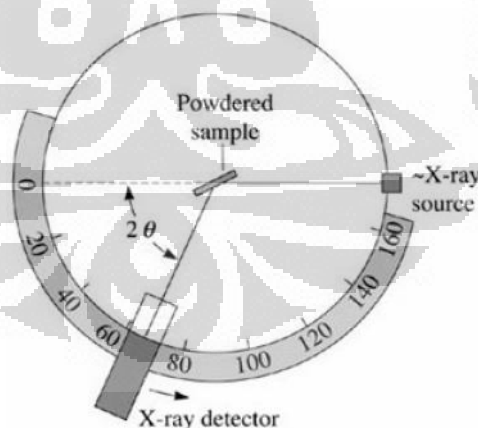
Pengion, yang berperan mirip dengan reaktor plasma, berfungsi melepaskan ion ke aliran gas. Filter elektrostatis, yang diletakkan di bawah pengion, berfungsi menangkap partikel bermuatan dalam aliran udara. Lampu UV akan mengaktifkan fotokatalis untuk memulai reaksi oksidasi yang berfungsi mendegradasi polutan udara. Fotokatalis diletakkan pada sekeliling keluaran filter elektrostatis.

2.7 Karakterisasi Katalis

Karakterisasi katalis bertujuan untuk mengetahui data-data spesifik katalis, dalam penelitian ini untuk menganalisis karakter TiO_2 , dopan Ag, ZAL, dan karbon aktif dengan karakterisasi yang digunakan adalah XRD dan SEM-EDX.

2.7.1 Karakterisasi XRD (*X-Ray Diffractometer*)

Tujuan karakterisasi XRD adalah menentukan parameter kisi, ukuran kristal, dan mengidentifikasi fasa suatu material kristalin. Jenis material juga dapat diketahui dengan membandingkan hasil karakterisasi XRD dengan katalog puncak difraksi. Prinsip karakterisasi XRD adalah difraksi panjang gelombang sinar X yang tersebar setelah bertumbukan dengan atom kristal. Hasil tumbukan menyebabkan puncak-puncak yang dapat digunakan untuk menentukan parameter spesifik kristal. Diagram alat karakterisasi XRD diberikan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Diagram alat karakterisasi *X-Ray Diffraction*

Sumber: Suryanarayana, 1998

Metode yang biasa digunakan adalah dengan memplot intensitas difraksi terhadap sudut difraksi 2θ . Intensitas tinggi pada nilai 2θ yang mengalami difraksi dan membentuk puncak. Berdasarkan lebar puncak yang muncul pada grafik dapat diketahui ukuran kristal menggunakan persamaan Scherrer (2.11).

$$L = \frac{K\lambda}{(\beta \cos \theta)} \quad (2.11)$$

dengan L = ukuran kristal (nm)

$$K = 0,89$$

λ = panjang gelombang radiasi sinar X-Ray (Cu-K α = 0,154118 nm)

β = lebar setengah puncak gelombang tertinggi (rad)

θ = sudut difraksi (rad)

Persamaan Scherrer diperoleh dengan asumsi puncak kristal memiliki profil Gauss dan merupakan kristal berbentuk kubus yang berukuran kecil. Sementara itu, komposisi antara kristal rutil dan anatase pada TiO₂ dapat dihitung dengan persamaan 2.12 berikut (Suryanarayana, 1998).

$$X = \left(1 + \frac{0,8I_A}{I_R} \right)^{-1} \quad (2.12)$$

dengan X = fraksi berat struktur rutil pada TiO₂

I_A = intensitas X-Ray pada puncak tertinggi anatase

I_R = intensitas X-Ray pada puncak tertinggi rutil

2.7.2 Karakterisasi SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

Karakterisasi SEM digunakan untuk mengetahui morfologi, porositas, serta ketebalan suatu material. SEM digunakan untuk mengarakterisasi material karena elektron memiliki resolusi lebih tinggi dari cahaya. Cahaya hanya mampu mencapai resolusi 200 nm, sedangkan elektron dapat mencapai resolusi 0,1-0,2 nm. Prinsip kerja SEM adalah sebagai berikut (Material Cerdas Indonesia, 2011).

- Sebuah pistol elektron memproduksi sinar e^- dan dipercepat dengan anoda.
- Lensa magnetik memfokuskan e^- menuju sampel.
- Sinar e^- fokus memindai keseluruhan sampel dan diarahkan kawat pemindai.
- Ketika e^- mengenai sampel akan mengeluarkan e^- baru yang akan diterima oleh detektor dan dikirim ke monitor (*Cathode-Ray Tube/CRT*).

Gambar secara simultan terbentuk dari tiap posisi penembakan. Sinyal yang dihasilkan SEM tergantung jenis pantulan. Pantulan elastis (elektron memantul ketika ditembakkan ke spesimen) menghasilkan sinyal *secondary electrons* dan karakteristik sinar X, sementara pantulan inelastis (elektron

dibelokkan ke dalam spesimen) menghasilkan sinyal *backscattered electrons*. Sinyal *secondary electrons* menghasilkan topografi dari sampel yang dianalisis, di mana permukaan yang lebih tinggi berwarna lebih cerah. Hal ini dikarenakan permukaan yang lebih tinggi lebih banyak melepaskan elektron. Sementara sinyal *backscattered electrons* memberikan perbedaan berat molekul dari atom-atom permukaan, di mana atom dengan berat molekul tinggi berwarna lebih cerah. Hal ini dikarenakan atom dengan berat molekul lebih besar memantulkan lebih banyak elektron dibanding elektron dengan berat molekul lebih rendah.

2.7.3 Karakterisasi EDX (*Energy Dispersive X-Ray*)

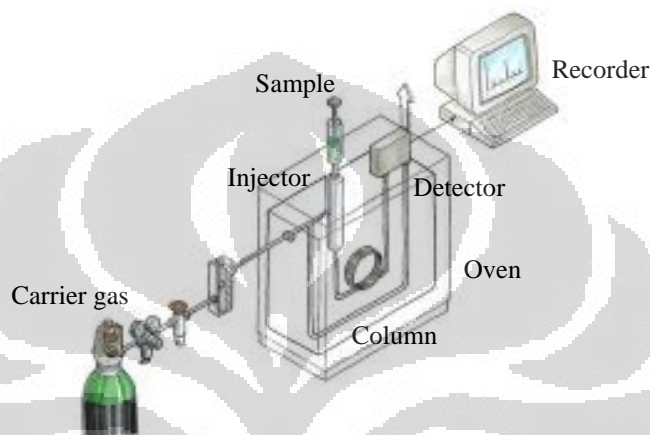
Karakterisasi EDX adalah teknik analisis untuk karakterisasi kimia yang bertujuan mengenali jenis atom di permukaan material yang mengandung multi atom. EDX dihasilkan dari sinar X karakteristik, yaitu dengan menembakkan sinar X pada posisi yang ingin diketahui komposisinya. Setelah ditembakkan pada posisi yang diinginkan, akan muncul puncak tertentu yang mewakili unsur-unsur yang terkandung pada permukaan material (Material Cerdas Indonesia, 2011). EDX dapat digunakan untuk karakterisasi kuantitatif berdasarkan presentase tiap elemen pada spesimen dari perbesaran kecil (~25 kali) hingga perbesaran sangat besar (~20.000 kali).

2.8 Metode Pengujian Komponen Gas; *Gas Chromatography – Thermal Conductivity Detector*

Gas kromatografi adalah salah satu metode analisis untuk pemisahan, pengidentifikasian, dan penentuan komponen kimia dalam campuran gas yang didasarkan pada perbedaan kecepatan migrasi komponen. Pada penelitian ini digunakan *Gas Chromatography – Thermal Conductivity Detector* (GC-TCD). Pada GC terdapat dua jenis fasa, yaitu fasa gerak (pembawa sampel) dan fasa diam (penahan sampel yang bersifat selektif). Pada penelitian ini fasa gerak berupa gas argon dan fasa diam berupa kolom *Activated Carbon*.

Beberapa komponen pada GC-TCD dijelaskan sebagai berikut. Detektor adalah sensor elektronik yang berfungsi mengubah sinyal gas pembawa dan komponen di dalamnya menjadi sinyal elektronik yang ditampilkan pada alat

perekam (*recorder*). Detektor ditempatkan pada ujung kolom tempat keluar gas pembawa dan berfungsi mengubah konduktivitas termal dari buangan pada kolom dan membandingkannya dengan konduktivitas aliran gas pembawa (gas argon). Tiap senyawa, baik organik dan anorganik, memiliki konduktivitas termal yang berbeda dari argon, sehingga senyawa tertentu dapat dideteksi. Komponen GC-TCD diberikan pada Gambar 2.16 sebagai berikut.



Gambar 2.16 Komponen GC-TCD

Sumber: Inforedia, 2008

Pada kromatogram akan terbentuk puncak-puncak yang menunjukkan sifat spesifik dari suatu senyawa. Jumlah puncak menunjukkan jumlah komponen yang terdapat dalam sampel, sedangkan luas peak menunjukkan konsentrasi komponen. Terdapat beberapa parameter yang digunakan dalam menganalisis suatu campuran melalui metode kromatografi, misalnya waktu retensi. Waktu retensi adalah waktu yang diperlukan komponen mulai dari sampel dimasukkan ke dalam mulut kolom hingga terjadinya elusi atau saat komponen mencapai detektor.

2.9 Metode Perhitungan Koloni Bakteri; *Total Plate Count*

Metode *Total Plate Count* (TPC) merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk memperkirakan jumlah bakteri dalam suatu sampel. Pada metode TPC yang dapat dihitung hanyalah bakteri yang masih hidup (*viable cells*) dan bukan bakteri yang sudah mati (*dead cells*). Metode ini didasarkan pada prinsip dilusi atau pengenceran. Pengenceran dilakukan untuk mencegah terlalu banyak

koloni bakteri yang terbentuk, sehingga lebih mudah dibaca. Gambar 2.17 berikut memperlihatkan prosedur pembacaan metode TPC.



Gambar 2.17 Prosedur pembacaan metode TPC

Sumber: Coleman, *n.d.*

Setelah pengenceran dilakukan, kemudian bakteri diinokulasi dalam medium agar hingga terbentuk koloni setelah proses inkubasi. Jumlah normal koloni bakteri yang dapat dibaca berkisar antara 3-300 koloni per cawan (Coleman, *n.d.*). Jumlah koloni bakteri dihitung dengan persamaan (2.13) sebagai berikut.

$$N = \frac{d \cdot \sum c}{V} \quad (2.13)$$

dengan N = total koloni bakteri per ml sampel

d = faktor pengenceran

c = total koloni terhitung pada cawan

V = volume sampel diinokulasi ke cawan

BAB 3

METODE PENELITIAN

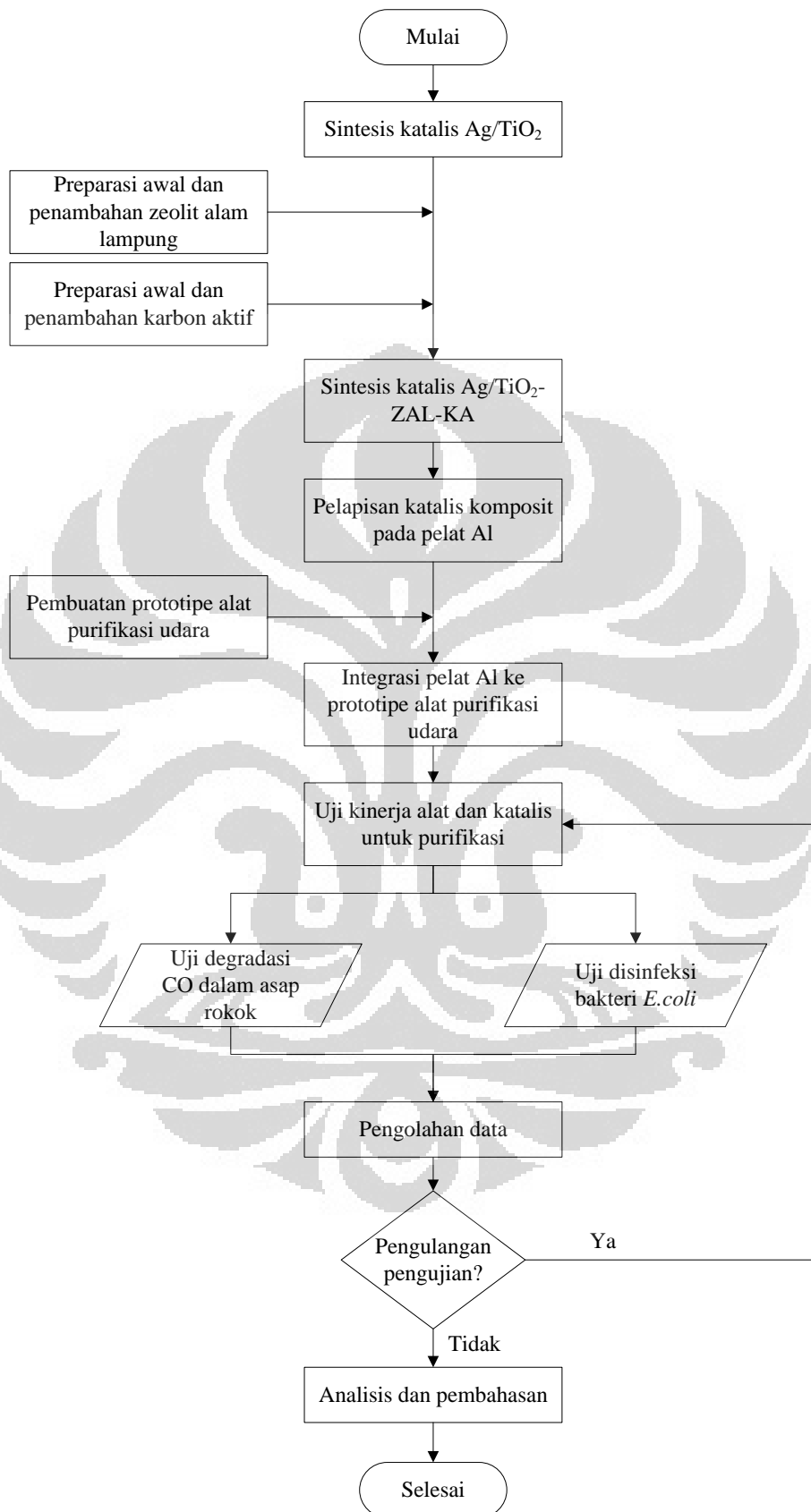
3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini menggunakan prototipe alat purifikasi udara untuk pengujian degradasi senyawa kimia pada asap rokok dengan model polutan berupa CO pada fasa gas. Sementara itu, pengujian katalis untuk disinfeksi bakteri dengan model bakteri *Escherichia coli* dilakukan pada fasa cair. Penelitian untuk uji degradasi polutan kimia pada udara ruang dilaksanakan di Laboratorium Rekayasa Produk Kimia dan Bahan Alam (RPKA) Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia. Sementara itu, pengujian untuk disinfeksi bakteri *Escherichia coli* dilaksanakan di Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

Penelitian ini meliputi beberapa kegiatan utama, yaitu sebagai berikut.

- a. Preparasi bahan, meliputi zeolit alam lampung dan karbon aktif;
- b. Sintesis katalis komposit Ag/TiO₂-ZAL-KA;
- c. Pelapisan katalis komposit pada pelat aluminium;
- d. Pembuatan prototipe alat purifikasi udara dan integrasi pelat aluminium ke dalam prototipe alat purifikasi udara;
- e. Pengujian kinerja alat dan katalis, meliputi uji degradasi polutan dalam udara ruang dan uji disinfeksi bakteri *E.coli*;
- f. Pengolahan data, analisis, dan pembahasan.

Pada Gambar 3.1 berikut ditampilkan diagram alir penelitian secara keseluruhan.



Gambar 3.1 Diagram alir keseluruhan penelitian

3.2 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini dibagi berdasarkan beberapa tahapan yang dilalui dalam melaksanakan penelitian, yaitu sebagai berikut.

3.2.1 Peralatan Sintesis Katalis Ag/TiO₂-ZAL-KA

Peralatan yang digunakan pada tahap sintesis katalis Ag/TiO₂-ZAL-KA (termasuk preparasi awal ZAL dan KA, serta sintesis katalis Ag/TiO₂) adalah sebagai berikut.

- | | |
|--|-----------------------------------|
| a. Gelas beaker 500 ml | i. <i>Magnetic stirrer</i> |
| b. Gelas ukur 100 ml | j. <i>Hot plate</i> |
| c. <i>Alat planetary ball mill</i> | k. Kotak iradiasi dengan lampu UV |
| d. Kaca arloji | l. Kertas saring |
| e. Spatula | m. <i>Atmospheric furnace</i> |
| f. Batang pengaduk | n. Pipet tetes |
| g. Sonikator (<i>ultrasonic processor</i>) | o. Alu dan mortar |
| h. Timbangan | p. Kertas pH |

3.2.2 Peralatan Pembuatan Prototipe Alat

Peralatan yang digunakan pada tahap pembuatan prototipe alat purifikasi udara adalah sebagai berikut.

- | | |
|------------------------------------|--------------------------|
| a. Kaca akrilik tebal 4 mm | g. Saklar |
| b. Pelat aluminium tebal 0,3 mm | h. Terminal |
| c. <i>Alat dip coating</i> | i. Soket |
| d. Lampu UV-A <i>black lamp</i> 8W | j. <i>Grinder</i> |
| e. <i>Blower</i> | k. Peralatan pertukangan |
| f. Kabel | l. Kuas gambar |

3.2.3 Peralatan Uji Kinerja Alat dan Katalis

1. Uji Degradasi CO

Peralatan uji kinerja alat dan katalis untuk degradasi CO sebagai berikut.

- Prototipe alat purifikasi udara yang telah dibuat sebelumnya
- Microsyringe*
- Stopwatch*
- Ruang uji berbahan akrilik; ukuran 50 x 50 x 50 cm dengan 2 *sampling port*

2. Uji Disinfeksi Bakteri *E.coli*

Peralatan uji kinerja katalis untuk disinfeksi bakteri *E.coli* sebagai berikut dengan reaktor digunakan adalah *portable fotoreactor* fasa cair.

- | | |
|--|----------------------------|
| a. <i>Portable fotoreactor</i> fasa cair | j. <i>Blue tip</i> |
| b. Botol sampel | k. Timbangan |
| c. Cawan petri | l. Inkubator |
| d. Pipet ukur 1, 5, dan 10 ml | m. Autoklaf |
| e. Tabung reaksi | n. Oven |
| f. Labu Erlenmeyer 500 ml | o. <i>Magnetic stirrer</i> |
| g. Gelas beaker 500 ml | p. Lemari pendingin |
| h. Spatel | q. Pembakar Bunsen |
| i. <i>Yellow tip</i> | r. Labu Erlenmeyer |

3.2.4 Peralatan Karakterisasi dan Uji Kinerja Katalis Komposit

Peralatan karakterisasi dan uji kinerja katalis komposit yang digunakan pada penelitian adalah sebagai berikut.

- Shimadzu XRD 7000 X-Ray Diffractometer untuk karakterisasi XRD
- Inspect F50 Scanning Electron Microscopy untuk karakterisasi SEM
- EDAX TSL Ametek Energy Dispersive X-Ray untuk karakterisasi EDX
- Shimadzu C-26A Chromatopac kolom *Activated Carbon* untuk pengujian GC-TCD

3.3 Bahan Penelitian

Bahan habis pakai yang digunakan pada penelitian dibagi berdasarkan beberapa tahapan yang dilakukan dalam melaksanakan aktivitas penelitian.

3.3.1 Bahan Sintesis Katalis Ag/TiO₂-ZAL-KA

Bahan-bahan habis pakai yang digunakan pada tahap sintesis katalis Ag/TiO₂-ZAL-KA adalah sebagai berikut.

- | | |
|--|------------------------------------|
| a. TiO ₂ nanopartikel Degussa P25 | e. Larutan HCl 6M |
| b. Zeolit alam lampung | f. Larutan NH ₄ Cl 0,1M |
| c. Karbon aktif berbahan tempurung kelapa | g. Larutan HF 1% |
| d. AgNO ₃ | h. Larutan HNO ₃ |

- i. TEOS (*Tetraethyl Orthosilicate*) 98% j. Akuades

3.3.2 Bahan Uji Kinerja Alat dan Katalis

Bahan-bahan habis pakai yang digunakan pada tahap uji kinerja alat dan katalis adalah sebagai berikut yang dibagi menurut jenis ujinya.

1. Uji Degradasi CO

Bahan-bahan habis pakai yang digunakan untuk uji degradasi CO pada asap rokok adalah sebagai berikut.

- a. Gas argon sebagai *carrier* GC-TCD c. Asap rokok
b. CO murni

2. Uji Disinfeksi Bakteri *E.coli*

Bahan-bahan habis pakai yang digunakan untuk uji disinfeksi bakteri *E.coli* adalah sebagai berikut.

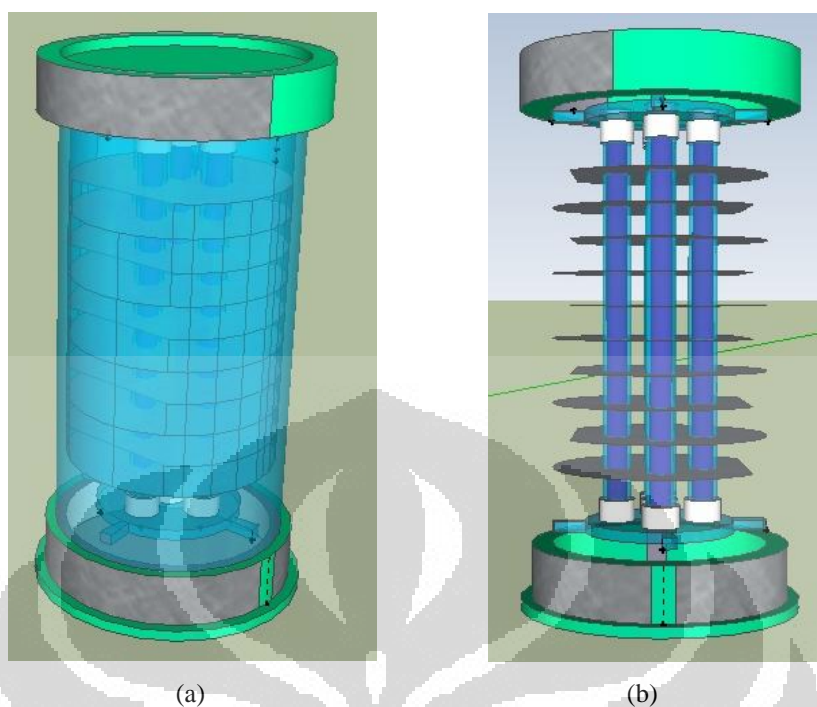
- a. Pelat Al berlapis katalis komposit d. Akuades
b. Kultur murni *E.coli* ATCC 9637 e. Larutan alkohol 70%
c. *ENDO-Agar*

3.4 Peralatan Uji Kinerja Katalis

Pada penelitian ini digunakan dua jenis peralatan untuk pengujian kinerja katalis, yaitu pada fasa gas (udara) maupun fasa cair. Alat uji pada fasa gas menggunakan prototipe alat purifikasi udara yang dikembangkan sendiri oleh penulis. Sementara itu, alat uji pada fasa cair menggunakan *portable fotoreactor* yang telah dikembangkan oleh Didit Kuncorojati pada penelitian sebelumnya.

3.4.1 Prototipe Alat Purifikasi Udara

Prototipe alat purifikasi udara yang dirancang bangun oleh penulis terdiri atas dua bagian utama, yaitu rangka luar dan rangka dalam. Rangka luar prototipe alat purifikasi udara terdiri atas tiga bagian, yaitu tutup bagian atas, badan alat, dan tutup bagian bawah yang berbentuk silinder. Keseluruhan bagian rangka luar terbuat dari bahan akrilik dengan ketebalan 4 mm. Pemilihan akrilik sebagai bahan rangka luar prototipe alat dikarenakan sifat yang ringan dan transparan. Perancangan awal prototipe alat purifikasi udara menggunakan *software* Google SketchUp sebagaimana diberikan pada Gambar 3.2 sebagai berikut.



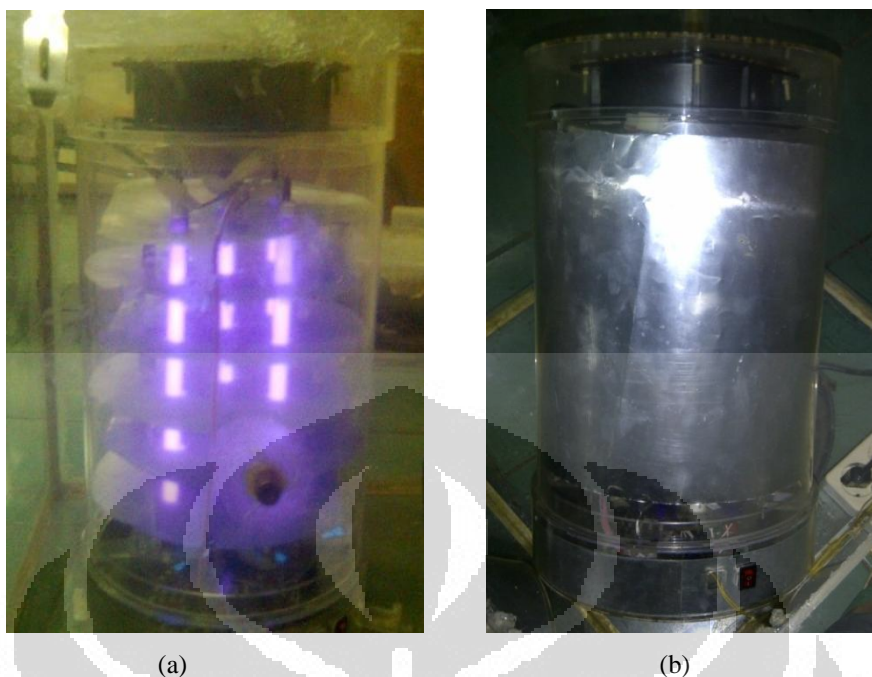
Gambar 3.2 Perancangan awal prototipe alat purifikasi udara; (a) dengan bagian badan dan (b) tanpa bagian badan, dapat dilihat pemasangan pelat Al sedemikian rupa sehingga aliran udara dalam alat purifikasi udara akan mengalir secara zig-zag

Ukuran tiap bagian rangka luar alat purifikasi udara diberikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Ukuran tiap bagian rangka luar prototipe alat purifikasi udara

Komponen Rangka Luar	Diameter Dalam (cm)	Tinggi (cm)
Tutup bagian atas	24,2	7
Badan	25,0	33
Tutup bagian bawah	24,2	6

Pada bagian tutup, baik sebelah atas maupun bawah dilubangi sebagai jalan sirkulasi udara keluar dan masuk alat. Udara masuk melalui lubang bagian atas dan keluar melalui lubang bagian bawah. Pada tutup bagian atas dipasang *blower* yang akan mengisap udara dari lingkungan dan menghembuskan udara ke dalam alat, sementara pada tutup bagian bawah merupakan lokasi bagi instalasi listrik untuk menyalakan lampu UV-A dan *blower*. Pada bagian ini juga dipasang saklar sebagai tombol *on/off* lampu UV-A dan *blower*. Visualisasi alat purifikasi udara yang dirancang bangun diberikan pada Gambar 3.3 sebagai berikut.

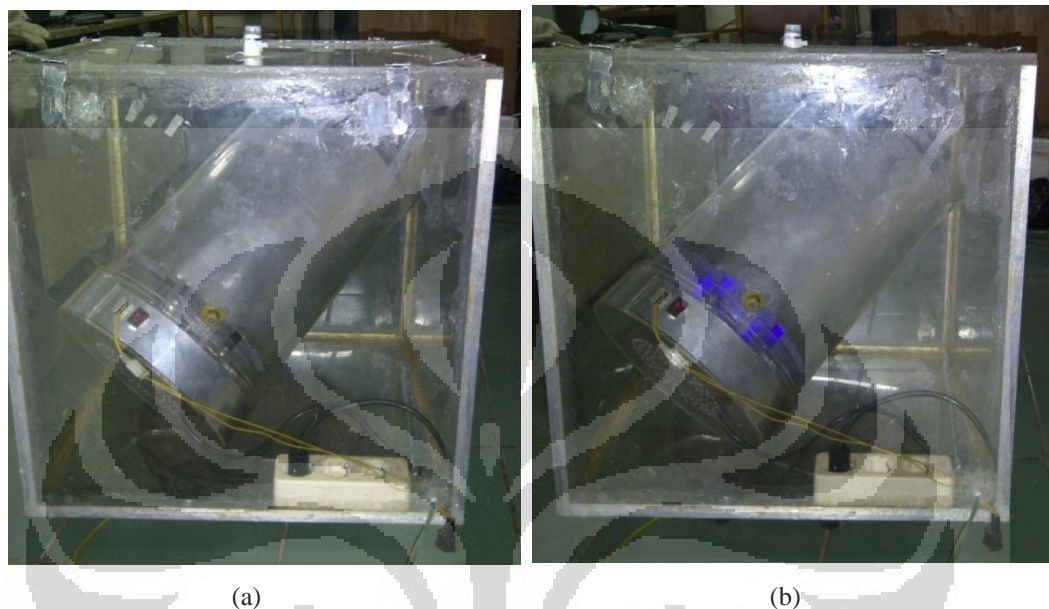


Gambar 3.3 Visualisasi alat purifikasi udara tampak samping;
(a) tanpa reflektor dan (b) dengan reflektor aluminium

Rangka dalam terdiri atas 6 buah pelat aluminium dengan tebal 0,3 mm sebagai tempat pelekatan katalis komposit Ag/TiO₂-ZAL-KA. Pelat aluminium ini ditopang oleh 5 buah lampu UV-A dan berdiri pada penyangga yang ditempatkan di tutup bagian bawah. Lampu UV-A juga berfungsi sebagai sumber energi foton untuk mengaktifasi TiO₂. Penyusunan lampu UV-A dibuat sedemikian rupa, sehingga dapat menjangkau keseluruhan pelat. Pada awalnya digunakan 10 buah pelat aluminium, namun intensitas sinar UV yang dipantulkan sangat kecil dan lebih banyak yang terbuang sehingga jumlah pelat dikurangi menjadi 6 buah. Selain itu, ditambahkan reflektor aluminium di sekeliling kaca akrilik untuk memantulkan sinar UV yang mengarah secara radial agar tidak terbuang ke lingkungan dan dapat dipantulkan kembali ke dalam alat.

Susunan pelat aluminium pada rangka dalam diatur sedemikian rupa, sehingga aliran udara di dalam alat berbentuk zig-zag dengan tujuan membuat aliran turbulen sekaligus meningkatkan waktu tinggal polutan dalam alat. Kondisi ini meningkatkan kontak antara katalis dengan polutan. Penggunaan aluminium sangat menguntungkan karena berfungsi sebagai reflektor untuk meningkatkan efektivitas penyinaran dan jangkauan sinar UV ke seluruh pelat.

Alat ini dirancang untuk pengujian degradasi polutan udara ruang fasa gas, di mana polutan diisap oleh *blower*. Pengujian dilakukan pada ruang uji berbahan akrilik berukuran 50 cm x 50 cm x 50 cm dan 2 buah *sampling port*. Gambar 3.4 berikut menunjukkan visualisasi prototipe alat purifikasi udara dalam ruang uji.



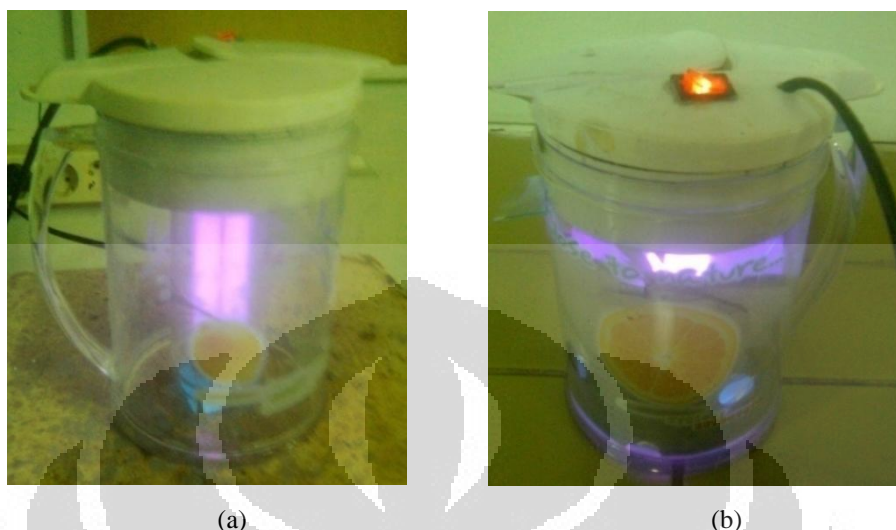
Gambar 3.4 Visualisasi prototipe alat purifikasi udara dalam ruang uji; (a) sebelum dan (b) setelah lampu UV dinyalakan

Pada bagian luar ruang uji terdapat kabel yang menghubungkan listrik dari sumber luar dan terdapat pula saklar untuk *on/off* lampu UV-A.

3.4.2 *Portable Fotoreactor Fasa Cair*

Portable fotoreactor yang dikembangkan pada penelitian sebelumnya oleh Didit Kuncorojati ini digunakan dengan tujuan untuk pengujian disinfeksi bakteri pada fasa cair. *Portable fotoreactor* ini menggunakan teko air yang dimodifikasi, di mana pada bagian tengah diletakkan 4 buah lampu UV-A sebagai sumber energi foton untuk mengaktifasi fotokatalis. Sementara itu, pelat aluminium yang telah dilapisi dengan katalis komposit dibuat melingkar pada dinding teko. Instalasi listrik dibuat pada bagian tutup teko dengan saklar *on/off* untuk lampu UV-A berada pada bagian luar tutup teko. Limbah cair yang berisi bakteri *Escherichia coli* sebagai model polutan berupa mikroorganisme dimasukkan ke dalam reaktor. Selanjutnya lampu UV-A dinyalakan untuk mengaktifasi katalis komposit yang terdapat di dinding teko. Katalis komposit inilah yang berfungsi

mendisinfeksi bakteri dalam limbah cair. Gambar 3.5 berikut menunjukkan visualisasi *portable fotoreactor* yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3.5 Visualisasi *portable fotoreactor* fasa cair;
(a) tanpa pelat berlapis katalis dan (b) dengan pelat berlapis katalis

3.5 Prosedur Penelitian

Langkah-langkah prosedur penelitian yang digunakan pada penelitian ini dibagi berdasarkan tahapan yang dilalui dalam melaksanakan aktivitas penelitian yang dijelaskan sebagai berikut.

3.5.1 Prosedur Preparasi Awal Zeolit Alam Lampung (ZAL)

Prosedur preparasi awal ZAL yang dilakukan melalui tahapan *ball milling* dan dealuminasi yang dilakukan dengan perlakuan asam dan pemanasan.

1. *Ball milling*

Prosedur *ball milling* dilakukan menggunakan alat NQM-4 Model Planetary Ball Mill yang berada di Departemen Metalurgi dan Material FTUI. Prosedur *ball milling* ZAL mengikuti langkah-langkah berikut (Charki, 2010).

- a. Mencuci tabung *vial* dan *ball mill* yang akan digunakan untuk penggilingan.
- b. Melakukan *pre-treatment* untuk alat *planetary ball mill* menggunakan silika dengan tujuan membersihkan bagian dalam tabung *vial* selama 10 menit.
- c. Menimbang ZAL sebanyak 20 g dan memasukkan ke dalam tabung *vial*.
- d. Memasukkan *ball mill* dengan rasio berat terhadap ZAL sebesar 4,5 : 1.
- e. Mengoperasikan *planetary ball mill* selama 3 jam dengan frekuensi 27,21 Hz.

- f. Menyimpan ZAL hasil penggilingan ke dalam botol katalis.

2. Dealuminasi

Prosedur dealuminasi ZAL bertujuan meningkatkan rasio Si/Al pada ZAL dengan perlakuan asam dan pemanasan (Alfat, 2009).

- a. Merendam ZAL dalam 200 ml larutan HF 1% selama 10 menit disertai pengadukan dengan *magnetic stirrer*. Perendaman dengan larutan HF bertujuan untuk melarutkan oksida pengotor yang terdapat dalam ZAL.
- b. Membilas ZAL dengan akuades dan kemudian disaring.
- c. Memanaskan ZAL dalam 200 ml larutan HCl 6 M pada suhu 90°C selama 30 menit disertai pengadukan dengan *magnetic stirrer*. Pemanasan ZAL dalam larutan HCl bertujuan agar Al dalam ZAL dapat terekstrak dan Al dalam kerangka menjadi Al luar kerangka, sehingga rasio Si/Al meningkat.
- d. Membilas ZAL dengan akuades dan kemudian disaring.
- e. Merendam ZAL dalam 200 ml larutan NH₄Cl 0,1 M selama satu minggu disertai pemanasan pada suhu 90°C selama 3 jam per hari. Perendaman dalam larutan NH₄Cl bertujuan untuk memperluas struktur baru yang terbentuk akibat dealuminasi oleh HCl.
- f. Membilas ZAL dengan akuades dan kemudian disaring.
- g. Menggerus ZAL hasil penyaringan dengan menggunakan alu dan mortar.

3.5.2 Prosedur Preparasi Awal Karbon Aktif (KA)

Prosedur preparasi awal KA dilakukan dengan tahapan *ball milling* dan pencucian dengan langkah-langkah sebagai berikut.

1. *Ball milling*

Prosedur *ball milling* dilakukan alat NQM-4 Model Planetary Ball Mill di Departemen Metalurgi dan Material FTUI dengan langkah-langkah berikut.

- a. Mencuci tabung *vial* dan *ball mill* yang akan digunakan untuk penggilingan.
- b. Melakukan *pre-treatment* untuk alat *planetary ball mill* menggunakan silika dengan tujuan membersihkan bagian dalam tabung *vial* selama 10 menit.
- c. Menimbang karbon aktif sebanyak 20 g dan memasukkan ke dalam *vial*.
- g. Memasukkan *ball mill* dengan rasio berat terhadap karbon aktif sebesar 4,5 : 1 ke tabung *vial*.

- h. Mengoperasikan *planetary ball mill* selama 3 jam dengan frekuensi 27,21 Hz.
- i. Menyimpan karbon aktif hasil penggilingan ke dalam botol katalis.

2. Pencucian

Prosedur pencucian karbon aktif mengikuti langkah berikut (Alfat, 2009).

- a. Merendam karbon aktif dalam 200 ml akuades sambil diaduk secara manual.
- b. Mengambil karbon aktif yang mengambang pada permukaan akuades karena diindikasikan senyawa tersebut adalah abu hasil pembakaran.
- c. Menyaring karbon aktif, kemudian dicuci kembali dengan akuades. Karbon aktif dinyatakan bersih jika air saringan sudah tidak berwarna hitam.
- d. Menggerus karbon aktif hasil penyaringan menggunakan alu dan mortar.

3.5.3 Prosedur Sintesis Katalis Ag/TiO₂

Prosedur sintesis katalis Ag/TiO₂ menggunakan metode *photo-assisted deposition* (PAD) dengan tahapan sebagai berikut (Sung-Suh, 2004).

- a. Membuat larutan metanol 10% sebanyak 325 ml.
- b. Menambahkan larutan HNO₃ sedikit demi sedikit hingga mencapai pH 3.
- c. Menambahkan 2,5 g TiO₂ Degussa P25 ke dalam larutan metanol 10%.
- d. Melakukan pengadukan secara manual, dilanjutkan dengan sonikasi selama 30 menit untuk memecah gumpalan yang mungkin terdapat dalam campuran.
- e. Menambahkan AgNO₃ dengan jumlah tertentu (0; 0,5; 1,0; 3,0%) ke dalam masing-masing campuran TiO₂.
- f. Melakukan iradiasi campuran TiO₂ dengan sinar UV dengan metode PAD di dalam kotak iradiasi selama 6 jam sambil diaduk dengan *magnetic stirrer*.

3.5.4 Prosedur Sintesis Katalis Ag/TiO₂-ZAL-KA

Prosedur sintesis katalis komposit Ag/TiO₂-ZAL-KA dilakukan dengan tahapan sebagai berikut.

- a. Menyiapkan campuran katalis Ag/TiO₂ yang dibuat dengan metode PAD.
- b. Melakukan pengadukan secara manual, kemudian dilanjutkan sonikasi selama 10 menit untuk memecah agregat yang terdapat dalam campuran.
- c. Menambahkan 3 ml TEOS 98% ke dalam campuran Ag/TiO₂ sambil diaduk.
- d. Menimbang ZAL dan KA sesuai rasio (rasio berat TiO₂ : ZAL : KA = 70 : 15 : 15), kemudian memasukkan ke dalam campuran Ag/TiO₂.

- e. Melakukan pengadukan secara manual, kemudian dilanjutkan dengan sonikasi selama 30 menit untuk memecah gumpalan yang mungkin terdapat dalam campuran dan mendispersikan masing-masing senyawa.

Berat katalis dan adsorben yang digunakan pada tiap variasi katalis komposit diberikan pada Tabel 3.2 sebagai berikut.

Tabel 3.2 Berat katalis dan adsorben untuk tiap variasi katalis komposit

Variasi katalis	Berat (g)			
	TiO ₂	ZAL	KA	AgNO ₃
TiO ₂ (100%)	2,500	-	-	-
TiO ₂ -ZAL-KA	1,750	0,375	0,375	-
0,5wt% Ag/TiO ₂ -ZAL-KA	1,741	0,373	0,373	0,020
1,0wt% Ag/TiO ₂ -ZAL-KA	1,733	0,371	0,371	0,039
3,0wt% Ag/TiO ₂ -ZAL-KA	1,698	0,364	0,364	0,118

3.5.5 Prosedur Pembuatan Prototipe Alat Purifikasi Udara

Prosedur pembuatan prototipe alat purifikasi udara memiliki dua bagian besar, yaitu pelapisan katalis komposit pada pelat Al dan pembuatan prototipe alat purifikasi udara. Pelat Al berlapis katalis komposit kemudian diintegrasikan ke dalam prototipe alat purifikasi udara untuk dilakukan uji kinerja alat dan katalis.

1. Pelapisan Katalis Komposit pada Pelat Aluminium

Pelat aluminium yang digunakan pada tiap variasi katalis komposit sebanyak 6 buah, sehingga total pelat aluminium yang diperlukan sebanyak 30 buah. Prosedur pelapisan katalis komposit pada pelat aluminium dilakukan dengan tahapan sebagai berikut.

- Memotong pelat aluminium tebal 0,3 mm berbentuk lingkaran dengan diameter 25 cm.
- Mengamplas pelat aluminium hingga permukaannya terasa kasar.
- Mencuci pelat aluminium yang telah diampelas, kemudian menempatkan pelat aluminium pada alat *spin coating*.
- Menyiapkan katalis komposit sambil diaduk dengan *magnetic stirrer*.
- Melapiskan katalis komposit sebanyak 1 ml pada pelat aluminium.

- f. Mengoperasikan alat *spin coating* pada kondisi 250 rpm selama 2 menit.
- g. Mengeringkan pelat aluminium dengan alat pengering selama 1 menit.
- h. Mengulangi langkah e-g untuk sisi pelat aluminium yang sama sebanyak 4 kali dan sisi satunya sebanyak 5 kali.
- i. Mengkalsinasi pelat aluminium yang telah dilapisi katalis komposit secara bertahap dalam *atmospheric furnace* dengan kondisi sebagai berikut:
 - 1) Suhu 100°C selama 2 jam
 - 2) Suhu 400°C selama 1 jam
- j. Menyimpan pelat aluminium berlapis katalis komposit dalam desikator.

2. Pembuatan Prototipe Alat Purifikasi Udara

Pembuatan prototipe alat purifikasi udara dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut.

- a. Membuat rangka luar prototipe alat purifikasi udara berbahan dasar kaca akrilik dengan ketebalan 4 mm dengan spesifikasi sebagaimana diberikan pada Tabel 3.1.
- b. Membuat lubang-lubang kecil pada bagian atas dan bawah sebagai tempat keluar masuk udara.
- c. Memasang *blower* pada bagian atas untuk sirkulasi udara masuk dengan arah aliran udara ke dalam prototipe alat.
- d. Memasangudukan untuk 5 buah lampu UV-A pada bagian bawah alat.
- e. Memasang instalasi listrik (termasuk kabel, saklar, dan soket) untuk lampu UV dan *blower* pada bagian bawah alat, kemudian menguji coba kinerja lampu UV dan *blower*.
- f. Memasang 6 buah pelat aluminium yang telah dilapisi katalis komposit.

3.5.6 Prosedur Uji Kinerja Alat dan Katalis

Uji kinerja alat dan katalis dilakukan untuk menguji degradasi polutan udara berupa karbon monoksida yang terdapat dalam medium pendispersi berupa asap rokok. Sementara itu, untuk uji disinfeksi bakteri berupa *Escherichia coli* dilakukan pada media cair, sehingga hanya digunakan untuk menguji kinerja katalis komposit. Uji kinerja katalis akan dimulai setelah polutan dimasukkan ke dalam alat uji dan lampu UV dinyalakan.

1. Uji Degradasi CO

Prosedur uji degradasi karbon monoksida dengan medium pendispersi berupa asap rokok dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut.

- a. Menyiapkan prototipe alat purifikasi udara yang telah dibuat sebelumnya dan telah diintergasikan dengan pelat aluminium berlapis katalis komposit.
- b. Meletakkan prototipe alat purifikasi udara ke dalam ruang uji berupa kotak akrilik dengan volume $0,125 \text{ m}^3$, kemudian menutup rapat ruang uji dengan lem silicon hingga tidak ada celah.
- c. Memasukkan asap rokok yang berasal dari dua batang rokok ke dalam ruang uji melalui *sampling port*.
- d. Menunggu selama 60 menit untuk proses homogenisasi, sehingga polutan tersebar merata dalam ruang uji.
- e. Menyalakan *blower* dan lampu UV-A pada prototipe alat purifikasi udara.
- f. Mengambil sampel udara dari ruang uji tiap selang waktu tertentu selama empat jam menggunakan *syringe* melalui *sampling port* lain.
- g. Menginjeksikan sampel udara dari ruang uji ke GC-TCD untuk mengetahui konsentrasi CO sisa dan CO_2 dihasilkan pada suatu waktu tertentu.

2. Uji Disinfeksi Bakteri *E.coli*

Pengujian disinfeksi bakteri *E.coli* dilakukan di Laboratorium Teknik Penyehatan dan Lingkungan, Departemen Teknik Sipil FTUI. Prosedur uji disinfeksi bakteri *E.coli* dilakukan dengan langkah-langkah berikut.

- a. Menyiapkan *portable fotoreaktor*, kemudian mensterilkan peralatan yang akan digunakan dengan menyemprotkan alkohol 70%.
- b. Memasang pelat Al berlapis katalis komposit pada dinding fotoreaktor.
- c. Menyiapkan kultur bakteri *E.coli* pada suhu ruang, kemudian diencerkan dalam sejumlah akuades sambil diaduk dengan *magnetic stirrer*.
- d. Memasukkan air berisi *E.coli* ke dalam fotoreaktor.
- e. Menyalakan lampu UV-A dan mengambil sampel air dalam fotoreaktor tiap 30 menit selama 2,5 jam. Sampel air dimasukkan ke botol sampel kemudian disimpan di lemari pendingin jika tidak segera dilakukan perhitungan TPC.

Perhitungan jumlah koloni bakteri E.coli menggunakan metode *Total Plate Count* (TPC) dengan langkah-langkah sebagai berikut.

- a. Mensterilkan berbagai peralatan yang akan digunakan dengan cara direndam dalam air sabun, dimasukkan ke dalam autoklaf pada suhu 120°C selama 20 menit, dan dioven hingga kering.
- b. Menyiapkan beberapa cawan petri berisi 10 ml *ENDO Agar* yang sudah dicairkan dan menjaga pada suhu 45 °C.
- c. Mengambil 1 ml sampel dari fotoreaktor dan menambahkan 9 ml akuades, kemudian mengocok dalam tabung reaksi 1 untuk pengenceran 10 kali.
- d. Mengambil 1 ml sampel air dari tabung reaksi 1 dan menambahkan 9 ml akuades, kemudian mengocok dalam tabung 2 untuk pengenceran 10² kali.
- e. Mengambil 1 ml sampel air dari tabung reaksi 2 dan menambahkan 9 ml akuades, kemudian mengocok dalam tabung 3 untuk pengenceran 10³ kali.
- f. Mengambil 0,1 ml sampel air dari tabung reaksi 3 menggunakan *yellow tip*, kemudian meletakkan dalam cawan petri berisi medium agar.
- g. Menginkubasi cawan petri pada suhu 30°C selama 36 jam.
- h. Menghitung koloni bakteri yang terbentuk di cawan petri secara manual.
- i. Menghitung total koloni bakteri per ml air menggunakan persamaan (2.17).

Untuk menentukan faktor pengenceran yang tepat dilakukan berdasarkan metode *trial and error*. Hal ini dapat diketahui dari jumlah koloni yang terbaca pada pelat berkisar antara 3-300 koloni.

3.6 Variabel Penelitian

Variabel pada penelitian ini dibedakan menjadi variabel bebas, terikat, dan kontrol. Berikut adalah rincian dari jenis-jenis variabel tersebut.

3.6.1 Variabel Bebas

Variabel bebas yang divariasikan pada penelitian adalah sebagai berikut.

- a. Jenis katalis komposit

Katalis komposit yang digunakan adalah sebagai berikut.

- | | |
|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1) TiO ₂ -ZAL-KA | 3) 1,0wt% Ag/TiO ₂ -ZAL-KA |
| 2) 0,5wt% Ag/TiO ₂ -ZAL-KA | 4) 3,0wt% Ag/TiO ₂ -ZAL-KA |

b. Jenis polutan

Polutan dipergunakan adalah CO dengan gas pembawa berupa asap rokok untuk pengujian fasa gas. Sementara bakteri *E.coli* sebagai model mikroorganismе digunakan untuk pengujian fasa cair.

c. Waktu reaksi

Variasi waktu reaksi dilakukan untuk mengetahui kemampuan katalis komposit dalam mendegradasi polutan udara ruang dan disinfeksi bakteri. Analisis konsentrasi polutan udara ruang dan disinfeksi bakteri dilakukan setiap setengah jam selama 270 menit untuk fasa gas dan 150 menit untuk fasa cair.

3.6.2 Variabel Terikat

Variabel terikat yang didapatkan sebagai hasil perubahan variabel bebas pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. Konsentrasi polutan sisa, berupa konsentrasi keluaran CO sisa dari alat purifikasi udara dan bakteri terbaca pada cawan petri.
- b. Konsentrasi produk keluaran, berupa CO₂ sebagai hasil degradasi polutan pada alat purifikasi udara.

3.6.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol yang digunakan pada penelitian ini adalah konsentrasi polutan sisa dan CO₂ sebagai hasil degradasi poluten serta bakteri *E.coli* tersisa pada pengujian dengan menggunakan pelat aluminium berlapis katalis TiO₂ Degussa P25 (100%).

3.7 Data Penelitian dan Teknik Pengolahan Data

Data yang diambil beserta teknik pengambilan data yang digunakan pada penelitian diberikan pada Tabel 3.3 di bawah ini.

Tabel 3.3 Data penelitian dan teknik pengambilan data

No.	Data	Alat	Teknik Pengolahan Data
1	Konsentrasi CO sisa	GC-TCD	Membuat kurva kalibrasi CO dan membaca <i>peak areayang</i> dihasilkan ketika menyuntikkan sampel

Tabel 3.3 Data penelitian dan teknik pengambilan data (lanjutan)

No.	Data	Alat	Teknik Pengolahan Data
2	Konsentrasi CO ₂ dihasilkan	GC-TCD	Membuat kurva kalibrasi CO ₂ dan membaca <i>peak area</i> yang dihasilkan ketika menyuntikkan sampel
3	Koloni bakteri <i>E.coli</i>	TPC	Mengambil sampel air, meletakkan pada cawan petri, melakukan pengenceran, menghitung jumlah koloni <i>E.coli</i> terbentuk
4	Struktur kristal Ag/TiO ₂	XRD	Membaca citra dan data XRD yang dihasilkan
5	Morfologi, porositas, ukuran katalis Ag/TiO ₂ -ZAL-KA	SEM	Membaca citra dan data SEM yang dihasilkan
6	Komposisi tiap senyawa dalam katalis Ag/TiO ₂ -ZAL-KA	EDX	Membaca data EDX yang dihasilkan

3.8 Pengolahan Data Penelitian

3.8.1 Uji Degradasi CO

Data *peak area* CO dan CO₂ dari GC-TCD diubah ke dalam konsentrasi menggunakan kurva kalibrasi yang telah dibuat. Data kemudian di-plot ke dalam grafik dengan waktu analisis sebagai sumbu-*x* dan konsentrasi CO serta CO₂ sebagai sumbu-*y*.

3.8.2 Uji Disinfeksi Bakteri *E.coli*

Data jumlah koloni bakteri yang didapatkan dari hasil pembacaan TPC kemudian di-plot ke dalam grafik dengan waktu analisis sebagai sumbu-*x* dan jumlah koloni bakteri per ml sampel sebagai sumbu-*y*. Grafik lain yang dibuat adalah rasio jumlah koloni bakteri aktual terhadap jumlah koloni bakteri awal (C/C_0) sebagai sumbu-*y* terhadap waktu analisis sebagai sumbu-*x*.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini membahas hasil penelitian yang telah dilakukan beserta analisis yang menjelaskan hasil penelitian. Batasan purifikasi udara pada penelitian ini adalah disinfeksi bakteri *Escherichia coli* dan degradasi senyawa kimia berupa karbon monoksida, baik pada CO murni maupun dalam asap rokok. Katalis komposit yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. TiO₂ Degussa P25 (100%)
- b. TiO₂-ZAL-KA
- c. 0,5wt% Ag/TiO₂-ZAL-KA
- d. 1,0wt% Ag/TiO₂-ZAL-KA
- e. 3,0wt% Ag/TiO₂-ZAL-KA

Pengujian disinfeksi bakteri *E.coli* dilakukan pada fasa cair dan pengujian degradasi CO dilakukan pada fasa gas.

4.1 Karakterisasi Katalis Komposit

4.1.1 Karakterisasi XRD

Karakterisasi XRD dilakukan dengan tujuan menentukan jenis, ukuran, dan struktur kristal pada suatu material. Jenis material dapat diketahui dengan membandingkan hasil karakterisasi XRD dengan puncak hasil difraksi katalog. Katalis komposit yang dikarakterisasi adalah 3,0wt% Ag/TiO₂ tanpa ditambahkan adsorben ZAL dan KA. Puncak-puncak hasil difraksi dari hasil karakterisasi XRD katalis 3,0wt% Ag/TiO₂ diberikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Puncak hasil karakterisasi XRD

2θ (degree)	Jenis Kristal	2θ (degree)	Jenis Kristal
25,32	Anatase TiO ₂	41,27	Rutile TiO ₂
26,02	-	44,10	-
27,45	Rutile TiO ₂	48,05	Anatase TiO ₂
32,16	-	53,92	-
36,09	Rutile TiO ₂	54,34	Anatase TiO ₂
37,02	Anatase TiO ₂	55,07	Rutile TiO ₂
37,90	Anatase TiO ₂	56,62	Anatase TiO ₂
38,64	Anatase TiO ₂	62,10	-

Tabel 4.1 Puncak hasil karakterisasi XRD (lanjutan)

2θ (degree)	Jenis Kristal	2θ (degree)	Jenis Kristal
62,74	Anatase TiO ₂	70,32	Anatase TiO ₂
64,14	-	75,13	Anatase TiO ₂
68,88	Rutile TiO ₂	76,26	Anatase TiO ₂

Berdasarkan Tabel 4.1 diketahui bahwa kristal dominan adalah anatase dan rutile TiO₂ Degussa P25, sementara puncak logam Ag belum terlihat. Hal ini dapat terjadi karena *loading* Ag terlalu kecil, sehingga belum dapat dibaca atau puncak Ag tumpang tindih dengan puncak TiO₂. Untuk mengetahui kristal dengan karakteristik puncak spesifik yang belum diketahui dapat dibandingkan dengan katalog puncak difraksi pada *software Match!*. Senyawa yang dibandingkan adalah Ag dan turunannya yang mungkin terbentuk, yaitu AgO dan Ag₂O.

1. Logam Ag (Ag⁰)

Puncak logam Ag tumpang tindih dengan puncak anatase TiO₂ pada $2\theta = 37,90^\circ$. Puncak Ag muncul pada $2\theta = 44,10^\circ$ dan $64,14^\circ$.

2. Senyawa Ag₂O (Ag⁺)

Puncak senyawa Ag₂O tumpang tindih dengan puncak anatase TiO₂ pada $2\theta = 37,90^\circ$ dan rutile pada $2\theta = 55,07^\circ$. Puncak Ag₂O muncul pada $2\theta = 26,02^\circ$.

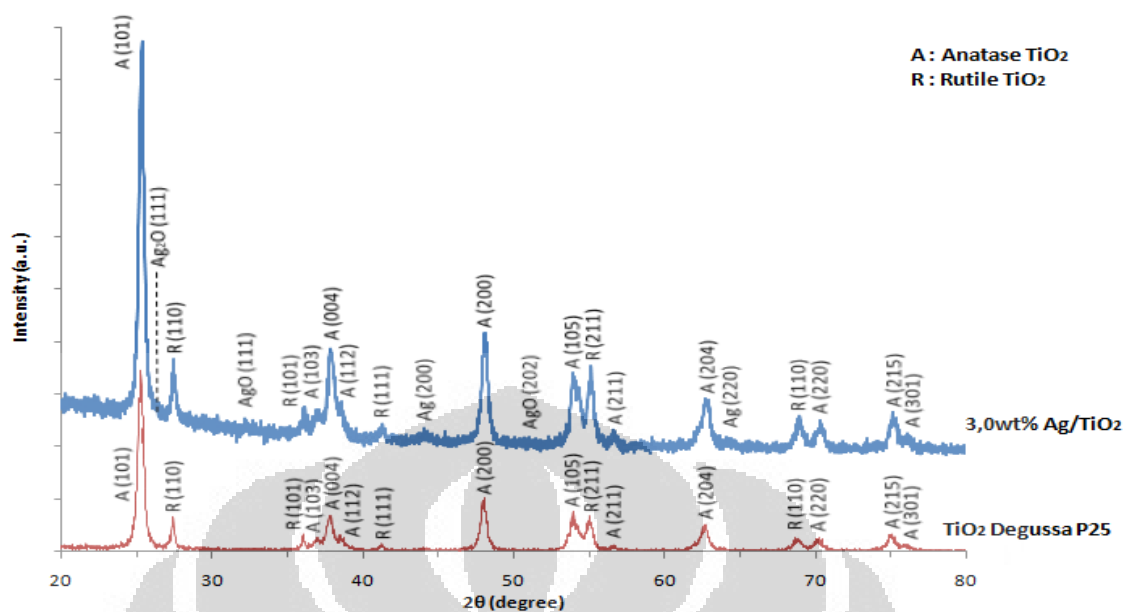
3. Senyawa AgO (Ag²⁺)

Puncak senyawa AgO tumpang tindih dengan puncak anatase TiO₂ pada $2\theta = 37,02^\circ$, $54,34^\circ$, dan $56,2^\circ$. Puncak AgO muncul pada $2\theta = 32,16^\circ$ dan $53,92^\circ$.

Pada katalis Ag/TiO₂ ini tidak hanya terbentuk logam Ag, melainkan senyawa turunan Ag berupa AgO dan Ag₂O. Hal ini dimungkinkan terjadi akibat perlakuan panas dan pengaruh stabilitas material pada saat PAD dan kalsinasi. Senyawa AgO mulai berubah menjadi Ag₂O pada suhu sekitar 160°C, sementara Ag₂O terdekomposisi menjadi Ag dan O pada suhu sekitar 380°C. Senyawa yang paling tidak stabil adalah AgO. Reaksi berantai yang terjadi pada senyawa Ag selama proses dekomposisi adalah sebagai berikut (Feng, 2010).



Perbandingan hasil XRD untuk TiO₂ Degussa P25 murni dan 3,0wt% Ag/TiO₂ diberikan pada Gambar 4.1 sebagai berikut.



Gambar 4.1 Perbandingan hasil karakterisasi XRD untuk TiO₂ Degussa P25 dan 3,0wt% Ag/TiO₂

Tinggi puncak dari suatu fase kristal pada suatu material berbanding lurus dengan ukuran rerata kristal tersebut. Puncak yang tajam menunjukkan ukuran kristal yang besar (Pan, 2010). Ukuran kristal dapat diketahui dengan persamaan Scherrer (2.11), sementara komposisi kristal anatase pada TiO₂ dapat diketahui dengan persamaan (2.12) sebagaimana diberikan pada Tabel 4.2 berikut.

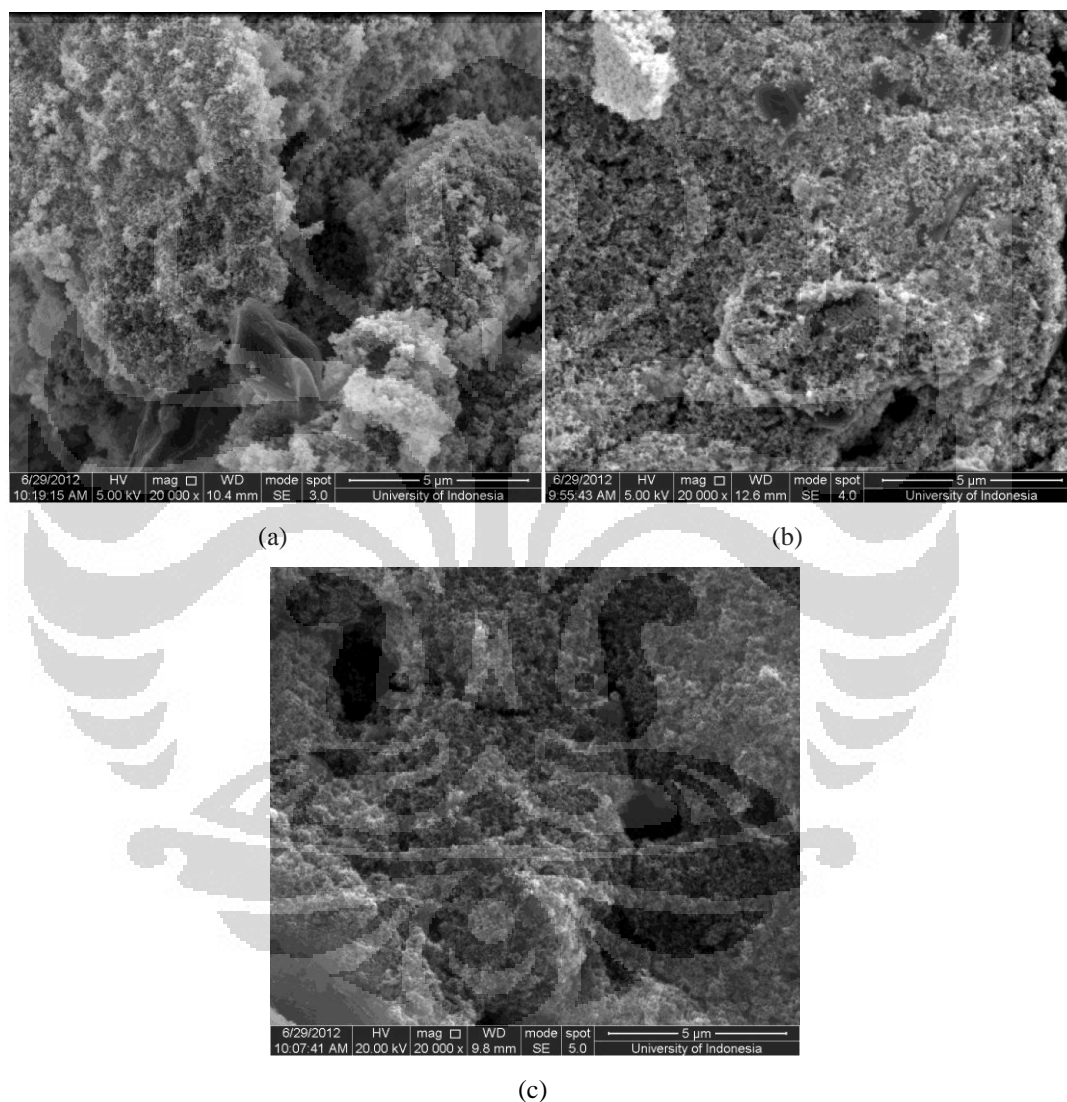
Tabel 4.2 Perbandingan persentase berat anatase dan ukuran kristal pada TiO₂ Degussa P25 dan katalis komposit 3,0wt% Ag/TiO₂

Material	% Berat Anatase	Ukuran kristal (nm)				
		Anatase	Rutile	Ag	Ag ₂ O	AgO
TiO ₂ Degussa P25	79,23	20	23	-	-	-
3,0wt% Ag/TiO ₂	80,72	20	23	16	29	23

Berdasarkan Tabel 4.2 diketahui ukuran kristal anatase dan rutile TiO₂ tidak berubah. Perlakuan panas dan mekanis tidak berpengaruh signifikan pada ukuran kristal. Sementara persentase berat anatase meningkat walau tidak signifikan. Hal ini terjadi akibat perlakuan panas pada saat kalsinasi sesuai dengan pembentukan kristal anatase pada suhu sekitar 400°C. Ukuran kristal senyawa perak oksida dimulai dari ukuran terbesar, yaitu Ag₂O, AgO, dan terkecil logam Ag. Ukuran kristal dipengaruhi jumlah atom yang menyusun masing-masing kristal, di mana semakin banyak atom penyusun maka ukuran kristal akan semakin besar pula.

4.1.2 Karakterisasi SEM-EDX

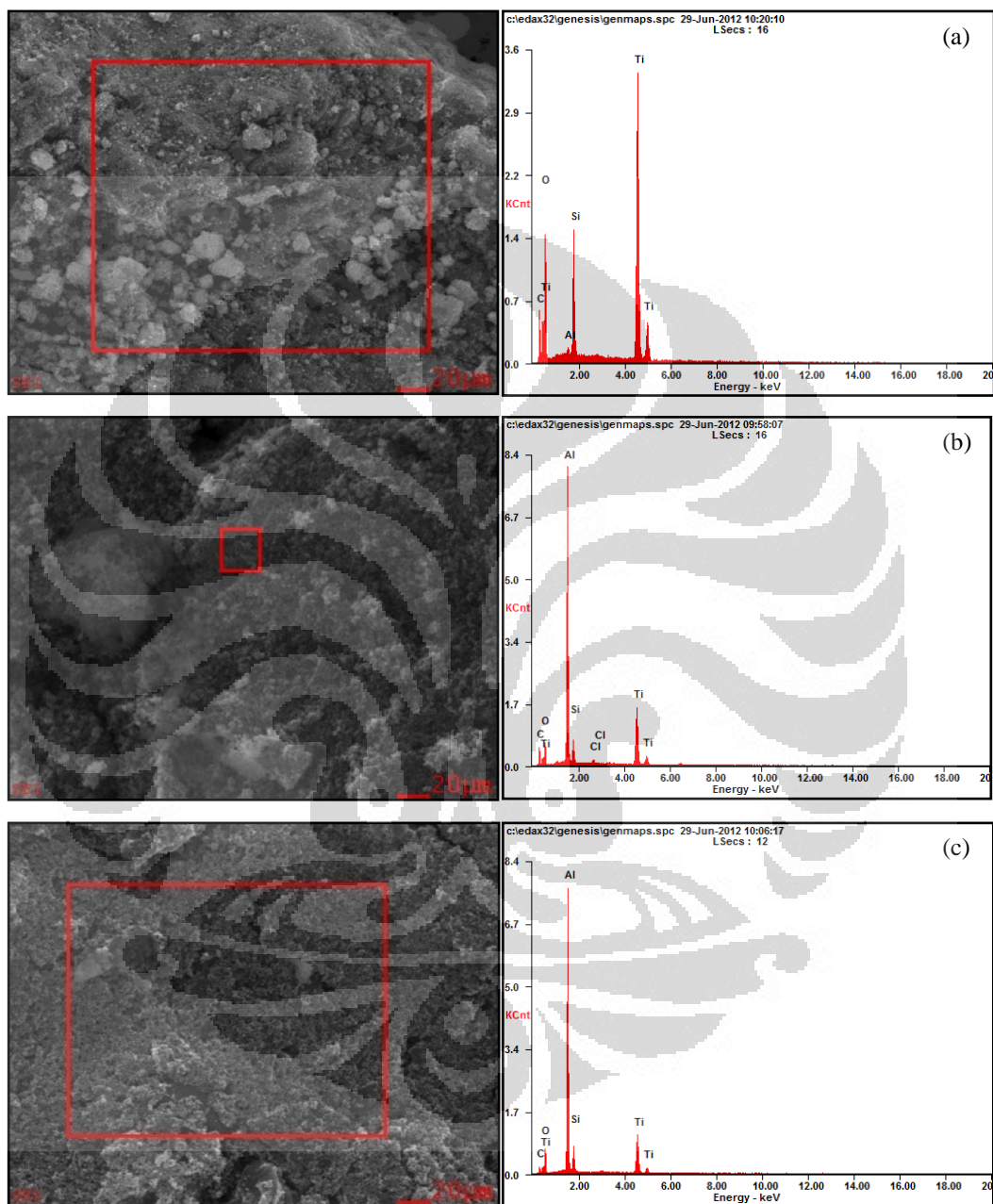
Karakterisasi SEM bertujuan untuk mengetahui morfologi, porositas, dan ukuran material. Katalis komposit yang dikarakterisasi SEM yaitu sebagai berikut; 3,0wt% Ag/TiO₂-ZAL-KA pada kondisi serbuk, TiO₂-ZAL-KA, dan 3,0wt% Ag/TiO₂-ZAL-KA pada pelat aluminium. Hasil karakterisasi SEM untuk ketiga jenis katalis komposit diberikan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Hasil karakterisasi SEM pada perbesaran 20.000 kali untuk (a) 3,0wt% Ag/TiO₂-ZAL-KA serbuk, (b) TiO₂-ZAL-KA, dan (c) 3,0wt% Ag/TiO₂-ZAL-KA pada pelat aluminium

Berdasarkan hasil karakterisasi terlihat adanya aglomerasi/gumpalan di antara komponen penyusun katalis komposit. Terlihat pula adanya pori pada katalis, baik pada kondisi serbuk maupun yang sudah dilapiskan pada pelat Al. Melalui hasil SEM yang didapatkan sulit untuk membedakan tiap komponen

penyusun katalis. Kemudian dilakukan karakterisasi EDX dengan tujuan mengenali jenis atom di permukaan material yang mengandung multi atom. Lokasi pengambilan sampel dan hasil puncak EDX dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Lokasi pengambilan dan puncak hasil EDX untuk (a) 3,0wt% Ag/TiO₂-ZAL-KA serbuk, (b) TiO₂-ZAL-KA, dan (c) 3,0wt% Ag/TiO₂-ZAL-KA pada pelat aluminium

Hasil karakterisasi EDX untuk katalis komposit, baik pada kondisi serbuk maupun pada pelat aluminium diberikan pada Tabel 4.3 berikut.

Tabel 4.3 Hasil EDX untuk katalis komposit pada kondisi serbuk dan terlapis pada pelat Al

Elemen	Persen berat (wt%)		
	3,0wt% Ag/TiO ₂ -ZAL- KA serbuk	TiO ₂ -ZAL-KA pada pelat Al	3,0wt% Ag/TiO ₂ -ZAL- KA pada pelat Al
C K	11,07	1,21	18,55
O K	39,48	29,78	15,97
F K	-	0,18	-
Al K	0,67	0,82	38,92
Si K	8,27	7,79	4,81
Ca K	-	0,90	-
Cl K	-	-	0,81
Ti K	40,51	59,31	20,94

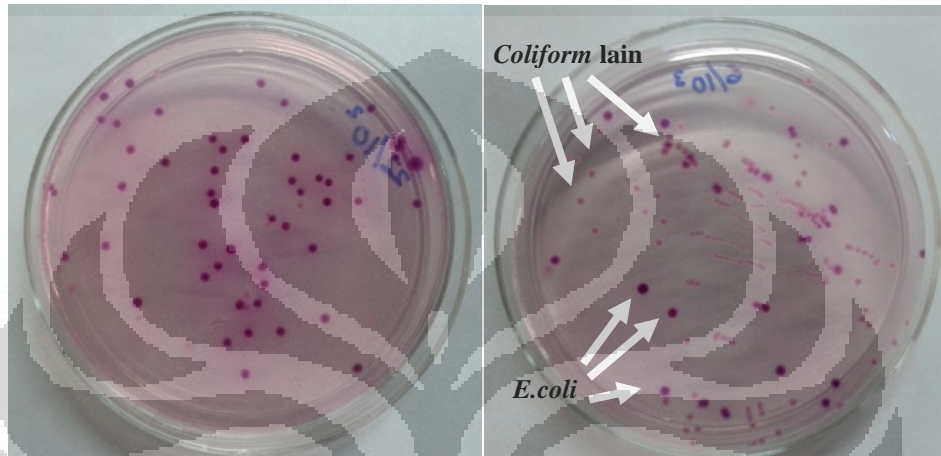
Berdasarkan Tabel 4.3 diketahui bahwa untuk katalis komposit 3,0wt% Ag/TiO₂-ZAL-KA, baik pada kondisi serbuk maupun terlapis pada pelat Al, tidak terbaca adanya unsur Ag. Hal ini dapat disebabkan karena beberapa hal, misalnya Ag tidak tersebar secara merata, membentuk aglomerasi dengan sesama Ag, jumlah sampel yang kecil, hingga Ag yang masuk ke pori-pori fotokatalis atau adsorben hingga tidak dapat dibaca oleh EDX.

Jumlah Al yang besar pada katalis komposit 3,0wt% Ag/TiO₂-ZAL-KA pada pelat berasal dari bahan pelat berupa aluminium. Hal ini mengindikasikan proses pelapisan (*coating*) yang tidak merata, sehingga Al terbaca dengan jumlah yang besar. Sementara pada katalis TiO₂-ZAL-KA yang dilapiskan pada pelat, terbaca jumlah Al yang sedikit yang mengindikasikan baiknya proses pelapisan. Rasio Si/Al pada ZAL pada katalis 3,0wt% Ag/TiO₂-ZAL-KA serbuk sesudah preparasi sebesar 12,34. Sementara rasio Si/Al pada ZAL sebelum preparasi pada data penelitian sebelumnya sebesar 6,8 (Meta, 2006). Dapat disimpulkan bahwa preparasi ZAL berhasil menaikkan rasio Si/Al hampir dua kali lipat.

4.2 Uji Disinfeksi Bakteri *Escherichia coli*

Pengujian disinfeksi bakteri dilakukan pada fasa cair dengan bakteri yang hidup pada media cair, bukan bakteri yang hidup di udara. Hal ini dikarenakan modifikasi peralatan yang cukup sulit untuk disinfeksi udara. *E.coli* digunakan karena kemudahan penanganan dan mudah bereplikasi, sehingga dapat digunakan untuk mengetahui efektivitas katalis dalam mendisinfeksi mikroorganisme secara

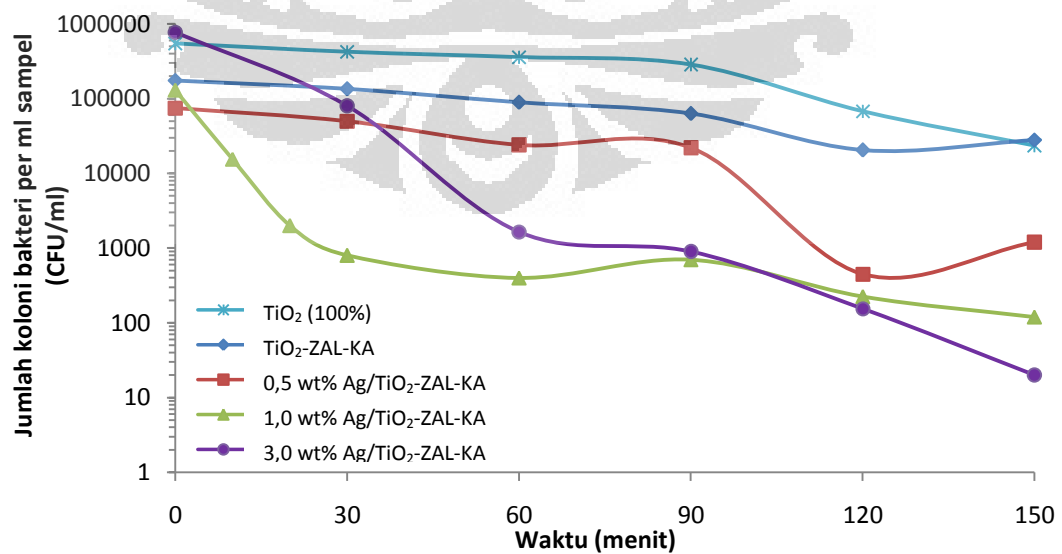
cepat. Variasi *loading* dopan logam Ag pada komposit fotokatalis TiO_2 -ZAL-KA, sebesar 0; 0,5; 1,0; 3,0% dari berat total katalis komposit sebesar 2,5 g. Uji disinfeksi *E.coli* menggunakan *portable fotoreactor*. Pembacaan jumlah koloni *E.coli* dilakukan dengan metode *Total Plate Count* (TPC) dan media *ENDO-Agar* dengan karakteristik *E.coli* dapat dilihat dari warna hijau metalik. Visualisasi hasil TPC dapat dilihat pada Gambar 4.4 sebagai berikut.



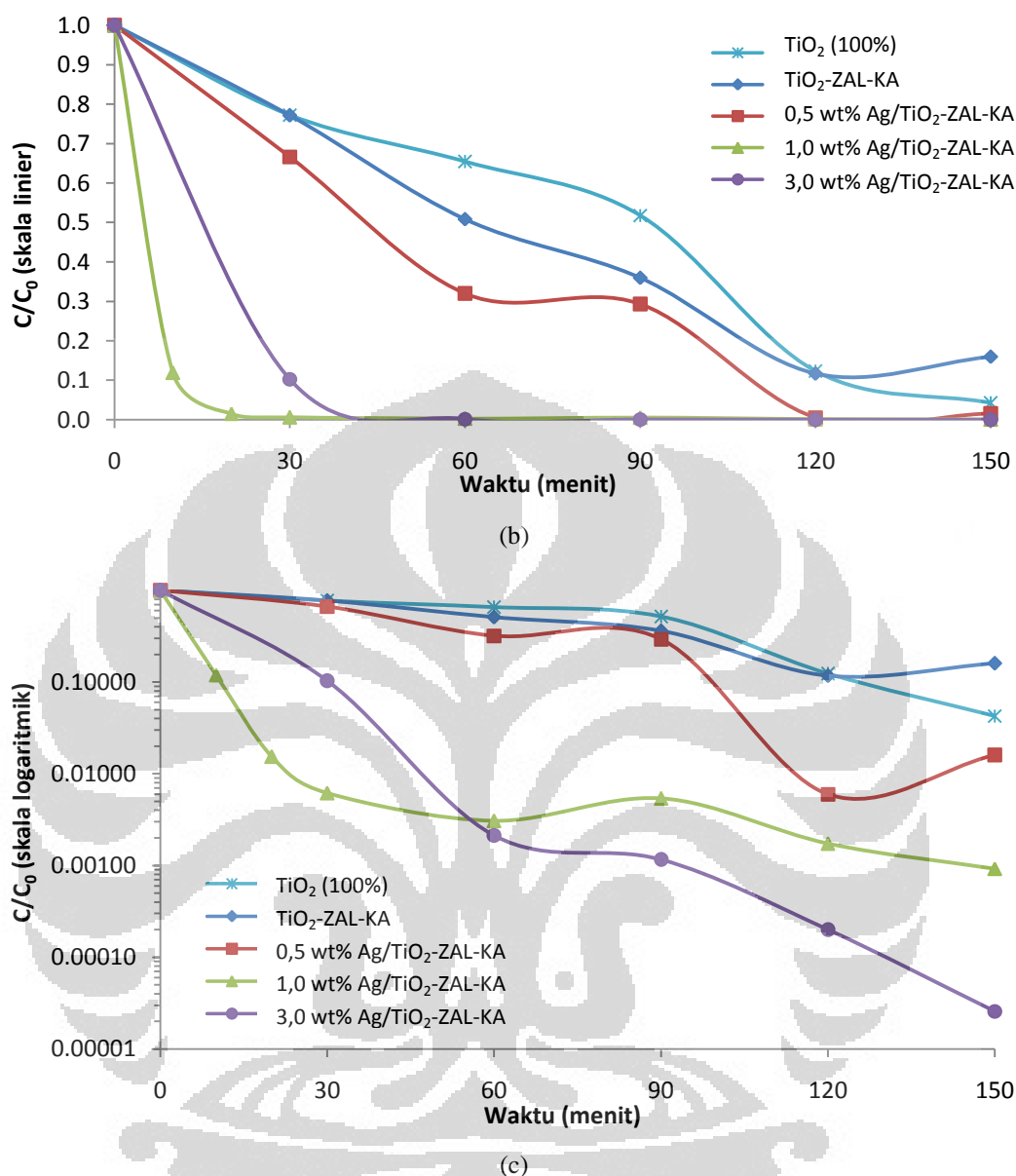
Gambar 4.4 Visualisasi koloni *E.coli* pada cawan petri dengan media *ENDO-Agar* (kiri) dan perbandingan koloni *E.coli* dengan bakteri *coliform* lain (kanan)

4.2.1 Pengaruh Variasi *Loading* Dopan Logam Ag pada Pertumbuhan *E.coli* pada Kondisi Penyinaran UV

Hasil uji disinfeksi *E.coli* untuk berbagai variasi *loading* dopan logam Ag pada kondisi penyinaran dengan sinar UV-A diberikan pada Gambar 4.5 berikut.



(a)



Gambar 4.5 Hasil uji disinfeksi bakteri *E.coli* untuk berbagai variasi loading dopan logam Ag pada kondisi penyinaran dengan sinar UV; (a) jumlah koloni bakteri per ml sampel, (b) efektivitas disinfeksi bakteri (skala linier), dan (c) efektivitas disinfeksi bakteri (skala logaritmik)

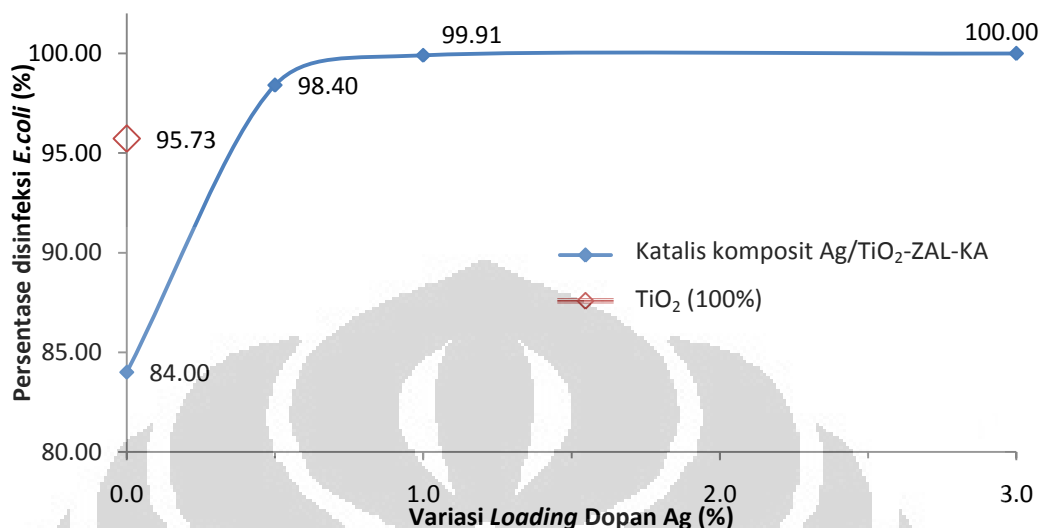
Berdasarkan hasil yang diberikan pada Gambar 4.5 diketahui bahwa penggunaan adsorben meningkatkan efektivitas disinfeksi fotokatalis. Hal ini dapat terlihat dari rasio disinfeksi untuk katalis komposit TiO₂-ZAL-KA yang lebih besar dibanding katalis TiO₂ (100%). Penurunan jumlah koloni bakteri *E.coli* pada katalis komposit TiO₂-ZAL-KA juga terbaca lebih besar dibanding katalis TiO₂ (100%), meskipun pada menit ke-150 terjadi kenaikan jumlah koloni pada katalis komposit TiO₂-ZAL-KA.

Proses adsorpsi memiliki pengaruh dalam menurunkan jumlah koloni *E.coli* dalam media cair. Pada rentang waktu hingga menit ke-60, laju adsorpsi cukup besar untuk mengadsorp limbah cair berisi *E.coli*. Setelah rentang 60 menit, kemampuan adsorben mulai berkurang dan telah mendekati titik jenuhnya. Pada kondisi ini *E.coli* sudah tidak mampu lagi diadsorp untuk kemudian dioksidasi oleh fotokatalis. Kenaikan jumlah koloni bakteri ini terlihat pada katalis komposit TiO₂-ZAL-KA dengan *loading* Ag sebesar 0 dan 0,5wt%. *E.coli* yang tidak teradsorp dan teroksidasi melalui proses fotokatalisis dapat bereplikasi, mengingat waktu replikasi *E.coli* yang singkat setiap 20 menit. Hal ini menjelaskan mengapa persentase disinfeksi *E.coli* pada akhir reaksi dengan katalis TiO₂ (100%) lebih besar dibandingkan pada katalis TiO₂-ZAL-KA.

Hasil ini sesuai dengan penelitian Guerra yang menyatakan bahwa *loading* dan distribusi Ag pada permukaan adsorben merupakan parameter penting dalam mendisinfeksi material biosidal. Pada *loading* Ag tinggi, bakteri mengalami kontak yang lebih besar dengan partikel Ag. Hal ini dikarenakan partikel Ag pada *loading* memiliki kerapatan tinggi dan tersebar merata pada permukaan adsorben. Sementara pada *loading* Ag rendah, bakteri terdispersi merata pada permukaan adsorben yang selanjutnya dapat bertindak sebagai tempat hidup bakteri. Seiring berjalannya waktu dan sirkulasi pada media cair, bakteri dapat mengalami kontak dengan Ag di sepanjang permukaan adsorben (Guerra, 2012). Penelitian Guerra dibuktikan kembali melalui penelitian ini bahwa persentase disinfeksi paling tinggi pada katalis komposit dengan *loading* Ag paling besar, yaitu 3,0wt%.

Berdasarkan Gambar 4.5(b) diamati bahwa laju disinfeksi pada 30 menit pertama untuk katalis komposit dengan *loading* Ag 1,0wt% lebih besar dibanding katalis dengan *loading* Ag 3,0wt%. Pada menit ke-60 laju disinfeksi pada katalis komposit dengan *loading* Ag 1,0wt% mulai menurun, tidak seperti laju disinfeksi pada katalis dengan *loading* Ag 3,0wt% yang cenderung konstan. Kondisi pada akhir reaksi untuk kedua variasi *loading* Ag dapat diketahui dengan mengubah sumbu-y dari skala linier ke skala logaritmik. Pada Gambar 4.5(c) dapat dilihat bahwa disinfeksi untuk *loading* Ag sebesar 3,0wt% berjalan lebih efektif. Hal ini ditunjukkan dengan jumlah koloni bakteri yang lebih sedikit.

Pada Gambar 4.6 berikut diberikan persentase disinfeksi pada kondisi akhir (menit ke-270) untuk masing-masing jenis katalis komposit.

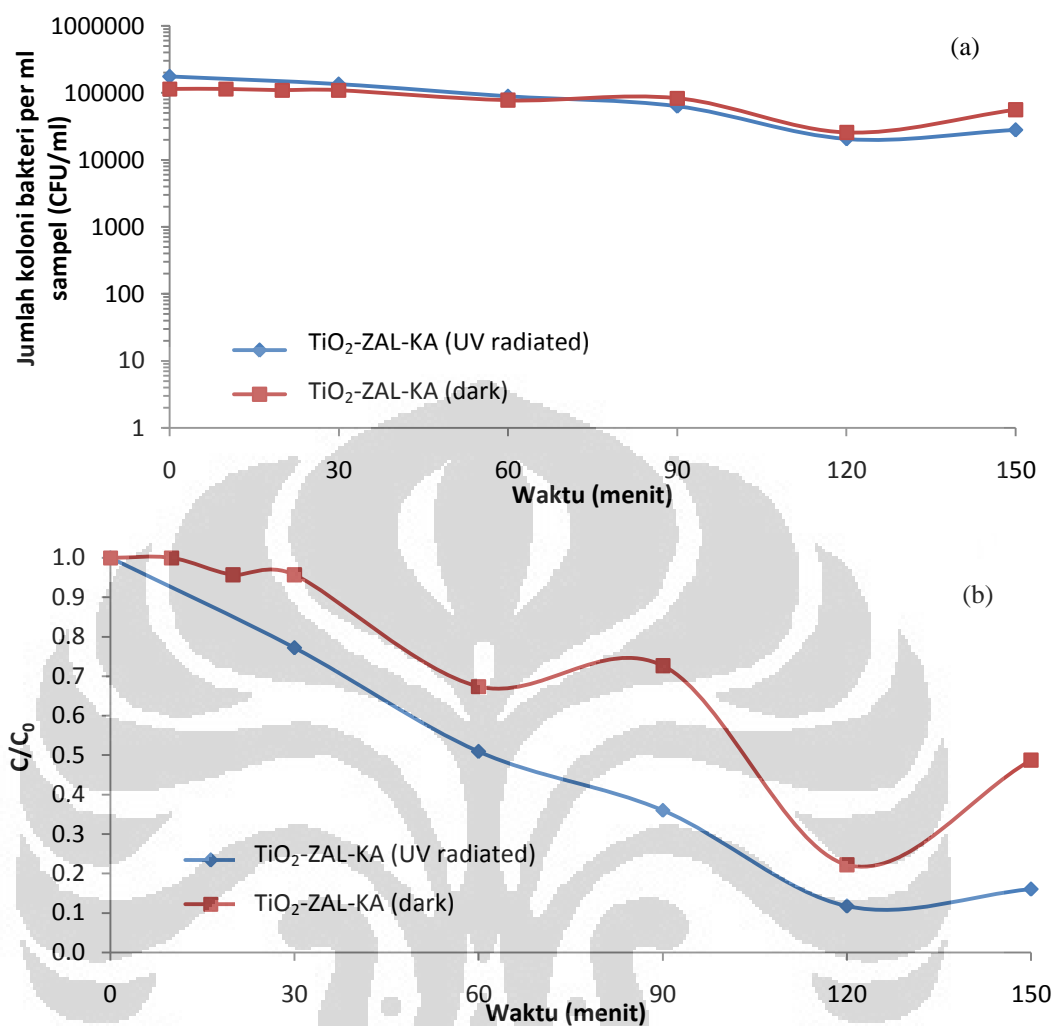


Gambar 4.6 Persentase disinfeksi untuk berbagai variasi *loading* dopan Ag

Berdasarkan hasil yang ditampilkan pada Gambar 4.6 didapatkan kesimpulan bahwa kecenderungan jumlah koloni bakteri *E.coli* menurun dan efektivitas disinfeksi meningkat seiring dengan bertambahnya *loading* dopan Ag. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa penambahan dopan Ag dan proses adsorpsi memiliki peran signifikan dalam mendukung proses fotokatalisis untuk disinfeksi bakteri. Untuk memperkuat kesimpulan ini dilakukan percobaan yang bertujuan mendeaktivasi TiO₂ dengan tidak memberikan energi foton (kondisi gelap/*dark*), sehingga tidak dihasilkan $\cdot\text{OH}$ yang mengarahkan pada reaksi oksidasi dan berfungsi menghancurkan dinding dan membran sel *E.coli*.

4.2.2 Perbandingan Kinerja Katalis Komposit TiO₂-ZAL-KA pada Kondisi Terang dan Gelap

Tujuan percobaan ini adalah melihat pengaruh proses adsorpsi dalam mendukung proses fotokatalisis guna mengadsorpsi limbah cair berisi *E.coli*. Hasil pengujian diberikan pada Gambar 4.7 dan dapat diamati bahwa pada kondisi gelap tanpa proses fotokatalisis, jumlah bakteri cenderung konstan pada 30 menit pertama kemudian menurun pada menit selanjutnya. Penurunan ini diakibatkan adanya adsorpsi limbah cair, sehingga *E.coli* dalam limbah cair turut diadsorpsi.



Gambar 4.7 Perbandingan kinerja katalis komposit TiO₂-ZAL-KA pada kondisi terang dan gelap; (a) jumlah koloni bakteri per ml sampel dan (b) efektivitas disinfeksi

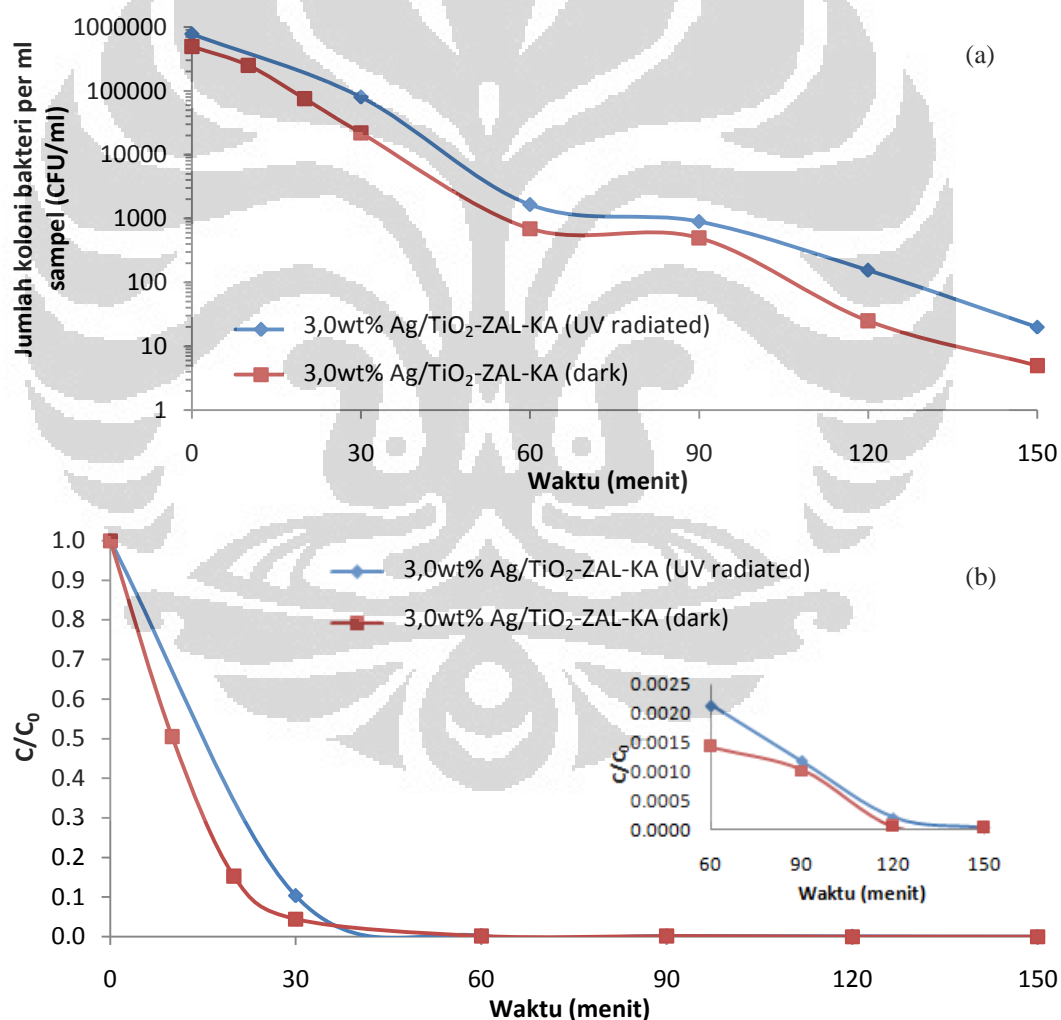
Peristiwa adsorpsi berlangsung hingga menit ke-120, selanjutnya jumlah koloni bakteri akan bertambah seiring dengan pertambahan waktu. Hasil ini senada dengan yang didapatkan untuk katalis TiO₂-ZAL-KA pada kondisi terang atau diiradiasi dengan sinar UV, di mana jumlah koloni bakteri menurun hingga menit ke-120 dan naik pada pembacaan di menit ke-150.

Berdasarkan analisis yang diberikan, terbukti bahwa peristiwa adsorpsi mendukung dalam upaya disinfeksi bakteri oleh proses fotokatalisis. Limbah cair yang mengandung bakteri *E.coli* teradsorp ke dalam pori-pori adsorben ZAL dan KA. Selanjutnya •OH yang terbentuk akibat reaksi oksidasi pada permukaan TiO₂ akan menghancurkan dinding dan membran luar sel bakteri yang menempel pada permukaan adsorben. Namun penggunaan adsorben perlu didukung dengan agen

disinfeksi lain, karena pori-pori adsorben berpotensi sebagai tempat tumbuhnya mikroorganisme sebagaimana hasil penelitian Guerra yang telah dijelaskan.

4.2.3 Perbandingan Kinerja Katalis Komposit Ag/TiO₂-ZAL-KA pada Kondisi Terang dan Gelap

Tujuan percobaan ini adalah melihat pengaruh penambahan dopan Ag sebagai agen disinfeksi dalam mendukung aktivitas TiO₂. Katalis komposit yang digunakan adalah 3,0wt% Ag/TiO₂-ZAL-KA. Pada kondisi terang, proses yang berlangsung adalah fotokatalisis, adsorpsi, dan disinfeksi oleh agen disinfeksi Ag. Sementara pada kondisi gelap hanya berlangsung proses adsorpsi dan disinfeksi oleh Ag. Hasil pengujian diberikan pada Gambar 4.8 sebagai berikut.



Gambar 4.8 Perbandingan kinerja katalis komposit 3,0wt% Ag/TiO₂-ZAL-KA pada kondisi terang dan gelap; (a) jumlah koloni bakteri per ml sampel dan (b) persentase disinfeksi

Berdasarkan Gambar 4.8 diketahui bahwa efektivitas disinfeksi meningkat justru pada kondisi gelap tanpa aktivasi fotokatalis TiO_2 . Pada Gambar 4.9(a) ditunjukkan bahwa jumlah koloni terbentuk pada katalis 3,0wt% Ag/ TiO_2 -ZALKA pada kondisi gelap lebih sedikit dibandingkan pada kondisi terang. Hasil ini sesuai dengan penelitian van Grieken yang menyatakan aktivitas fotokatalitik pada *loading* Ag yang sama justru menurun pada saat diberikan radiasi UV dibandingkan dengan kondisi gelap. Radikal hidroksil yang terbentuk pada proses fotokatalitik berhubungan dengan aktivitas *photokilling* bakteri *E.coli*, namun di sisi lain *loading* yang tinggi menghasilkan efek merugikan yang disebabkan oleh beberapa hal, yang dijelaskan sebagai berikut (van Grieken, 2009).

- a. Berkurangnya akses radiasi foton ke permukaan TiO_2 karena deposit Ag yang berlebihan dan menutupi permukaan TiO_2 ;
- b. Tertutupinya situs aktif TiO_2 akibat deposit logam;
- c. Meningkatnya laju rekombinasi akibat terlalu banyaknya pembawa muatan (*charge carrier*);

Tertutupinya situs aktif TiO_2 pada *loading* tinggi ini juga menjelaskan mengapa pada percobaan sebelumnya laju disinfeksi pada menit-menit awal untuk katalis komposit dengan *loading* Ag 1,0wt% lebih tinggi dibanding katalis komposit dengan *loading* Ag 3,0wt%. Mengacu pada hasil penelitian yang sudah dilakukan, maka dapat dipilih *loading* Ag paling optimum untuk disinfeksi bakteri pada nilai 1,0wt%. Hal ini didasarkan pada laju disinfeksi pada menit awal yang lebih tinggi. Selain itu, *loading* Ag yang terlalu tinggi dapat menutupi inti aktif TiO_2 dan menyebabkan fotokatalis menjadi inaktif.

Selain itu, dijelaskan bahwa pada kondisi terang tidak terjadi fenomena *lixiviation* yang signifikan pada deposit Ag. *Lixiviation* adalah salah satu bentuk *leaching*, di mana deposit logam akan terdekomposisi menjadi senyawa yang larut dan tidak larut di dalam medium cair. Pada proses sintesis Ag, baik pada tahap PAD maupun kalsinasi akan terbentuk Ag dan senyawa turunannya akibat peristiwa reduksi dan oksidasi. Deposit logam yang dominan terbentuk adalah Ag dan Ag_2O yang relatif stabil. Reaksi berantai seperti pada persamaan (4.1) di bawah terjadi seiring dengan perlakuan panas dan proses fotokatalisis.



Pada peristiwa oksidasi logam Ag dapat terbentuk ion Ag^+ , di mana peristiwa inilah yang memicu adanya fenomena *lixiviation*.

Pada kondisi terang, deposit Ag stabil pada kondisi logamnya karena ion Ag^+ yang terbentuk bereaksi dengan e^- yang ditangkap dan mengubah ion Ag^+ ke dalam bentuk deposit logam Ag. Sementara pada kondisi gelap, fenomena *lixiviation* pada deposit Ag ke medium cair teramati secara signifikan. Logam Ag terdepositasi menjadi ion Ag^+ yang larut dalam media cair dan kembali stabil pada kondisi logam jika dikenai cahaya (van Grieken, 2009). Kondisi ini meningkatkan aktivitas Ag sebagai agen disinfeksi karena kontak yang semakin besar dengan bakteri yang tidak teradsorpsi dan bebas dalam limbah cair. Namun di sisi lain, fenomena *lixiviation* ini belum banyak dibahas sehingga belum diketahui mekanisme dan faktor lain yang mempengaruhi terjadinya fenomena ini pada Ag.

Radiasi UV menjadi faktor yang penting untuk menjaga stabilitas deposit Ag, terutama sebagai pendukung proses fotokatalitik. Berdasarkan pengujian disinfeksi mikroorganisme dengan model bakteri *Escherichia coli* yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa katalis komposit Ag/TiO₂-ZAL-KA dapat bekerja dengan efektif untuk disinfeksi mikroorganisme, baik pada kondisi gelap maupun terang. Pada kondisi terang terjadi aktivitas fotokatalitik dibantu dengan Ag sebagai disinfektan. Sementara pada kondisi gelap disinfeksi bakteri tetap terjadi dengan adanya Ag sebagai agen disinfeksi.

4.2.4 Mekanisme Disinfeksi Bakteri *E.coli* pada Media Cair dan Similaritas dengan Disinfeksi pada Udara

Mekanisme disinfeksi oleh katalis Ag/TiO₂ pada media cair diajukan oleh Pan melalui mekanisme fotooksidasi air (H₂O) dan oksigen (O₂) terlarut. Reaksi ini menghasilkan spesi oksigen reaktif (*reactive oxygen species/ROS*), seperti radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$), anion superoksida ($\cdot\text{O}_2^-$), dan hidrogen peroksida (H₂O₂). ROS dapat berinteraksi dengan komponen dinding sel, peptidoglikan (β -1,4-N asetilglukosamin dan β -1,4-N asam asetilmuramik), dan asam amino (seperti L-alanin dan D-glutamin) yang menghasilkan lipid peroksida dan malondialdehid (MDA). MDA berfungsi mengikat dan menginaktivasi protein sel dan DNA yang

menyebabkan kematian sel (Pan, 2010). Mekanisme reaksi pembentukan ROS yang dihasilkan proses fotokatalisis diberikan pada Tabel 4.4 sebagai berikut.

Tabel 4.4 Mekanisme pembentukan ROS

Reaksi melibatkan e^- pita konduksi	Reaksi melibatkan h^+ pita valensi
$TiO_2 (e^-) + O_2 \rightarrow TiO_2 + \cdot O_2^-$	$TiO_2 (h^+) + H_2O_{ads} \rightarrow TiO_2 + \cdot OH + H^+$
$TiO_2 (e^-) + \cdot O_2^- + 2H^+ \rightarrow TiO_2 + H_2O_2$	$TiO_2 (h^+) + 2H_2O_{ads} \rightarrow TiO_2 + H_2O_2 + 2H^+$
$TiO_2 (e^-) + H_2O_2 \rightarrow TiO_2 + \cdot OH + OH^-$	$TiO_2 (h^+) + OH^- \rightarrow TiO_2 + \cdot OH$

Sumber: Pan, 2010

Aktivitas bakterisidal katalis Ag/TiO₂ pada *E.coli* diberikan melalui mekanisme sebagai berikut.

Tahap 1 : Dinding sel tidak mampu bertahan melawan anion superoksida dan radikal hidroksil

Tahap 2 : Lipid pada membran sel teroksidasi menjadi malondialdehida (MDA)

Tahap 3 : MDA mengikat dan menginaktivasi protein dan DNA

Tahap 4 : Sel *E.coli* mati akibat inaktivasi protein dan DNA sel

Unsur Ag sendiri memiliki sifat bakterisidal yang disebut efek oligodinamik.

Seperti disebutkan pada Tabel 4.4 bahwa pembentukan ROS melibatkan e^- dan h^+ yang dihasilkan dari proses fotokatalisis. Elektron akan mereduksi O₂ dan *hole* akan mengoksidasi air. Spesi yang dibutuhkan untuk memulai pembentukan ROS pada media cair ini juga terdapat pada udara. Oksigen adalah salah satu gas yang dominan pada udara ruang, sementara air pada udara terdapat dalam bentuk uap air. Keberadaan uap air banyak terdapat pada kondisi udara dengan kelembaban tinggi, misalnya pada daerah tropis. Peran Ag pada katalis komposit sebagai perangkap elektron turut meningkatkan kinerja fotokatalitik untuk mencegah terjadinya rekombinasi. Semakin banyak *hole* terlepas ke permukaan TiO₂, maka semakin banyak jumlah ROS yang terbentuk. Peningkatan jumlah ROS terbentuk menyebabkan meningkatnya jumlah bakteri yang terbunuh.

Sebagaimana disebutkan pada subbab 4.2.3 bahwa pada medium cair terjadi fenomena *lixiviation*, tetapi belum banyak penelitian yang membahas fenomena ini pada medium gas (udara). Namun demikian mekanisme disinfeksi bioaerosol oleh Ag tetap terjadi sebagaimana hasil penelitian yang dilakukan oleh

Sharma sebagai berikut. Kinerja partikel nano-Ag untuk disinfeksi menunjukkan kinerja yang sama seperti ion Ag^+ pada konsentrasi mikromolar. Hal ini diduga akibat adanya disipasi gaya gerak proton (*proton motive force*). Selain itu, Ag merupakan unsur yang mudah teroksidasi sebagian oleh oksigen menjadi ion Ag^+ dan teradsorpsi kimia pada permukaan partikel Ag. Sehingga dapat disimpulkan bahwa beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja Ag sebagai disinfektan pada fase gas (udara) adalah ukuran partikel dan ion Ag^+ yang teradsorpsi kimia pada partikel Ag (Sharma, 2009). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa katalis komposit Ag/TiO₂-ZAL-KA dapat digunakan secara aktif untuk mendisinfeksi bakteri yang terdapat pada udara.

4.3 Uji Degradasi Karbon Monoksida (CO)

4.3.1 Pengaruh Katalis Komposit TiO₂-ZAL-KA pada Prototipe Alat Purifikasi Udara untuk Degradasi Karbon Monoksida Murni

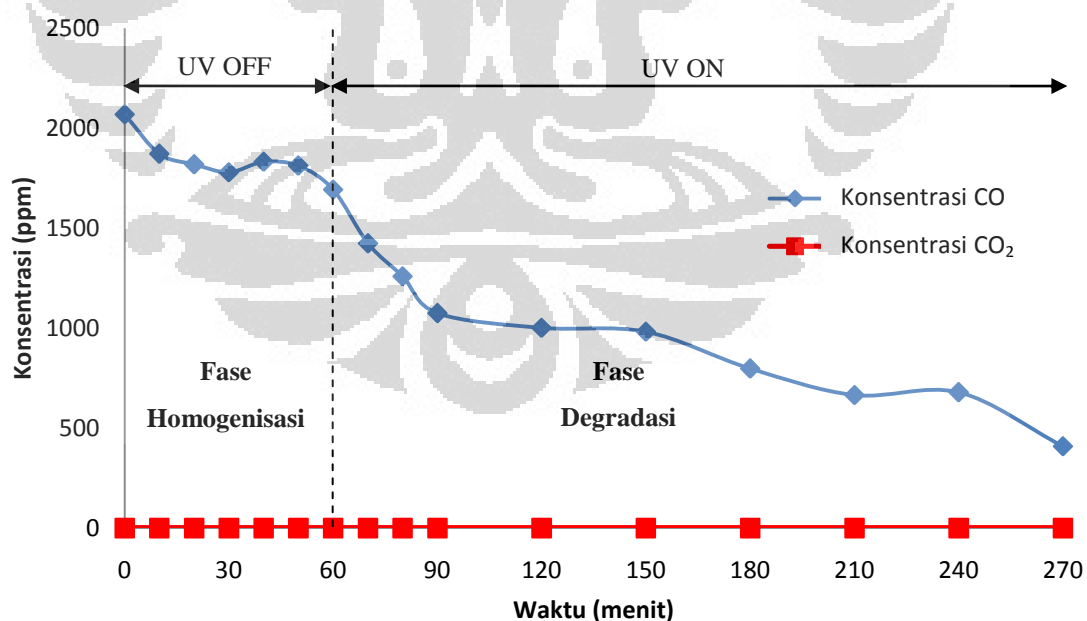
Uji degradasi karbon monoksida sebagai model polutan udara ruang yang berasal dari asap rokok dilakukan menggunakan prototipe alat purifikasi udara dan katalis komposit yang telah dikembangkan. Katalis komposit yang digunakan adalah katalis komposit TiO₂-ZAL-KA tanpa dopan Ag. Pelat Al berlapis katalis komposit yang digunakan sebanyak 6 buah. Uji degradasi dilakukan pada fasa gas di dalam ruang uji berbahan akrilik berukuran 50 cm x 50 cm x 50 cm. Waktu reaksi selama 270 menit dan lampu UV mulai dinyalakan pada menit ke-60.

Pada pengujian ini tidak dilakukan variasi dopan logam Ag, meskipun penambahan dopan logam Ag berfungsi sebagai *electron trapper*. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Liang didapatkan hasil degradasi formaldehida antara TiO₂ dan Ag/TiO₂ yang tidak terlalu jauh dengan kinerja Ag/TiO₂ yang lebih baik (Liang, 2012). Dengan demikian pengujian ini hanya digunakan untuk mengetahui kemampuan prototipe alat purifikasi udara yang dikembangkan dalam degradasi CO murni dan CO dalam asap rokok pada fasa gas.

Kendala yang dialami adalah tidak terbacanya puncak karakteristik gas CO sebagai reaktan dan CO₂ sebagai produk degradasi. Hal ini dapat terjadi akibat beberapa sebab, antara lain sebagai berikut.

- Kebocoran pada ruang uji.* Hal ini dapat diperbaiki dengan melakukan pengeleman ulang pada seluruh bagian sambungan ruang uji, yaitu pada bagian tutup, sambungan sisi, dan alas ruang uji.
- Gas habis teradsorpsi oleh adsorben.* Kondisi ini tidak memungkinkan untuk uji degradasi karena pada kondisi awal gas reaktan harus dapat terbaca untuk menentukan konsentrasinya. Hal ini diperbaiki dengan menambahkan CO ke dalam ruang uji hingga puncak CO terbaca pada GC-TCD.
- Kolom GC-TCD tidak lagi sensitif.* Hal ini dapat diperkirakan dengan munculnya CO pada input konsentrasi yang tinggi.

CO ditambahkan ke dalam ruang uji untuk mendapatkan puncak CO pada GC-TCD mencapai 360 ml atau konsentrasi 2880 ppm dalam ruang uji dengan volume 125 dm³. Jika dibandingkan, kadar CO dalam asap yang dihasilkan satu bungkus rokok berisi 12 batang dan terdistribusi merata dalam rumah berukuran sedang diperkirakan mencapai 14 ppm (Alfat, 2009). Kondisi pengujian sudah melebihi kondisi aktual yang mungkin terjadi jika polusi udara yang diasumsikan terjadi hanya berasal dari asap rokok. Gambar 4.9 di bawah ini menunjukkan hasil degradasi CO untuk pengujian dengan katalis komposit TiO₂-ZAL-KA.



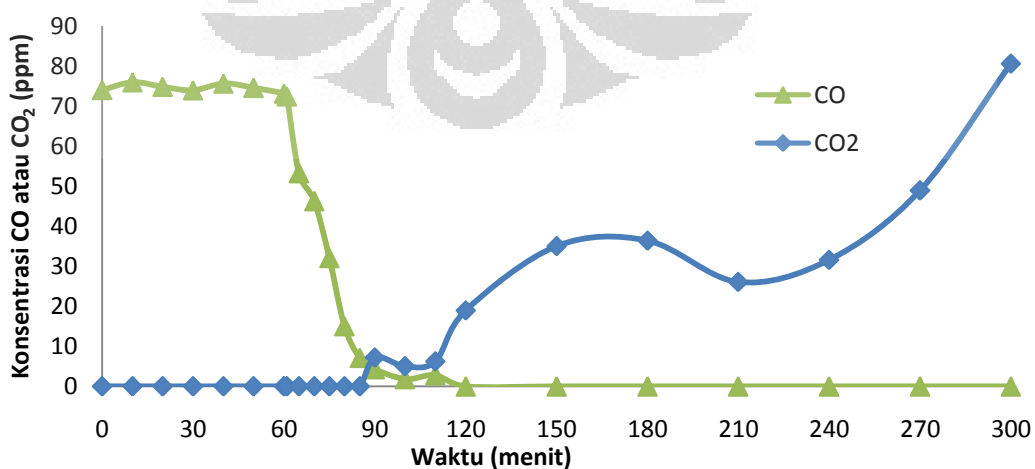
Gambar 4.9 Hasil degradasi CO dan produksi CO₂ pada katalis komposit TiO₂-ZAL-KA

Pada 60 menit pertama *blower* dinyalakan, sedangkan lampu UV tidak dinyalakan (fase homogenisasi) bertujuan untuk homogenisasi CO dalam ruang

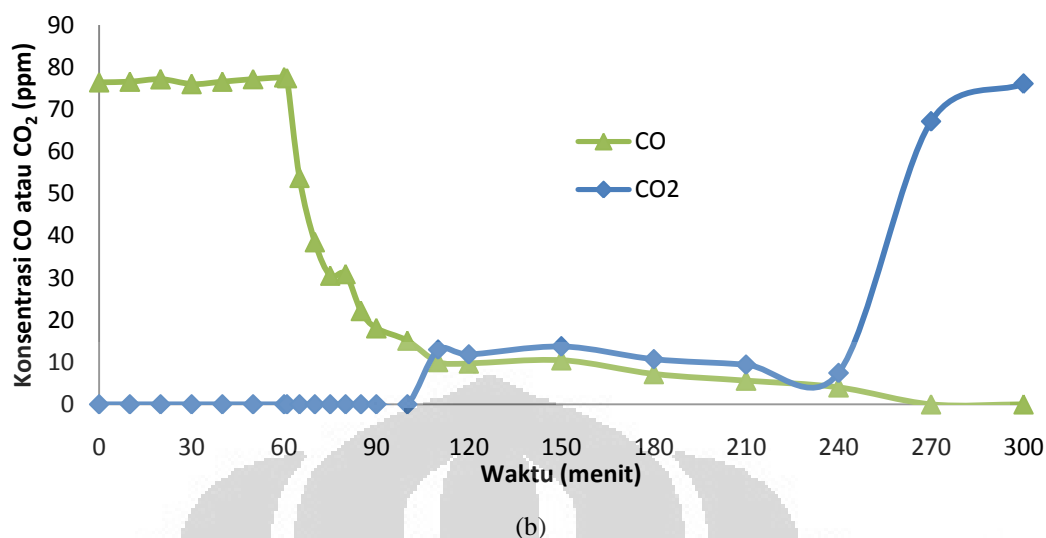
uji. Pada Gambar 4.9 saat lampu UV belum dinyalakan grafik konsentrasi CO cenderung linier dan menurun. Hal ini mengindikasikan bahwa mulai terjadi adsorpsi CO oleh ZAL. Hal ini juga menunjukkan bahwa ruang uji tidak mengalami kebocoran dan CO terdispersi sempurna di dalam ruang uji. Pada fase degradasi setelah lampu UV dinyalakan, konsentrasi CO menurun secara signifikan. Laju penurunan yang tinggi terlihat pada 30 menit pertama setelah lampu UV dinyalakan, di mana degradasi CO telah mencapai 36,58%. Hingga akhir proses pada menit ke-270, degradasi telah mencapai 80,25%. Degradasi belum mencapai angka 100% diperkirakan karena proses degradasi yang belum selesai dan konsentrasi CO yang tinggi di dalam ruang uji.

Berdasarkan hasil penelitian pada Gambar 4.10 diketahui bahwa CO₂ belum terbaca pada *peak* yang terbentuk dari hasil GC-TCD atau dengan kata lain tidak ada CO₂ yang dilepaskan ke ruang uji. Hal ini dapat dijelaskan bahwa CO₂ yang dihasilkan dari proses fotokatalisis masih teradsorpsi oleh karbon aktif dan belum terdesorpsi ke lingkungan. ZAL cenderung mengadsorpsi material polar, sementara karbon aktif cenderung mengadsorpsi material non polar. CO₂ merupakan material non polar, sehingga cenderung diadsorpsi oleh karbon aktif.

Hal ini senada dengan hasil yang didapatkan oleh Alfat bahwa pada pengujian degradasi CO dengan katalis TiO₂(85%)-KA(15%), CO₂ baru dapat terbaca pada menit ke-270 (Alfat, 2009). Gambar 4.10 berikut menunjukkan hasil penelitian Alfat untuk degradasi CO murni pada katalis komposit TiO₂(85%)-ZAL(15%) dan TiO₂(85%)-KA(15%).



(a)



Gambar 4.10 Produksi CO₂ pada degradasi CO dengan katalis (a) TiO₂(85%)-ZAL(15%) dan (b) TiO₂(85%)-KA(15%)

Sumber: Alfath, 2009

Pada katalis komposit TiO₂(85%)-ZAL(15%), produksi CO₂ dapat terbaca dengan signifikan karena ZAL cenderung tidak mengadsorpsi molekul non polar seperti CO₂. Sementara pada katalis komposit TiO₂(85%)-KA(15%), produksi CO₂ baru dapat dibaca secara signifikan pada menit ke-270.

Desorpsi merupakan salah satu tahapan penting pada proses fotokatalisis heterogen, di mana proses ini terdiri atas langkah-langkah utama sebagai berikut (Takada, 1998).

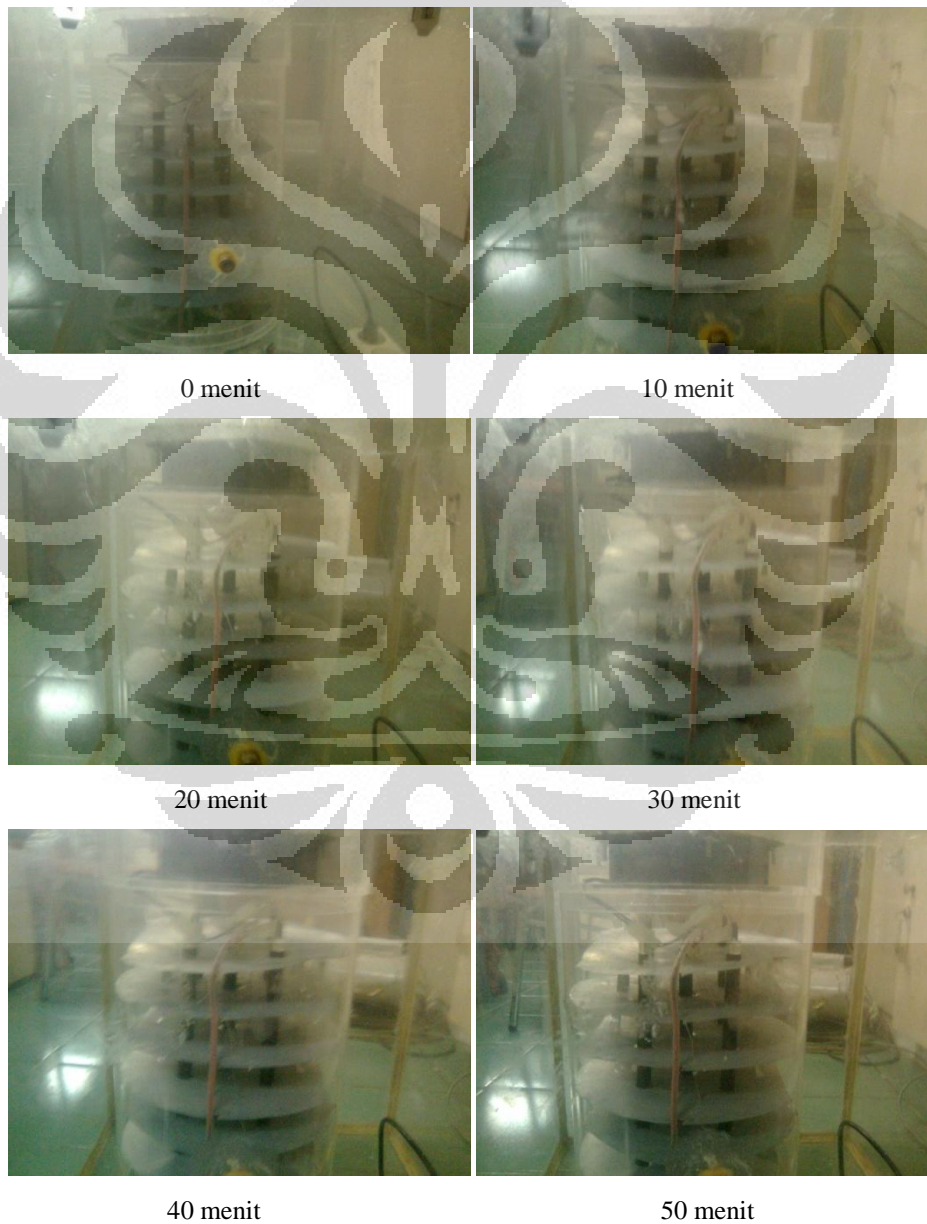
- Reaktan berdifusi ke permukaan katalis;
- Reaktan mengalami adsorpsi pada permukaan katalis;
- Reaktan bereaksi dengan katalis menghasilkan produk;
- Produk yang dihasilkan terdesorpsi dari katalis;
- Produk berdifusi keluar dari permukaan katalis.

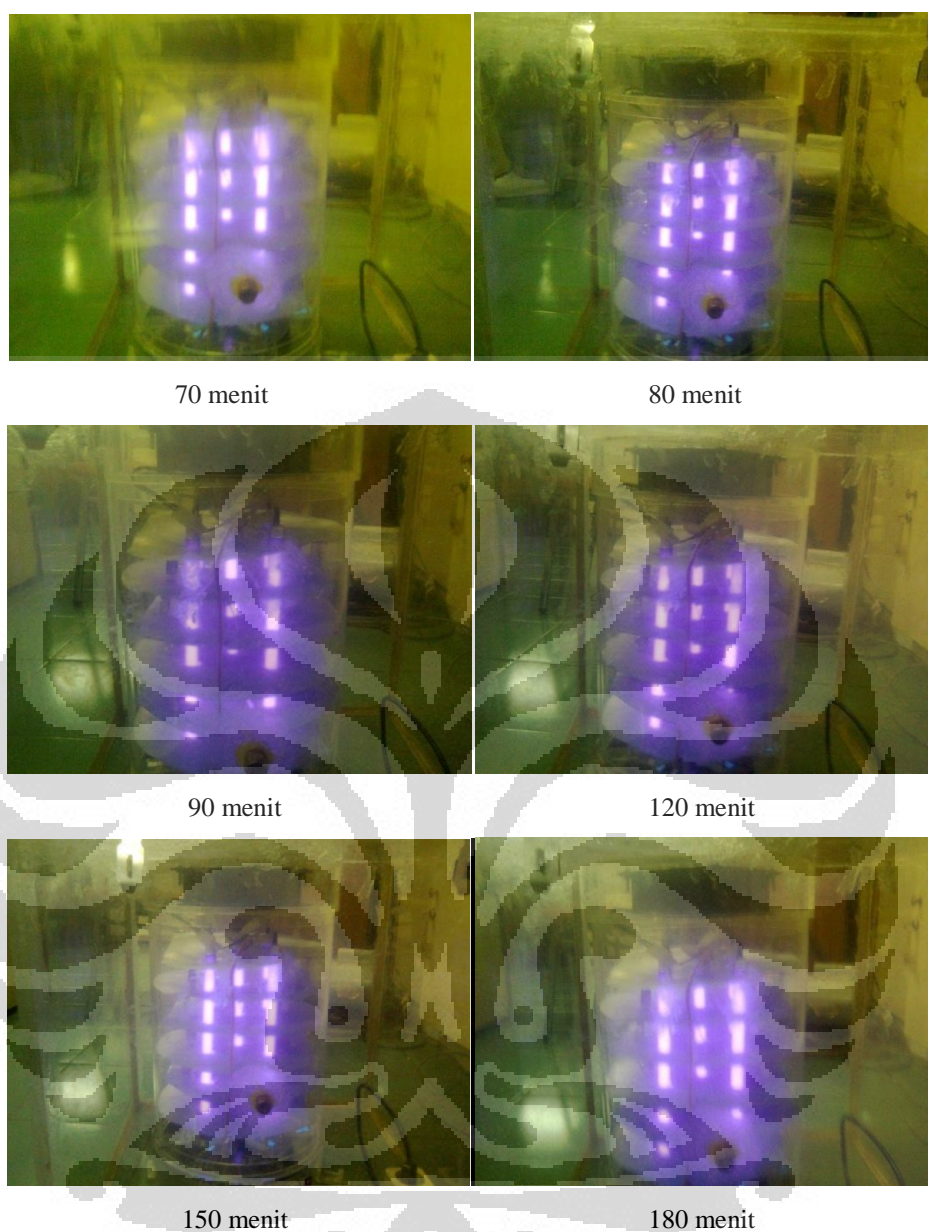
Untuk uji degradasi CO menggunakan katalis komposit TiO₂-ZAL-KA diduga tahapan fotokatalisis heterogen baru mencapai tahapan ketiga, yaitu dihasilkannya produk tetapi belum terjadi desorpsi oleh adsorben. Kemampuan desorpsi ini dipengaruhi oleh jenis katalis yang digunakan dan jenis produk yang dihasilkan.

4.3.2 Uji Kualitatif Degradasi CO pada Asap Rokok

Pengamatan ini dilakukan secara kualitatif untuk mengukur degradasi CO secara fisik. Gas pembawa CO yang digunakan adalah asap rokok. Asap rokok

dapat digunakan karena sifatnya yang berwarna dan berbau, sehingga mudah untuk diamati. Selain itu asap rokok merupakan salah satu penyumbang polusi udara ruang, sehingga penggunaan asap rokok representatif untuk purifikasi udara ruang. Indikasi berhasilnya degradasi CO pada pengujian ini adalah tidak adanya gas berwarna putih yang berasal dari asap rokok di dalam ruang uji. Gambar 4.11 berikut menunjukkan proses degradasi asap rokok di dalam ruang uji untuk tiap selang waktu tertentu. Alat purifikasi udara berisi pelat berlapis katalis komposit sebelumnya telah ditempatkan di dalam ruang uji.





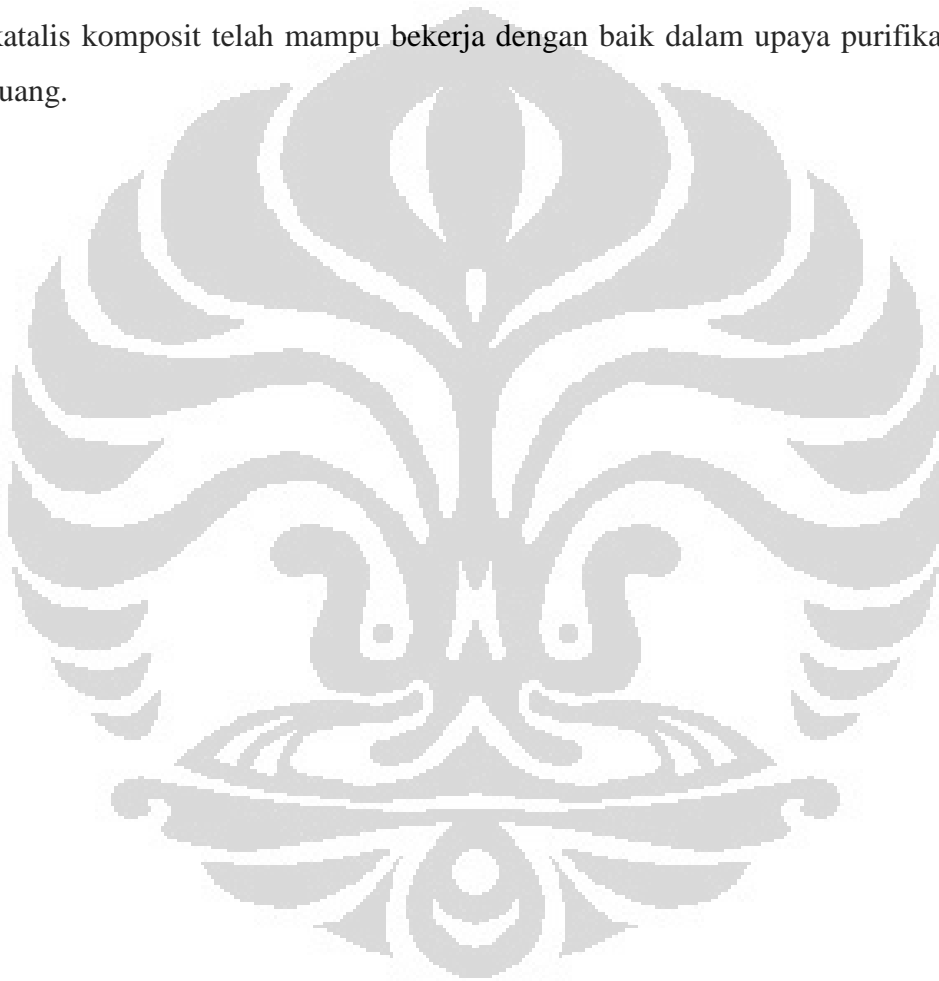
Gambar 4.11 Uji degradasi kualitatif CO dalam ruang uji

Pada menit ke-0 ruang uji tertutupi asap rokok berwarna putih keabu-abuan dengan cukup pekat. Selama 60 menit awal, *blower* dinyalakan untuk proses homogenisasi ruang uji. Pada menit ke-50 dapat dilihat bahwa asap rokok hampir tidak terlihat dan ruang uji terlihat bening.

Pada menit ke-60 lampu UV dinyalakan untuk memulai proses fotokatalisis. Dapat terlihat bahwa pada menit ke-80 ruang uji sudah terlihat bening dan tidak tampak adanya asap rokok. Namun tidak serta merta melalui hasil ini dapat dikatakan bahwa CO terdegradasi karena CO merupakan gas yang

tidak berwarna dan berbau. Melalui fenomena ini diduga polutan organik lain yang menyebabkan warna abu-abu pada asap rokok juga turut terdegradasi.

Melalui berbagai uji yang telah dilakukan, baik uji disinfeksi maupun uji degradasi CO yang dilakukan secara kuantitatif maupun kualitatif, dapat dikatakan bahwa katalis komposit yang digunakan aktif dalam mendukung proses fotokatalisis untuk purifikasi udara ruang. Hasil degradasi yang cukup besar juga membuktikan bahwa alat purifikasi udara ruang yang direkayasa dan dilengkapi katalis komposit telah mampu bekerja dengan baik dalam upaya purifikasi udara ruang.



BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini, yaitu sebagai berikut.

1. Pada uji disinfeksi bakteri *E.coli* didapatkan *loading* Ag optimum pada 1,0wt% dengan laju disinfeksi paling tinggi.
2. Spesi pembentuk oksigen reaktif (ROS) pada media cair untuk disinfeksi bakteri dapat terbentuk pada fase gas (udara), sehingga katalis komposit Ag/TiO₂-ZAL-KA dapat digunakan secara aktif untuk purifikasi udara ruang.
3. Prototipe alat purifikasi udara ruang yang direkayasa mampu mendegradasi CO murni pada konsentrasi tinggi hingga 80,25% dan menyerap asap rokok dalam ruang uji.

5.2 Saran

Beberapa saran yang menjadi masukan untuk penelitian selanjutnya, antara lain sebagai berikut.

1. Melakukan variasi *loading* dopan Ag untuk degradasi CO dan polutan udara ruang berbasis senyawa kimia lain yang tidak dilakukan pada penelitian ini. Variasi *loading* dopan Ag juga dapat digunakan untuk melihat ada tidaknya pengaruh elektron yang diperangkap oleh Ag terhadap kemungkinan terjadinya reduksi CO₂.
2. Menggunakan ruang uji yang tidak memiliki banyak sambungan, sehingga mengurangi potensi kebocoran pada ruang uji.
3. Memvariasikan konsentrasi polutan untuk mengetahui ketahanan katalis komposit dalam mendegradasi polutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfat, M.A. (2009). "Rekayasa alat dan uji kinerja katalis komposit TiO₂-adsorben alam untuk degradasi polutan asap rokok". Skripsi. Depok: Universitas Indonesia.
- Anonim. (2008). "Sistem kerja GC (Gas Chromatografi)". [Online] <http://www.inforedia.com/2010/03/sistem-kerja-gc-gas-chromatografi.html> [Accessed 25th June 2011]
- Anonim. (2011). "Karbon monoksida". [Online] http://id.wikipedia.org/wiki/Karbon_monoksida [Accessed 27th March 2011]
- Anonim. (2012). "*Escherichia coli*". [Online] http://id.wikipedia.org/wiki/Escherichia_coli [Accessed 18th June 2011]
- Anpo, M. (2000). "Utilization of TiO₂ photocatalysis in green chemistry". *Pure Appl. Chem.*, Vol. 72, No. 7, pp. 1265-1270.
- Ashkarran, A.A., Aghigh, S.M, Kaviani-pour, M., & Farahani, N.J. (2011). "Visible light photo and bioactivity of Ag/TiO₂ nanocomposite with various silver contents". *Current Applied Physics*, pp. 1-8.
- Beiersdorf AG. (2011). "Silver Technology". [Online] <http://int.hansaplast.com/med-info/wound-care-beautiful-healing/silver-tech.html> [Accessed 4th April 2011]
- Bergeron, V. & Fullana, L.A. (2011). "Air Purification Devices". *United States Patent*, Patent No. US 8,003,058 B2.
- Blake, D.M., Maness, P., Huang, Z., Wolfrum, E.J., & Huang, J. (1999). "Application of the photocatalytic chemistry of titanium dioxide to disinfection and the killing of cancer cells". *Separation and Purification Methods*, Volume 28(1), pp. 1-50.
- Canadian Centre for Occupational Health and Safety. (2012). "Environmental Tobacco Smoke (ETS): General Information and Health Effects". [Online] http://www.ccohs.ca/ohsanswers/psychosocial/ets_health.html [Accessed 24th March 2012]

- Catherine, M.B. & Falconer, J.L. (2001). "Characterization of adsorbed species on TiO₂ after photocatalytic oxidation of toluene". *J. of Catal*, 200, pp. 21-33.
- Charkhi, A., Kazemian, H., & Kazemeini, M. (2010). "Optimized experimental design for natural clinoptilolite zeolite ball milling to produce nano powders". *Powder Technology* 203, pp. 389-396.
- Coleman, A. (n.d.). "Direct Plate Counting; Soil Microbiology". [Online] http://filebox.vt.edu/users/chagedor/biol_4684/links.html [Accessed 20th June 2012]
- Colón, G., Maicu, M., Hidalgo, M.C., & Navio, J.A. (2006). "Cu-doped TiO₂ systems with improved photocatalytic activity". *Applied Catalysis B: Environmental*, 67, pp. 41-51.
- Cristallo, G., Roncari, E., Rinaldo, A., & Trifiro, F. (2001). "Study of anatase-rutile transition phase in monolithic catalyst V₂O₅/TiO₂ and V₂O₅-WO₃/TiO₂". *Applied Catal. A General* 209, pp. 249–256.
- Demeestere, K., Dewulf, J., Witte, B.D., Beeldens, A., & Langenhove, H.V. (2008). "Heterogenous photocatalytic removal of toluene from air on building materials enriched with TiO₂". *Building and Environment* 43, pp. 406-414.
- Feldman, V. & Iskov, E. (2010). "Portable Indoor Air Purification System". *United States Patent*, Patent No. US 7,674,436 B1.
- Feng, H.L., Gao, X.Y., Zheng, Z.Y., & Ma, J.M. (2010). "Study on the crystalline structure and the thermal stability of silver-oxide films deposited by using direct-current reactive magnetron sputtering methods". *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 56, No.4, pp. 1176-1179.
- Fu, P., Luan, Y., & Dai, X. (2004). "Preparation of TiO₂ photocatalyst anchored on activated carbon fibers and its photodegradation of methylene blue". *China Particuology*, Vol. 2, No. 2, pp. 76-80.
- Grandcolas, M., Ye, J., & Hanagata, N. (2011). "Combination of photocatalytic and antibacterial effects of silver oxide loaded on titania nanotubes". *Materials Letters* 65, pp. 236-239.
- Grätzel, M. (2001). "Photoelectrochemical cells". *Nature* 414, pp. 338-344.

- Guerra, R., Lima, E., Viniegra, M., Guzmán, A., & Lara, V. (2012). "Growth of *Escherichia coli* and *Salmonella typhi* inhibited by fractal silver nanoparticles supported on zeolites". *Microporous and Mesoporous Materials* 147, pp. 267-273.
- Guin, D., Latha, J.N.L., Singh, S., & Manorama, S.V. (2007). "Photoreduction of silver on bare and colloidal TiO₂ nanoparticles/nanotubes: synthesis, characterization, and tested for antibacterial outcome". *J. Phys. Chem*, 111, pp. 13393-13397.
- Handoko, S. (2002). "Preparasi katalis Cr/zeolit melalui modifikasi zeolit alam". *Jurnal ILMU DASAR*, 3(1), hal. 15-23.
- He, C., Shu, D., Su, M., Xia, D., Asi, M.A., Lin, L., & Xiong, Y.(2009). "Photocatalytic activity of metal (Pt, Ag, and Cu)-deposited TiO₂ photoelectrodes for degradation of organic pollutants in aqueous solution". *Desalination*, 253, pp. 88-93.
- Hisanaga, T.T. & Tanaka, K.K. (2002). "Photocatalytic degradation of benzene on zeolite-incorporated TiO₂ film". *J. Hazard Mater* 93, No. 3, pp. 331-337.
- Ichiura, H., Kitaoka, T., & Tanaka, H. (2002). "Preparation of composite TiO₂-zeolite sheets using a papermaking technique and their application to environmental improvement". *Journal of Material Science* 37, pp. 2937-2941.
- Kalogerakis, N., Paschali, D., Lekaditis, V., Pantidou, A., Eleftheriadis, K., & Lazaridis, M. (2005). "Indoor air quality – bioaerosol measurements in domestic and office premises". *Aerosol Science* 36, pp. 751-761.
- Korea International Trade Association (KITA). (2011). "TiO₂ Photocatalyst" [Online] [http://www.tradekorea.com/e-catalogue/nanoin/product-detail/P00001936/TiO₂ Photocatalyst.html](http://www.tradekorea.com/e-catalogue/nanoin/product-detail/P00001936/TiO2_Photocatalyst.html) [Accessed 18th June 2012]
- Kubacka, A., Ferrer, M., Martínez-Arias, A., & Fernández-García, M. (2008). "Ag promotion of TiO₂-anatase disinfection capability: Study of *Escherichia coli* inactivation". *Applied Science B: Environmental* 84, pp. 87-93.

- Kuncorojati, D. (2010). "Sintesis komposit TiO₂ – zeolit alam lampung – karbon aktif untuk disinfeksi *E.coli*, oksidasi fenol, dan reduksi Cr(VI)". Skripsi. Depok: Universitas Indonesia.
- Kusnoputranto, H. (1996). "Indoor air pollution in Indonesia: problems and solution". *Lingkungan dan Pembangunan: Jurnal Pusat Studi Lingkungan Seluruh Indonesia*, Vol. 16, No. 2, pp. 123-128.
- Lai, C.Y., Hung, P.C., Huang, S.H., Ho, Y.F., Chang, C.P., Shih, T.S., Yu, T.S., & Chuang, C.Y. (2011). "Air Sterilization Device with Low Aerosol Bounce". *United States Patent*, Patent No. US 8,038,777 B2.
- Las, T. (2011) *Potensi Zeolit untuk Mengolah Limbah Industri dan Radioaktif* [Online] Available from: <http://www.batan.go.id/ptlr/11id/?q=content/potensi-zeolit-untuk-mengolah-limbah-industri-dan-radioaktif> [Accessed 28th May 2012]
- Liang, W., Li, J., & Jin, Y. (2012). "Photo-catalytic degradation of gaseous formaldehyde by TiO₂/UV, Ag/TiO₂/UV, and Ce/TiO₂/UV,". *Building and Environment* 51, pp. 345-350.
- Licciulli, A. & Lisi, D. (2002). "Self-cleaning glass". Università Degli Studio Di Lecce.
- Litter, M.I. & Navio, J.A. (1996). "Photocatalytic properties of iron-doped titania semiconductors". *J. of Photochem. and Photobiology A: Chemistry*, 98, pp. 171–181.
- Liu, H., Liu, G., & Zhou, Q. (2009). "Preparation and characterization of Zr doped TiO₂ nanotube arrays on the titanium sheet and their enhance photocatalytic activity". *J. of Solid State Chemistry*, 182, pp. 3238-3242.
- Maron, S.H. & Lando, J. (1965). *Fundamental of Physical Chemistry*, cetakan ketiga. London: Macmillan Publishing Co. Inc.
- Material Cerdas Indonesia. (2011). "Scanning Electron Microscopy" [Online] <http://materialcerdas.wordpress.com/teori-dasar/scanning-electron-microscopy/> [Accessed 27th May 2011]
- Matsuoka, M. & Anpo, M. (2003). "Local structures, excited states, and photocatalytic reactivities of highly dispersed catalyst constructed within

- zeolites". *J. Photochem. and Photobiol. C: Photochem. Rev.* 3, pp. 225-252.
- Miller, G.T. & Spoolman, S. (2008). *Environmental Science*. Canada: Thomson Brooks/Cole.
- Pan, X., Medina-Ramirez, I., Mernaugh, R., & Liu, J. (2010). "Nano-characterization and bactericidal performance of silver modified titania photocatalyst". *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 77, pp. 82-89.
- Parmon, V., Emeline, A.V., & Serpone, N. (2002). "Glossary of terms in photocatalysis and radiocatalysis". *International Journal of Photoenergy* Vol. 4.
- Paz, Y. (2010). "Application of TiO₂ photocatalysis for air treatment: Patents' overview". *Applied Catalysis B: Environmental* 99, pp. 448-460.
- Permanasari, I. (2010). "Sick Building Syndrome: Ruangan Padat, Pekerja Sakit". [Online] <http://kesehatan.kompas.com/read/2010/06/22/06555257/Ruangan.Padat.Pekerja.Sakit> [Accessed 18th May 2011]
- Perry, R.H. & Green, D.W. (1999). *Perry's Chemical Engineers Handbook*. USA: McGraw Hill, Inc.
- Pieraccini, G., Furlanetto, S., Orlandini, S., Bartolucci, G., Giannini, L., Pinzauti, S., & Moneti, G. (2008). "Identification and determination of mainstream and sidestream smoke components in different brands and types of cigarettes by means of solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry". *Journal of Chromatography A* 1180, pp. 138-150.
- Rai, M., Yadav, A., & Gade, A. (2009). "Silver nanoparticles as a new generation of microbials". *Biotechnology Advances*, 27, pp. 76-83.
- Ruthven, D.M. (*n.d.*) "Principles of adsorption and adsorption process". Willey-Interscience Publication.
- Samet, J.M. (2002). "Involuntary smoking; composition, exposure, and regulations". *IARC Monograph*, Volume 83, pp. 1191-1230.
- Sharma, V.K., Yngard, R.A., & Lin, Y. (2009). "Silver nanoparticles: Green synthesis and their antimicrobial activities". *Advance in Colloid and Interface Science* 145, pp. 83-96.

- Skoog, D.A. (2001). *Fundamentals of Analytical Chemistry, Sixth Edition*. London: Saunders College Publishing.
- Slamet, Bismo, S., & Arbianti, R., (2007). "Modifikasi zeolit alam dan karbon aktif dengan TiO₂ serta aplikasinya sebagai bahan adsorben dan fotokatalis untuk degradasi polutan organik". DIKTI – Laporan Hibah Bersaing.
- Slamet. (2011). *Rekayasa Nano-Fotokatalisis dan Prospek Aplikasinya di Indonesia*. Pidato pada Upacara Pengukuhan Guru Besar Tetap dalam Bidang Ilmu Teknologi Fotokatalisis dan Rekayasa Nanomaterial. Jakarta: Lembaga Penerbit Fakultas Ekonomi Universitas Indonesia.
- Somasundaram, S. (2006). "Novel approaches to photoassisted deposition of semiconductors and nanocomposite materials". Disertasi. Arlington: The University of Texas.
- Sunada, K., Kikuchi, Y., Hashimoto, K., & Fujishima, A. (1998). "Bactericidal and detoxification effects of TiO₂ thin film photocatalyst". *Environmental Science & Technology*, Vol. 32, No. 5, pp. 726-728.
- Sunada, K. & Watanabe, T. (2003). "Studies on photokilling of bacteria on TiO₂ thin film." *Journal of Photochemistry and Photobiology* 156.
- Sung-Suh, H.M., Choi, J.R., Hah, H.J., Koo, S.M., & Bae, Y.C. (2004). "Comparison of Ag deposition effects on the photocatalytic activity of nanoparticulate TiO₂ under visible and UV light irradiation". *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 163, pp. 37-44.
- Suryanarayana, C. & Norton, M.G. (1998). *X-Ray Diffraction*. New York: Plenum Press.
- Sutarti, M. (1994). *Zeolit Tinjauan Literatur*. Jakarta: Pusat Dokumentasi dan Informasi Ilmiah LIPI.
- Takada, T. (2008). "Gas Treating Device". *US Patent*, Publication No. US 7,332,020 B2.
- Tompkins, D.T., Lawnloki, B.J., Zeltner, W.A., & Anderson, M.A. (2005). "Evaluation of photocatalysis for gas-phase air cleaning-part 1: Process, technical, and sizing considerations". *American Society of Heating,*

- Refrigeration, and Air Conditioning Engineers (ASHRAE)*, Volume 111, pp. 60-84.
- Torimoto, T., Ito, S., Kuwabata, S., & Yoneyama, H. (1996). "Effects of adsorbent used as supports for titanium dioxide loading on photocatalytic degradation of propylamide". *Environ. Sci. Technol.*, 30, pp. 1275-1281.
- van Grieken, R., Marugán, J., Sordo, C., Martínez, P., & Pablos, C. (2009). "Photocatalytic inactivation of bacteria in water using suspended and immobilized silver-TiO₂". *Applied Catalysis B: Environmental* 93, pp. 112-118.
- Vohra, A., Goswami, D.Y., Deshpande, D.A., & Block, S.S. (2006). "Enhanced photocatalytic disinfection of indoor air". *Applied Catalysis B: Environmental* 65, pp. 57-65.
- Wang, P., Huang, B., Qin, X., Zhang, X., Dai, Y., & Whangbo, M. (2009). "Ag/AgBr/WO₃.H₂O: Visible-light photocatalyst for bacteria destruction". *Inorg. Chem.*, 48, pp. 10697-10702.
- Yalun. (2008) "Mengenal bakteri Escherichia coli". [Online] <http://yalun.wordpress.com/2008/10/07/mengenal-bakteri-escherichia-coli/> [Accessed 18th June 2012]
- Yang, R.T. (1987). *Gas Separation by Adsorption Processes*. Stoneham: Butterworth Publisher.

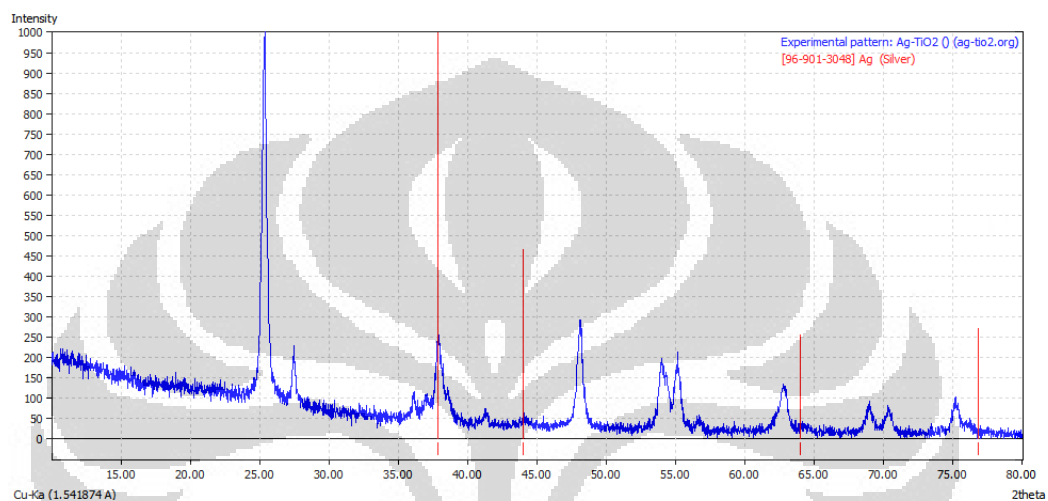


LAMPIRAN

Lampiran A. Perbandingan Hasil XRD dengan *Database Software Match!*

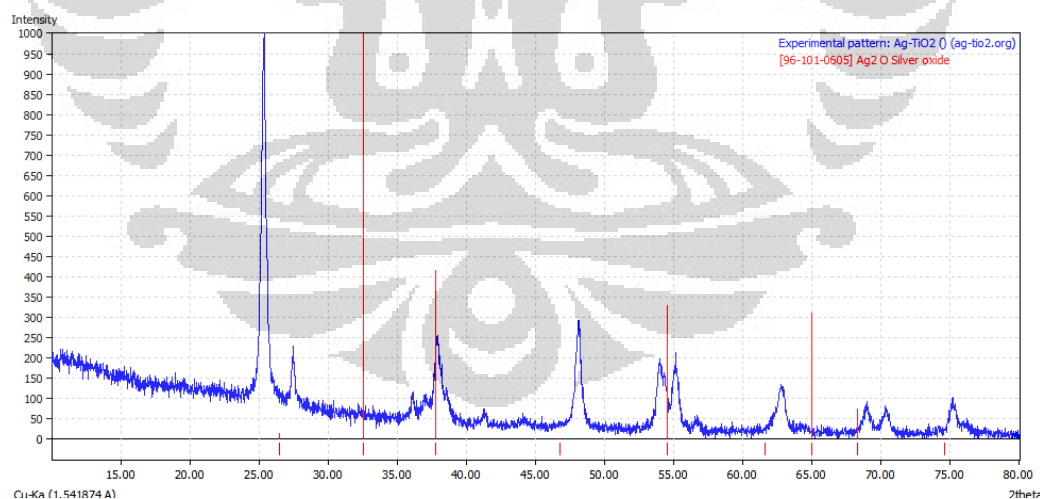
Hasil karakterisasi XRD yang didapatkan dibandingkan dengan puncak difraksi pada katalog *software Match!* ditunjukkan garis lurus berwarna merah sebagai berikut.

1. Logam Ag (Ag^0)



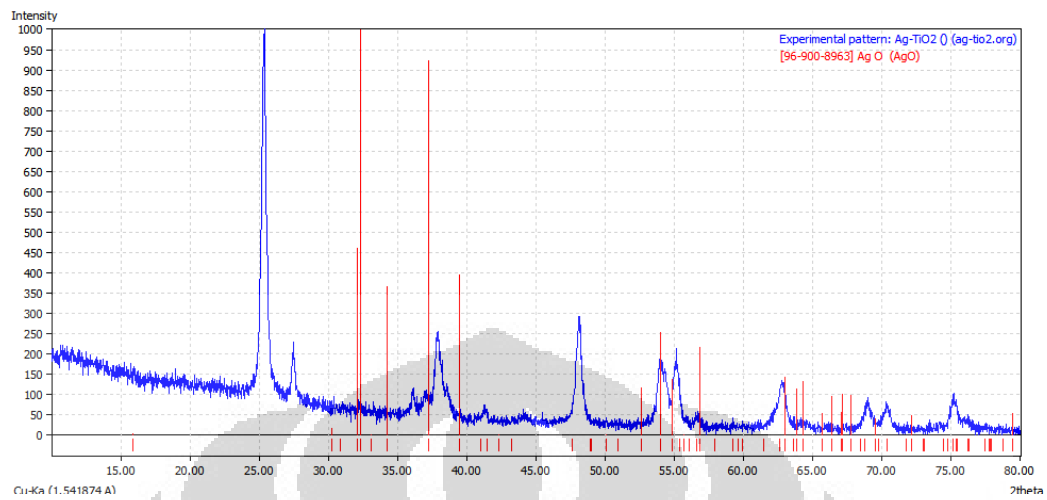
Gambar A.1 Puncak difraksi Ag (Ag^0) pada *database software Match!*

2. Senyawa Ag_2O (Ag^+)



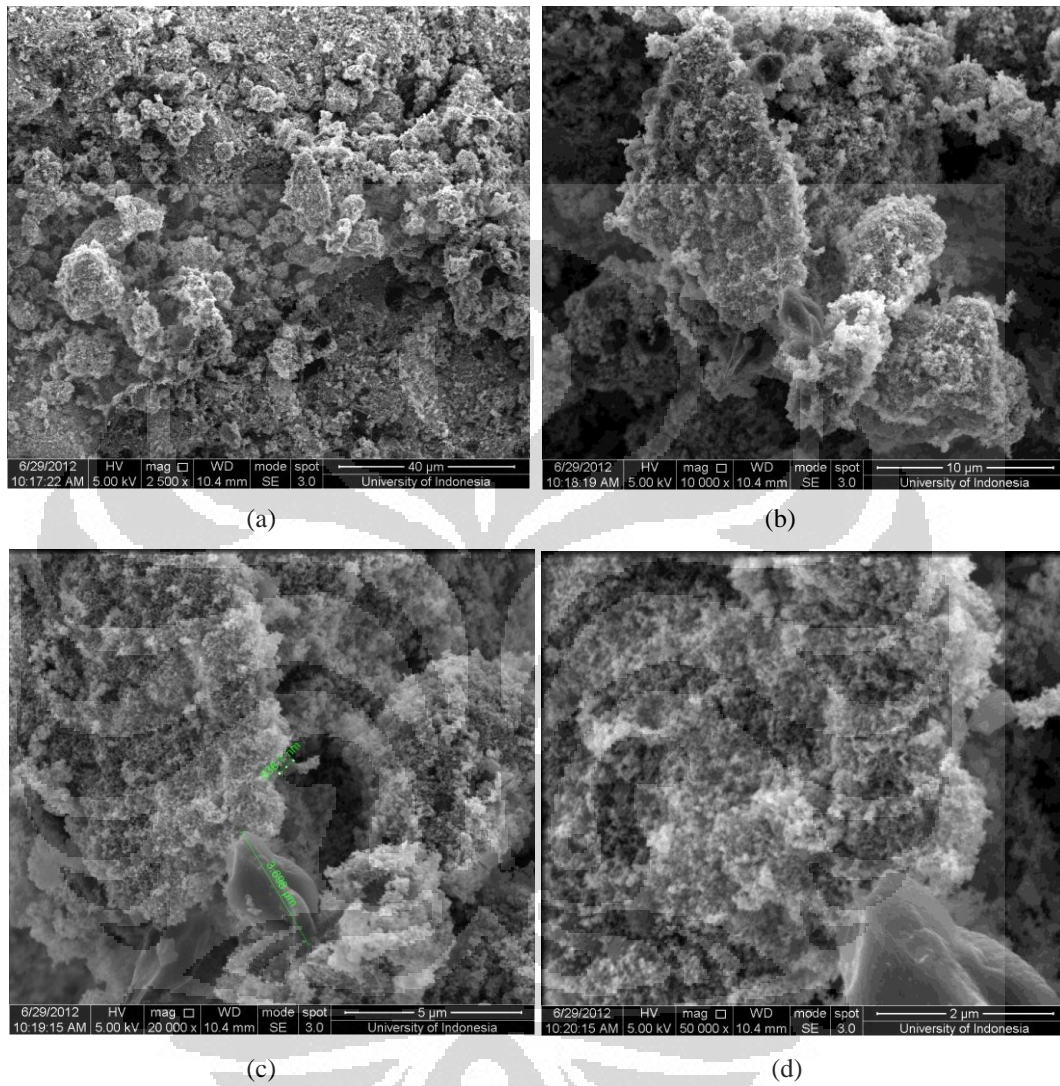
Gambar A.2 Puncak difraksi Ag_2O (Ag^+) pada *database software Match!*

3. Senyawa AgO (Ag^{2+})



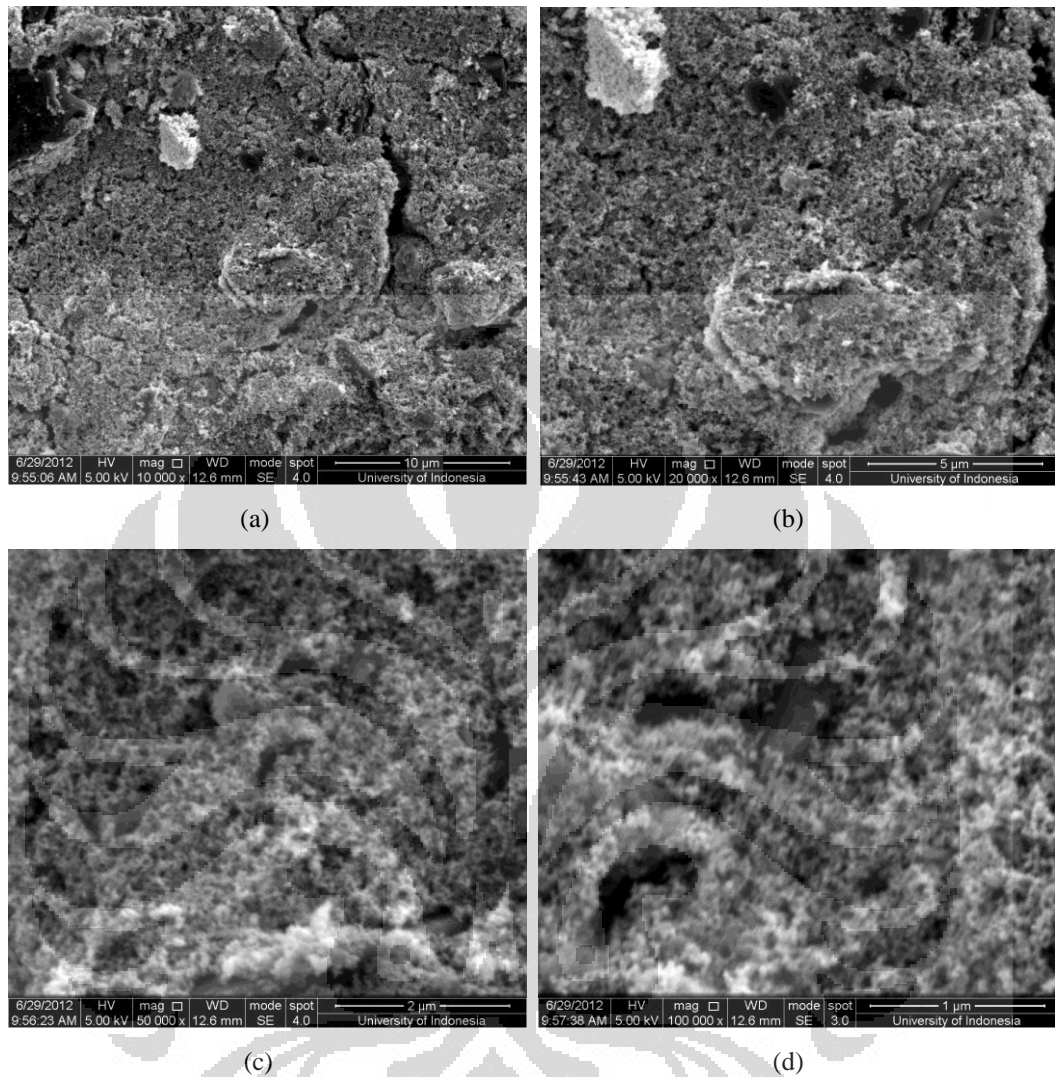
Gambar A.3 Puncak difraksi AgO (Ag^{2+}) pada *database software Match!*



Lampiran B. Hasil Karakterisasi SEM**1. Katalis Komposit 3,0wt% Ag/TiO₂-ZAL-KA pada Kondisi Serbuk**

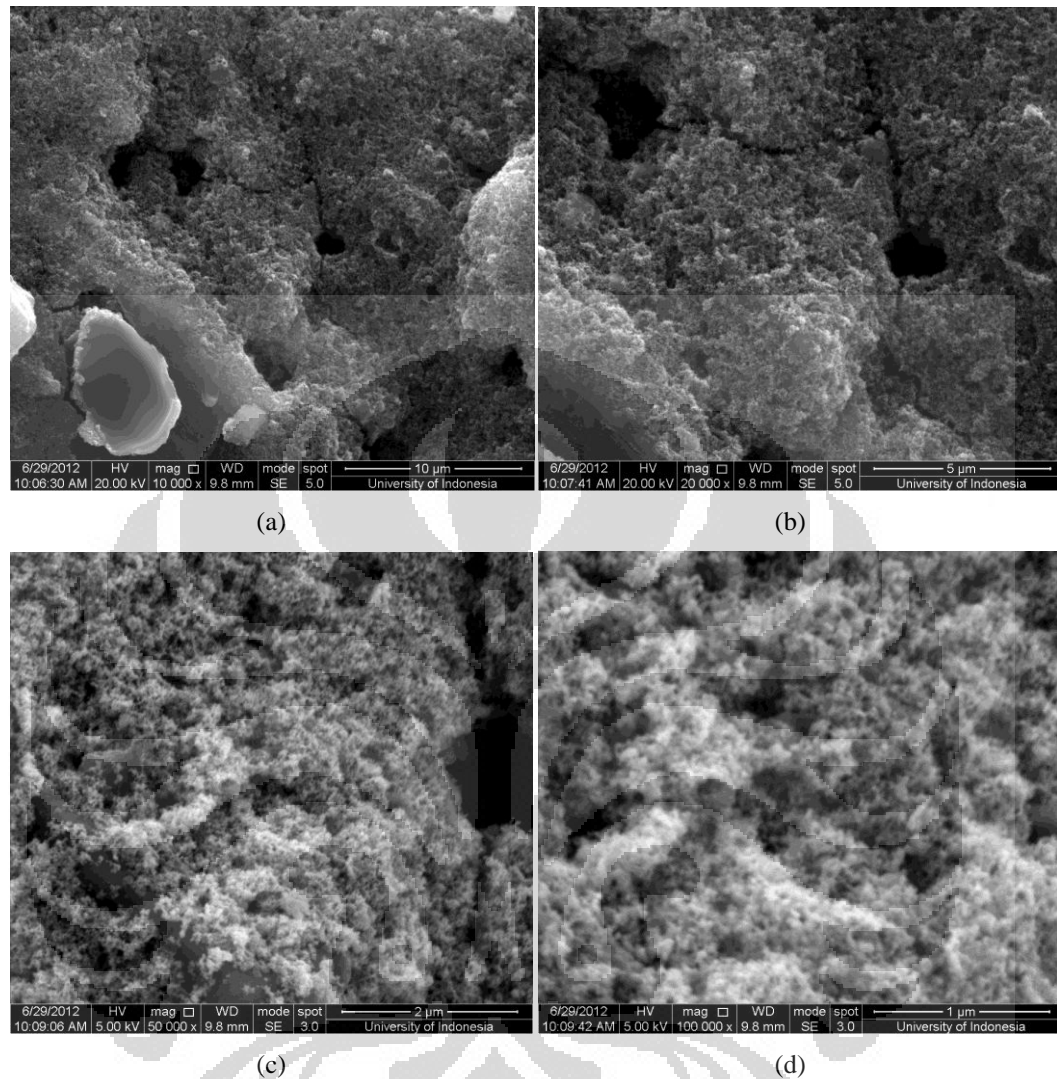
Gambar B.1 Hasil karakterisasi SEM untuk katalis komposit 3,0% Ag/TiO₂-ZAL-KA serbuk untuk perbesaran (a) 2.500 kali, (b) 10.000 kali, (c) 20.000 kali, dan (d) 50.000 kali

2. Katalis Komposit TiO_2 -ZAL-KA pada Pelat Aluminium



Gambar B.2 Hasil karakterisasi SEM untuk katalis komposit TiO_2 -ZAL-KA pada pelat aluminium untuk perbesaran (a) 10.000 kali, (b) 20.000 kali, (c) 50.000 kali, dan (d) 100.000 kali

3. Katalis Komposit 3,0wt% Ag/TiO₂-ZAL-KA pada Pelat Aluminium

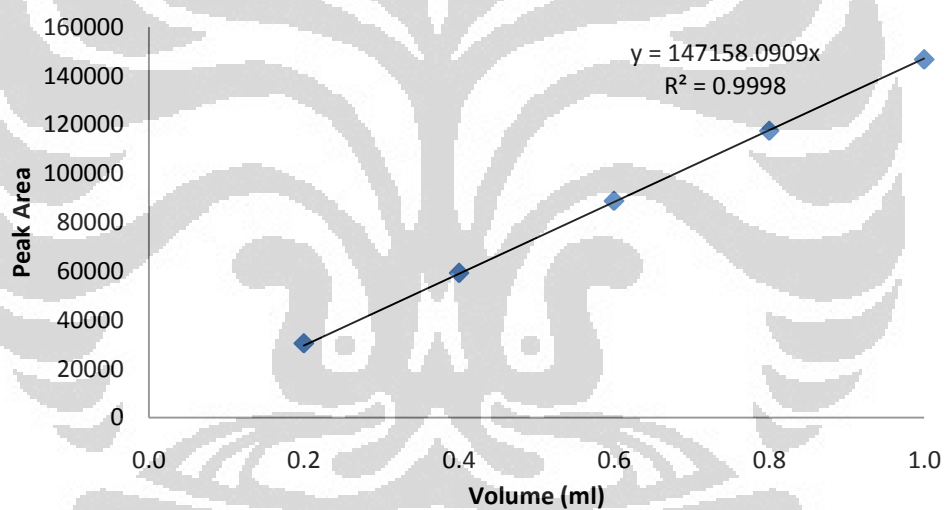


Gambar B.3 Hasil karakterisasi SEM untuk katalis komposit 3,0wt% Ag/TiO₂-ZAL-KA pada pelat aluminium untuk perbesaran (a) 10.000 kali, (b) 20.000 kali, dan (c) 50.000 kali

Lampiran C. Hasil Kalibrasi CO

Tabel C.1 Hasil kalibrasi CO

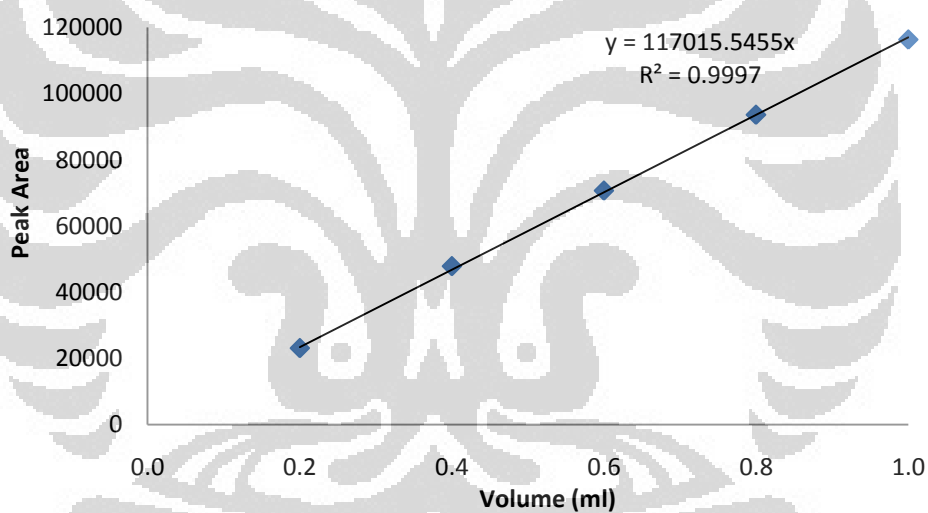
Volume (ml)	Retention Time (menit)			Peak Area		
	1	2	rataan	1	2	rataan
0,2	1,072	1,072	1,072	31052	29687	30369,5
0,4	1,065	1,062	1,064	58761	59582	59171,5
0,6	1,058	1,052	1,055	88124	89509	88816,5
0,8	1,050	1,047	1,049	117919	117082	117500,5
1,0	1,043	1,042	1,043	146227	147203	146715,0
	rataan		1,056			



Gambar C.1 Hasil kalibrasi CO

Lampiran D. Hasil Kalibrasi CO₂Tabel D.1 Hasil kalibrasi CO₂

Volume (ml)	Retention Time (menit)			Peak Area		
	1	2	rataan	1	2	rataan
0,2	3,408	3,412	3,410	22249	23964	23106,5
0,4	3,357	3,357	3,357	47502	48246	47874,0
0,6	3,317	3,315	3,316	70783	70592	70687,5
0,8	3,280	3,282	3,281	93492	93735	93613,5
1,0	3,243	3,247	3,245	116129	116591	116360,0
	rataan		3,322			

Gambar D.1 Hasil kalibrasi CO₂

Lampiran E. Data Total Plate Count untuk Bakteri *Escherichia coli*

Tabel E.1 Data Total Plate Count untuk bakteri *Escherichia coli*

No. Sampel	Variasi Katalis	Waktu (menit)	Faktor Pengenceran	Jumlah Koloni di Cawan			Total Koloni per ml Sampel (CFU/ml)	C/C ₀	Persentase Disinfeksi (%)
				Cawan 1	Cawan 2	Rataan			
1	TiO ₂ -ZAL-KA (UV radiated)	0	10 ³	26	9	17,5	1,75 x 10 ⁵	1,0000	84,00
2		30	10 ³	14	13	13,5	1,35 x 10 ⁵	0,7714	
3		60	10 ²	121	57	89,0	8,90 x 10 ⁴	0,5086	
4		90	10 ²	73	53	63,0	6,30 x 10 ⁴	0,3600	
5		120	10 ²	14	27	20,5	2,05 x 10 ⁴	0,1171	
6		150	10 ²	28	28	28,0	2,80 x 10 ⁴	0,1600	
7	0,5wt% Ag/TiO ₂ -ZAL-KA (UV radiated)	0	10 ³	7	8	7,5	7,50 x 10 ⁴	1,0000	98,40
8		30	10 ³	5	5	5,0	5,00 x 10 ⁴	0,6667	
9		60	10 ²	17	31	24,0	2,40 x 10 ⁴	0,3200	
10		90	10 ²	22	22	22,0	2,20 x 10 ⁴	0,2933	
11		120	10 ¹	2	7	4,5	4,50 x 10 ²	0,0060	
12		150	10 ¹	9	15	12,0	1,20 x 10 ³	0,0160	
13	1,0wt% Ag/TiO ₂ -ZAL-KA (UV radiated)	0	10 ³	15	11	13,0	1,30 x 10 ⁵	1,0000	99,91
14		10	10 ²	14	17	15,5	1,55 x 10 ⁴	0,1192	
15		20	10 ²	2	2	2,0	2,00 x 10 ³	0,0154	

No. Sampel	Variasi Katalis	Waktu (menit)	Faktor Pengenceran	Jumlah Koloni di Cawan			Total Koloni per ml Sampel (CFU/ml)	C/C ₀	Persentase Disinfeksi (%)
				Cawan 1	Cawan 2	Rataan			
16	1,0wt% Ag/TiO ₂ -ZAL-KA (UV radiated)	30	10 ¹	9	7	8,0	8,00 x 10 ²	0,0062	99,91
17		60	10 ¹	4	4	4,0	4,00 x 10 ²	0,0031	
18		90	10 ¹	8	6	7,0	7,00 x 10 ²	0,0054	
19		120	10 ⁰	18	27	22,5	2,25 x 10 ²	0,0017	
20		150	10 ⁰	9	15	12,0	1,20 x 10 ²	0,0009	
21	3,0wt% Ag/TiO ₂ -ZAL-KA (UV radiated)	0	10 ³	90	65	77,5	7,75 x 10 ⁵	1,0000	100,00
22		30	10 ³	6	10	8,0	8,00 x 10 ⁴	0,1032	
23		60	10 ¹	15	18	16,5	1,65 x 10 ³	0,0021	
24		90	10 ¹	8	10	9,0	9,00 x 10 ²	0,0012	
25		120	10 ⁰	15	16	15,5	1,55 x 10 ²	0,0002	
26		150	10 ⁰	2	2	2,0	2,00 x 10	0,0000	
27	TiO ₂ (100%) (UV radiated)	0	10 ⁴	3	8	5,5	5,50 x 10 ⁵	1,0000	95,73
28		30	10 ³	42	43	42,5	4,25 x 10 ⁵	0,772727	
29		60	10 ³	27	45	36,0	3,60 x 10 ⁵	0,654545	
30		90	10 ³	10	47	28,5	2,85 x 10 ⁵	0,518182	
31		120	10 ²	68	68	68,0	6,80 x 10 ⁴	0,123636	
32		150	10 ²	22	25	23,5	2,35 x 10 ⁴	0,042727	

No. Sampel	Variasi Katalis	Waktu (menit)	Faktor Pengenceran	Jumlah Koloni di Cawan			Total Koloni per ml Sampel (CFU/ml)	C/C ₀	Persentase Disinfeksi (%)
				Cawan 1	Cawan 2	Rataan			
33	TiO ₂ -ZAL-KA (dark)	0	10 ³	8	15	11,5	1,15 x 10 ⁵	1,0000	51,30
34		10	10 ³	12	11	11,5	1,15 x 10 ⁵	1,0000	
35		20	10 ³	12	10	11,0	1,10 x 10 ⁵	0,9565	
36		30	10 ³	9	13	11,0	1,10 x 10 ⁵	0,9565	
37		60	10 ²	92	63	77,5	7,75 x 10 ⁴	0,6739	
38		90	10 ²	83	84	83,5	8,35 x 10 ⁴	0,7261	
39		120	10 ²	22	29	25,5	2,55 x 10 ⁴	0,2217	
40		150	10 ²	59	53	56,0	5,60 x 10 ⁴	0,4870	
41	3,0wt% Ag/TiO ₂ -ZAL-KA (dark)	0	10 ³	48	51	49,5	4,95 x 10 ⁵	1,0000	100,00
42		10	10 ³	18	32	25,0	2,50 x 10 ⁵	0,5051	
43		20	10 ²	62	89	75,5	7,55 x 10 ⁴	0,1525	
44		30	10 ²	12	32	22,0	2,20 x 10 ⁴	0,0444	
45		60	10 ¹	5	9	7,0	7,00 x 10 ²	0,0014	
46		90	10 ¹	4	6	5,0	5,00 x 10 ²	0,0010	
47		120	10 ⁰	3	2	2,5	2,50 x 10	0,0001	
48		150	10 ⁰	1	0	0,5	5,00 x 10 ⁰	0,0000	

Lampiran F. Data Degradasi CO dan Produksi CO₂ untuk Katalis Komposit TiO₂-ZAL-KA

Tabel F.1 Data degradasi CO dan produksi CO₂ untuk katalis komposit TiO₂-ZAL-KA

Waktu (menit)	CO		CO ₂	
	Peak	Konsentrasi (ppm)	Peak	Konsentrasi (ppm)
0	314	2069,61	-	-
10	284	1871,87	-	-
20	276	1819,14	-	-
30	270	1779,60	-	-
40	278	1832,33	-	-
50	275	1812,55	-	-
60	257	1693,91	-	-
70	216	1423,68	-	-
80	191	1258,90	-	-
90	163	1074,35	-	-
120	152	1001,85	-	-
150	149	982,07	-	-
180	121	797,52	-	-
210	101	665,70	-	-
240	103	678,88	-	-
270	62	408,65	-	-