



UNIVERSITAS INDONESIA

**REKAYASA KOMPOSIT TiO_2 -KARBON AKTIF FILM
UNTUK DISINFEKSI BAKTERI *E.coli* PADA PENYEDIAAN
AIR MINUM**

SKRIPSI

RENDA FILOSOFI RAISULI

04 05 06 05 63

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA

DEPOK

JULI 2009

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Renda Filosofi Raisuli

NPM : 04 05 06 05 63

Tanda Tangan :

Tanggal : 07 Juli 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Renda Filosofi Raisuli
NPM : 04 05 06 05 63
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Rekayasa Komposit TiO₂-Karbon Aktif Film
untuk Disinfeksi Bakteri *Escherichia coli* pada
Penyediaan Air Minum

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Slamet, M.T. ()
Penguji : Prof. Dr. Ir. M. Nasikin, M.Eng ()
Penguji : Ir. Tilani Hamid, M.Si ()

Ditetapkan di : Depok

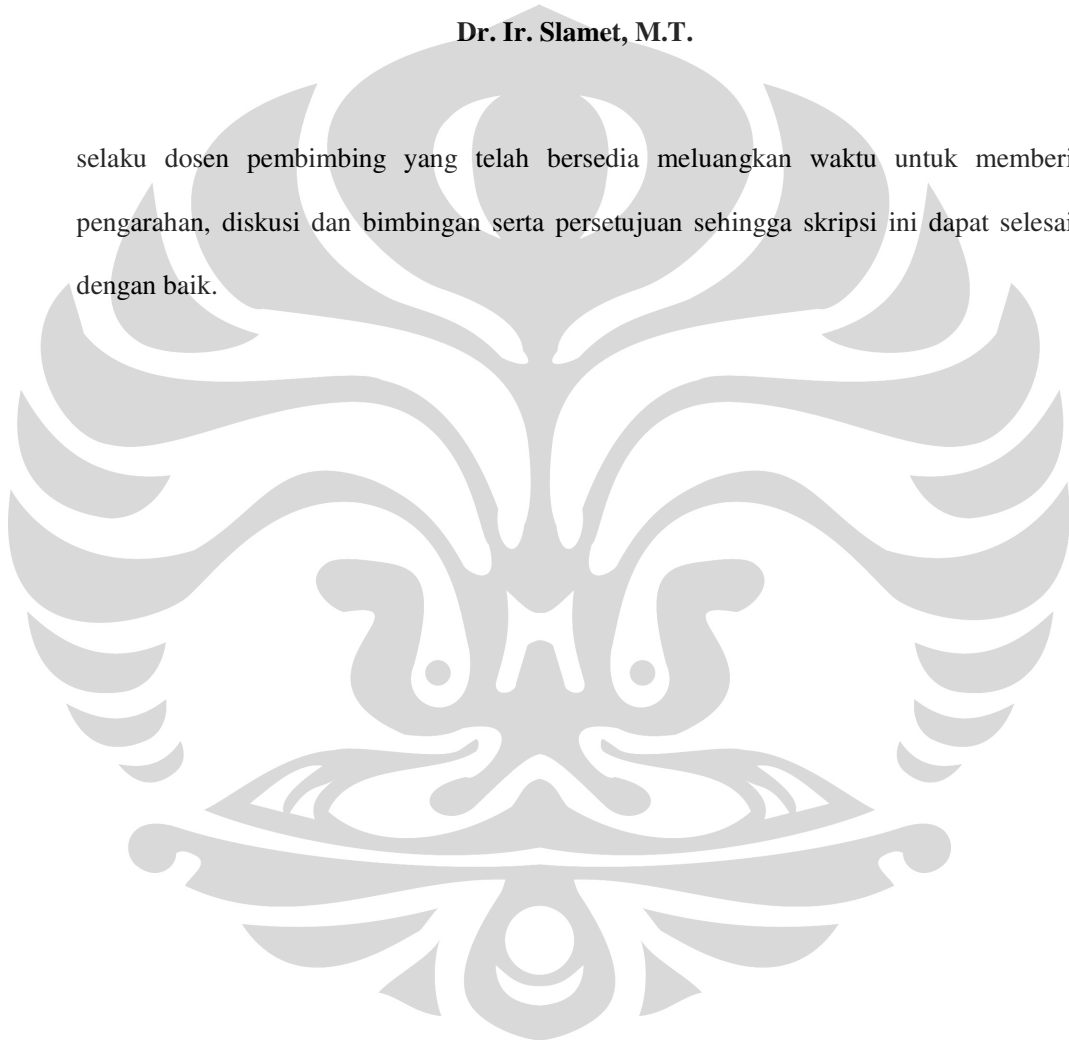
Tanggal : 07 Juli 2009

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

Dr. Ir. Slamet, M.T.

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.



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

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

Nama : Renda Filosofi Raisuli
NPM : 04 05 06 05 63
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

Rekayasa Komposit TiO₂-Karbon Aktif Film untuk Disinfeksi Bakteri *Escherichia coli* pada Penyediaan Air Minum

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 07 Juli 2009
Yang menyatakan

(Renda Filosofi Raisuli)

ABSTRAK

Nama : Renda Filosofi Raisuli
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Rekayasa Komposit TiO₂-Karbon Aktif Film untuk Disinfeksi Bakteri *Escherichia coli* pada Penyediaan Air Minum

Rekayasa komposit TiO₂-karbon aktif untuk proses disinfeksi bakteri *E.coli* telah dilakukan. Komposit yang dilapiskan pada penyangga batu apung dengan diameter 1-2 mm mampu mendisinfeksi kandungan bakteri *E.coli* dengan konsentrasi awal $6,9 \times 10^4$ sel/mL hingga mencapai nilai konversi 100% dalam 90 menit. Hasil uji kinerja juga menunjukkan bahwa penambahan 2% karbon aktif pada fotokatalis TiO₂ mampu meningkatkan laju disinfeksi bakteri *E.coli* hampir dua kalinya dibandingkan tanpa penambahan karbon aktif. Ukuran penyangga yang lebih kecil (1-2 mm) mampu meningkatkan nilai konversi dari 81% menjadi 100% dibandingkan apabila komposit disangga oleh batu apung ukuran 2-5 mm.

Kata kunci:

Disinfeksi *E.coli*, komposit, fotokatalis, TiO₂, adsorben, karbon aktif

ABSTRACT

Name : Renda Filosofi Raisuli
Study Program : Chemical Engineering
Title : Photocatalytic Disinfection of *Escherichia Coli* Bacteria in Drinking Water Treatment with TiO₂-Activated Carbon Film Composites

Photocatalytic Disinfection of *Escherichia Coli* bacteria with activated carbon-TiO₂ film composites has been done. Composite superimposed at pumice support with diameter 1-2 mm and initial concentration of $6,9 \times 10^4$ cell/mL can disinfect *E.coli* bacteria to 100% of its conversion value in 90 minutes. Performance test result also indicates that addition of 2% of activated carbon at photocatalyst TiO₂ can increase disinfection rate of *E.coli* bacteria approximant twice compared to without addition of activated carbon. Smaller support measure (1-2 mm) can increase conversion value from 81% to 100% compared to if composite supported to pumice with larger diameter (2-5 mm).

Keywords:

E.coli bacteria disinfection, composite, photocatayst, TiO₂, adsorbent, activated carbon

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
UCAPAN TERIMA KASIH.....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Polutan dalam Air Minum.....	6
2.2 Pertumbuhan Populasi Bakteri.....	9
2.3 Penentuan Jumlah Sel Bakteri.....	11
2.4 Konfigurasi Katalis.....	12
2.5 Fotokatalisis.....	15
2.6 Fotokatalis TiO ₂	17
2.7 Metode Pelapisan TiO ₂	21
2.8 Bakteri Escherichia coli.....	22
2.9 Proses Disinfeksi.....	25
2.10 Proses Disinfeksi dengan Fotokatalisis.....	28
2.11 Adsorpsi.....	28
2.11.1 Kombinasi Proses Adsorpsi-Fotokatalisis.....	29
2.11.2 Adsorben Karbon Aktif.....	31
2.12 Adsorpsi Isotermal Langmuir.....	32
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	34
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	34

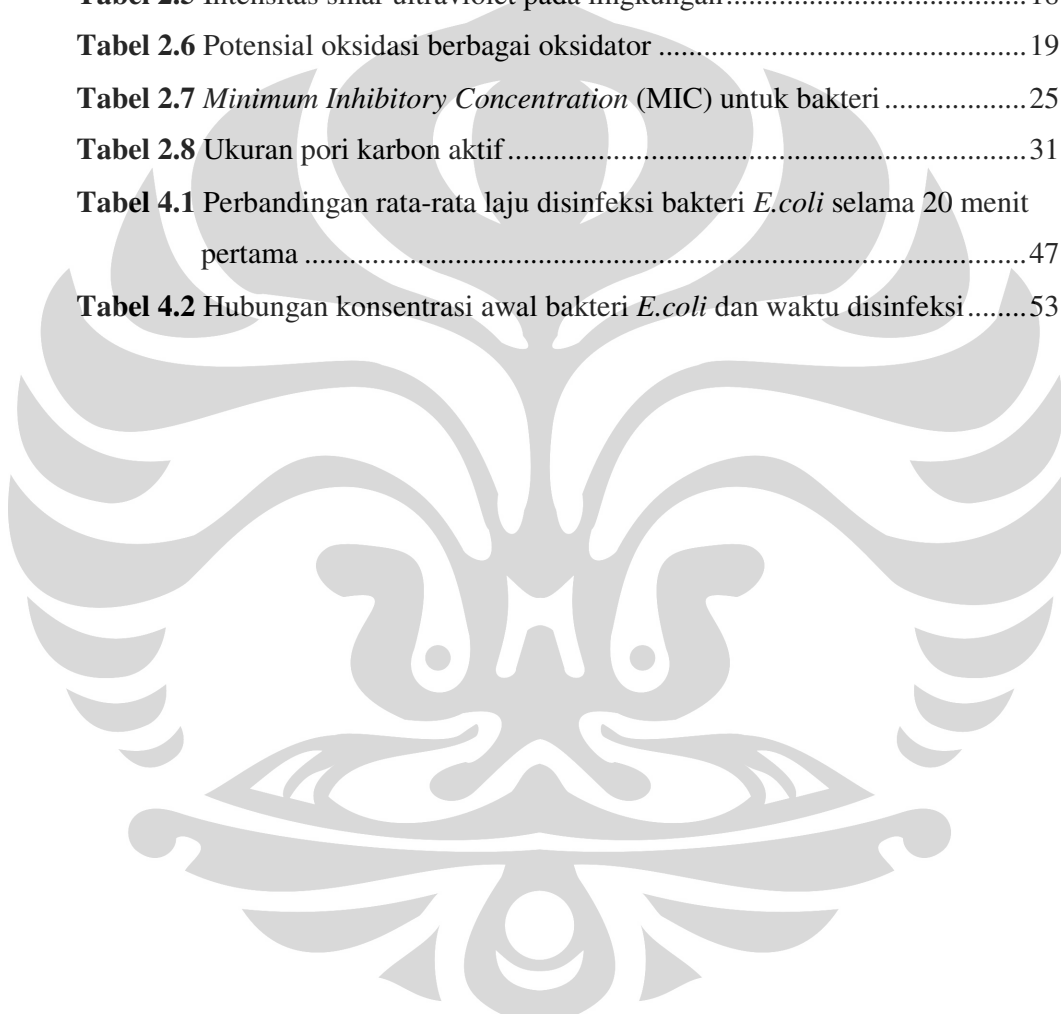
3.2 Peralatan dan Bahan Penelitian.....	35
3.2.1 Fotoreaktor.....	35
3.2.2 Peralatan Sintesis Komposit.....	36
3.2.3 Peralatan Uji Aktivitas dan Analisis Produk.....	36
3.2.4 Bahan Sintesis Komposit.....	36
3.3 Tahap Persiapan Fotoreaktor.....	37
3.4 Preparasi Komposit.....	37
3.5 Uji Kinerja Komposit.....	38
3.5.1 Penentuan Variabel Operasi.....	38
3.5.2 Prosedur Pengambilan Data.....	39
3.5.3 Pengolahan dan Analisis Data.....	40
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	41
4.1 Pengaruh Jenis Penyangga.....	42
4.2 Pengaruh Metode Analisis.....	43
4.3 Pengaruh UV, TiO ₂ dan Karbon Aktif.....	44
4.4 Pengaruh Penambahan Karbon Aktif.....	46
4.5 Pengaruh Diameter Penyangga.....	49
4.6 Pengaruh Konsentrasi Awal Bakteri <i>E.coli</i>	50
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	54
5.1 Kesimpulan.....	54
5.2 Saran.....	54
DAFTAR PUSTAKA.....	55
LAMPIRAN.....	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kurva pertumbuhan bakteri	9
Gambar 2.2 Ilustrasi skematis proses fotoeksitasi dan deeksitasi pada suatu semikonduktor (Linsebigler et al, 1995 dalam Gunlazuardi, 2001) 12	
Gambar 2.3 Celah pita semikonduktor (Katz, et al., 2007)	16
Gambar 2.4 Struktur kristal TiO ₂ (Amemiya, 2004)	17
Gambar 2.5 <i>Escherichia coli</i>	22
Gambar 2.6 Mekanisme degradasi polutan pada adsorben sebagai penyangga TiO ₂	29
Gambar 2.7 Struktur karbon aktif (Figuredo, 1986)	30
Gambar 3.1 Skema fotoreaktor teraerasi bagian dalam	34
Gambar 3.2 Skema selubung bagian luar fotoreaktor	35
Gambar 4.1 Pengaruh Jenis Penyangga pada Disinfeksi Bakteri <i>E.coli</i>	41
Gambar 4.2 Pengaruh Metode Analisis pada Disinfeksi Bakteri <i>E.coli</i>	43
Gambar 4.3 Pengaruh UV, UV + TiO ₂ , dan Karbon Aktif pada Disinfeksi <i>E.coli</i>	44
Gambar 4.4 Pengaruh Penambahan Karbon Aktif pada Fotokatalis TiO ₂	46
Gambar 4.5 Pengaruh Diameter Penyangga Batu Apung pada Disinfeksi Bakteri <i>E.coli</i>	48
Gambar 4.6 Pengaruh Konsentrasi Awal Bakteri pada Disinfeksi Bakteri <i>E.coli</i>	49
Gambar 4.7 Hubungan antara $1/C_0$ dengan $-1/r_0$	50
Gambar 4.8 Perbandingan Model Langmuir Hinselwood dengan Data Percobaan	51

DAFTAR TABEL

Tabel 2.2 Pembelahan biner bakteri tiap 15 menit	8
Tabel 2.3 Ciri dan fase pada kurva pertumbuhan.....	9
Tabel 2.4 Berbagai material penyangga pada reaktor	12
Tabel 2.5 Intensitas sinar ultraviolet pada lingkungan.....	18
Tabel 2.6 Potensial oksidasi berbagai oksidator	19
Tabel 2.7 <i>Minimum Inhibitory Concentration</i> (MIC) untuk bakteri	25
Tabel 2.8 Ukuran pori karbon aktif.....	31
Tabel 4.1 Perbandingan rata-rata laju disinfeksi bakteri <i>E.coli</i> selama 20 menit pertama	47
Tabel 4.2 Hubungan konsentrasi awal bakteri <i>E.coli</i> dan waktu disinfeksi.....	53



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kehidupan di Indonesia yang berlangsung selama ini masih menghadapi persoalan sanitasi dalam tingkat yang berbeda-beda. Unsur sanitasi seperti air minum, air limbah, udara segar dan limbah padat semakin berkembang tuntutan pengelolaannya sejalan dengan kehidupan yang semakin maju, sementara keadaan di Indonesia masih pada taraf yang dapat dinilai tidak cukup memadai sanitasi lingkungannya.

Indonesia merupakan salah satu negara dengan pelayanan sanitasi paling rendah di dunia. Lebih dari sepuluh juta rumah tangga di Indonesia tidak dilayani oleh bentuk sanitasi apapun. Sebagian besar populasi pedesaan, serta sejumlah besar rumah tangga berpendapatan rendah di daerah perkotaan membuang air limbahnya langsung ke sungai, danau dan ruang terbuka. Kontaminasi yang dihasilkan pada air permukaan dan air tanah telah mengarah ke insidensi penularan penyakit lewat *faeces* yang tinggi (ISSDP BAPPENAS, 2006).

Sungai-sungai utama di perkotaan umumnya sudah tercemar, dengan rata-rata kadar BOD 34,48% dan kadar COD 51,73% yang melampaui ambang batas. Sebesar 33,34% sampel air minum perpipaan dan 54,16% sample air minum non perpipaan ternyata mengandung bakteri *E.coli* (ISSDP BAPPENAS, 2006).

E.coli merupakan mikroflora alami yang terdapat pada saluran pencernaan manusia dan hewan. Beberapa galur *E.coli* dapat menyebabkan penyakit pada manusia seperti diare (Astawan, 2007), dimana sampai dengan tahun 2001 diare masih merupakan penyebab kematian bayi ketiga di Indonesia (ISSDP BAPPENAS, 2006).

Tidak terdapatnya kandungan bakteri *E.coli* dalam air minum merupakan parameter bakteriologis dari baku mutu air minum berdasarkan keputusan menteri kesehatan (KepMen Kes., 2002). Padahal keadaan sanitasi Indonesia saat ini mendukung menyebarnya penularan penyakit lewat *faeces*, sebagai pembawa bakteri *E.coli* ke lingkungan.

Upaya penyediaan air minum yang dikembangkan saat ini masih memiliki berbagai kendala, metode pertukaran ion diantaranya memiliki biaya operasional tinggi dan tidak dapat menyaring bakteri, virus dan bahan-bahan organik. Metode penyulingan membutuhkan energi listrik yang besar, kandungan oksigen terlarut yang rendah serta tidak dapat membuang bahan organik. Metode ozonasi membutuhkan biaya produksi yang tinggi. Metode yang saat ini digunakan PDAM yaitu klorinasi dapat menyebabkan reaksi dengan dengan senyawa lain membentuk klorofenol yang dapat memunculkan radikal bebas (Media Indonesia Online, 2005).

Salah satu metode yang sedang dikembangkan sebagai pengganti metode konvensional pengolahan air minum adalah fotokatalisis. Reaksi fotokatalisis dapat mendegradasi bakteri dengan mengoksidasinya menjadi karbondioksida dan air yang aman untuk dilepaskan ke lingkungan. Fotokatalis yang umum digunakan adalah fotokatalis berbasis TiO_2 yang akan bereaksi dengan penyinaran yang sesuai dengan celah pita energinya.

Ketika fotokatalis TiO_2 disinari UV dengan panjang gelombang dibawah 400 nm, elektron akan tereksitasi dari pita valensi ke pita konduksi, meninggalkan hole di pita valensi. Hole di pita valensi TiO_2 akan bereaksi dengan molekul air atau ion OH^- dan memproduksi radikal hidroksil ($\text{OH}\cdot$) yang merupakan senyawa pengoksidasi kuat. Radikal hidroksil tersebut yang akan mengoksidasi bakteri *E.coli* pada air minum dan menyebabkan kematian bakteri (Huang, et al., 1999).

Penggunaan suspensi fotokatalis untuk meningkatkan keterlayakan air tidak praktis untuk diaplikasikan, karena partikel TiO_2 harus *recovery* dengan filtrasi setelah pemaparan dengan cahaya matahari sebelum air dikonsumsi. Langkah tambahan *recovery* fotokatalis ini sulit untuk diterapkan dalam masyarakat kita yang menghendaki kepraktisan, sehingga alternatif yang lebih dapat diterima adalah dengan mengimobilisasi fotokatalis ke dalam bentuk film (Duffy, et al., 2004).

Daya adsorpsi yang lemah pada kebanyakan semikonduktor merupakan masalah bagi proses fotokatalisis. Untuk menutupi kekurangan tersebut, maka proses fotokatalisis oleh fotokatalis semikonduktor perlu ditopang dengan suatu

adsorben sebagai penyangga (Canela, 1999; El-Maazawi, 2000). Beberapa penelitian telah membuktikan bahwa penambahan adsorben, dalam hal ini karbon aktif pada fotokatalis TiO_2 , dapat meningkatkan laju degradasi berbagai senyawa organik seperti pada dekomposisi *propylamide* (Torimoto, 1996), degradasi fenol (Matos, 2001), degradasi *methyl orange* (Youji Li, 2005), serta dekomposisi *toluene* (Liu Jian-hua, 2006). Namun penelitian untuk tujuan disinfeksi bakteri dengan kombinasi proses ini masih belum banyak dikembangkan.

Kombinasi proses fotokatalis dan adsorben ini dapat diperoleh dengan mencampurkan TiO_2 dan karbon aktif menjadi suatu komposit dengan tujuan untuk memperoleh material baru yang memiliki sifat fisik dan kimia seperti yang diharapkan yaitu mampu mengadsorpsi sekaligus mendisinfeksi kandungan bakteri dalam air. Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat diperoleh suatu kombinasi proses yang optimum antara fotokatalis TiO_2 dan adsorben karbon aktif sehingga masalah ketersediaan air bersih yang layak untuk dikonsumsi dapat diselesaikan dengan segera.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana memperoleh komposit yang mampu mendisinfeksi kandungan *E.coli* dalam air sehingga memenuhi baku mutu air minum, dengan reaksi fotokatalisis komposit TiO_2 -karbon aktif yang dilapiskan pada Penyangga batu apung dalam *batch reactor*.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Memperoleh kombinasi proses yang optimum antara fotokatalis TiO_2 dan adsorben karbon aktif untuk mendisinfeksi kandungan bakteri *E.coli* dalam air.
2. Memperoleh kondisi yang optimal pada proses disinfeksi bakteri *E.coli* untuk memperoleh ambang batas baku mutu air minum.

1.4 Batasan Penelitian

Beberapa hal yang menjadi batasan dalam penelitian ini antara lain adalah:

1. Komposit yang disintesis terdiri dari TiO_2 (sebagai foto-katalis) dan karbon aktif (sebagai material adsorben).
2. Bahan prekursor TiO_2 yang dipakai adalah TiO_2 Degussa P25, sedangkan karbon aktif yang digunakan adalah karbon aktif komersial bermerek Karbosorb[®]
3. Uji kinerja komposit hanya untuk disinfeksi bakteri *E.coli* dengan metode analisis *Total Plate Count* (TPC)
4. Unit penyedia air bersih (foto-reaktor) yang digunakan adalah jenis 'foto-reaktor teraerasi'.
5. Pengujian kinerja komposit hanya untuk memenuhi baku mutu air minum dari aspek bakteriologis.
6. Tidak dilakukan karakterisasi pada komposit yang dipreparasi.

1.5 Sistematika Penulisan

Makalah skripsi ini ditulis berdasarkan sistematika sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Meliputi latar belakang penelitian, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah penelitian dan sistematika penulisan makalah.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Meliputi polutan dalam air, konfigurasi katalis, preparasi dan pelapisan katalis pada Penyangga, proses adsorpsi dan adsorben karbon aktif, serta pertumbuhan bakteri dan metode analisisnya.

BAB III METODE PENELITIAN

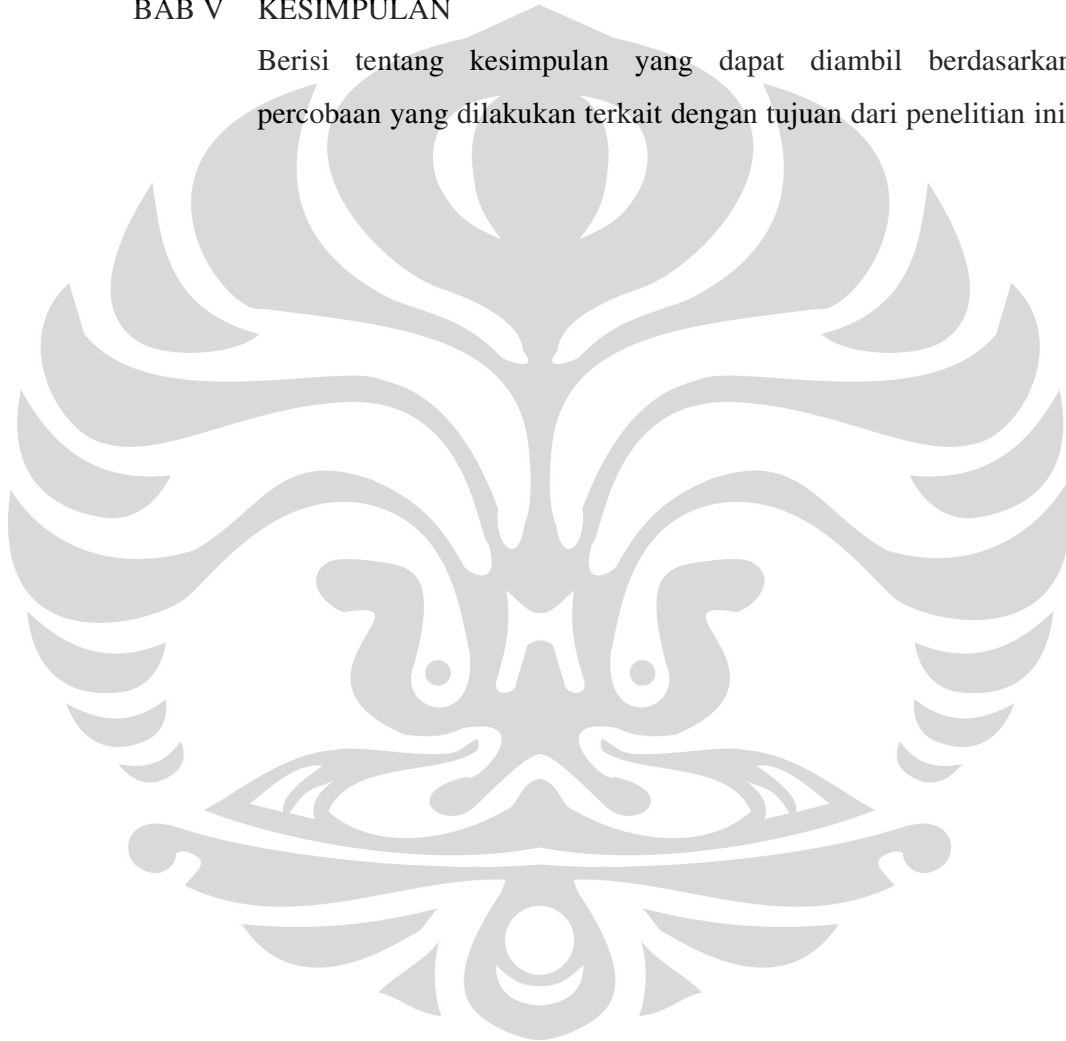
Meliputi skema penelitian, peralatan dan bahan yang akan digunakan, preparasi, pelapisan dan karakterisasi fotokatalis, set-up sistem reaktor, serta uji kinerja fotokatalis untuk aplikasi penyediaan air minum.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang penyajian data penelitian yang diperoleh, analisis kecenderungan pada berbagai variasi variabel bebas, dan pembahasan mengenai fenomena yang terjadi dalam proses disinfeksi.

BAB V KESIMPULAN

Berisi tentang kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan percobaan yang dilakukan terkait dengan tujuan dari penelitian ini.



BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Polutan dalam Air Minum

Air minum ialah air yang digunakan untuk konsumsi manusia (Wikipedia, 2008). Air minum dapat diperoleh dari salah satu sumber berikut (Juraneck, 1997):

1. Air tanah, atau air dari bawah permukaan bumi yang dipompa keluar untuk digunakan (contoh: air sumur) atau air yang mengalir alami ke permukaan (contoh: mata air).
2. Air permukaan, atau air dari sumber di atas tanah seperti sungai, danau, dan bendungan.

Air permukaan yang tidak diolah lebih mungkin terkontaminasi mikroorganisme patogen dibandingkan air tanah karena lebih besar kemungkinannya terkena kontak langsung dengan kotoran hewan, limbah manusia atau aliran *fecal* setelah hujan lebat. Air tanah lebih jarang terkontaminasi mikroorganisme patogen karena ketika merembes ke atas permukaan akan melewati pasir dan batuan berpori yang menjadi penyaring alami dari mikroorganisme yang terkandung di dalamnya. Air tanah dapat terkontaminasi apabila berupa sumur yang terletak di dekat pembuangan limbah atau saluran *septic*.

Air dikatakan layak minum apabila memenuhi persyaratan kualitas air minum yang tercantum dalam baku mutu air minum. Parameter kualitas air minum sesuai dengan Kepmenkes No 907/Menkes/SK/VII/2002 tentang Syarat dan Pengawasan Kualitas Air Minum yang berhubungan langsung dengan mikrobiologi adalah kandungan bakteri *E.coli* dan total koliform. Yang berhubungan dengan kimia organik berupa arsenik, flourida, kromium, kadmium, nitrit, sianida dan selenium. Sedangkan parameter yang tidak langsung berhubungan dengan kesehatan, antara lain berupa bau, warna, jumlah zat padat terlarut (TDS), kekeruhan, rasa, dan suhu. Untuk parameter kimiawi berupa kandungan aluminium, besi, khlorida, mangan, pH, seng, sulfat, tembaga, sisa klor dan amonia (Media Indonesia Online, 2005). Kandungan berbagai polutan dalam air dapat dilihat pada Tabel 2.1 dimana masih terdapat kandungan berbagai

senyawa pada sumber air minum masyarakat yang melebihi ambang batas baku mutu air yang dapat dikonsumsi.

Adanya senyawa kimia berbahaya yang terlarut dalam air dapat berakibat fatal jika kadarnya sangat berlebih atau bila hanya sedikit berlebih pada penggunaan jangka panjang mungkin tertimbun dan menimbulkan efek merugikan kesehatan. Konsumsi nitrit secara berlebihan dapat mengakibatkan terganggunya proses pengikatan oksigen oleh hemoglobin darah sehingga menimbulkan *methhaemoglobinaemia* terutama pada bayi (bayi biru), serta gangguan pada saluran pencernaan seperti diare, kolik, syok, koma sampai meninggal. Mineral besi dapat menimbulkan warna kuning pada air, memberi rasa tidak enak pada minuman, pertumbuhan bakteri besi dan kekeruhan. Keracunan kronis mangan dapat memberi gejala gangguan susunan syaraf dan bila mengalami paparan lebih lanjut akan mengalami gangguan dalam bicara, monoton, hiper refleks, klonus pada patella dan tumit, berjalan seperti penderita Parkinson. Sulfat dalam jumlah besar dapat bereaksi dengan natrium dan magnesium sehingga dapat menimbulkan iritasi pada saluran pencernaan (Raini, 2004).

Salah satu kondisi geologis yang mempengaruhi kualitas air secara kimia adalah adanya unsur besi dan mangan yang berlebihan dalam lapisan tanah tempat sumber air berada. Air hujan yang meresap ke dalam tanah pada saat melewati lapisan humus, kandungan oksigen di dalamnya dikonsumsi oleh bakteri-bakteri penghancur bahan organik menjadi humus. Proses respirasi mikroorganisme dan mineralisasi bahan organik menghasilkan CO_2 . Semakin dalam tanah yang dilalui air, kandungan CO_2 semakin tinggi, sebaliknya kandungan O_2 pada air tanah anaerobic menjadi nol. Kondisi ini akan menaikkan kelarutan Fe^{2+} dan Mn^{2+} dalam air tanah sehingga mengakibatkan meningkatnya kandungan besi dan mangan dalam air (Raini, 2004).

Tabel 2.1 Hasil Pemeriksaan Fisik dan Kimia Sampel Air PAM di Wilayah DKI Jakarta, Bogor, Tangerang dan Bekasi tahun 1999-2001 (Raini, 2004).

No.	Parameter	Satuan	Kadar Maksimal	Memenuhi Syarat Air Minum		Tidak Memenuhi Syarat Air Minum	
				N	%	N	%
Fisika							
1.	Bau			431	100	-	-
2.	Kekeruhan	Skala TCU	15	423	98,14	8	1,86
3.	Warna	Skala TCU	5	424	98,38	7	1,62
Kimia							
4.	Besi	mg/L	0,3	422	97,91	9	2,09
5.	Kesadahan	mg/L	500	430	99,77	1	0,23
6.	Klorida	mg/L	250	427	99,07	4	0,93
7.	Mangan	mg/L	0,1	412	95,59	19	4,41
8.	Nitrit	mg/L	1/3*	431	100	-	-
9.	pH		6,5-8,5	431	100	-	-
10.	Sulfat	mg/L	250	431	100	-	-
11.	Zat organik/KmnO ₄	mg/L	10	424	98,38	7	1,62
	Kesimpulan			395	91,65	36	8,35

Keterangan: * Menurut Permenkes nomor 907/Menkes/SK/VII/2002

Bakteri *Escherichia coli* biasa digunakan sebagai indikator biologis efisiensi disinfektan dalam air (Rincon, Pulgarin, 2004). *E. coli* merupakan bakteri tipe batang dengan ukuran 0,4 – 0,7 µm x 1,4 µm, tidak membentuk spora, tidak tahan asam dan dapat memfermentasikan laktosa (Budiman, 2007). *E.coli* dapat menyebabkan beberapa jenis penyakit pada manusia seperti infeksi pencernaan, *meningitis*, *peritonitis*, *mastitis*, *septicemia*, *pneumonia* gram negatif dan infeksi saluran kencing. *E.coli* memiliki waktu penggandaan dalam waktu 20 menit pada temperatur 37° C. Jika berada dalam media yang kaya dengan nutrisi maka bakteri ini dapat hidup dengan suhu pertumbuhan optimum 39°C dan pada kisaran pH 6-8.

Bakteri *E.coli* secara alami berada dalam usus besar binatang berdarah panas termasuk manusia. Umumnya pada tiap gram kotoran manusia dan hewan berdarah panas, akan terdapat *E.coli* sebanyak 10^7 - 10^8 sel organisme. *E.coli* secara periodik didepositkan dari usus ke tanah atau air sehingga jumlah koliform dalam penyediaan air minum merupakan ukuran kemurnian air jika ditinjau dari aspek mikrobiologi. (Lablink, 2007).

2.2 Pertumbuhan Populasi Bakteri

Pertumbuhan adalah penambahan secara teratur semua komponen sel suatu jasad. Pertumbuhan adalah hasil dari pembelahan sel. Pada jasad bersel tunggal (uniseluler), pembelahan atau perbanyakan sel merupakan penambahan jumlah individu. Sedangkan pada jasad bersel banyak (multiseluler), pembelahan sel tidak menghasilkan penambahan jumlah individu, tetapi hanya merupakan pembentukan jaringan.

Bakteri memiliki kemampuan untuk menggandakan diri secara eksponensial dikarenakan sistem reproduksinya adalah pembelahan biner melintang, dimana tidap sel membelah diri menjadi dua sel. Selang waktu yang dibutuhkan sel untuk membelah diri disebut dengan *waktu generasi*.

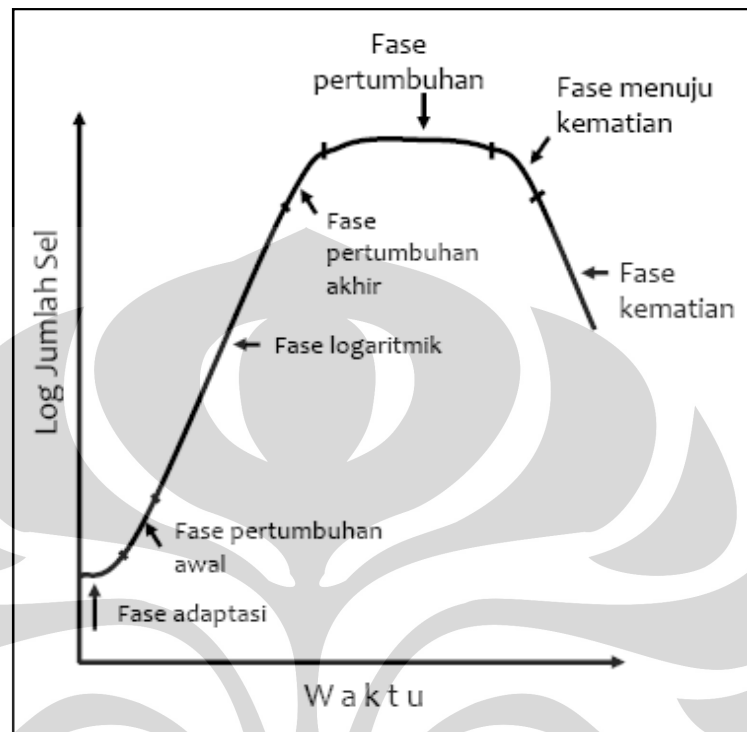
Tiap spesies bakteri memiliki waktu generasi yang berbeda-beda, pada *Escherichia coli*, waktu generasinya adalah 15-20 menit. Hal ini berarti bakteri *E.coli* dalam waktu 15-20 menit mampu menggandakan selnya menjadi dua kali lipat (www.ipb.ac.id). Tabel 2.2 menunjukkan hubungan antara penambahan sel dengan waktu adalah berbentuk geometrik eksponensial dengan rumus 2^n . Ilustrasinya dapat berlangsung sebagai berikut:

Tabel 2.2 Pembelahan biner bakteri tiap 15 menit

0'	15'	30'	45'	60'	75'	90'	105'	120'	135'
1 sel	2 sel	4 sel	8 sel	16 sel	32 sel	64 sel	128 sel	256 sel	512 sel
2^0	2^1	2^2	2^3	2^4	2^5	2^6	2^7	2^8	2^9

Suatu bakteri yang dimasukkan ke dalam medium baru yang sesuai akan tumbuh memperbanyak diri. Jika pada waktu-waktu tertentu jumlah bakteri dihitung dan dibuat grafik hubungan antara jumlah bakteri dengan waktu maka

akan diperoleh suatu grafik atau kurva pertumbuhan seperti pada gambar di bawah:



Gambar 2.1 Kurva pertumbuhan bakteri (www.ipb.ac.id)

Berdasarkan Gambar 2.1, fase-fase pertumbuhan bakteri dimulai pada fase permulaan, fase pertumbuhan yang dipercepat, fase pertumbuhan logaritma (eksponensial), fase pertumbuhan yang mulai dihambat, fase stasioner maksimum, fase kematian dipercepat, dan fase kematian logaritma. Fase-fase tersebut dijelaskan dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Ciri dan fase pada kurva pertumbuhan

Fase Pertumbuhan	Ciri
<i>Lag</i> (lambat)	Tidak ada pertumbuhan populasi karena sel mengalami perubahan komposisi kimiawi dan ukuran serta bertambahnya substansi intraseluler sehingga siap untuk membelah diri.
<i>Logaritma</i> atau eksponensial	Sel membelah diri dengan laju konstan, waktu generasi pendek dan konstan, massa menjadi

	dua kali lipat, keadaan pertumbuhan seimbang. Metabolisme sel paling aktif, sintesis bahan sel sangat cepat dengan jumlah konstan sampai nutrisi habis atau terjadi penimbunan hasil metabolisme yang menyebabkan terhambatnya pertumbuhan.
<i>Stationary</i> (stasioner/tetap)	Terjadinya penumpukan racun akibat metabolisme sel dan kandungan nutrisi mulai habis, akibatnya terjadi kompetisi nutrisi sehingga beberapa sel mati dan lainnya tetap tumbuh. Jumlah sel menjadi konstan.
<i>Death</i> (kematian)	Sel menjadi mati akibat penumpukan racun dan habisnya nutrisi, menyebabkan jumlah sel yang mati lebih banyak sehingga mengalami penurunan jumlah sel secara eksponensial. Penurunan jumlah sel hidup tidak mencapai nol, dalam jumlah minimum tertentu sel mikrobia akan tetap bertahan sangat lama dalam medium.

Sumber: www.ipb.ac.id

Pengetahuan akan kurva pertumbuhan bakteri sangat penting untuk menggambarkan karakteristik pertumbuhan bakteri, sehingga akan mempermudah di dalam kultivasi (menumbuhkan) bakteri ke dalam suatu media, penyimpanan kultivasi dan penggantian media.

2.3 Penentuan Jumlah Sel Bakteri

Pertumbuhan dapat diukur dari perubahan jumlah sel atau berat kering massa sel. Jumlah sel dapat dihitung dari jumlah sel total yang tidak membedakan jumlah sel hidup atau mati, dan jumlah sel hidup (*viable count*). Jumlah total sel mikrobia dapat ditetapkan secara langsung dengan pengamatan mikroskopis, dalam bentuk sampel kering yang diletakkan di permukaan gelas benda (slide) dan dalam

sampel cairan yang diamati menggunakan metode counting chamber, misalnya pada alat Petroff-Hausse Bacteria Counter (PHBC) untuk menghitung bakteri atau dengan alat haemocytometer untuk menghitung khamir, spora, atau sel-sel yang ukurannya relatif lebih besar dari bakteri (SNI 01-2782-1998/Rev.1992).

Jumlah sel hidup dapat ditetapkan dengan metode plate count atau colony count, dengan cara ditaburkan pada medium agar sehingga satu sel hidup akan tumbuh membentuk satu koloni, maka jumlah koloni dianggap setara dengan jumlah sel. Cara ini ada dua macam, yaitu metode taburan permukaan (*spread plate method*) dan metode taburan (*pour plate method*). Cara lain untuk menghitung jumlah sel hidup adalah dengan filter membrane dan MPN (*Most Probable Number*) yang menggunakan medium cair. Sampel mikrobial yang dihitung biasanya dibuat seri pengenceran.

Pertumbuhan sel dapat diukur dari massa sel dan secara tidak langsung dengan mengukur turbiditas cairan medium tumbuh. Massa sel dapat dipisahkan dari cairan mediumnya menggunakan alat sentrifus (pemusing) sehingga dapat diukur volume massa selnya atau diukur berat keringnya (dikeringkan dahulu dengan pemanasan pada suhu 90-110 °C semalam). Umumnya berat kering bakteri adalah 10-20% dari berat basahnya.

Turbiditas dapat diukur menggunakan alat photometer (penerusan cahaya), semakin pekat atau semakin banyak populasi mikrobial maka cahaya yang diteruskan semakin sedikit. Turbiditas juga dapat diukur menggunakan spektrofotometer (*optical density/OD*), yang sebelumnya dibuat kurva standart berdasarkan berat kering sel. Unit photometer atau OD proporsional dengan massa sel dan juga jumlah sel, sehingga cara ini dapat digunakan untuk memperkirakan jumlah atau massa sel secara tidak langsung.

2.4 Konfigurasi Katalis

Berdasarkan konfigurasi katalis, dapat diidentifikasi dua mode operasi fotoreaktor: dengan katalis suspensi atau dengan katalis yang diimobilisasi pada suatu penyangga. Ketika keduanya dibandingkan, umumnya katalis tersuspensi memberikan hasil yang lebih efisien, akibat tidak adanya keterbatasan perpindahan massa dan luas permukaan spesifik yang besar dari partikel skala

nano. Akan tetapi metode ini memiliki kelemahan dibandingkan metode imobilisasi, yaitu diperlukannya tahapan pemisahan untuk mengambil kembali katalis setelah proses pemurnian, selain itu kedalaman penyinaran pada suspensi terbatas. Masalah tersebut dapat diatasi dengan menggunakan katalis yang diimobilisasi pada penyangga. Dengan metode ini dapat didesain sebuah reaktor yang seluruh permukaannya dapat disinari. Kelemahan dari metode ini adalah hambatan perpindahan massa dapat muncul dengan mudah dan luas permukaan spesifik untuk reaktan terbatas.

Desain yang layak dan pemilihan jenis penyangga dapat mengatasi kelemahan ini. Material penyangga harus transparan terhadap radiasi UV, membentuk ikatan fisika-kimia yang kuat dengan TiO_2 tanpa mengurangi aktivitasnya, memiliki luas permukaan penyinaran spesifik yang besar, mudah dipisahkan pada fasa liquid, mendukung desain reaktor yang memudahkan perpindahan massa, dan inert.

Pada reaksi fotokatalisis, katalis harus disinari sebelum menjadi aktif. Katalis yang terletak di dalam pori dari suatu material penyangga berpori dengan luas permukaan besar, sebagian besar dari katalis akan tidak tersinari dan karenanya sia-sia. Meskipun penyangganya transparan terhadap cahaya, katalis yang dilapiskan pada bagian luar partikel akan menyerap cahaya sehingga menghalangi tembusnya cahaya ke permukaan dalam. Masalah ini dapat diatasi dengan menggunakan penyangga tidak berpori seperti *pellet* kaca. Partikel penyangga berukuran kecil memiliki keuntungan memiliki luas permukaan spesifik yang besar. Beberapa material penyangga telah dipelajari untuk reaksi fotokatalisis dan dirangkum dalam Tabel 2.4 (Dijkstra, et al., 2001). Salah satu material penyangga yang digunakan adalah karbon aktif, dimana pada penelitian ini karbon aktif tidak hanya digunakan sebagai penyangga, namun juga sebagai adsorben.

Tabel 2.4 Berbagai material penyangga pada reaktor

No.	Material Penyangga	Konfigurasi Katalis	Referensi
1.	Glass beads	Packed-bed reactor	Serpone et al. (1986), Al-Ekabi and Serpone (1988), Trillas, Peral and

			Domenech (1996), Wang, Tsai and Hsieh (1998)
2.	Silica gel	Packed-bed reactor	Matthews (1998b), Burns et al. (1999)
3.	Glass tubes	Fixed on spiral glass tube	Matthews (1998a), Al-Ekabi and Serpone (1988)
		Fixed on hollow tubes	Ray and Beenackers (1998a)
		Fixed on lamp	Ray and Beenackers (1998b)
4.	Hollow beads	Floating on surface	Jackson et al. (1991), Preis, Krichevskaya and Kharchenko (1997)
5.	Silica based materials (sand, silica gel, glass wool, glass beads)	Packed-bed reactor	Zhang, Crittenden, Hand and Perram (1994)
		Fixed on reactor bottom	Matthews (1991)
6.	Membranes	Fixed-bed reactor	Bellobono, Pinacci, Riva and Lagrasta (1998)
7.	Optical fibers	Fixed-bed reactor	Hofstadler, Bauer, Novalic and Heisler (1994), Peill and Hoffmann (1996)
8.	Zeolites, mordenite, activated carbon, silica, ferrierite	Fixed-bed reactor	Takeda, Torimoto, Sampath, Kuwabata and Yoneyama (1995)
9.	TiO ₂ pellets	Packed-bed reactor	Yamazali-Nishida, Nagano, Philips, Carvera-March and Anderson (1993)
		Suspended system	Dagan and Tomkiewicz (1993)
10.	Stainless steel	Fixed-bed reactor	Byrne et al. (1998)
11.	Tin oxide coated glass	Fixed-bed reactor	Byrne et al. (1998)

Sumber: *Dijkstra, et al., 2004*

Selain parameter perancangan reaktor konvensional, tantangan terbesar desain reaktor fotokatalitik adalah penyinaran katalis yang efisien. Untuk mendapatkan aktivitas reaktor yang tinggi, sebesar mungkin luas permukaan katalis harus tersinari. Karenanya, pada metode imobilisasi, ketebalan lapisan

penyangga katalis harus cukup tipis untuk memungkinkan sinar mencapai seluruh partikel katalis. Pada sistem suspensi, lapisan cairan sangat tipis atau suspensi memerlukan pencampuran menyeluruh untuk memungkinkan seluruh partikel katalis memperoleh banyak penyinaran (Dijkstra, et al., 2001).

Tantangan lain teknologi fotokatalisis adalah bagaimana mengembangkan desain reaktor yang dapat meningkatkan efisiensi. Untuk desain reaktor kontinyu fotokatalitik yang dapat ditingkatkan untuk ukuran industri, parameter paling penting adalah konfigurasi katalis, luas permukaan tersinari spesifik, laju perpindahan massa, efisiensi penyinaran, sumber UV, kemungkinan *scale up* dan kinetika reaksi intrinsik (Su, et al., 2004).

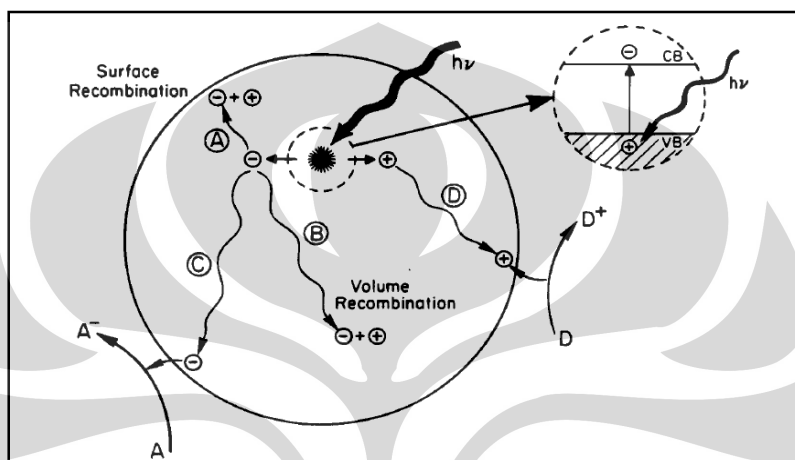
Fotokatalis TiO_2 yang diimobilisasi pada penyangga kaca *pyrex* berbentuk kumparan dengan teknik *dip-coating* dikembangkan dengan keuntungan distribusi pencahayaan yang seragam di sepanjang reaktor, rasio luas permukaan tersinari terhadap volume reaktor tinggi, *pressure drop* rendah dan tidak ada hambatan perpindahan massa. Sebagai pembanding adalah *packed-bed* reaktor dengan katalis diimobilisasi pada *pellet* dan *packed-bed* reaktor dengan katalis suspensi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa diantara ketiga desain reaktor, reaktor dengan katalis diimobilisasi pada penyangga kaca *pyrex* berbentuk kumparan memiliki rasio area permukaan spesifik tersinari yang relatif konstan untuk setiap penambahan volume reaktor. Hal tersebut memungkinkan *scale-up* reaktor untuk aplikasi komersial (Chen, et al., 2001).

2.5 Fotokatalisis

Fotokatalisis merupakan suatu proses kombinasi antara proses fotokimia dan katalis, yaitu suatu proses sintesis secara kimiawi dengan melibatkan cahaya sebagai pemicu dan katalis sebagai pemercepat proses transformasi tersebut (Slamet, et al., 2007).

Secara umum, fenomena fotokatalisis pada permukaan semikonduktor dapat digambarkan pada Gambar 2.2. Jika suatu semikonduktor tipe n dikenai cahaya ($h\nu$) dengan energi yang sesuai, maka elektron (e^-) pada pita valensi akan pindah ke pita konduksi, dan meninggalkan lubang positif (*hole* $^+$ atau h^+) pada pita valensi. Sebagian besar pasangan e^- dan h^+ ini akan berekombinasi kembali,

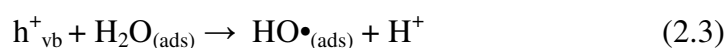
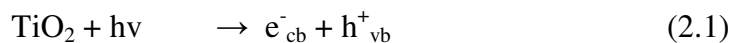
baik di permukaan (jalur A) atau didalam *bulk* partikel (jalur B). Sementara itu sebagian pasangan e^- dan h^+ dapat bertahan sampai pada permukaan semikonduktor (jalur C dan D), dimana h^+ dapat menginisiasi reaksi oksidasi dan dilain pihak e^- akan menginisiasi reaksi reduksi zat kimia yang ada disekitar permukaan semikonduktor (Gunlazuardi, 2001).



Gambar 2.2 Ilustrasi skematis proses fotoeksitasi dan deeksitasi pada suatu semikonduktor (Linsebigler et al, 1995 dalam Gunlazuardi, 2001)

Pada prinsipnya, reaksi oksidasi pada permukaan semikonduktor dapat berlangsung melalui donasi elektron dari substrat ke h^+ (menghasilkan radikal pada substrat yang akan menginisiasi reaksi berantai). Apabila potensial oksidasi yang dimiliki oleh h^+ pada pita valensi ini cukup besar untuk mengoksidasi air dan/atau gugus hidroksil pada permukaan partikel maka akan dihasilkan radikal hidroksil. Radikal hidroksil adalah spesi pengoksidasi kuat (pada $\text{pH} = 1$) memiliki potensial redoks sebesar 2,8 Volt (relatif terhadap elektroda hidrogen Nernst). Potensial sebesar ini cukup kuat untuk mengoksidasi kebanyakan zat organik menjadi air, asam mineral dan karbon dioksida.

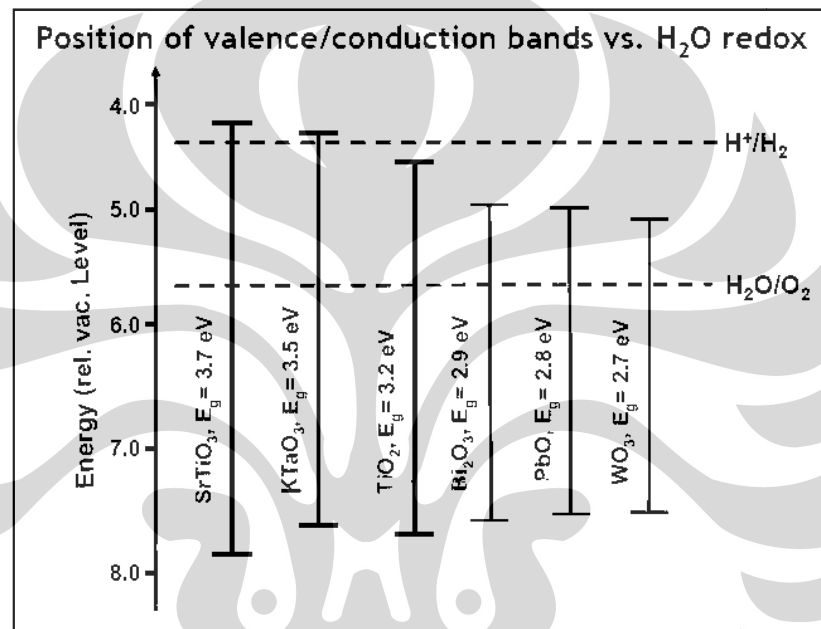
Berikut adalah reaksi kimia dalam proses fotokatalitik (Gunlazuardi, 2001):



2.6 Fotokatalis TiO₂

TiO₂ merupakan material yang potensial untuk dikembangkan sebagai fotokatalis karena berbagai keunggulannya, diantaranya tidak beracun dan harganya relatif murah (Andersson, 2002).

Penelitian telah dilakukan pada berbagai material semikonduktor sebagai sensitizer sel surya, dimana sel berbasis semikonduktor oksida lainnya seperti SnO₂ dan ZnO menghasilkan efisiensi yang jauh di bawah sel berbasis TiO₂.



Gambar 2.3 Celah pita semikonduktor (Katz, et al., 2007)

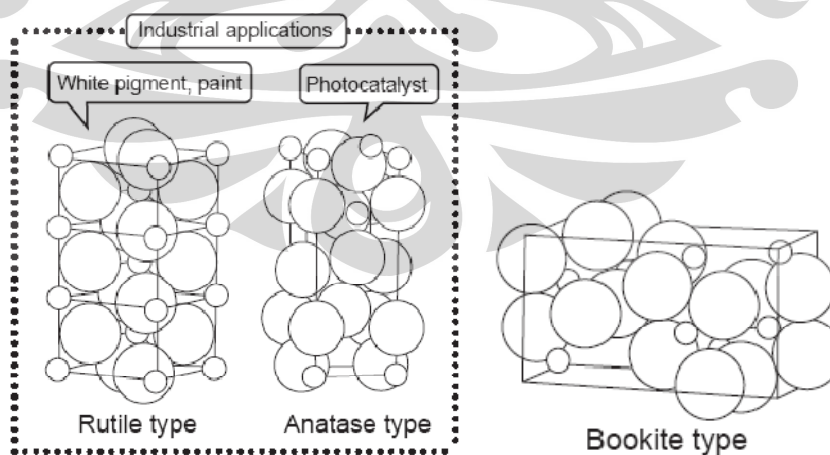
Pada semikonduktor lain, eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi akan menyebabkan struktur fotoeksitasi tidak stabil dan mudah rusak, dimana hal tersebut tidak terjadi pada TiO₂ (Amemiya, 2004).

Tiga faktor berkaitan dengan struktur pita semikonduktor yang berpengaruh besar terhadap reaksi fotokatalitik:

1. Celah pita energi; mempengaruhi panjang gelombang cahaya yang paling efektif untuk katalis tersebut.
2. Letak titik terendah pita konduksi.
3. Letak titik tertinggi pita valensi; penentu utama daya dekomposisi oksidatif dari fotokatalis.

Terdapat tiga struktur kristal dari TiO_2 , tipe rutil, tipe anatase, dan tipe brookite. TiO_2 menyerap sinar yang memiliki tingkat energi lebih tinggi dari energi celah pitanya, dan menyebabkan elektron melompat ke pita konduksi dan membentuk *hole* positif pada pita valensi. Celah pita energi struktur rutile adalah 3,0 eV dan untuk stuktur anatase 3,2 eV. Keduanya hanya menyerap sinar ultraviolet. Namun struktur rutile dapat menyerap sinar yang panjang gelombangnya dekat dengan sinar tampak, sehingga rentang panjang gelombang yang dapat diserap rutil lebih besar. Namun, tipe anatase menunjukkan aktivitas fotokatalitik yang lebih tinggi. Salah satu sebabnya adalah perbedaan struktur energi antara kedua tipe. Pada kedua tipe, pita valensi lebar, dan akibatnya *hole* positif menunjukkan daya oksidatif yang cukup. Namun pita konduksi terletak dekat dengan potensial oksidasi-reduksi dari hidrogen, mengindikasikan bahwa kedua tipe relatif lemah daya reduksinya. Pita konduksi pada tipe anatase lebih dekat ke posisi negatif dibandingkan tipe rutil, sehingga kemampuan mereduksi dari anatase lebih kuat daripada rutil. Mengacu pada perbedaan posisi pita konduksi, tipe anatase menunjukkan aktivitas fotokatalisis keseluruhan yang lebih tinggi dibandingkan rutil (Amemiya, 2004).

Celah energi TiO_2 tipe anatase adalah 3,2 eV yang ekuivalen dengan panjang gelombang 388 nm. Penyerapan sinar ultraviolet yang panjang gelombangnya lebih pendek dari 388 nm akan memicu reaksi.



Gambar 2.4 Struktur kristal TiO_2 (Amemiya, 2004)

Sinar ultraviolet tersebut merupakan sinar ultraviolet dekat yang terdapat pada sinar matahari yang sampai ke bumi dan yang diemisikan oleh lampu neon (*fluorescence*). Untuk aplikasi fotokatalisis dalam larutan, tidak ada bahan semikonduktor lain yang lebih baik dari TiO_2 , sebab semikonduktor dengan celah pita yang lebih kecil dari TiO_2 akan mengalami *autolysis* apabila menerima sinar dengan kehadiran air (Amemiya, 2004).

Tabel 2.5 Intensitas sinar ultraviolet pada lingkungan

Lokasi Pengujian		Intensitas Sinar Ultraviolet	Keterangan
Di luar ruangan	Dibawah sinar matahari langsung	4 - 5 mw/cm^2	Cuaca cerah
		2 - 2,5 mw/cm^2	Cuaca sedikit mendung
		0,7 - 0,8 mw/cm^2	Cuaca mendung
Di dalam kendaraan	Melalui kaca belakang	150 - 350 $\mu\text{w/cm}^2$	Cuaca cerah - sedikit mendung
	Melalui kaca samping	90 - 300 $\mu\text{w/cm}^2$	
	Melalui kaca depan	0,5 - 2,0 $\mu\text{w/cm}^2$	
	Di kursi belakang	10 - 30 $\mu\text{w/cm}^2$	
	Permukaan langit-langit kendaraan	2 - 4 $\mu\text{w/cm}^2$	
Di dalam rumah	Tepat di bawah lampu <i>fluorescent</i>	2 - 3 $\mu\text{w/cm}^2$	

Illuminance meter: TOPCON UVR-2 manufactured by Topcon Corporation

Sumber: *Three Bond Technical News (January 1, 2004)*

Ketika cahaya diserap oleh TiO_2 , terbentuk elektron (e^-) dan *hole* positif (h^+). Pada substansi biasa, elektron dan *hole* akan berekombinasi dengan cepat, namun pada fotokatalis TiO_2 , rekombinasi terjadi sangat lambat. Persentase yang berekombinasi merupakan parameter keefektifan proses fotokatalisis. Ketika air

dioksidasi oleh *hole* positif, terbentuk radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) yang memiliki daya oksidasi dekomposisi tinggi.

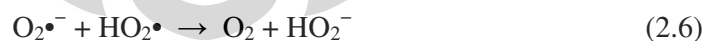
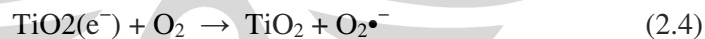
Tabel 2.6 Potensial oksidasi berbagai oksidator

Oksidator	Potensial oksidasi (V)
$\bullet\text{OH}$ (radikal hidroksil)	2,80
O_3 (ozon)	2,07
H_2O_2 (hidrogen peroksida)	1,77
ClO_2 (asam hipoklorit)	1,49
Cl (klorin)	1,36

Sumber: *Three Bond Technical News* (January 1, 2004)

Radikal hidroksil akan bereaksi dengan senyawa organik. Apabila terdapat oksigen selama proses berlangsung, bentuk *intermediate* dari radikal dalam senyawa organik dan molekul oksigen dapat mengalami reaksi berantai dan mengkonsumsi oksigen. Dalam kasus tersebut, senyawa organik terurai menjadi karbon dioksida dan air. Dalam beberapa kondisi, senyawa organik dapat bereaksi langsung dengan *hole* menghasilkan penguraian oksidatif.

Karena oksigen adalah senyawa yang mudah direduksi, apabila terdapat oksigen, maka yang terjadi bukannya reduksi hidrogen, tapi reduksi oksigen. Reduksi oksigen menghasilkan anion superoksida. ($\bullet\text{O}_2^-$). Anion superoksida berikatan dengan produk antara dalam reaksi oksidasi, membentuk peroksida atau berubah menjadi hidrogen peroksida, kemudian menjadi air (Rincon, Pulgarin, 2004).



2.7 Metode Pelapisan TiO₂

Sol merupakan suatu sistem yang memungkinkan spesies kimia padat tersuspensi stabil dalam larutan. Pada pembuatan TiO₂ film, sol TiO₂ dilapiskan pada penyangga sebagai tempat berlangsungnya reaksi fotokatalisis. Kehadiran penyangga diperlukan terutama untuk meningkatkan kualitas sifat tekstur demi efektifitas kontak dengan reaktan, seperti misalnya meningkatkan porositas, luas permukaan, dan lain lain (Slamet, et al., 2007). Penyangga yang biasa digunakan adalah senyawa non-organik seperti zeolit, *silica gel*, kaca, apatite, titania, dan zirkonium fosfat (Amemiya, 2004).

Diantara metode yang umum digunakan untuk membentuk film tipis pada substrat adalah *spray coating*, *dip-coating* dan *spin coating*. *Spray coating* adalah aplikasi salut plastik, seperti pelapis gel, pada suatu substrat dengan alat *spray gun* (CRC Press LLC, 1989). Sebelum dilapiskan dengan fotokatalis, penyangga dibersihkan terlebih dahulu. Penyemprotan dilakukan pada jarak 20-30 cm dari penyangga.

Dip-coating mengacu pada membenaman suatu substrat kedalam tanki berisi material pelapis, mengeluarkan substrat dari tanki, dan mengeringkan substrat tersebut dengan pengeringan paksa atau pembakaran.

Proses *dip-coating* umumnya dibagi menjadi tiga tahap (Wikipedia, 2008):

1. membenaman substrat, substrat dibenamkan dalam larutan yang berisi material pencelup dengan laju yang konstan.
2. Waktu tunda, substrat dibenamkan secara penuh dan perlahan agar material pencelup dapat melapisi dirinya pada substrat.
3. Penarikan substrat, substrat ditarik, dengan laju konstan untuk mencegah getaran. Semakin cepat laju penarikan substrat, semakin tipis lapisan film yang terbentuk.

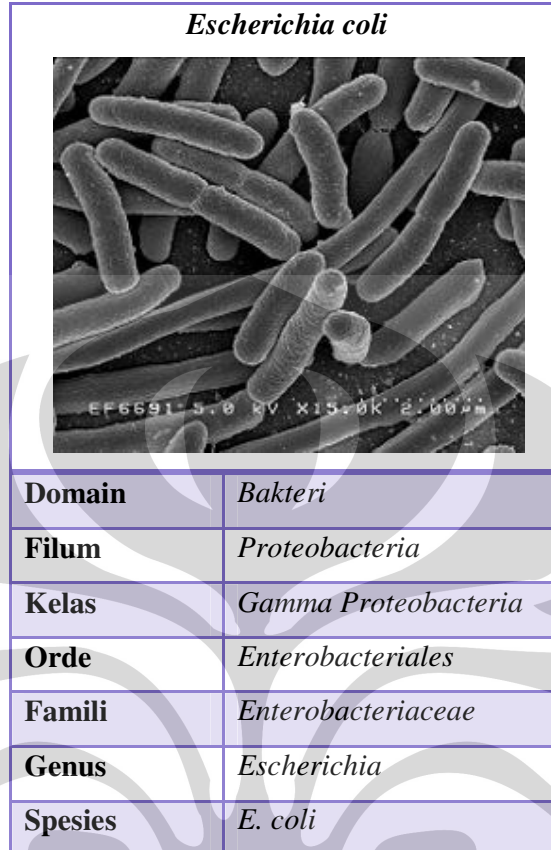
Viskositas dari larutan *dip-coating* sangat penting karena ketebalan film bergantung pada viskositas larutan pada laju penarikan substrat yang konstan. Koefisien viskositas larutan *dip-coating* diukur dengan viscometer Ostwald pada 25 °C. Semua film yang dipreparasi pada substrat kaca adalah transparan, seragam, dan anti retak. Ketebalan film diukur dengan SEM Ketebalan maksimum film dengan satu kali run *dip-coating* adalah ca. 1 μm (Miki, et al., 2004).

Spin-coating adalah prosedur yang digunakan untuk mendapatkan film tipis yang seragam pada substrat datar. Sejumlah larutan diletakkan di atas substrat yang kemudian diputar pada kecepatan tinggi dengan tujuan untuk menyebarkan fluida dengan gaya sentrifugal. Mesin yang digunakan untuk *spin-coating* disebut *spin coater* atau *spinner*. Pemusingan dilanjutkan hingga ketebalan film yang diinginkan pada substrat tercapai. Pelarut yang digunakan umumnya *volatile* dan akan menguap secara perlahan. Jadi semakin tinggi kecepatan angular *spinner*, semakin tipis lapisan film yang dihasilkan. Ketebalan lapisan film juga bergantung pada konsentrasi larutan dan pelarut. Proses *spin coating* secara umum dibagi menjadi empat tahap (Wikipedia, 2008):

1. Deposisi fluida pelapis pada substrat, tahap ini dapat dilakukan dengan menuangkan larutan pelapis ke atas substrat atau dengan menyemprotkan pelapis ke atas permukaan substrat.
2. Substrat dipusingkan dengan laju putaran yang terus bertambah hingga laju putaran yang diinginkan.
3. Substrat dipusingkan pada laju konstan dan faktor viskositas menentukan ketebalan film yang terbentuk.
4. Substrat dipusingkan pada laju konstan dan faktor evaporasi pelarut menentukan ketebalan film yang terbentuk.

2.8 Bakteri *Escherichia coli*

Escherichia coli adalah bakteri tipe batang (Gambar 2.5) dengan ukuran $0,4 - 0,7 \mu\text{m} \times 1,4 \mu\text{m}$, tidak membentuk spora, tidak tahan asam dan dapat memfermentasikan laktosa (Budiman, 2007). *E.coli* tersebar luas di usus manusia dan mamalia berdarah panas, merupakan anaerob fakultatif yang utama dalam usus dan bagian dari flora usus yang esensial untuk menjaga fisiologi dari inang yang sehat. *E.coli* bagian dari keluarga *Enterobacteriaceae*, termasuk di dalamnya bakteri patogen seperti *Salmonella*, *Shigella*, dan *Yersinia*. Meskipun sebagian besar jenis *E.coli* bukan bakteri patogen, namun ada beberapa jenis *E.coli* yang dapat menyebabkan infeksi dalam sistem kekebalan inangnya. Ada juga jenis patogen *E.coli* yang apabila tertelan, menyebabkan penyakit pada sistem pencernaan manusia (Feng, Weagant, Grant, 2002).



Gambar 2.5 *Escherichia coli*

(Sumber: www.wikipedia.org, 05 April 2008)

Escherichia coli biasa digunakan sebagai indikator biologis efisiensi disinfektan dalam air (Rincon, Pulgarin, 2004). Tahun 1892, Shardingger mengajukan penggunaan *E.coli* sebagai indikator kontaminasi feces. Berdasarkan premis bahwa keberadaan *E.coli* pada feces manusia dan mamalia melimpah, namun tidak pada organisme lain. Kemudian, karena *E.coli* mudah dideteksi dari kemampuannya memfermentasikan glukosa menjadi laktosa, maka lebih mudah untuk diisolasi dibandingkan patogen usus. Karenanya, keberadaan *E.coli* di air dan makanan dapat diterima sebagai indikasi adanya kontaminasi fecal yang baru dan kemungkinan terdapat patogen.

Meskipun konsep penggunaan *E.coli* sebagai indikator tak langsung adanya resiko kesehatan banyak diperbincangkan, namun penerapannya rumit, dengan kehadiran bakteri enteron lainnya seperti *Citrobacter*, *Klebsiella* dan

Enterobacter yapat memfermentasikan laktosa dan memiliki fenotif yang sama dengan *E.coli*, sehingga sulit dibedakan. Hasilnya, bentuk koliform diciptakan untuk mendeskripsikan grup bakteri enteron tersebut. Koliform bukan klasifikasi berdasarkan taksonomi, namun lebih pada definisi yang digunakan untuk mendeskripsikan suatu kelompok bakteri gram-negatif berbentuk batang anaerob fakultatif yang memfermentasikan laktosa untuk memproduksi asam dan gas selama 8 jam pada temperatur 35°C. Tahun 1914, *U.S. Public Health Service* mengadopsi penyebutan koliform sebagai standar umum parameter kebersihan.

Meskipun koliform mudah dideteksi, hubungannya dengan kontaminasi *fecal* masih dipertanyakan, sebab koliform dapat ditemui secara alami di lingkungan. Hal tersebut merupakan awal penelitian digunakannya koliform sebagai indikator kontaminasi lingkungan. Fecal koliform adalah suatu subset dari koliform total yang tumbuh dan memfermentasikan laktosa pada temperatur inkubasi yang ditingkatkan, atau disebut koliform termotoleran. Analisis koliform *fecal* dilakukan pada 45,5 °C untuk uji makanan. Uji air dilakukan pada temperatur 44,5 °C.

Grup koliform *fecal* sebagian besar terdiri dari *E.coli* dan bakteri enteron lain seperti *Klebsiella* yang dapat memfermentasikan laktosa pada temperatur di atas, dan karenanya, juga dikenal sebagai koliform *fecal*. Termasuknya *Klebsiella species* dalam definisi koliform *fecal* menyusutkan hubungan kelompok ini dengan kontaminasi *fecal*. Sehingga, *E.coli* muncul kembali sebagai suatu indikator, dimudahkan dengan adanya metode terbaru yang dapat mengidentifikasi *E.coli* dengan cepat.

Saat ini, ketiga kelompok tersebut digunakan sebagai indikator, namun untuk aplikasi yang berbeda. Pendeteksian koliform digunakan sebagai indikator kualitas kebersihan air atau sebagai indikator umum kondisi kebersihan dari lingkungan pengolahan makanan. Koliform *fecal* merupakan indikator standar untuk pemilihan kerang air, dan *E. coli* digunakan untuk mengindikasikan adanya kontaminasi *fecal* baru atau proses pengolahan yang tidak sehat. (Feng, Weagant, Grant, 2002).

2.9 Proses Disinfeksi

Disinfeksi ialah penidakaktifan mikroorganisme penyebab penyakit. Disinfeksi digunakan pada objek tak-hidup, berkebalikan dengan antiseptik yang digunakan pada jaringan hidup. Disinfeksi selalu melibatkan bahan kimia, panas atau sinar ultraviolet.

Disinfeksi dapat digolongkan dalam tiga golongan (Centre for Disease Control, 2003):

1. Disinfeksi tingkat tinggi (*High level disinfection*)

Disinfeksi tingkat tinggi dapat menghancurkan bakteri vegetatif, mikrobakteri, jamur dan virus berlipid dan virus non-lipid; namun tidak resisten terhadap spora bakteri. Disinfektan kimiawi tingkat tinggi mampu mensterilisasi apabila waktu kontak ditingkatkan. Materi harus secara menyeluruh dibersihkan sebelum dilakukan disinfeksi tingkat tinggi.

2. Disinfeksi tingkat menengah (*Intermediate level disinfection*)

Disinfeksi tingkat menengah dapat membunuh bakteri vegetatif, sebagian besar virus dan jamur; namun tidak resisten terhadap spora bakteri.

3. Disinfeksi tingkat rendah (*Low level disinfection*)

Disinfeksi tingkat rendah dapat membunuh sebagian besar bakteri vegetatif, beberapa jenis jamur, dan virus berlipid seperti virus hepatitis B, C, hantavirus dan HIV. Disinfeksi tingkat rendah tidak resisten terhadap mikrobakteri dan spora bakteri. Disinfeksi tingkat rendah umumnya digunakan untuk membersihkan permukaan lingkungan.

Suatu material dapat dikategorikan sebagai *antibacterial agent* apabila pengukuran *Minimum Inhibitory Concentration* (MIC) maksimum dari bahan tersebut adalah 800 µg/ml (Amemiya, 2004). Berikut adalah nilai MIC untuk perwakilan beberapa bakteri:

Tabel 2.7 *Minimum Inhibitory Concentration (MIC) untuk bakteri*

Bakteri sampel	MIC ($\mu\text{g/mL}$)	Organisasi penguji
<i>Staphylococcus aureus</i> MCMR9901	200	Microbiology Laboratory, Faculty of Pharmacy, Meijo University
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> NEPA0015	200	
<i>Pseudomonas putida</i>	100	
<i>Burkholderia cepacia</i> NEPC0001	200	
<i>Serratia marcescens</i> NESM0002	200	
<i>Escherichia coli</i> ENEC001	100	
<i>Salmonella typhimurium</i>	100	
<i>Listeria monocytogenes</i> VTU206	200	Japan Food Research Laboratories

Sumber: *Three Bond Technical News (January 1, 2004)*

Pengolahan air minum konvensional dapat melalui dua metode (Juraneck, 1997):

1. Disinfeksi kimia

Disinfeksi kimia adalah metode pengolahan air minum yang paling luas penggunaannya. Disinfeksi kimia dapat membunuh berbagai mikroorganisme berbahaya yang terdapat di air. Disinfektan yang umum digunakan adalah klorin. Disinfektan lainnya yaitu kloramin, klorin dioksida dan ozon.

2. Filtrasi

Proses filtrasi konvensional yang digunakan oleh sebagian besar pengolahan air permukaan umumnya terdiri dari beberapa langkah: koagulasi-flokulasi, sedimentasi dan filtrasi. Selama langkah pertama proses, bahan kimia (koagulan) ditambahkan ke air yang menyebabkan partikel suspensi yang kecil saling melekat (flokulasi) untuk membentuk partikel yang lebih besar. Kedua jenis partikel akan mengendap di bagian bawah (sedimentasi) sehingga lebih mudah dipisahkan dengan filter pengolahan air. Pada prinsipnya proses ini ialah pemisahan pasir sedimen dari air.

Keberhasilan proses koagulasi-flokulasi ini beresiko tinggi untuk pemisahan protozoa resisten-klorin (ukuran 1-20 mikron) yang dapat dengan mudah lolos melalui pori ukuran 50-70 mikron antara butiran-butiran pasir dalam

proses filtrasi. Proses pengadukan dengan air yang buruk dan kesalahan jumlah penambahan koagulan merupakan penyebab umum kegagalan proses filtrasi. Jumlah koagulan yang dibutuhkan dapat berubah-ubah dengan perubahan pH air umpan, temperatur, atau kekeruhan. Keberhasilan filtrasi sangat bergantung pada operator penyaringan yang terlatih dan berpengalaman.

Metode pengujian kelayakan air minum dapat dilakukan dengan beberapa metode, diantaranya (Juraneck, 1997):

1. Tes Bakteri Koliform

Bakteri koliform sering ditemukan di lingkungan dan umumnya tidak berbahaya. Adanya bakteri tersebut dalam air minum merupakan akibat adanya masalah dengan pengolahan air atau pipa distribusi, dan mengindikasikan air tersebut mungkin terkontaminasi organisme yang dapat menyebabkan penyakit. Tes total koliform menentukan jumlah bakteri koliform aerob yang hidup dalam sampel air.

Apabila hasil tes total koliform pada sampel air minum positif (1 atau lebih koliform per 100 mL air), baik *fecal* koliform atau tes *Escherichia coli* harus ditunjukkan untuk menentukan apabila ada bakteri koliform yang ditemukan atau asal *fecal*. Fasilitas air biasanya mengumpulkan sampel air tambahan untuk tujuan ini selama 24 jam pemberitahuan tes. Ketika tes bakteri *fecal* positif, peningkatan penyelidikan dari pengolahan air dan sistem distribusi air diaktifkan.

2. Tes Kekeruhan

Tes kekeruhan menentukan jumlah partikel suspensi atau “kesuraman” dalam air. Kekeruhan diukur dalam satuan *nephelometric turbidity units* (NTU). Kekeruhan yang tinggi pada air hasil olahan dapat menjadi indikator kontaminasi air, filtrasi yang tidak cukup, atau masalah sistem air lainnya. 95% dari seluruh pembacaan pasca filtrasi harus ≤ 0.5 NTU untuk memenuhi standar EPA.

Environmental Protection Agency (EPA) menggunakan *E. coli* sebagai indikator terdapatnya kontaminasi *fecal*. Data indikator penting karena penyakit dapat timbul dari mengkonsumsi air tanah yang terkena kontaminasi *fecal* tanpa adanya virus yang teridentifikasi (*National Primary Drinking Water*, 2006).

2.10 Proses Disinfeksi dengan Fotokatalisis

Teknologi fotokatalisis menarik untuk dikembangkan sebagai disinfeksi mikroorganisme karena kemampuannya untuk mendegradasi mikroorganisme dalam konsentrasi yang sangat kecil tanpa menghasilkan produk samping yang berbahaya (M.F Kabir et al., 2003). Penelitian fotokatalisis TiO_2 dikembangkan secara luas untuk menguji kemampuannya dalam membunuh virus, bakteri, fungi, alga, dan sel kanker (Zheng Huang et al., 1999). Ketika diterangi dengan sinar ultraviolet-dekat, titanium oksida (TiO_2) menunjukkan aktivitas anti bakteri yang baik (Huang, et al., 1999; Lu, et al., 2003).

Kematian sel bakteri oleh fotokatalisis disebabkan berkurangnya permeabilitas sel. Kontak pertama fotokatalis dengan sel terjadi pada dinding sel, dimana reaksi oksidasi oleh fotokatalis akan merusak dinding sel bakteri. Bakteri dengan dinding sel yang rusak masih merupakan bakteri yang sehat, namun tanpa perlindungan. Setelah menghilangkan perlindungan dinding sel, selanjutnya reaksi oksidasi terjadi di membran sitoplasma, Kerusakan oksidatif yang terjadi akan semakin meningkatkan permeabilitas sel, dan menyebabkan isi dalam sel mengalir bebas keluar sel yang menyebabkan kematian sel. Partikel TiO_2 yang bebas juga dapat mencapai membran sel yang sudah rusak, dan serangan langsung tersebut dapat mempercepat kematian sel. (Huang, 1999).

Teknologi fotokatalisis TiO_2 dapat menguraikan spora bakteri apabila mendapatkan energi UV-A yang besar (Goswami, 1997). Kinerja fotokatalis TiO_2 dalam menguraikan patogen semakin menurun dengan urutan berikut: *E. coli* DH5 α < *P.aeruginosa* < *A.polyphaga* (trofozoit) < *C.albicans* < *F. solani* < *B. subtilis* (spora) < *A. polyphaga* (kista).

Percobaan antara pemaparan patogen dengan sinar matahari langsung dan dengan penambahan penfotokatalis TiO_2 menunjukkan bahwa penambahan fotokatalis TiO_2 dapat mereduksi waktu yang diperlukan untuk proses oksidasi patogen hingga 50% (Lonnen, et al., 2004).

2.11 Adsorpsi

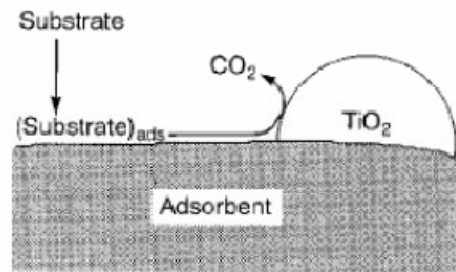
Adsorpsi adalah suatu istilah yang digunakan untuk menggambarkan terjerapnya suatu zat (molekul atau ion) pada permukaan adsorben. Mekanisme

menjerapan tersebut dapat dibedakan menjadi dua yaitu, jerapan secara fisiska (fisisorpsi) dan jerapan secara kimia (kemisorpsi). Pada proses fisisorpsi gaya yang mengikat adsorbat oleh adsorben adalah gaya-gaya van der Waals. Molekul terikat sangat lemah dan energi yang dilepaskan pada adsorpsi fisika relatif rendah sekitar 20 kJ/mol (Castellan, 1982). Sedangkan pada proses adsorpsi kimia, interaksi adsorbat dengan adsorben melalui pembentukan ikatan kimia. Kemisorpsi terjadi diawali dengan adsorpsi fisik, yaitu partikel-partikel adsorbat mendekati ke permukaan adsorben melalui gaya van der Waals atau melalui ikatan hidrogen, kemudian diikuti oleh adsorpsi kimia. Partikel melekat pada permukaan dengan membentuk ikatan kimia (biasanya ikatan kovalen), dan cenderung mencari tempat yang memaksimalkan bilangan koordinasi dengan substrat (Atkins, 1999).

2.11.1 Kombinasi Proses Adsorpsi-Fotokatalisis

Penyangga katalis TiO_2 harus memiliki konfigurasi dan luas area yang besar sehingga memungkinkan radiasi UV ke seluruh partikel katalis berlangsung efisien (meningkatkan luas reaksi dan luas penyinaran) (Tomosvka et al., 2007). Salah satu tahap kritis dalam reaksi oksidasi senyawa organik adalah tahap inisiasi pembentukan radikal hidroksil (oksidator polutan) yang diproduksi di permukaan fotokatalis. Oleh karenanya, adsorbabilitas polutan ke permukaan fotokatalis adalah suatu faktor yang penting dalam mengevaluasi efisiensi reaksi fotokatalitik. Untuk meningkatkan efisiensi dekomposisi, fotokatalis sebaiknya dimuati dengan adsorben tertentu untuk mengkonsentrasikan polutan pada permukaan fotokatalis.

Memilih adsorben yang tepat dengan kemampuan adsorpsi yang lebih baik perlu dilakukan (Lu et al., 1999). Ide penggunaan adsorben dengan luas permukaan yang besar dan kapasitas adsorpsi tinggi, misalnya zeolit, karbon aktif, dan silika terbukti mampu meningkatkan aktivitas katalis. Dengan penggunaan adsorben, adsorpsi senyawa objek pada permukaan penyangga dan difusi pada permukaan interfasa antara sisi aktif fotokatalisis dan sisi inert yang adsorptif akan terjadi seperti yang terlihat pada Gambar 2.6. Selain itu, deaktivasi katalis dan



Gambar 2.6 Mekanisme degradasi polutan pada adsorben sebagai penyangga TiO₂

(Slamet et al., 2007)

kemungkinan terbentuknya senyawa *intermediate* yang berbahaya akan menurun secara signifikan. Walaupun aktivitas fotokatalitik yang dihasilkan bukanlah yang terbaik, proses semacam ini sangatlah efektif untuk konsentrasi polutan tingkat rendah seperti untuk aplikasi dalam ruangan.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan manfaat penggunaan adsorben sebagai penyangga TiO₂ adalah (Matsuoka dan Anpo, 2003; Takeda et al., 1995; Torimoto et al., 1996; Yoneyama dan Torimoto, 2000):

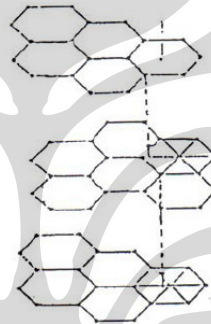
- a. Meningkatkan konsentrasi senyawa yang akan didegradasi pada sekitar ruang TiO₂, sehingga dapat meningkatkan laju reaksi.
- b. Meningkatkan kemampuan adsorpsi katalis. Bila kemampuan adsorpsi meningkat maka kinetika fotokatalitik meningkat karena fotokatalis dapat langsung mengoksidasi polutan tersebut.
- c. Penggunaan penyangga dapat mendispersikan fotokatalis TiO₂ sehingga luas permukaan katalis menjadi lebih besar dan fotokatalis menjadi lebih aktif.
- d. Polutan teradsorpsi oleh penyangga kemudian dioksidasi oleh fotokatalis, sehingga *intermediate* yang terbentuk pun akan teradsorpsi oleh penyangga yang selanjutnya akan dioksidasi lagi oleh fotokatalis.
- e. Polutan yang teradsorpsi oleh penyangga dapat langsung dioksidasi oleh fotokatalis menjadi CO₂ dan H₂O sehingga adsorben akan membutuhkan waktu yang cukup lama untuk menjadi jenuh. Jadi adsorben diregenerasi

secara insitu oleh fotokatalis, sehingga proses degradasi polutan dapat berlangsung dalam waktu yang cukup lama dan lebih efisien.

2.11.2 Adsorben Karbon Aktif

Karbon aktif biasanya dibuat dengan dekomposisi termal dari material berkarbon yang diikuti dengan aktivasi dengan steam atau karbon dioksida pada suhu tinggi.

Struktur karbon aktif pada Gambar 2.7 mengandung mikrokrystalit dari grafit, akan tetapi mikrokrystalit ini terkumpul pada arah yang acak. Ruang antar kristal inilah yang membentuk pori mikro (Ruthven; Yang, 1987).



Gambar 2.7 Struktur karbon aktif (Figuredo, 1986)

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

Karbon aktif adalah senyawa kompleks yang sulit diklasifikasikan berdasarkan sifat dasar, karakteristik permukaan dan metode preparasinya. Namun karbon aktif dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Wikipedia, 2008):

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

Distribusi pori dan luas pori total berhubungan dengan kondisi awal pirolisis dan prosedur aktivasinya. Karakteristik dari karbon aktif dapat dilihat pada tabel 2.8 (Ruthven):

Tabel 2.8 Ukuran pori karbon aktif

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

Sumber: Ruthven

2.12 Adsorpsi Isotermal Langmuir

Adsorpsi isothermal Langmuir merupakan pendekatan yang paling umum dan terbaik untuk diaplikasikan pada katalis karena sederhana dan menyediakan titik awal untuk memformulasikan banyak ekspresi kinetis untuk reaksi katalitis (Richardson, 1989).

Isoterm adsorpsi Langmuir didasarkan atas beberapa asumsi yaitu: (a) adsorpsi hanya terjadi pada lapisan tunggal (monolayer), (b) panas adsorpsi tidak tergantung pada penutupan permukaan, dan (c) semua situs dan permukaannya bersifat homogen.

Berdasarkan adsorpsi isotermis Langmuir, kesetimbangan adsorpsi diasumsikan konstan sepanjang waktu. Konsentrasi dari komponen teradsorpsi ditentukan dari kesetimbangan adsorpsi yang diberikan oleh teori adsorpsi isotermis Langmuir. Jika terdapat 2 atau lebih komponen maka akan terjadi kompetisi untuk dapat teradsorpsi pada sejumlah active sites yang ada.

Selanjutnya reaksi diasumsikan terjadi antara komponen yang teradsorpsi pada permukaan katalis (Richardson, 1989).

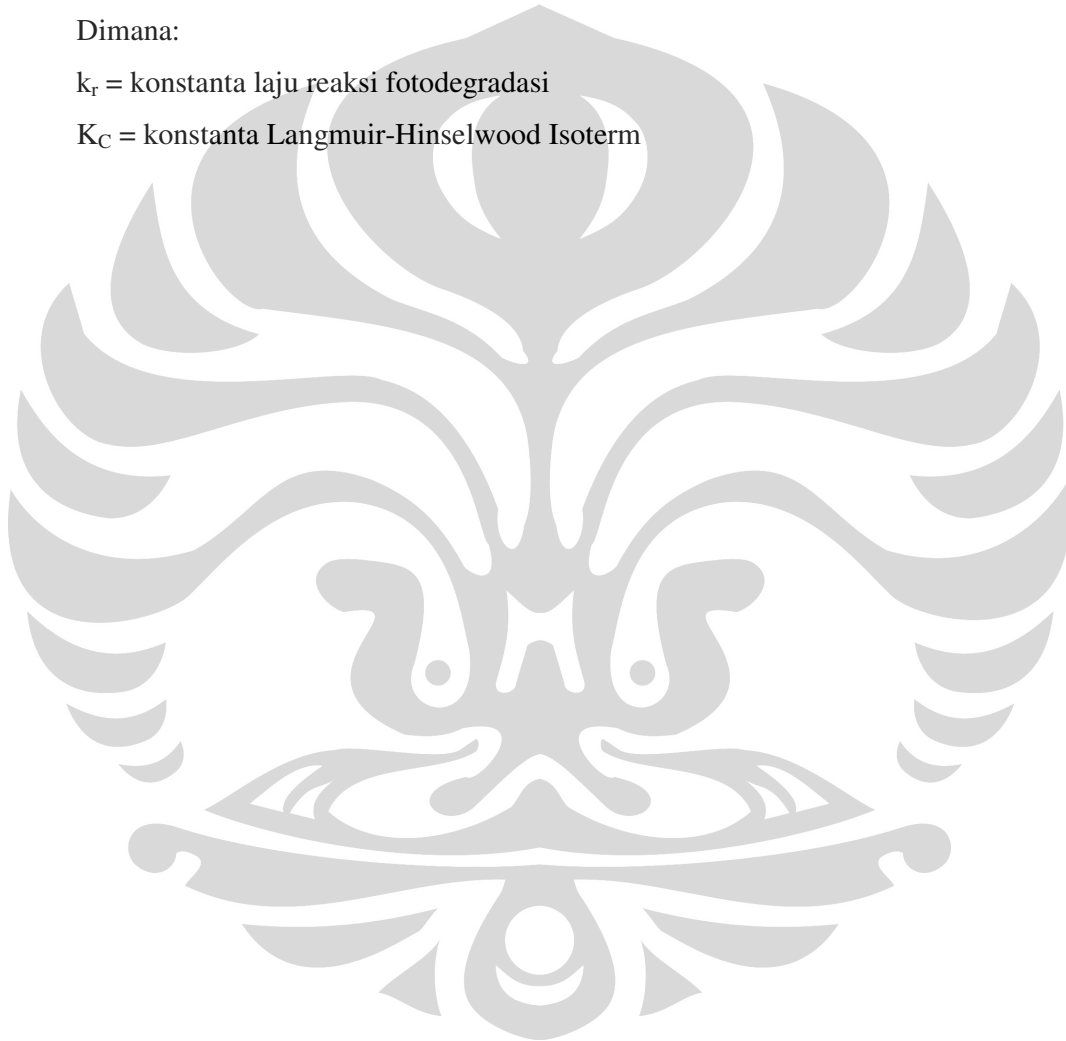
Kinetika fotokatalisis mengikuti mekanisme Langmuir-Hinselwood untuk katalis heterogen dimana laju reaksi (r) sebanding dengan konsentrasi senyawa organik pada waktu t (θ) berdasarkan persamaan:

$$-r = -\frac{dC}{dt} = k_r \cdot \theta = \frac{k_r K_C C}{1 + K_C C} \quad (2.14)$$

Dimana:

k_r = konstanta laju reaksi fotodegradasi

K_C = konstanta Langmuir-Hinselwood Isoterm

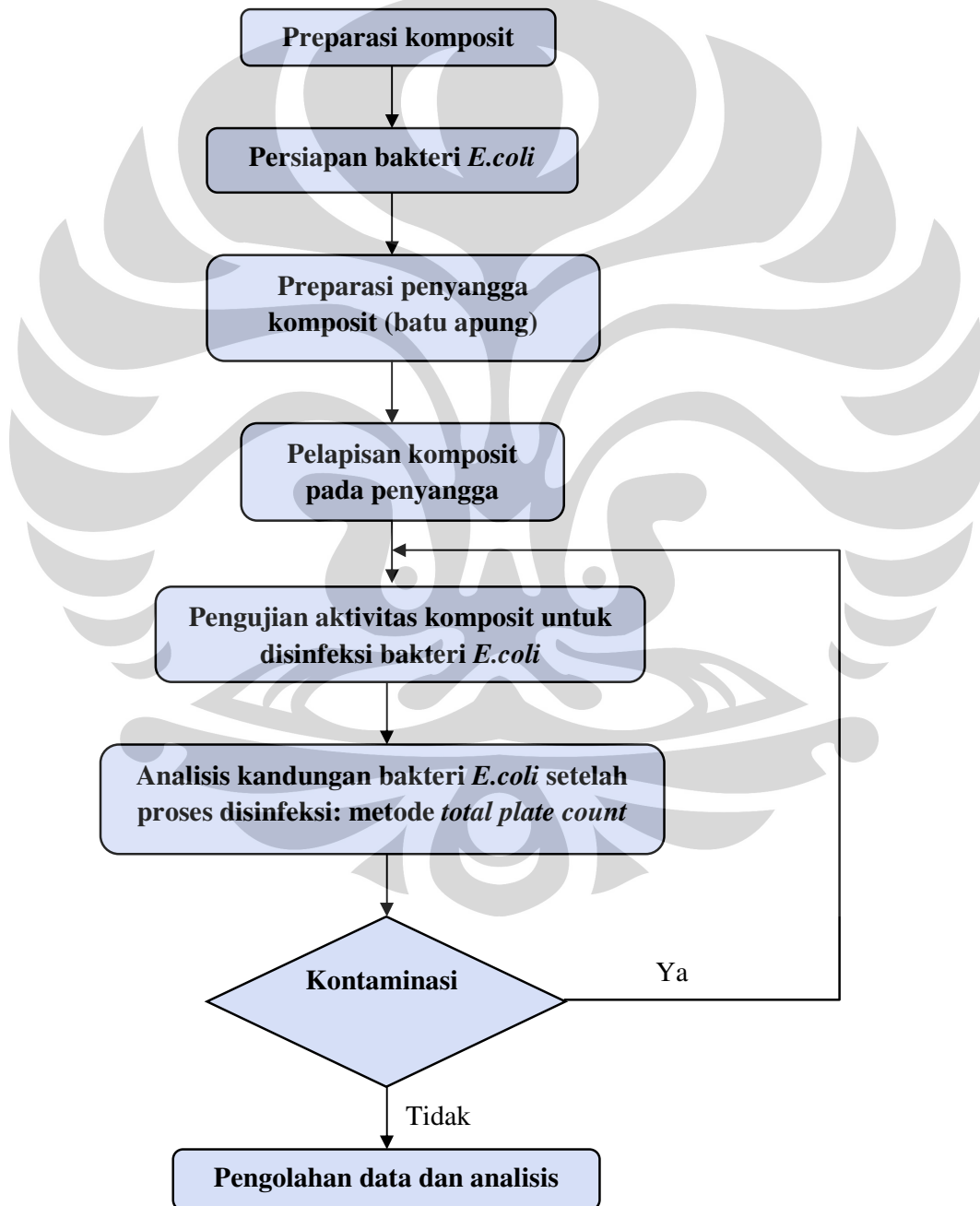


BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian diawali dengan tahap preparasi komposit dalam bentuk film yang dilanjutkan dengan uji aktivitas komposit untuk disinfeksi bakteri *E.coli*. Keseluruhan rancangan penelitian dapat dilihat pada skema penelitian berikut:

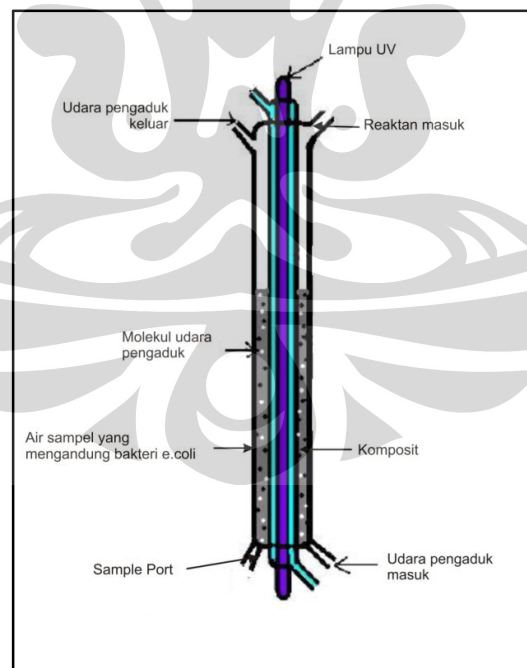


Komposit berupa fotokatalis TiO_2 yang ditambahkan dengan adsorben karbon aktif. Komposit yang telah dipreparasi kemudian dilapiskan pada batu apung sebagai penyangga dengan pemusingan dan pemanasan menggunakan *hot plate*. Analisis aktivitas komposit dalam mendisinfeksi bakteri *E.coli* dilakukan dengan metode *total plate count* (TPC). Sampel air dari keluaran fotoreaktor diambil untuk diuji total kandungan bakteri *E.coli*-nya. Data konsentrasi bakteri *E.coli* pada sampel air dianalisis dan dibuat kesimpulan penelitian.

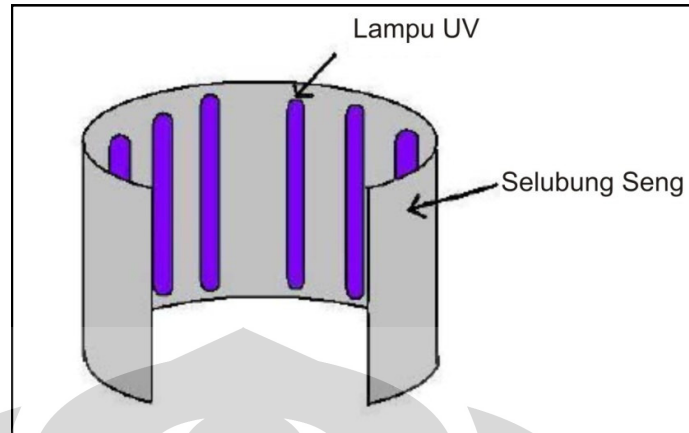
3.2 Peralatan dan Bahan Penelitian

3.2.1 Fotoreaktor

Reaktor fotokatalitik teraerasi terdiri dari sebuah lampu UV di tengah dan 8 buah lampu UV lainnya yang terdapat di selubung luar reaktor. Di sekeliling lampu UV dalam dialirkan udara menggunakan kompresor yang bertujuan sebagai penyedia oksigen bagi bakteri *E.coli* serta sebagai pengaduk agar kontak antara reaktan dan komposit yang dilapiskan pada penyangga batu apung dapat berjalan secara maksimal. Visualisasi fotoreaktor dapat dilihat pada Gambar 3.1 dan 3.2.



Gambar 3.1 Skema fotoreaktor teraerasi bagian dalam



Gambar 3.2 Skema selubung bagian luar fotoreaktor

3.2.2 Peralatan Sintesis Komposit

- Beaker glass 250 mL, 500 mL dan 100 mL
- Gelas ukur
- Corong
- Spatula
- Pipet tetes
- *Hot plate & Magnetic stirrer*
- Stop watch
- Cawan porselen
- *Atmospheric furnace*
- Alat ultrasonikasi

3.2.3 Peralatan Uji Aktivitas dan Analisis Produk

- Labu Erlenmeyer
- Tabung reaksi
- Cawan petri
- Spatel
- Spidol
- Appendove tube
- Bunsen
- Yellow tip
- Blue tip
- Transfer pipet

3.2.4 Bahan Sintesis Komposit

- TiO₂ Degussa-P25
- Karbon aktif
- *tetraethyl orthosilicate (TEOS) 98%*
- C₂H₅OH (etanol)
- H₂O
- HNO₃

3.3 Tahap Persiapan Fotoreaktor

Reaktor ini disiapkan untuk proses disinfeksi *E.coli* pada penyediaan air minum secara *batch*. Proses persiapan fotoreaktor terdiri dari uji kebocoran dan uji kelengkapan suku cadang fotoreaktor.

3.4 Preparasi Komposit

Tahap preparasi komposit mencakup preparasi karbon aktif dan sintesis TiO_2 membentuk komposit TiO_2 -karbon aktif film. Komposit ini kemudian dilapiskan pada penyangga berupa batu apung dengan pemusingan dan pemanasan menggunakan *hot plate* sampai komposit melekat pada seluruh permukaan penyangga. Bahan dasar yang digunakan adalah TiO_2 komersial Degussa P-25 dan karbon aktif merek Karbosorb[®].

Preparasi Karbon Aktif :

1. Mencuci karbon aktif dengan air keran sampai air sisa cucian karbon aktif tidak berwarna hitam.
2. Memasukkan karbon aktif ke dalam *atmospheric furnace* pada suhu 100 °C selama 1 jam untuk dikeringkan.
3. Menumbuk karbon aktif hingga didapatkan serbuk karbon aktif dengan diameter 1-2 mm dan 2-5 mm.
4. Memasukkan karbon aktif ke dalam *atmospheric furnace* pada suhu 200 °C selama 1,5 jam.

Sintesis TiO_2 :

1. Melarutkan TiO_2 Degussa P-25 ke dalam 80 mL air demin.
2. Mengaduk larutan secara sonikasi selama 30 menit.
3. Menambahkan TEOS dan HNO_3 ke dalam larutan.
4. Mengaduk larutan secara sonikasi selama 30 menit.
5. Menambahkan karbon aktif sesuai dengan konsentrasi yang akan divariasikan.
6. Mengaduk larutan secara sonikasi selama 15 menit.

Preparasi Batu Apung :

1. Mencuci dan mengeringkan batu apung di dalam *furnace* hingga kandungan air yang teradsorpsi pada batu apung menguap seluruhnya.
2. Menumbuk dan mengayak batu apung untuk memperoleh ukuran yang diinginkan yaitu diameter 1-2 mm dan 2-5 mm sebagai variasi ukuran penyangga.

Pelapisan Komposit :

1. Melapiskan larutan komposit pada batu apung dengan pemusingan dan pemanasan pada alat *hot plate* dengan kecepatan putaran skala 6, temperatur 300°C sampai seluruh katalis melekat pada permukaan penyangga.
2. Memasukkan Penyangga yang telah dilapisi komposit ke dalam *furnace* pada suhu 150 °C selama 120 menit.
3. Mendinginkan penyangga pada suhu ruang selama 24 jam.

3.5 Uji Kinerja Komposit

Uji kinerja komposit dilakukan dengan metode *total plate count*. Pengambilan sampel air dilakukan pada menit ke 0, 10, 20, 30, 60 dan 90 untuk dianalisis jumlah bakteri *E.coli* yang terkandung di dalam sampel. Komposit yang diujikan divariasikan dengan penambahan karbon aktif sebesar 0% (tanpa penambahan), 2%, 5%, dan 10% terhadap fotokatalis TiO₂.

3.5.1 Penentuan Variabel Operasi

Variabel Tetap:

1. Jenis bakteri yang diujikan yaitu *E.coli*
2. Jenis komposit yang digunakan yaitu TiO₂-karbon aktif

Variabel Bebas:

1. Konsentrasi karbon aktif dalam komposit yaitu 0%, 2%, 5%, dan 10%.
2. Ukuran Penyangga batu apung yaitu diameter 1-2 mm dan 2-5 mm.
3. Konsentrasi awal bakteri *E.coli* yaitu $7,7 \times 10^5$ sel/mL, $6,9 \times 10^4$ sel/mL, dan $6,1 \times 10^4$ sel/mL
4. Waktu reaksi yaitu 0, 10, 20, 30, 60 dan 90 menit.

Variabel Terikat:

Konsentrasi bakteri *E.coli* setelah proses disinfeksi

3.5.2 Prosedur Pengambilan Data

Sampel air diambil pada menit ke 0, 10, 20, 30, 60, dan 90 untuk setiap variasi komposisi karbon aktif dalam komposit, variasi ukuran penyangga dan variasi konsentrasi awal bakteri. Selanjutnya kandungan *E.coli* dalam sampel air akan dihitung dengan metode TPC (*total plate count*). Prosedur uji TPC pada sampel air keluaran fotoreaktor adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan beberapa cawan petri yang sudah disterilisasi di dalam oven pada suhu 150 °C selama 2 jam.
2. Menyiapkan NA (nutrien agar) cair di dalam erlenmeyer dan menjaganya pada temperatur 30 °C.
3. Mengambil 1 mL larutan contoh dari fotoreaktor dan menambahkan 9 mL air demineralisasi, dikocok dalam tabung reaksi 1 untuk dilakukan pengenceran 10^{-1} kali.
4. Mengambil 1 mL larutan contoh dari tabung reaksi 1 dan menambahkan 9 mL air distilasi, dikocok dalam tabung reaksi 2 untuk dilakukan pengenceran 10^{-2} kali.
5. Mengambil 50 μ L larutan contoh dari tabung reaksi 2, diletakkan dalam petri yang berisi medium agar. Untuk meningkatkan ketepatan pengujian, pemupukan dilakukan secara duplo.
6. Menuangkan 10 mL NA ke dalam masing-masing cawan petri yang sudah berisi larutan contoh.
7. Mengaduk larutan contoh dan NA dengan gerakan searah jarum jam yang dilanjutkan dengan gerakan berlawanan dengan arah jarum jam, atau dengan gerakan seperti angka delapan, masing-masing sebanyak 5 kali.
8. Membiarkan cawan petri pada posisi horisontal sampai mengeras, kemudian membalik posisi cawan.
9. Menginkubasi petri pada temperatur 35 °C selama 48 jam.
10. Menghitung koloni bakteri *E.coli* yang terbentuk secara manual.

3.5.3 Pengolahan dan Analisis Data

Untuk melaporkan hasil analisis mikrobiologi digunakan suatu standar yang disebut *Standard Plate Count* (SPC) dengan satuan *colony-forming units* (CFU) per milliliter atau per gram, dan hasil yang dilaporkan hanya terdiri dari dua angka, yaitu angka pertama di depan koma dan angka kedua di belakang koma. Jika angka yang ketiga sama dengan atau lebih besar dari 5, maka dilakukan pembulatan satu angka lebih tinggi dari angka kedua.

Data yang diperoleh digambarkan dalam bentuk grafik perubahan jumlah koloni *E.coli* terhadap waktu tinggal di dalam fotoreaktor untuk variasi konsentrasi karbon aktif dalam komposit, variasi ukuran penyangga, dan variasi konsentrasi awal bakteri *E.coli*.

Dari grafik proses tersebut dapat dianalisis laju disinfeksi untuk menentukan konsentrasi optimal karbon aktif di dalam komposit. Kemudian dilakukan perhitungan waktu yang diperlukan untuk mendisinfeksi kandungan bakteri *E.coli* hingga mencapai ambang batas yang aman untuk dikonsumsi. Waktu perkiraan tersebut diperoleh dari data variasi konsentrasi awal dengan menggunakan persamaan Langmuir-Hinselwood.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Katalis yang digunakan adalah komposit TiO₂-Karbon Aktif dalam bentuk film dengan penyangga berupa batu apung yang memiliki diameter 2–5 mm. TiO₂ dan karbon aktif dicampurkan membentuk komposit dengan variasi penambahan karbon aktif sebesar 2%, 5% dan 10%. Sebesar 0,13 gram komposit dilapiskan pada batu apung untuk setiap variasi dengan pemusingan dan pemanasan, sehingga semua suspensi katalis terlapiskan pada permukaan batu apung.

Untuk menguji kinerja dari komposit film yang dibuat, digunakan sampel berupa 300 mL air yang mengandung $6,6 - 7,2 \times 10^5$ sel bakteri *E.coli*/mL sampel. Bakteri *E.coli* yang digunakan adalah yang berumur 24 jam, karena diperkirakan pada usia 24 jam bakteri *E.coli* telah melewati fase pertumbuhan awal dan memasuki fase logaritmiknya seperti dapat dilihat pada Gambar 2.1.

Tujuan penggunaan bakteri pada fase logaritmik ini karena metode analisis yang digunakan berupa TPC yang basisnya adalah menghitung jumlah sel hidup/*viable count*. Apabila bakteri tidak berada pada fase logaritmik maka pembelahan sel untuk membentuk koloni tidak berlangsung sehingga penghitungan bakteri tidak bisa dilihat langsung dengan mata tanpa menggunakan mikroskop.

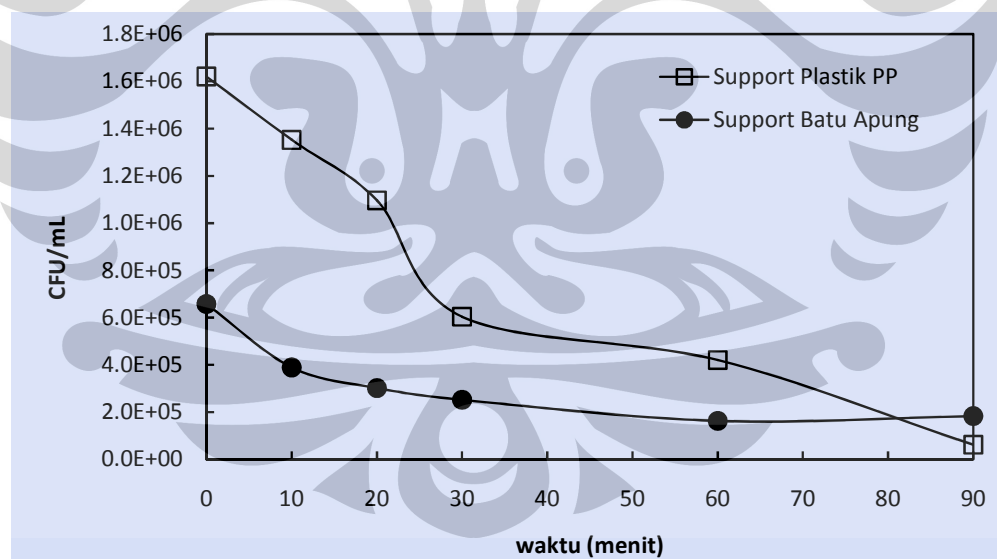
Setelah diperoleh laju disinfeksi bakteri *E.coli* yang paling optimum, dilakukan variasi diameter penyangga dengan menggunakan batu apung berdiameter 1-2 mm serta variasi konsentrasi awal (C_0) sebesar 10^4 dan 10^5 cfu/mL bakteri *E.coli* dalam sampel. Kedua variasi dilakukan untuk memperoleh air dengan jumlah kandungan bakteri *E.coli* mendekati 0 sel/mL sampel.

Penentuan efektivitas komposit sebagai disinfektan dilakukan dengan uji kinerja dalam mendisinfeksi kandungan bakteri *E.coli* dalam air. Efektivitas komposit dilihat dari seberapa besar kandungan *E.coli* yang terdisinfeksi selama selang waktu tertentu serta bagaimana menentukan variabel-variabel yang berperan dalam penelitian dapat diuji untuk memperoleh kondisi yang memungkinkan seluruh kandungan *E.coli* dalam sampel dapat terdisinfeksi.

4.1 Penyangga Fotokatalis

Pada preparasi fotokatalis film ini, sebanyak 80 mL sol TiO_2 dilapiskan pada penyangga plastik PP dan batu apung. Plastik PP yang digunakan sebanyak 3 lembar dengan total luas permukaan 540 cm^2 , sedangkan batu apung yang digunakan berupa butiran dengan diameter 2-5 mm seberat 20 gram. Penyangga yang telah dilapisi kemudian dipanaskan di furnace pada suhu $150 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam dan dilakukan uji kinerja fotokatalis TiO_2 dengan penyinaran lampu UV menggunakan kedua jenis penyangga tersebut.

Uji kinerja menggunakan 1 mL suspensi bakteri *E.coli* usia 24 jam dalam 300 mL air demineralisasi. Gambar 4.1 menunjukkan bahwa pada 20 menit pertama, pengurangan bakteri *E.coli* jika menggunakan penyangga batu apung adalah sebesar 54% dari jumlah awalnya, lebih besar dibandingkan jika menggunakan penyangga plastik PP yaitu 32%. Selanjutnya konversi cenderung konstan pada batu apung dan terus meningkat pada plastik PP sampai akhir proses di menit ke-90.



Gambar 4.1 Pengaruh Jenis Penyangga pada Disinfeksi Bakteri *E.coli*

(C_0 : (□) $1,6 \times 10^6$ cfu/mL, (●) $6,6 \times 10^5$ cfu/mL)

Hal ini disebabkan kemampuan katalis untuk melekat pada batu apung lebih rendah dibandingkan pada plastik PP, sehingga jumlah permukaan aktif katalis pada batu apung lebih sedikit dibandingkan pada plastik PP. Namun

dikarenakan masalah teknis pada konfigurasi reaktor, maka penyangga yang digunakan adalah batu apung, dengan asumsi penyangga batu apung akan memiliki kemampuan untuk mendisinfeksi bakteri *E.coli* lebih tinggi dibandingkan plastik PP karena dapat tersirkulasi ke seluruh bagian larutan di dalam reaktor sedangkan plastik PP tidak mengalami sirkulasi. Fenomena serupa juga terjadi pada penelitian yang dilakukan Xiu-Yun Chuan (2004), dimana TiO_2 tipe anatase yang dilapiskan pada batu apung mampu mengapung pada permukaan air sehingga penggunaan radiasi ultraviolet pada fotoreaksi TiO_2 menjadi efektif dan ekonomis.

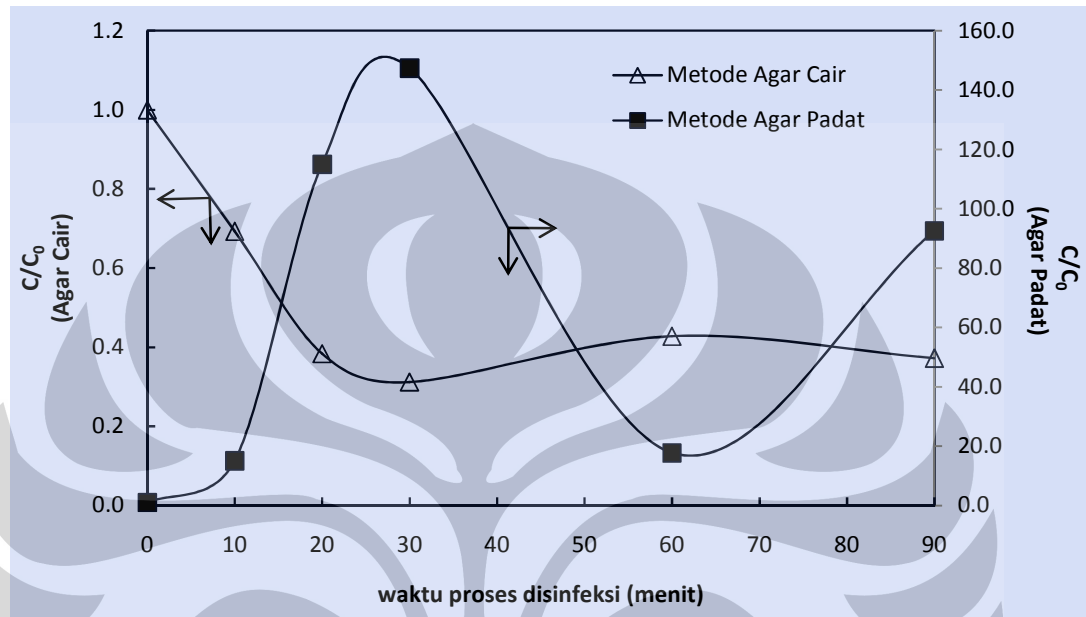
4.2 Metode Analisis

Pada penelitian ini digunakan metode analisis dengan *Total Plate Count* (TPC). Prinsip analisisnya adalah pengenceran pada volume spesifik 10^{-2} dari sampel pada permukaan cawan petri (Plate Count Agar/PCA). Setelah sampel dipindahkan ke cawan, cawan harus didiamkan selama 15 menit untuk keperluan absorpsi inokulum bakteri pada agar. Setelah itu cawan dibalikkan sehingga bagian udara berada di bawah permukaan agar. Hal ini dilakukan untuk mencegah kontaminasi oleh bakteri lain yang terbawa udara dan terabsorpsi pula di permukaan agar. Cawan kemudian diinkubasi pada $35\text{ }^\circ\text{C}$ selama 48 jam dan hasil perhitungan dibuat dalam satuan jumlah koloni (number of colony forming units/CFU) per mL bakteri *E.coli*.

Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.2, metode analisis dengan menuangkan sampel pada agar yang sudah kering (metode agar padat) memberikan hasil yang tidak rasional. Hal tersebut diakibatkan oleh penggunaan spatel untuk meratakan sampel pada permukaan agar yang menyebabkan ada beberapa bagian dari sampel terbawa oleh spatel dan adanya kematian bakteri akibat masih ada alkohol yang tertinggal pada spatel atau akibat suhu spatel yang masih terlalu tinggi.

Dengan mempertimbangkan banyaknya faktor yang tidak dapat dikendalikan dengan metode agar padat, maka selanjutnya dipilih metode analisis dengan agar cair. Pada metode analisis ini, terlebih dahulu sampel dimasukkan ke dalam cawan lalu dituangkan suspensi agar pada temperatur $30\text{ }^\circ\text{C}$ ke dalam

cawan, kemudian cawan ditutup rapat. Pengadukan dilakukan tanpa memasukan alat ke dalam cawan sehingga hasil yang diperoleh lebih akurat, seperti dapat dilihat pada Gambar 4.2 di bawah.



Gambar 4.2 Pengaruh Metode Analisis pada Disinfeksi Bakteri *E.coli*

(C₀: (Δ) $1,9 \times 10^9$ cfu/mL, (■) $1,9 \times 10^7$ cfu/mL)

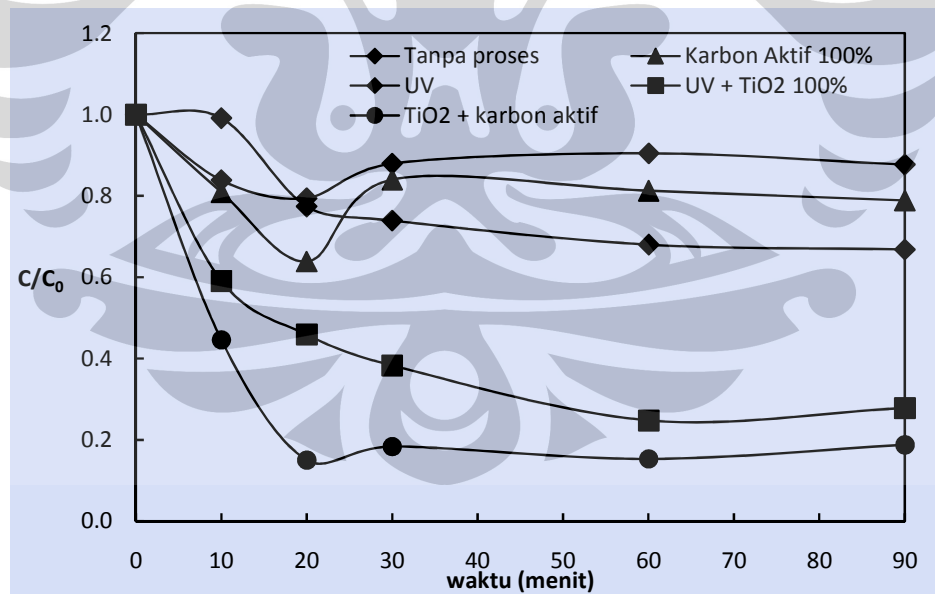
4.3 Pengaruh UV, TiO₂ dan Karbon Aktif

Pada penelitian ini digunakan 1 mL suspensi bakteri *E.coli* usia 24 jam dalam 300 mL air demineralisasi untuk uji aktivitas fotokatalis. Gambar 4.4 menunjukkan perbedaan dimana apabila tidak dilakukan treatment apapun maka jumlah bakteri *E.coli* yang terkandung di dalam air cenderung konstan. Apabila satu bakteri tunggal (seperti *E. coli*) diinokulasikan pada suatu medium dan memperbanyak diri dengan laju yang konstan/tetap, maka pada suatu waktu pertumbuhannya akan berhenti dikarenakan sokongan nutrisi pada lingkungan sudah tidak memadai lagi, akibatnya terjadi kompetisi nutrisi sehingga beberapa sel mati dan lainnya tetap tumbuh. Akibatnya jumlah sel menjadi konstan. (www.ipb.co.id).

Apabila diberikan penyinaran dari lampu UV maka akan bekerja proses fotokimia pada bakteri yang menyebabkan kerusakan struktur DNA sel dan proses replikasinya akibat penetrasi sinar UV ke dalam inti sel bakteri *E.coli*. Sedangkan

apabila diberikan katalis TiO_2 dan lampu UV maka berlaku kombinasi proses fotokimia dan katalis pada bakteri dimana TiO_2 yang tersinari oleh lampu UV akan melepaskan *hole* yang bereaksi dengan air membentuk radikal hidroksil. Radikal hidroksil tersebut menyerang dinding sel bakteri dan masuk ke dalam membran sitoplasma. Kerusakan oksidatif yang terjadi akan semakin meningkatkan permeabilitas sel, dan menyebabkan isi dalam sel mengalir bebas keluar sel sehingga terjadi kematian bakteri (Huang, 1999).

Dari Gambar 4.3 terlihat bahwa laju disinfeksi pada penambahan TiO_2 dengan disinari UV terjadi paling cepat pada 10 menit pertama, dimana kandungan *E.coli* telah berkurang sebesar 40,88% dari jumlah awalnya. Hal ini dikarenakan fotokatalis TiO_2 film yang dilapiskan pada penyangga masih berada pada kondisi *fresh catalyst*/baru sehingga belum terjadi deaktivasi katalis. Jumlah *E.coli* yang terdisinfeksi terus meningkat hingga menit ke 60 dan cenderung stabil sampai akhir reaksi pada menit ke 90. Nilai konversi total yang diperoleh selama 90 menit adalah 72,19%. Nilai konversi tersebut jauh lebih besar dibandingkan nilai konversi jika hanya menggunakan penyinaran lampu UV saja, yaitu sebesar 33%.



Gambar 4.3 Pengaruh UV, UV + TiO_2 , dan Karbon Aktif pada Disinfeksi *E.coli*

(C_0 : (□) $8,3 \times 10^5$ cfu/mL, (▲) $8,0 \times 10^5$ cfu/mL, (◆) $7,9 \times 10^5$ cfu/mL,
(■) $6,6 \times 10^5$ cfu/mL, (●) $7,2 \times 10^5$ cfu/mL)

Proses disinfeksi bakteri *E.coli* dengan menggunakan kombinasi TiO₂-karbon aktif diawali dengan melihat pengaruh adsorpsi dari karbon aktif. Hal ini dilakukan dengan melakukan uji kinerja karbon aktif dalam mengadsorpsi kandungan *E.coli* dalam air. Pengujian proses adsorpsi ini dilakukan untuk melihat proses mana yang lebih dominan antara adsorpsi dan fotokatalitik dalam proses disinfeksi *E.coli*.

Pada uji adsorpsi diharapkan kandungan *E.coli* akan turun akibat sebagian sel *E.coli* teradsorpsi ke permukaan karbon aktif. Dari grafik terlihat bahwa pada 20 menit pertama terjadi pengurangan jumlah *E.coli* paling signifikan, sebesar 36,13% dari jumlah awalnya. Namun pada menit ke-20 hingga ke-30 kandungan *E.coli* di dalam air mengalami peningkatan kembali hingga kemudian berkurang dengan laju yang lambat sampai akhir proses di menit ke-90. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan karbon aktif menyebabkan terjadinya proses adsorpsi fisik dimana bakteri *E.coli* terikat dengan lemah pada permukaan adsorben. Ketika kesetimbangan adsorpsi telah tercapai namun proses adsorpsi masih berlangsung, adsorben menjadi jenuh dan melepaskan kembali sejumlah sel *E.coli* ke air.

Dari gambar 4.3 juga terlihat bahwa dengan adanya kombinasi proses TiO₂-karbon aktif, konsentrasi bakteri *E.coli* mengalami penurunan di awal proses disinfeksi, lalu mengalami peningkatan kembali. Hal ini dikarenakan pada awal proses, bakteri *E.coli* hanya terserap pada pori karbon aktif dan belum terdisinfeksi oleh fotokatalis. Ketika kesetimbangan adsorpsi tercapai dan karbon aktif menjadi jenuh, bakteri *E.coli* keluar dari celah pori dan mengakibatkan jumlah kandungan bakteri yang terukur pada analisis TPC mengalami peningkatan dari waktu sebelumnya. Dengan bertambahnya waktu reaksi, proses fotokatalisislah yang berperan dalam menyebabkan kematian sel bakteri, sehingga grafik cenderung terus turun yang menunjukkan terjadinya pengurangan jumlah sel bakteri pada air.

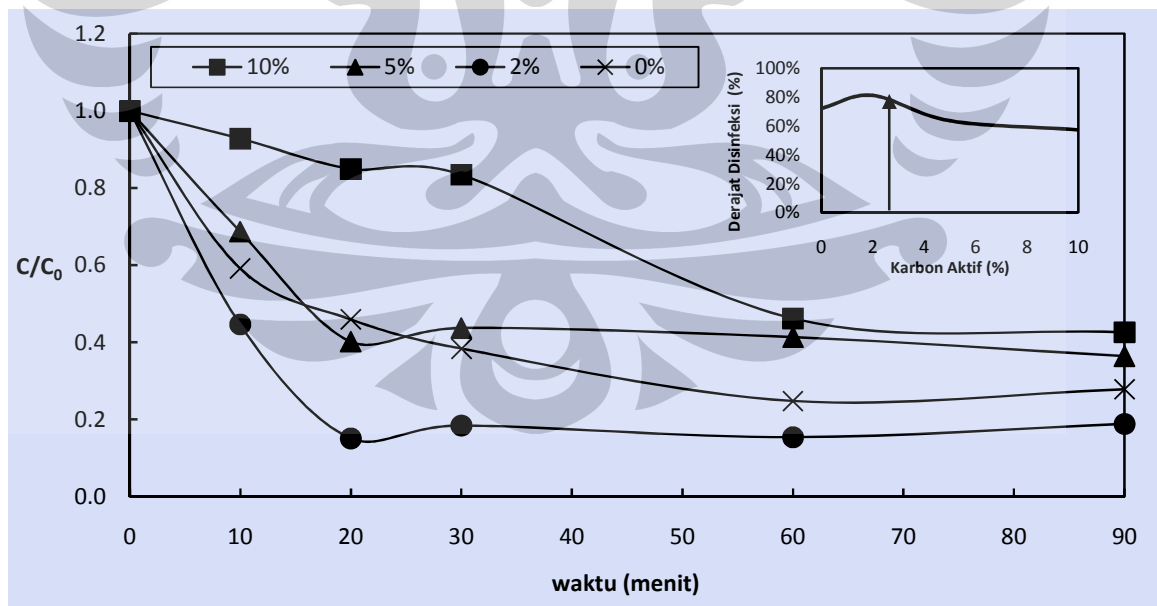
4.4 Pengaruh Penambahan Karbon Aktif

Kombinasi katalis TiO₂ dan karbon aktif diharapkan dapat meningkatkan kinerja fotokatalitik dari aspek adsorpsi dan luas permukaan katalis. Semakin besar luas permukaan katalis yang disediakan adsorben karbon aktif, maka akan

semakin banyak inti aktif TiO_2 yang tersedia untuk kebutuhan proses fotokatalitik. Pengaruh kombinasi karbon aktif dan TiO_2 yang menunjukkan efek sinergis pada degradasi senyawa organik telah diungkapkan oleh Matos (2001).

Pada penelitian ini digunakan 1 mL suspensi bakteri *E.coli* usia 24 jam dalam 300 mL air demineralisasi untuk uji aktivitas komposit. Komposit dibuat dengan mencampurkan TiO_2 dan karbon aktif dengan variasi komposisi karbon aktif pada komposit sebesar 0%, 2%, 5% dan 10%. Gambar 4.4 menunjukkan bahwa penambahan sebesar 2% karbon aktif pada pada komposit menunjukkan nilai konversi yang paling tinggi yaitu sebesar 81%. Nilai konversi tersebut bahkan lebih tinggi dari nilai konversi fotokatalis tanpa tambahan karbon aktif.

Nilai optimum yang dicapai pada penambahan 2% karbon aktif menunjukkan bahwa penambahan karbon aktif dapat meningkatkan kemampuan disinfeksi fotokatalis TiO_2 sampai mencapai titik optimumnya, hingga kemudian penambahan lanjut karbon aktif malah menurunkan kemampuan disinfeksi fotokatalis TiO_2 . Peningkatan kemampuan disinfeksi tersebut disebabkan karbon aktif yang ditambahkan pada TiO_2 dapat meningkatkan kemampuan katalis dalam menyerap komponen organik, dimana bakteri *E.coli* akan terikat pada permukaan komposit sehingga proses disinfeksi oleh fotokatalis lebih mudah terjadi.



Gambar 4.4 Pengaruh Penambahan Karbon Aktif pada Fotokatalis TiO_2
 $(C_0: (\blacksquare) 7,0 \times 10^5 \text{ cfu/mL}, (\blacktriangle) 7,1 \times 10^5 \text{ cfu/mL}, (\bullet) 7,2 \times 10^5 \text{ cfu/mL},$
 $(\times) 6,6 \times 10^5 \text{ cfu/mL})$

Dengan menggunakan persamaan laju reaksi untuk reaktor batch:

$$-\frac{dC_A}{dt} = -r_A \quad (4.1)$$

Apabila diplotkan grafik antara C_A dan t akan diperoleh laju reaksi yang merupakan slope dari grafik tersebut. Laju reaksi untuk setiap variasi penambahan karbon aktif pada fotokatalis TiO_2 dicantumkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Perbandingan rata-rata laju disinfeksi bakteri *E.coli* selama 20 menit pertama

Karbon aktif (%)	C_{0A} (CFU/mL)	$-r_A$ (CFU/mL)/menit
0	6.6×10^5	17800
2	7.2×10^5	30750
5	7.1×10^5	21300
10	7.0×10^5	5250

Laju disinfeksi (r) paling signifikan terjadi pada 20 menit pertama dimana penambahan 2% karbon aktif pada fotokatalis TiO_2 menghasilkan laju disinfeksi terbesar seperti dapat dilihat pada Tabel 4.1 yaitu $2,2 \times 10^{10}$ (cfu/mL)/menit. Setelah menit ke 20 katalis mulai terdeaktivasi dan laju disinfeksi mulai terhenti sehingga jumlah sel bakteri cenderung konstan pada menit ke-30 sampai menit ke-90. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa proses disinfeksi yang terbaik adalah dengan menggunakan kombinasi fotokatalis TiO_2 dan karbon aktif dengan konsentrasi karbon aktif yang tidak terlalu banyak (2%).

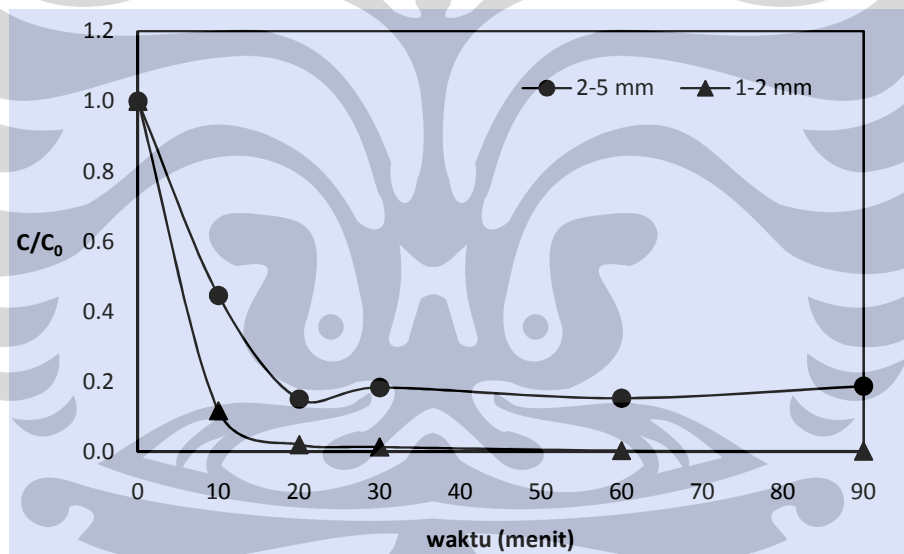
Gambar 4.4 dan Tabel 4.1 menunjukkan bahwa penambahan karbon aktif pada fotokatalis TiO_2 mampu menghasilkan laju reaksi awal yang lebih cepat. Ini terlihat dari konversi yang dicapai oleh penambahan 2% karbon aktif pada 20 menit pertama, yaitu 84,94%. Nilai ini jauh lebih besar dari nilai konversi apabila menggunakan fotokatalis tanpa penambahan adsorben dimana pada 20 menit pertama, nilai konversinya hanya sebesar 54,10% dan hingga menit ke-90 masih belum dapat mencapai konversi yang sama seperti yang dicapai oleh komposit TiO_2 -karbon aktif pada 20 menit pertama proses disinfeksi.

Penambahan karbon aktif yang dapat meningkatkan laju disinfeksi *E.coli* ini analog dengan laporan beberapa hasil penelitian yang menunjukkan

peningkatan laju degradasi senyawa organik dengan kombinasi TiO_2 -karbon aktif seperti pada dekomposisi *propyzamide* (Torimoto, 1996), degradasi fenol (Matos, 2001), degradasi *methyl orange* (Youji Li, 2005), serta dekomposisi *toluene* (Liu Jian-hua, 2006).

4.5 Pengaruh Diameter Penyangga

Pada penelitian ini digunakan $\pm 7 \times 10^5$ sel bakteri *E.coli*/mL air sampel dengan umur bakteri 24 jam untuk uji aktivitas komposit pada dua diameter Penyangga yang berbeda. Gambar 4.5 menunjukkan bahwa dengan diameter penyangga 2-5 mm, nilai konversi komposit dalam mendisinfeksi kandungan bakteri *E.coli* adalah 81,22%. Nilai konversi tersebut meningkat dengan menggunakan Penyangga yang diameternya lebih kecil, 1-2 m, yaitu sebesar 99,74%.



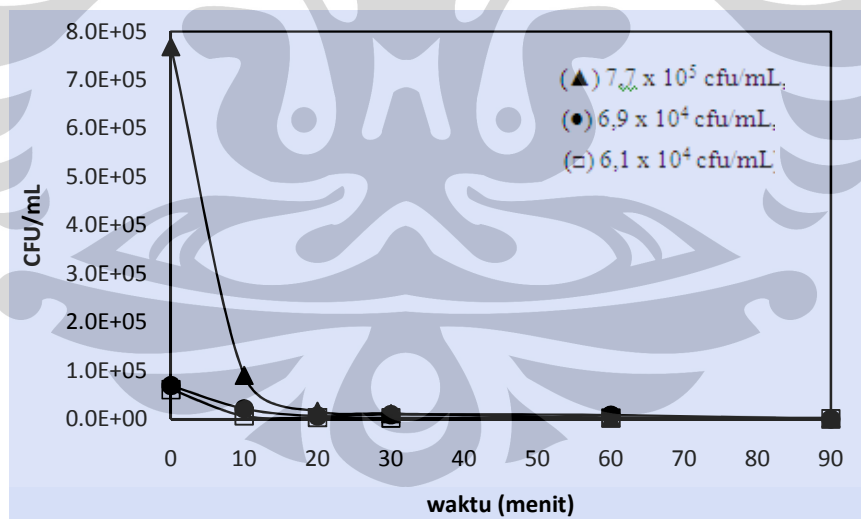
Gambar 4.5 Pengaruh Diameter Penyangga Batu Apung pada Disinfeksi Bakteri *E.coli*
(C₀: (●) $7,2 \times 10^5$ cfu/mL, (▲) $7,7 \times 10^5$ cfu/mL)

Hal tersebut disebabkan diameter penyangga yang lebih kecil dapat memberikan luas permukaan yang lebih besar untuk melekatnya bakteri *E.coli* pada permukaan komposit sehingga lebih banyak bakteri yang dapat terdisinfeksi.

4.6 Pengaruh Konsentrasi Awal Bakteri *E.coli*

Pada penelitian ini digunakan variasi konsentrasi awal (C_0) sebesar $6,1 \times 10^4$, $6,9 \times 10^4$ dan $7,7 \times 10^5$ cfu/mL bakteri *E.coli* berumur 24 jam dalam 300 mL air sampel untuk mengetahui pengaruh konsentrasi awal terhadap disinfeksi bakteri *E.coli*. Penyangga yang digunakan adalah batu apung dengan diameter 1-2 mm untuk ketiga variasi. Dari Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa konsentrasi awal bakteri *E.coli* tidak memberikan perbedaan yang signifikan dimana pada konsentrasi awal $7,7 \times 10^5$ cfu/mL nilai konversi yang diperoleh adalah 99,74%, pada konsentrasi awal $6,1 \times 10^4$ cfu/mL nilai konversinya sebesar 99,50%, sedangkan pada konsentrasi awal $6,9 \times 10^4$ nilai koversinya mencapai 100% pada menit ke-90.

Dari gambar juga terlihat bahwa penurunan konsentrasi bakteri *E.coli* pada awal proses terjadi lebih signifikan pada konsentrasi awal yang lebih tinggi (10^5 CFU/mL). Hal ini menunjukkan bahwa laju reaksi menurun dengan berkurangnya konsentrasi awal bakteri *E.coli*. Hal tersebut dapat dibuktikan dengan menurunkan persamaan laju reaksi disinfeksi bakteri *E.coli*.



Gambar 4.6 Pengaruh Konsentrasi Awal Bakteri pada Disinfeksi Bakteri *E.coli*

Kinetika fotokatalisis mengikuti mekanisme Langmuir-Hinselwood untuk katalis heterogen dimana laju reaksi (r) sebanding dengan konsentrasi senyawa organik pada waktu t (θ). Telah dilaporkan bahwa kinetika fotokatalisis untuk

degradasi fenol dapat didekati dengan persamaan Langmuir-Hinselwood dengan rata-rata penyimpangan 10% (Ellyana, 2007).

Persamaan berikut:

$$-r = -\frac{dC}{dt} = k_r \cdot \theta = \frac{k_r K_C C}{1 + K_C C} \quad (4.2)$$

dapat digunakan apabila pada sistem katalis heterogen terjadi adsorpsi salah satu reaktan, reaksi terjadi dalam fasa teradsorpsi dan terjadi desorpsi produk hasil reaksi. Reaksi disinfeksi bakteri *E.coli* terjadi dalam fasa teradsorpsi dan CO₂ yang dihasilkan dari oksidasi bakteri *E.coli* berupa gas yang diasumsikan mudah terdesorpsi, sehingga persamaan Langmuir-Hinselwood dapat digunakan pada penelitian ini.

Bila persamaan 4.1 dilinearisasi, maka diperoleh persamaan:

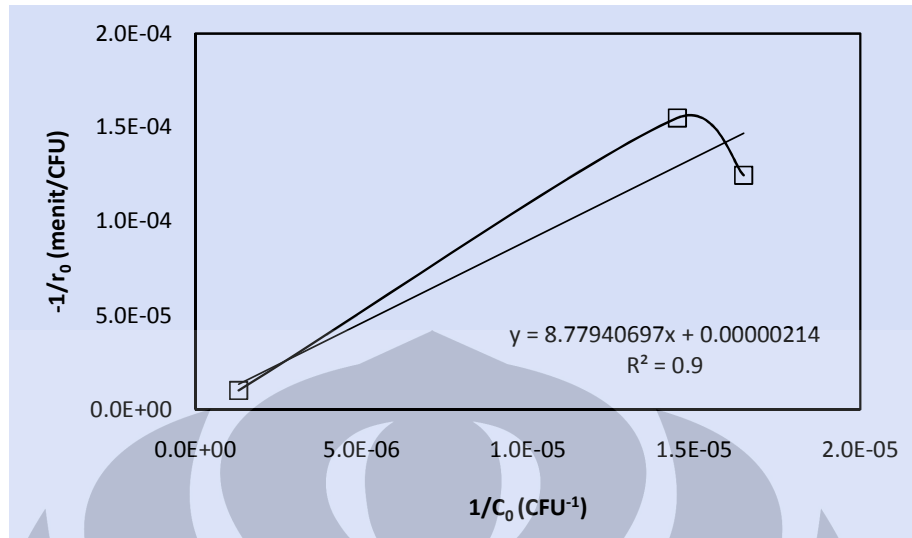
$$-\frac{1}{r} = \left(\frac{1}{k_r K_C}\right) \left(\frac{1}{C}\right) + \left(\frac{1}{k_r}\right) \quad (4.3)$$

Bila kondisi awal adalah pada $t = 0$, maka persamaan 4.2 menjadi:

$$-\frac{1}{r_0} = \left(\frac{1}{k_r K_C}\right) \left(\frac{1}{C_0}\right) + \left(\frac{1}{k_r}\right) \quad (4.4)$$

$$\text{Dengan } r_0 = \left. \frac{dC}{dt} \right|_{t=0} \quad (4.5)$$

Untuk menyelesaikan persamaan laju reaksi, data dari hasil percobaan digambarkan kecenderungannya dalam persamaan polinomial dan diturunkan berdasarkan persamaan 4.5 sehingga diperoleh nilai r_0 dari masing-masing grafik untuk setiap variasi konsentrasi awal. Kemudian dibuat grafik antara $1/C_0$ dengan $-1/r_0$ untuk memperoleh laju reaksi disinfeksi (k_r) dan konstanta Langmuir-Hinselwood isotherm (K_C) seperti pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Hubungan antara $1/C_0$ dengan $-1/r_0$

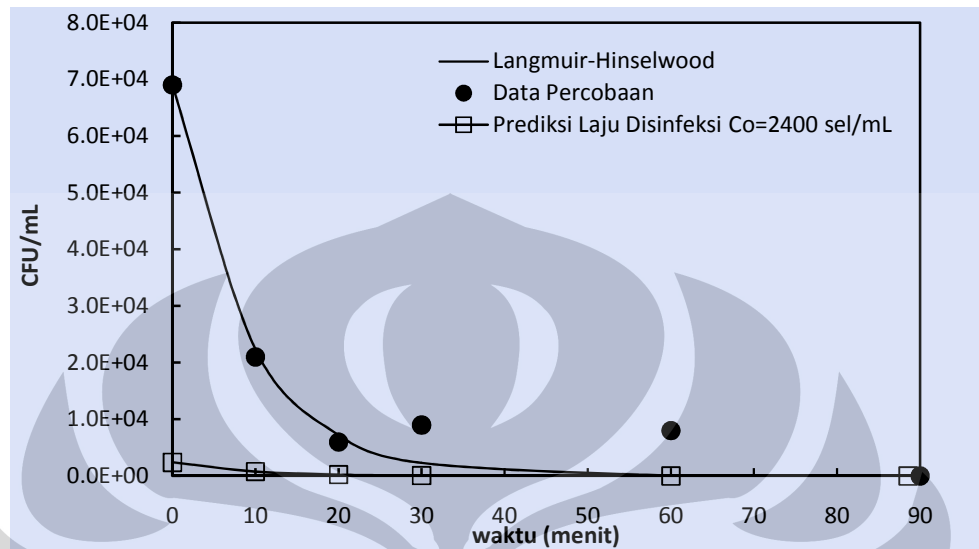
Dari Gambar 4.7 di atas diperoleh slope dan intersep, dimana berdasarkan persamaan 4.4, slope grafik tersebut merupakan $\left(\frac{1}{k_r K_C}\right)$ dan intersepnya merupakan $\left(\frac{1}{k_r}\right)$ sehingga diperoleh nilai $k_r = 4,7 \times 10^5/\text{menit}$ dan nilai $K_C = 2,4 \times 10^{-7}/(\text{CFU}/\text{mL})$, sehingga persamaan laju reaksi untuk model Langmuir-Hinselwood adalah:

$$-r = -\frac{dC}{dt} = \frac{0,11390 C}{1+2,4 \times 10^{-7} C} \quad (4.6)$$

Profil perubahan konsentrasi bakteri *E.coli* terhadap waktu yang diperoleh dari model Langmuir-Hinselwood memiliki penyimpangan rata-rata 67,52% dari data percobaan.

Dari hasil pengawasan pada daerah pemukiman di Jakarta, Bogor, Tangerang dan Bekasi, 100% dari 100 sampel sumur dangkal sudah tercemar oleh bakteri *E.coli*. Indikator bahwa suatu sumur tercemar adalah ditemukannya kandungan bakteri *E.coli* antara 30-240.000 MNP/100 mL sampel. Dengan menggunakan persamaan 4.6, laju reaksi disinfeksi *E.coli* untuk konsentrasi awal maksimum cemaran bakteri *E.coli* pada sumur dangkal, yaitu 2.400 CFU/mL dapat dihitung. Gambar 4.8 menunjukkan perubahan konsentrasi bakteri *E.coli* terhadap waktu berdasarkan model Langmuir-Hinselwood untuk konsentrasi awal

2.400 sel/mL bakteri *E.coli*. Ambang batas aman baku mutu air minum dicapai setelah menit ke-88 dimana kandungan *E.coli* dalam air sudah 100% terdisinfeksi.



Gambar 4.8 Perbandingan Model Langmuir Hinselwood dengan Data Percobaan

Berdasarkan model Langmuir-Hinselwood dapat diperkirakan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai ambang batas aman air minum pada berbagai konsentrasi awal bakteri *E.coli* seperti dapat dilihat pada tabel 4.2 di bawah.

Tabel 4.2 Hubungan konsentrasi awal bakteri *E.coli* dan waktu disinfeksi

C_0 (sel/mL)	t (menit)
2.4×10^3	88
1.6×10^3	84
1.2×10^3	81
8.0×10^2	78
3.0×10^2	69
2.0×10^2	66
1.0×10^2	60
3.0×10^1	49
1.0×10^1	40

Apabila menggunakan data percobaan pada gambar 4.8, pada 10 menit pertama sebanyak 4.8×10^4 sel/mL bakteri *E.coli* dapat terdisinfeksi. Hal ini menunjukkan bahwa model tidak berlaku untuk setiap kondisi dan diperlukan data tambahan untuk mendapatkan persamaan yang lebih valid.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Penambahan 2% adsorben karbon aktif pada fotokatalis TiO₂ terbukti dapat meningkatkan laju reaksi disinfeksi bakteri *E.coli* dibandingkan hanya menggunakan fotokatalis TiO₂ tanpa penambahan karbon aktif.
2. Penggunaan ukuran penyangga yang lebih kecil (1-2 mm) terbukti mampu memberikan peningkatan laju disinfeksi bakteri *E.coli* dibandingkan menggunakan penyangga yang diameternya lebih besar (2-5 mm).
3. Komposit TiO₂-karbon aktif dengan konsentrasi karbon aktif 2% terbukti mampu mendisinfeksi kandungan bakteri *E.coli* dalam air dengan konsentrasi awal $6,9 \times 10^4$ sel/mL hingga mencapai nilai konversi 100%.
4. Laju reaksi disinfeksi untuk konsentrasi awal bakteri *E.coli* $2,4 \times 10^3$ sel/mL yang dimodelkan menggunakan mekanisme Langmuir-Hinselwood dengan persamaan $-r = -\frac{dC}{dt} = \frac{0,11390 C}{1+2,4 \times 10^{-7}C}$ akan mencapai ambang batas aman baku mutu air minum pada menit ke-88 proses disinfeksi.

5.2 Saran

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

1. Melakukan pengembangan pada fotokatalis film dengan menggunakan penyangga dan adsorben yang berbeda.
2. Mengaplikasikan proses disinfeksi dalam reaktor skala pilot dan penggunaan air yang berasal dari air baku seperti PDAM atau air sumur.

DAFTAR PUSTAKA

- Amemiya, S., *Titanium-oxide Photocatalyst*, Three Bond Technical News, (2004).
- _____. "Air Bersih Bebas Bakteri dan Zat Kimia". <http://mediaindonesia.or.id> (22 Maret 2005).
- _____. "Air Minum". <http://wikipedia.or.id> (17 Januari 2008).
- _____. "Escherichia coli". <http://wikipedia.org> (05 April 2008).
- _____. "Fermentasi". <http://ipb.ac.id> (11 November 2008).
- _____, *National Primary Drinking Water Regulations: Ground water Rule*, Environmental Protection Agency, (2006).
- _____. "Pertumbuhan Mikroba". <http://ipb.ac.id> (11 November 2008).
- _____, *Syarat-syarat dan Pengawasan Kualitas Air Minum*, KEP MENKES No. 907/MENKES/SK/VII/2002, (2002).
- _____. "Ultraviolet". <http://wikipedia.org> (24 Mei 2008).
- Athena, Sukar, Hendro, M., Anwar, D. M., dan Haryono, *Kandungan Bakteri Total Coli dan Escherichia Coli/Fecal Coli Air Minum dari Depot Air Minum Isi Ulang di Jakarta, Tangerang, dan Bekasi*, Bul. Penel. Kesehatan, volume 32. no. 4. (2004) hlm. 135-143.
- Badan Standardisasi Nasional, *Metode Pengujian Susu Segar*, SNI 01-2782-1998/Rev. 1992, (1998).
- Budiman, F.B., *Pengolahan Limbah Cr(VI), Fenol dan Bakteri E.coli Menggunakan Fotokatalis TiO₂ Bentuk Film*, Skripsi Sarjana, Program Sarjana Fakultas Teknik UI, Depok 2007.
- Chen, A., Lu, G., Tao, Y., Dai, Z. and Gu, H., *Novel Photocatalyst Immobilized on Springs and Packed Photoreactor*, Mater. Phys. Mech. 4. (2001) pp. 121-124.
- Chuan, X.Y., Hinaro, M., and Inagaki, M., *Preparation and Photocatalytic Performance of Anatase-Mounted Natural Porous Silica, Pumice, by Hydrolysis under Hydrothermal Conditions*, Appl. Catal. B: Environ. 51. (2004) pp.255-260.

- Dijkstra, M. F. J., Buwalda, H., de Jong, A. W. F., Michorius, A., Winkelman, J. G. M., and Beenackers, A. A. C. M., *Experimental Comparison of Three Reactor Designs for Photocatalytic Water Purification*, Chem. Eng. Sci. 56. (2001) pp. 547-555.
- Duffy, E. F., Al Touati, F., Kehoe, S. C., McLoughlin, O. A., Gill, L. W., Gernjak, W., Oller, I., Maldonado, M. I., Malato, S., Cassidy, J. Reed, R. H. and McGuigan, K. G., *A Novel TiO₂-assisted Solar Photocatalytic Batch-Process Disinfection Reactor for the Treatment of Biological and Chemical Contaminants in Domestic Drinking Water in Developing Countries*, Science Direct. 77. (2004) pp. 649-655.
- Centre for Disease Control, *BCCDC Laboratory Service: A Guide to Selection and Use of Disinfectants*, BC Centre for Disease Control, (2003).
- Gao, X. and Wachs, I. E., *Titania-Silica as Catalysts: Molecular Structural Characteristics and Physico-Chemical Properties*, Catal Today. 51. (1999) pp. 233-254.
- Gunlazuardi, J., *Fotokatalisis pada Permukaan TiO₂: Aspek Fundamental dan Aplikasinya*, Seminar Nasional Kimia Fisika II, (2001).
- Hoffmann, M.R., Martin, S.T., Choi, W., and Bahnemann, D.W., *Environmental Application of Semiconductor Photocatalysis*, Chem. Rev., 95. (1995). pp. 69-96.
- Hotez, P.J., Molyneux, D.H., Fenwick, A., Kumaresan, J., Sachs, S.E., Sachs, J.D., and Savioli, L., *Control of Neglected Tropical Diseases*, N Engl J Med, 357. 10. (2007). Pp 1018-1027.
- Huang, Z., Maness, P. C., Blake, D. M., Wolfrum, E. J. and Smolinski, S. L., *Bactericidal Mode of Titanium Dioxide Photocatalysis*, J. of Photochem. Photobiol. A. Chem. (1999) pp. 1-29.
- Indonesia Sanitation Sector Development Program, *Program Pengembangan Sanitasi*, BAPPENAS, (2006).
- Juranek, D. D., *Public Health Handbook: Cryptosporidium and Water*, Working Group on Waterborne Cryptosporidiosis, (1997).

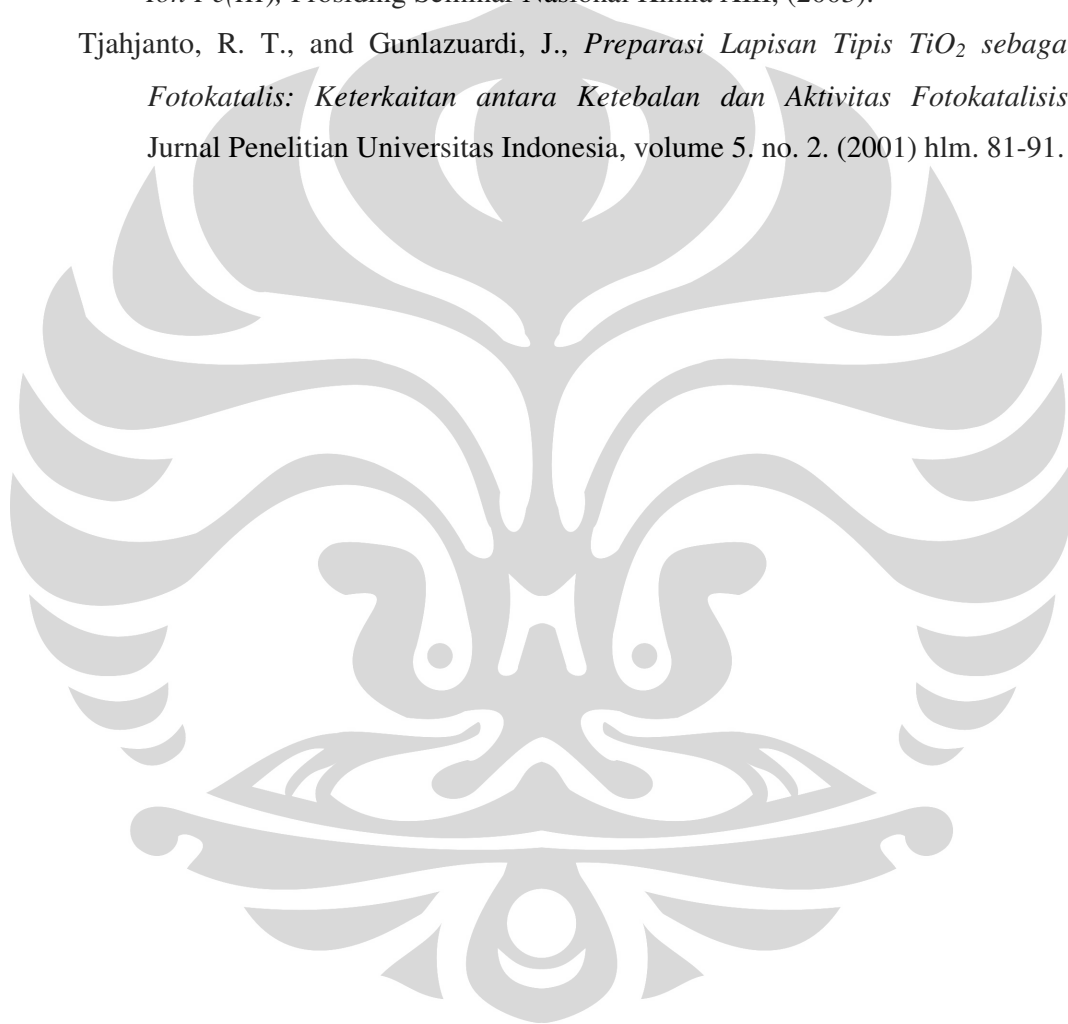
- Kabir, M. F., Haque, F., Vaisman, E., Langford, C. H. and Kantzas, A., *Disinfecting E. coli Bacteria in Drinking Water Using A Novel Fluidized Bed Reactor*, Int. J. of Chem. Reactor Eng. 1. (2003) Article A 39.
- Katz, J., *Solar Water Splitting: Photocatalyst Materials Discovery and Systems Development*, DOE Solar H₂ Merit Review, (2007).
- Klimov, V.I., *Mechanisms for Photogeneration and Recombination of Multiexcitons in Semiconductor Nanocrystals: Implications for Lasing and Solar Energy Conversion*, J. Phys. Chem. B. 110. (2006) pp. 16827-16845.
- Li, Y., Li, X., Li, J., and Yin, J., *Photocatalytic Degradation of Methyl Orange in a Sparged Tube Reactor with TiO₂-Coated Activated Carbon Composites*, Cat. Comm. 6. (2005) pp 650-655.
- Liu, J., Yang, R., and Li, S., *Preparation and Application of Efficient TiO₂/ACFs Photocatalyst*, J. of Environ. Sci, volume 18. no. 5. (2006) pp 979-982.
- Lonnen, J., Kilvington, S., Kehoe, S. C., Al-Touati, F. and McGuigan, K. G., *Solar and Photocatalytic Disinfection of Protozoan, Fungal and Bacterial Microbes in Drinking Water*, Water Research. 39. (2005) pp. 877-883.
- Lu, Z. H., Zhou, L., Zhang, Z. L., Shi, W. L., Xie, Z. X., Xie, H. Y., Peng, D. W. and Shen, P., *Cell Damage Induced by Photocatalysis of TiO₂ Thin Films*, Langmuir. 19. (2003) pp. 8765-8768.
- Matos, J., Laine, J., and Herrmann, J. M., *Effect of the Type of Activated Carbons on the Photocatalytic Degradation of Aqueous Organic Pollutants by UV-Irradiated Titania*, J of Cat. 200. (2001) pp 10-20.
- Raini, M., Isnawati, A., dan Kurniati, *Kualitas Fisik dan Kimia Air PAM di Jakarta, Bogor, Tangerang, Bekasi Tahun 1999-2001*, Media Litbang Kesehatan, volume 14. No. 3. (2004) hlm. 14-19.
- Richardson, J. T., *Principles of Catalyst Development*, Plenum Press, 1989.
- Rincon, A. G., and Pulgarin, C., *Effect of pH, Inorganic ions, Organic matter and H₂O₂ on E. coli K12 Photocatalytic Inactivation by TiO₂ Implications in Solar Water Disinfection*, Appl. Catal. B: Environ. 51. (2004) pp. 283-302.
- Slamet, Bismo, S. and Rita, A., *Modifikasi Zeolit Alam dan Karbon Aktif dengan TiO₂ serta Aplikasinya sebagai Bahan Adsorben dan Fotokatalis untuk*

Degradasi Polutan Organik, Laporan Penelitian Hibah Bersaing Universitas Indonesia, (2007).

Torimoto, et.al., *Effects of Adsorbents Used as Supports for TiO₂ Loading on Photocatalytic Degradation of Propylamide*, Environ. Sci. Technol., vol. 30. (1996). pp. 1275-1281.

Wahyuni, E.T., Sugiharto, E., Tahir, I., *Fotodegradasi Klorofenol oleh Adanya Ion Fe(III)*, Prosiding Seminar Nasional Kimia XIII, (2003).

Tjahjanto, R. T., and Gunlazuardi, J., *Preparasi Lapisan Tipis TiO₂ sebagai Fotokatalis: Keterkaitan antara Ketebalan dan Aktivitas Fotokatalisis*, Jurnal Penelitian Universitas Indonesia, volume 5. no. 2. (2001) hlm. 81-91.



LAMPIRAN A

Baku Mutu Air Minum

KEPUTUSAN MENTERI KESEHATAN RI

Nomor : 907/MENKES/SK/VII/2002

Tanggal : 29 Juli 2002

PERSYARATAN KUALITAS AIR MINUM

1. BAKTERIOLOGIS

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Keterangan
1	2	3	4
a. <u>Air Minum</u>			
<i>E.Coli</i> atau <i>fecal coli</i>	Jumlah per 100 ml sampel	0	
b. <u>Air yang masuk sistem distribusi</u>			
<i>E.Coli</i> atau <i>fecal coli</i>	Jumlah per 100 ml sampel	0	
Total Bakteri Coliform	Jumlah per 100 ml sampel	0	
c. <u>Air pada sistem distribusi</u>			
<i>E.Coli</i> atau <i>fecal coli</i>	Jumlah per 100 ml sampel	0	
Total Bakteri Coliform	Jumlah per 100 ml sampel	0	

2. KIMIAWI

2.1. Bahan kimia yang memiliki pengaruh langsung pada kesehatan.

A. Bahan Anorganik

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Keterangan
1	2	3	4
Antimon	(mg/liter)	0.005	
Air Raksa	(mg/liter)	0.001	
Arsenic	(mg/liter)	0.01	
Barium	(mg/liter)	0.7	
Boron	(mg/liter)	0,3	
Kadmium	(mg/liter)	0,003	
Kromium (Valensi 6)	(mg/liter)	0,05	
Tembaga	(mg/liter)	2	
Sianida	(mg/liter)	0.07	
Fluorida	(mg/liter)	1,5	
Timbal	(mg/liter)	0.01	
Molybdenum	(mg/liter)	0.07	
Nikel	(mg/liter)	0.02	
Nitrat(sebagai NO_3)	(mg/liter)	50	
Nitrit(sebagai NO_2)	(mg/liter)	3	
Selenium	(mg/liter)	0.01	

B. Bahan Organik

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Keterangan
1	2	3	4
<i>Chlorinated alkanes</i>			
Carbon tetrachloride	($\mu\text{g/liter}$)	2	
Dichloromethane	($\mu\text{g/liter}$)	20	
1,2-dichloroethane	($\mu\text{g/liter}$)	30	
1,1,1-trichloroethane	($\mu\text{g/liter}$)	2000	
<i>Chlorinated ethenes</i>			
Vinyl chloride	($\mu\text{g/liter}$)	5	
1,1-dichloroethene	($\mu\text{g/liter}$)	30	
1,2-dichloroethene	($\mu\text{g/liter}$)	50	
Trichloroethene	($\mu\text{g/liter}$)	70	
Tetrachloroethene	($\mu\text{g/liter}$)	40	
<i>Aromatic hydrocarbons</i>			
Benzene	($\mu\text{g/liter}$)	10	
Toluene	($\mu\text{g/liter}$)	700	
Xylenes	($\mu\text{g/liter}$)	500	
Benzo[a]pyrene	($\mu\text{g/liter}$)	0,7	
<i>Chlorinated benzenes</i>			
Monochlorobenzene	($\mu\text{g/liter}$)	300	
1,2-dichlorobenzene	($\mu\text{g/liter}$)	1000	
1,4-dichlorobenzene	($\mu\text{g/liter}$)	300	
Trichlorobenzenes (total)	($\mu\text{g/liter}$)	20	
<i>Lain-lain</i>			
Di(2-ethyl hexyl)adipate	($\mu\text{g/liter}$)	80	
Di(2-ethylhexyl) phthalate	($\mu\text{g/liter}$)	8	
Acrylamide	($\mu\text{g/liter}$)	0,5	
Epichlorohydrin	($\mu\text{g/liter}$)	0,4	
Hexachlorobutadiene	($\mu\text{g/liter}$)	0,6	
Edetic acid (EDTA)	($\mu\text{g/liter}$)	200	
Tributyltin oxide	($\mu\text{g/liter}$)	10	

C. Pestisida

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Keterangan
1	2	3	4
Alachlor	(µg/liter)	20	
Aldicarb	(µg/liter)	10	
Aldrin/dieldrin	(µg/liter)	0,03	
Atrazine	(µg/liter)	2	
Bentazone	(µg/liter)	30	
Carbofuran	(µg/liter)	5	
Chlordane	(µg/liter)	0,2	
Chlorotoluron	(µg/liter)	30	
DDT	(µg/liter)	2	
1,2-dibromo - 3-chloropropane	(µg/liter)	1	
2,4-D	(µg/liter)	30	
1,2-dichloropropane	(µg/liter)	20	
1,3-dichloropropene	(µg/liter)	20	
Heptachlor and Heptachlor epoxide	(µg/liter)	0,03	
Hexachlorobenzene	(µg/liter)	1	
Isoproturon	(µg/liter)	9	
Lindane	(µg/liter)	2	
MCPA	(µg/liter)	2	
Methoxychlor	(µg/liter)	20	
Metolachlor	(µg/liter)	10	
Molinate	(µg/liter)	6	
Pendimethalin	(µg/liter)	20	
Pentachlorophenol	(µg/liter)	9	
Permethrin	(µg/liter)	20	
Propanil	(µg/liter)	20	
Pyridate	(µg/liter)	100	
Simazine	(µg/liter)	2	
Trifluralin	(µg/liter)	20	

Chlorophenoxy	($\mu\text{g/liter}$)		
<i>Herbicides</i>	($\mu\text{g/liter}$)		
<i>selain 2,4D dan MCPA</i>	($\mu\text{g/liter}$)		
2,4-DB	($\mu\text{g/liter}$)	90	
Dichlorprop	($\mu\text{g/liter}$)	100	
Fenoprop	($\mu\text{g/liter}$)	9	
Mecoprop	($\mu\text{g/liter}$)	10	
2,4,5-T	($\mu\text{g/liter}$)	9	

D. Desinfektan dan hasil sampingannya

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Keterangan
1	2	3	4
Monochloramine	(mg/liter)	3	
Chlorine	(mg/liter)	5	
Bromate	($\mu\text{g/liter}$)	25	
Chlorite	($\mu\text{g/liter}$)	200	
Chlorophenol	($\mu\text{g/liter}$)		
2,4,6-trichlorophenol	($\mu\text{g/liter}$)	200	
Formaldehyde	($\mu\text{g/liter}$)	900	
Trihalomethanes			
Bromoform	($\mu\text{g/liter}$)	100	
Dibromochloromethane	($\mu\text{g/liter}$)	100	
Bromodichloromethane	($\mu\text{g/liter}$)	60	
Chloroform	($\mu\text{g/liter}$)	200	
Chlorinated acetic acids			
Dichloroacetic acid	($\mu\text{g/liter}$)	50	
Trichloroacetic acid	($\mu\text{g/liter}$)	100	
Chloral hydrate	($\mu\text{g/liter}$)		
(trichloroacetaldehyde)	($\mu\text{g/liter}$)	10	
Halogenated acetonitriles			
Dichloroacetonitrile	($\mu\text{g/liter}$)	90	
Dibromoacetonitrile	($\mu\text{g/liter}$)	100	
Trichloroacetonitrile	($\mu\text{g/liter}$)	1	
Cyanogen chloride			
(sebagai CN)	($\mu\text{g/liter}$)	70	

2.2 Bahan Kimia yang kemungkinan dapat menimbulkan keluhan pada konsumen

A. Bahan Anorganik

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Keterangan
1	2	3	4
Ammonia	mg/l	1,5	
Aluminium	mg/l	0,2	
Klorida	mg/l	250	
Tembaga	mg/l	1	
Kesadahan	mg/l	500	
Hidrogen Sulfida	mg/l	0.05	
Besi	mg/l	0.3	
Mangan	mg/l	0.1	
pH	-	6,5-8,5	
Sodium	mg/l	200	
Sulfat	mg/l	250	
Total zat padat terlarut	mg/l	1000	
Seng	mg/l	3	

B. Bahan Organik, Desinfektan dan hasil sampingannya

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Keterangan
1	2	3	4
Organik			
Toluene	(μ g/l)	24-170	
Xylene	(μ g/l)	20-1800	
Ethylbenzene	(μ g/l)	2-200	
Styrene	(μ g/l)	4-2600	
Monochlorobenzene	(μ g/l)	10-120	
1,2-dichlorobenzene	(μ g/l)	1-10	
1,4-dichlorobenzene	(μ g/l)	0,3-30	
Trichlorobenzenes (total)	(μ g/l)	5-50	
Deterjen	(μ g/l)	50	

Desinfektan dan hasil sampingannya			
Chlorine	($\mu\text{g/l}$)	600-1000	
2-chlorophenol	($\mu\text{g/l}$)	0.1-10	
2,4-dichlorophenol	($\mu\text{g/l}$)	0,3-40	
2,4,6-trichlorophenol	($\mu\text{g/l}$)	2-300	

3. RADIOAKTIFITAS

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Keterangan
1	2	3	4
Gross alpha activity	(Bq/liter)	0,1	
Gross beta activity	(Bq/liter)	1	

4. FISIK

Parameter	Satuan	Kadar Maksimum yang diperbolehkan	Keterangan
1	2	3	4
Parameter Fisik			
Warna	TCU	15	
Rasa dan bau	–	–	tidak berbau dan berasa
Temperatur	$^{\circ}\text{C}$	Suhu udara $\pm 3^{\circ}\text{C}$	
Kekeruhan	NTU	5	

LAMPIRAN B

DATA KONSENTRASI BAKTERI E.COLI

E.coli Tanpa Proses

x	y	C/C ₀
0	8.3E+05	1.0000
10	7.0E+05	0.8386
20	6.6E+05	0.7940
30	7.3E+05	0.8795
60	7.5E+05	0.9048
90	7.3E+05	0.8771

Penyinaran UV

x	y	C/C ₀
0	7.9E+05	1.0000
10	7.8E+05	0.9911
20	6.1E+05	0.7738
30	5.8E+05	0.7395
60	5.4E+05	0.6798
90	5.3E+05	0.6684

TiO₂ 100%

x	y	C/C ₀
0	6.6E+05	1.0000
10	3.9E+05	0.5912
20	3.0E+05	0.4590
30	2.5E+05	0.3830
60	1.6E+05	0.2477
90	1.8E+05	0.2781

Karbon Aktif 100%

x	y	C/C ₀
0	8.0E+05	1.0000
10	6.5E+05	0.8088
20	5.1E+05	0.6388
30	6.7E+05	0.8400
60	6.5E+05	0.8125
90	6.3E+05	0.7888

Data Perbedaan Pengaruh Jenis Penyangga

Plastik PP

x	y	C/C ₀
0	1.6E+06	1.0000
10	1.4E+06	0.8346
20	1.1E+06	0.6765
30	6.0E+05	0.3728
60	4.2E+05	0.2593
90	6.2E+04	0.0384

Karbon Aktif

x	y	C/C ₀
0	6.6E+05	1.0000
10	3.9E+05	0.5912
20	3.0E+05	0.4590
30	2.5E+05	0.3830
60	1.6E+05	0.2477
90	1.8E+05	0.2781

Data Pengaruh Perbedaan Metode Analisis

Metode Agar Padat

x	y	C/C ₀
0	1.92E+07	1.0000
10	2.89E+08	15.0696
20	2.20E+09	115.0174
30	2.82E+09	147.3826
60	3.40E+08	17.7130
90	1.77E+09	92.5478

Metode Agar Cair

x	y	C/C ₀
0	1.92E+09	1.0000
10	1.33E+09	0.6926
20	7.36E+08	0.3839
30	5.98E+08	0.3120
60	8.20E+08	0.4276
90	7.13E+08	0.3719

Data Pengaruh Penambahan Karbon Aktif

Komposit AC 10%

x	y	C/C ₀
0	7.0E+05	1.0000
10	6.5E+05	0.9281
20	5.9E+05	0.8489
30	5.8E+05	0.8345
60	3.2E+05	0.4619
90	3.0E+05	0.4259

Komposit AC 5%

x	y	C/C ₀
0	7.1E+05	1.0000
10	4.9E+05	0.6868
20	2.9E+05	0.4017
30	3.1E+05	0.4368
60	2.9E+05	0.4129
90	2.6E+05	0.3638

Komposit AC 2%

x	y	C/C ₀
0	7.2E+05	1.0000
10	3.2E+05	0.4461
20	1.1E+05	0.1506
30	1.3E+05	0.1837
60	1.1E+05	0.1533
90	1.4E+05	0.1878

Komposit AC 0%

x	y	C/C ₀
0	6.6E+05	1.0000
10	3.9E+05	0.5912
20	3.0E+05	0.4590
30	2.5E+05	0.3830
60	1.6E+05	0.2477
90	1.8E+05	0.2781

Data Pengaruh Konsentrasi Awal Bakteri E.coli

1-2 mm, 98%, $7,7 \times 10^5$

x	y	C/Co
0	7.7E+05	1
10	9.0E+04	0.117035111
20	1.6E+04	0.020806242
30	1.1E+04	0.014304291
60	3.0E+03	0.00390117
90	2.0E+03	0.00260078

1-2 mm, 98%, $6,9 \times 10^4$

x	y	C/Co
0	6.9E+04	1
10	2.1E+04	0.304347826
20	6.0E+03	0.086956522
30	9.0E+03	0.130434783
60	8.0E+03	0.115942029
90	0.0E+00	0

1-2 mm, 98%, $6,1 \times 10^3$

x	y	C/Co
0	6.1E+04	1
10	6.1E+03	0.100577
20	3.0E+03	0.04864
30	2.2E+03	0.035449
60	1.9E+03	0.030503
90	3.0E+02	0.004946

Data Pengaruh Diameter Penyangga

2 - 5mm, 98%, $7,2 \times 10^5$

x	y	C/Co
0	7.2E+05	1
10	3.2E+05	0.446133
20	1.1E+05	0.150552
30	1.3E+05	0.183702
60	1.1E+05	0.153315
90	1.4E+05	0.187845

1-2mm, 98%, $7,7 \times 10^5$

x	y	C/Co
0	7.7E+05	1
10	9.0E+04	0.117035
20	1.6E+04	0.020806
30	1.1E+04	0.014304
60	3.0E+03	0.003901
90	2.0E+03	0.002601