



UNIVERSITAS INDONESIA

**DEGRADASI SENYAWA FENOL PADA REAKTOR SKALA
PILOT MENGGUNAKAN KOMBINASI PROSES
FOTOKATALISIS DAN OZONASI**

SKRIPSI

DINAN ROAENI

0606043074

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**DEGRADASI SENYAWA FENOL PADA REAKTOR SKALA
PILOT MENGGUNAKAN KOMBINASI PROSES
FOTOKATALISIS DAN OZONASI**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

DINAN ROAENI

0606043074

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS

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

Nama : Dinan Roaeni
NPM : 0606043074
Tanda Tangan : 
Tanggal : 23 Desember 2008

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Dinan Roeni

NPM : 0606043074

Program Studi : Teknik Kimia

Judul Skripsi : "Degradasi Senyawa Fenol Pada Reaktor Skala Pilot Menggunakan Kombinasi Proses Fotokatalisis dan Ozonasi"

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

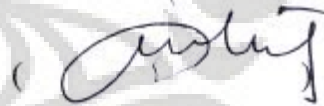
Pembimbing 1 : Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA



Pembimbing 2 : Dr. Ir. Slamet, MT



Penguji : Ir. Yuliusman, MEng



Penguji : Dr. Ir. Nelson Saksono, MT



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 23 Desember 2008

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat rahmat-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dengan judul **“Degradasi Senyawa Fenol Pada Reaktor Skala Pilot Menggunakan Kombinasi Proses Fotokatalisis dan Ozonasi”** disusun dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA selaku pembimbing 1 dan Dr. Ir. Slamet, MT selaku pembimbing 2 yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
2. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI.
3. Kang Jajat, Mas Eko, Bang Ijal dan Neng Vita atas bantuannya di Laboratorium.
4. Mama, Papa, Ibu Ingrid Law, Adik-Adikku (Ilman & Hamdan) dan Cepi Supriyadi yang telah memberikan bantuan dukungan moril dan materil; dan
5. Teman-teman satu angkatan dan teman-teman dari untirta yang telah menemani saya running, memberikan bantuan dan juga semangat.
6. Pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Walaupun masih mempunyai banyak sekali kekurangan, mudah-mudahan skripsi ini dapat bermanfaat.

Depok, 23 Desember 2008

Penulis

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

LEMBAR PERSETUJUAN

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

Nama : Dinan Roaeni
NPM : 0606043074
Program Studi : Ekstensi 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:

“Degradasi Senyawa Fenol Pada Reaktor Skala Pilot Menggunakan Kombinasi
Proses Fotokatalisis dan Ozonasi”

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan 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 : 23 Desember 2008

Yang menyatakan



(Dinan Roaeni)

ABSTRAK

Nama : Dinan Roaeni
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Degradasi Senyawa Fenol Pada Reaktor Skala Pilot Menggunakan Kombinasi Proses Fotokatalisis dan Ozonasi

Penelitian fotokatalisis-ozonasi ini menggunakan reaktor *Tubular 'V' Collector* (TVC) yang dilengkapi dengan sejumlah *black light lamp*. Limbah cair sintetik yang digunakan adalah fenol dan katalisnya adalah TiO_2 Degussa P25. Fotokatalisis dan ozonasi merupakan *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) yang berpotensi dikembangkan untuk mengolah limbah cair organik. Hasil penelitian menunjukkan kombinasi proses ozonasi dan fotokatalisis lebih baik dibandingkan dengan proses tunggal, baik ozonasi maupun fotokatalisis. Pada konsentrasi 20 ppm, *loading* katalis 0,5 g/L, volume awal limbah 20 L selama 4 jam dengan menggunakan fotokatalisis diperoleh persen penyisihan sebesar 15,45%, dengan ozonasi sebesar 44,31% dan dengan gabungan kedua metode tersebut diperoleh 56,58%.

Kata kunci :
Fotokatalisis, ozonasi, fenol, TiO_2

ABSTRACT

Name : Dinan Roaeni
Study Program: Chemical Engineering
Title : Phenol Compound Degradation in Pilot Reactor with Combination Process of Photocatalytic and Ozonation.

This experiment of photocatalytic and ozonation used Tubular "V" Collectors (TVC) equipped by amount of black light lamp. Synthetic wastewater used in this experiment is phenol and its catalys is TiO_2 Degussa P25. Photocatalysis and ozonation are Advanced Oxidation Processes (AOPs) potencing developed for organic compound of wastewater treatment. The experiment results showed that in the use of combine photocatalysis and ozonation are obtained better result than single process for ozonation or photocatalysis. At 20 ppm, loading catalys 0.5 g/L, phenol aqueous volume 20 L for 4 hours, % removal in the use of photocatalytic process is 15.45%, ozonation is 44.31% and in the use of combine photocatalysis and ozonation methodes is 56.58%.

Key words :
Photocatalysis, Ozonation, Phenol, TiO_2

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Batasan Masalah.....	4
1.5. Sistematika Penulisan	5
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Definisi Fotokatalisis dan Prinsip Dasar Proses Fotokatalisis	6
2.2. Mekanisme Degradasi Fenol dengan Fotokatalisis TiO ₂	9
2.3. Pengolahan Limbah Cair dengan Teknik Ozonasi.....	10
2.4. Ozon (O ₃).....	11
2.4.1. Sifat Fisika Ozon	12
2.4.2. Sifat Kimia Ozon	12
2.4.3. Pembuatan Ozon.....	13
2.4.4. Kontak Ozon dalam Air	14
2.4.5. Reaksi Ozon dengan Fenol.....	15
2.5. Fotokatalisis dan Ozonasi	17
2.5.1. Mekanisme Reaksi Degradasi Fenol dengan Proses Fotokatalisis-Ozonasi.....	18
2.5.2. Parameter yang Mempengaruhi Fotokatalisis-Ozon	21
2.6. Fenol.....	22
2.6.1. Sifat-Sifat Fisika dan Kimia Fenol	23
2.6.2. Pengaruh Senyawa Fenol	25
2.7. Reaktor Fotokatalisis	26
2.7.1. <i>Parabolic Through Reactor</i> (PTR).....	27
2.7.2. <i>Compound Parabolic Collecting Reactor</i> (CPCR).....	29
2.7.3. Reaktor Tubular 'V' <i>Collectors</i> (TVC)	31
2.8. UV-Vis <i>Spectrophotometer</i>	34
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	36
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	36
3.2. Peralatan dan Bahan yang Digunakan	37
3.2.1. Peralatan	37
3.2.2. Bahan	39
3.3. Prosedur Penelitian.....	39
3.3.1. Prosedur Modifikasi Reaktor TVC.....	40

3.3.2.	Prosedur Kalibrasi dan Uji Coba Kebocoran Reaktor	40
3.3.3.	Prosedur Pembuatan Larutan Fenol.....	40
3.3.4.	Prosedur Uji Penyisihan Fenol	41
3.3.5.	Prosedur Pengukuran dan Analisis Fenol Menggunakan UV-VIS <i>Spectrophotometer</i>	41
3.3.6.	Prosedur Pembuatan Larutan Standar	42
3.3.7.	Prosedur Kalibrasi Spektrofotometer.....	42
3.3.8.	Prosedur Analisis Sampel	42
3.4.	Parameter yang Divariasi.....	43
3.5.	Data Penelitian dan Cara Pengambilan Data	43
3.6.	Pengolahan Data Penelitian	43
BAB 4.	HASIL DAN PEMBAHASAN	44
4.1.	Uji Blanko	44
4.2.	Pengaruh Metode yang Digunakan terhadap Penyisihan Fenol	45
4.3.	Uji Kinerja Reaktor TVC Menggunakan Cahaya Matahari	47
4.4.	Pengaruh Loding Katalis	49
4.5.	Pengaruh Perbedaan Sumber UV (antara <i>black light lamp</i> dan matahari)	51
4.6.	Pengaruh pH.....	53
BAB 5.	KESIMPULAN DAN SARAN	57
	REFERENSI	58
	LAMPIRAN.....	61

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Fungsi Ozon dan Aplikasinya dalam Pengolahan Air Minum dan Limbah.....	10
Tabel 2.2.	Sifat Fisik Ozon	12
Tabel 2.3.	Kelarutan Ozon dan Oksigen di dalam Air	13
Tabel 2.4.	Potensial Oksidasi dari beberapa Oksidan.....	13
Tabel 2.5.	Sifat-Sifat Fisik Fenol	23
Tabel 2.6.	Pengelompokan Jenis Reaktor Berdasarkan Property Pemusatan/Pengkonsentrasian Cahayanya.....	27



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Tahapan dalam Reaksi Fotokatalisis Heterogen	7
Gambar 2.2.	Ilustrasi Skematis Proses Foto-Eksitasi dan De-Eksitasi pada Suatu Semikonduktor	8
Gambar 2.3.	Potensi Energi Potensial beberapa Semikonduktor dalam Kontaknya dengan Larutan Elektrolit pada pH 1.....	9
Gambar 2.4.	Skema Sederhana dari Generator Ozon.....	14
Gambar 2.5.	Skema Reaksi Ozonasi Fenol.....	16
Gambar 2.6.	Konduksi dan Pita Valensi dan Pembentukan Pasangan Lubang Elektron pada Semikonduktor.....	17
Gambar 2.7.	Skala Laboratorium yang Dibuat untuk Fotokatalisis Ozonasi	17
Gambar 2.8.	Skema Produk Intermediet pada Degradasi Fenol.....	21
Gambar 2.9.	Struktur Kimia Fenol.....	22
Gambar 2.10.	Ikatan Hidrogen antara 2 Molekul Fenol.....	24
Gambar 2.11.	Ikatan Hidrogen antara Air dan Molekul Fenol.....	24
Gambar 2.12.	Reaksi Hidrolisis Fenol Menjadi Proton dan Ion Fenoksida	24
Gambar 2.13.	Delokalisasi Elektron pada Fenoksida.....	24
Gambar 2.14.	<i>Solar Parabolic Through Reactor (PTR)</i>	27
Gambar 2.15.	<i>Solar Falling Film Reactor</i>	28
Gambar 2.16.	Skema Reaktor PTR.....	29
Gambar 2.17.	Skema Reaktor CPC.....	30
Gambar 2.18.	Bentuk Reflektor Sinar pada Reaktor (a) TVC, (b) PTR, (C) CPC.....	31
Gambar 2.19.	Nilai Transmittan Material yang Umum Digunakan sebagai Fotoreaktor (300-400 nm).....	32
Gambar 2.20.	Reaktor TVC Tampak Depan	33
Gambar 3.1.	Diagram Alir Penelitian.....	36
Gambar 3.2.	Reaktor <i>Tubular 'V' Collectors (TVC)</i> yang telah Dilengkapi Injektor dan Ozonator.....	37
Gambar 3.3.	Skema Aliran Reaktor <i>Tubular 'V' Collectors (TVC)</i> Tampak Samping yang Dilengkapi dengan Ozonator.....	38
Gambar 4.1.	Penurunan Konsentrasi Fenol pada Uji Blanko	44
Gambar 4.2.	Kurva Perbandingan Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada Variasi Proses	46
Gambar 4.3.	Kurva Perbandingan Konversi Degradasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada Variasi Proses	46
Gambar 4.4.	Kurva Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada <i>Running</i> Fotokatalisis-Ozonasi dengan Matahari pada berbagai <i>Loading</i> Katalis	47
Gambar 4.5.	Kurva % <i>Removal</i> Fenol terhadap Waktu Reaksi pada <i>Running</i> Fotokatalisis-Ozonasi dengan Matahari pada berbagai <i>Loading</i> Katalis	48
Gambar 4.6.	Perbandingan Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada <i>Running</i> Fotokatalisis-Ozonasi dengan Variasi <i>Loading</i> Katalis (g/L).	49
Gambar 4.7.	Perbandingan % Konversi Degradasi Fenol terhadap waktu pada <i>Running</i> Fotokatalisis-Ozonasi Variasi <i>Loading</i> Katalis.....	50

Gambar 4.8.	Perbandingan Konversi Degradasi Fenol terhadap <i>Loading</i> Katalis TiO_2 pada Proses Fotokatalisis-Ozonasi (Konsentrasi Fenol Awal ± 20 ppm; pH 5-6; Volume Limbah 20 L; t = 8 jam)	50
Gambar 4.9.	Kurva Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada <i>Running</i> Fotokatalisis-Ozonasi Variasi Sumber Foton pada <i>Loading</i> Katalis 0,5 g/L.....	52
Gambar 4.10.	Kurva % Konversi Degradasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada <i>Running</i> Fotokatalisis-Ozonasi Variasi Sumber Foton pada <i>Loading</i> Katalis 0,5 g/L.	52
Gambar 4.11.	Pengaruh pH terhadap Degradasi Fenol untuk Proses Fotokatalisis Ozonasi	53
Gambar 4.12.	Pengaruh pH terhadap Konversi Degradasi Fenol (%) untuk Kombinasi Proses Fotokatalisis Ozonasi.....	53
Gambar 4.13.	Degradasi 2,4-D pada pH yang berbeda dengan Menggunakan Kombinasi Proses Fotokatalisis-Ozonasi	55



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk, kemajuan teknologi dan pertumbuhan berbagai industri, di satu sisi menyebabkan kebutuhan air akan bertambah, tetapi di sisi lain menyebabkan degradasi air akibat pencemaran. Kualitas air dipengaruhi oleh sifat air yang dapat melarutkan benda padat, mengabsorpsi gas-gas maupun dapat bercampur dengan bahan lain. Akibat dari sifat tersebut, air mudah tercemar karena mengandung zat-zat yang diperoleh dari udara, tanah dan tempat-tempat yang dilalui. Oleh karena itu perlu adanya sistem pengolahan air limbah. Sistem pengolahan air limbah memiliki berbagai macam cara yang memerlukan pertimbangan yang baik agar sasaran dapat tercapai secara efektif dan efisien.

Parameter air limbah industri sangat banyak, terutama parameter bahan organik, salah satu diantaranya adalah fenol dan senyawa-senyawa turunannya (senyawa fenolik) (Metcalf & Eddy, 1991). Fenol sebagai polutan organik terkandung dalam air buangan industri sintesis kimia yang bersifat toksik. Senyawa fenolik dapat dijumpai di dalam air limbah yang bersumber dari kegiatan pabrik gas dan batu bara, pabrik resin sintetik, pengilangan minyak, industri tekstil, penyulingan aspal, industri kimia, pabrik pestisida, dan pabrik bahan pewarna.

Beberapa teknologi yang dipakai untuk mengolah limbah organik tersebut, di antaranya adalah adsorpsi menggunakan karbon aktif berbentuk granular (GAC). Tetapi cara ini tidak akan mendegradasi bentuk atau formula awalnya sehingga polutan yang telah terserap tetap berbahaya. Dengan demikian akan tetap menimbulkan pencemaran lingkungan, meskipun dalam bentuk lain, karena sampai saat ini teknologi regenerasi absorben yang terpakai belum tersedia. Cara lain adalah dengan bioteknologi yaitu proses penyisihan dengan memanfaatkan mikroba yang ada. Namun kendalanya adalah sering dihadapi di sini adalah memilih atau menemukan mikroba yang cocok yang dapat mendegradasi polutan organik secara efektif. Selain itu teknik ini pada umumnya relatif lebih lambat daripada cara-cara kimiawi dan tidak semua polutan organik dapat terdegradasi dengan metode ini.

Sejak tahun 1980-an, teknologi fotokatalis sudah mulai diaplikasikan sebagai teknologi baru untuk mengatasi masalah lingkungan baik di Amerika, Eropa, maupun Jepang. Teknologi ini awalnya ditujukan untuk mengurangi kadar polutan dengan menggunakan radikal hidroksil yang dihasilkan oleh adanya paparan cahaya. Akan tetapi sejak sifat hidrofilik dari material yang dilapisi oleh fotokatalis (dalam hal ini TiO_2) ditemukan pada tahun 1990-an, berbagai jenis material yang fungsional mulai dikembangkan terutama oleh Jepang (Lee *et al.*, 2006). Sumber sinar yang digunakan pada teknologi fotokatalisis adalah sinar matahari. Pemilihan sinar matahari sebagai sumber sinar karena sinar matahari jumlahnya berlimpah, tidak polutif sedangkan pemanfaatannya masih terbatas. Dan dipilihnya TiO_2 sebagai katalis karena mempunyai energi celah sebesar 3,0 eV. Foton yang dipancarkan sumber sinar menyebabkan elektron valensi akan terlepas dari ikatannya sehingga menyebabkan terbentuknya elektron dan hole. Penelitian ini melakukan degradasi fotokatalisis fenol dengan menggunakan suspensi TiO_2 pada suhu kamar.

Proses Ozon atau proses oksidasi tingkat lanjut/*Advanced Oxidation Processes* (AOP) telah dibuktikan untuk teknologi yang sesuai. Penggunaan dari proses ini dilaporkan pada literatur di mana perbedaan contoh tentang aplikasi dari penghilangan fenol dapat disertakan. Proses-proses ini ditandai oleh pembentukan radikal hidroksil yang akan mengoksidasi senyawa organik tersebut. Sebagai tambahan, jika proses melibatkan ozon, degradasi fenol ditingkatkan melalui elektofilik yang secara langsung menyerang oksidan ini. Suatu proses yang menyertakan sampai ke empat mekanisme oksidasi yang mungkin adalah fotokatalisis ozonasi di mana suatu fotokatalisis (TiO_2) diarahkan ke radiasi (UV atau visible) dan ozon (Fernando *et al.*, 2005).

Secara umum, kombinasi dari beberapa metoda memberikan efisiensi pengolahan yang lebih tinggi dibandingkan dengan pengolahan dengan satu metoda. Sebagai contoh, suatu campuran organik tertentu sulit didegradasi oleh ozonasi atau fotolisis itu sendiri dan pengolahannya mungkin lebih berbahaya sebagai hasil ozonasi kecuali suatu kombinasi beberapa metoda pengolahan, seperti: O_3/VUV (ozone/vacuum ultraviolet), $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ (ozone/hydrogen peroksida/ultraviolet), dan

UV/H₂O₂ (ultraviolet/hydrogen peroksida) dapat meningkatkan hilangnya zat pengotor (senyawa organik) dari air limbah (Agustina *et al.*, 2005).

Di sisi lain, fotokatalisis mempunyai suatu potensi yang besar untuk mendegradasi zat organik pengotor dari limbah cair, walaupun fotokatalisis bukan merupakan metode yang praktis penggunaannya karena laju oksidasi yang rendah. Oleh karena itu, suatu kombinasi dari fotokatalisis dengan ozon, yang merupakan pengoksidasi dapat digunakan untuk pengolahan senyawa organik yang sulit didegradasi. Senyawa organik yang sulit terurai diharapkan terurai dengan cepat dan secara menyeluruh karena adanya ozon menjadi gas karbondioksida, air, atau ion anorganik. Sanchez *et al.* mengkombinasikan dua metoda (fotokatalisis dan ozonasi) ini untuk mendegradasi anilin dari air dan menemukan laju dekomposisi anilin lebih besar dari pada menggunakan pengolahan dengan masing-masing metode atau satu metode (Sanchez *et al.*, 1998).

Wang *et al.* pada tahun 2002 mempelajari dekomposisi larutan asam format menggunakan fotokatalisis, ozonasi, dan kombinasi keduanya (fotokatalisis dan ozonasi). Sebagai hasilnya, laju dekomposisi dari larutan asam format dengan menggunakan kombinasi metode tersebut didapatkan lebih besar dari pada jumlah laju dekomposisi larutan asam format dengan menggunakan masing-masing metode. Hal ini menandai bahwa terdapat suatu efek yang sinergis dari fotokatalisis dan ozonasi. (Wang *et al.*, 2002)

Pengolahan limbah organik menggunakan metode fotokatalisis ozonasi masih sedikit diantaranya yang meneliti menggunakan reaktor skala pilot. Oleh karena itu penelitian yang akan dilakukan adalah pengolahan limbah organik menggunakan kombinasi metode fotokatalisis dan ozonasi skala pilot dengan modifikasi reaktor yang diharapkan dapat menghasilkan kinerja yang baik dalam mendegradasi senyawa fenol.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang menjadi permasalahan utama ialah bagaimana merencanakan reaktor skala pilot kombinasi proses fotokatalisis dengan TiO₂ dan ozonasi untuk mendegradasi senyawa fenol dan menentukan kinerja dari reaktor tersebut.

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian yang dilakukan ini adalah studi kombinasi proses fotokatalisis dan ozonasi untuk mendegradasi fenol pada reaktor skala pilot dan mempunyai tujuan :

1. Rekayasa reaktor *Tubular "V" Collectors* (TVC) untuk degradasi fenol dengan kombinasi proses fotokatalisis dan ozonasi.
2. Menguji kinerja reaktor *Tubular "V" Collectors* (TVC) untuk penyisihan fenol pada berbagai kondisi pada matahari dan lampu.

1.4. Batasan Masalah

Ruang lingkup permasalahan dalam penelitian ini adalah :

1. Sampel yang digunakan dalam degradasi limbah senyawa organik (fenol) adalah larutan fenol sintetik pada konsentrasi tertentu.
2. Katalis yang digunakan dalam degradasi limbah senyawa organik (fenol) adalah TiO_2 degussa P25.
3. Proses fotokatalisis dan ozonasi dilakukan dalam skala pilot dengan menggunakan Reaktor *Tubular-V-Collector* (TVC) dengan sistem *batch* yang dilengkapi lampu UV dan ozonator.
4. Metode yang digunakan adalah kombinasi metode fotokatalisis dengan ozonasi.
5. Untuk mengetahui pengaruh sumber foton dalam penyisihan fenol, digunakan dua sumber: sinar matahari dan lampu UV.
6. Untuk mengetahui pengaruh banyaknya penambahan katalis, dilakukan pengujian menggunakan kombinasi proses fotokatalitik dan ozonasi dengan lampu UV sebagai sumber foton.
7. Untuk mempelajari pengaruh pH pada proses penyisihan fenol dengan menggunakan kombinasi proses fotokatalitik dan ozonasi, digunakan dua kondisi: pH 5-6 dan pH 10-11.
8. Metode yang dipakai untuk menganalisis larutan fenol adalah metode aminoantipirin dengan menggunakan UV-VIS *Spectrophotometer*.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam makalah seminar ini dilakukan dengan membagi tulisan menjadi lima bab, yaitu:

BAB 1 PENDAHULUAN

Meliputi latar belakang penelitian dan penulisan, perumusan masalah yang dibahas, tujuan dilakukannya penelitian, ruang lingkup penelitian, serta sistematika penulisan skripsi ini.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tinjauan pustaka yang menjadi dasar penelitian yang meliputi definisi fotokatalisis dan prinsip dasar proses fotokatalitik, mekanisme degradasi fenol dengan fotokatalisis TiO_2 , pengolahan limbah cair dengan teknik ozonasi, ozon, sifat fisika ozon, sifat kimia ozon, pembuatan ozon, kontak ozon dalam air, reaksi ozon dengan fenol, fotokatalisis dan ozonasi, mekanisme reaksi kombinasi fotokatalisis dan ozonasi, parameter yang mempengaruhi fotokatalisis-ozonasi, fenol, sifat-sifat fisika dan kimia fenol, pengaruh senyawa fenol, reaktor fotokatalisis, *Parabolic Through Reactor* (PTR), *Compound Parabolic Collecting Reactor* (CPCR), Reaktor *Tubular "V" Collectors* (TVC) dan UV-VIS Spektrofotometer.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Berisi diagram alir penelitian, peralatan percobaan, bahan percobaan dan prosedur yang dilakukan dalam penelitian.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini meliputi paparan hasil percobaan serta pembahasan.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

DAFTAR REFERENSI

LAMPIRAN

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Definisi Fotokatalisis dan Prinsip Dasar Proses Fotokatalisis

Menurut IUPAC fotokatalisis didefinisikan sebagai reaksi katalitik yang melibatkan absorpsi cahaya oleh katalis atau substrat tertentu. Dapat juga didefinisikan suatu proses kombinasi antara proses fotokimia dan katalis. Proses fotokimia adalah proses sintesis (transformasi) secara kimiawi dengan melibatkan cahaya sebagai pemicunya dan katalis sebagai pemercepat proses transformasi tersebut. Katalis yang digunakan disebut fotokatalis karena memiliki kemampuan dalam mengabsorpsi foton karena fungsi lain dari fotokatalis adalah mengabsorpsi foton. Hal ini dikarenakan bahan-bahan yang dapat dimanfaatkan sebagai fotokatalis ialah bahan-bahan yang memiliki celah pita energi (*energy bandgap*) dan bahan yang termasuk dalam jenis ini adalah semikonduktor. Bahan semikonduktor hanya akan berfungsi sebagai katalis jika cahaya yang mengenainya memiliki energi yang setara atau lebih besar dari pada celah pita energi dari bahan semikonduktor. (Ahmad F. Fasa, 2005)

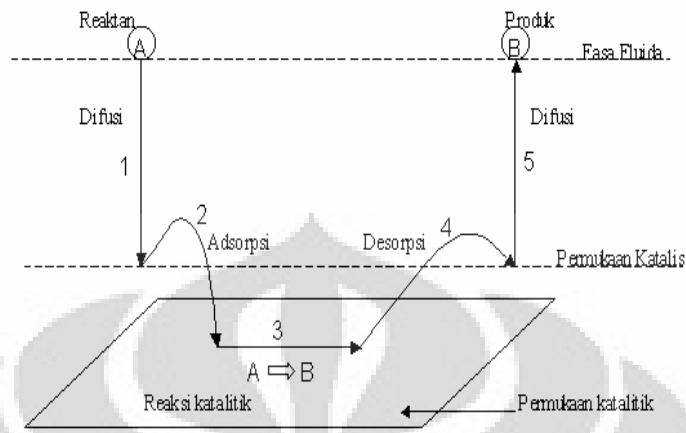
Fotokatalisis heterogen adalah proses fotokatalis dimana tahap reaksinya berlangsung dengan kehadiran pasangan *electron-hole* yang dihasilkan pada permukaan bahan semikonduktor yang diiluminasi oleh cahaya pada tingkat energi yang sesuai. Seperti pada katalis heterogen yang sudah ada, proses keseluruhannya dapat dibagi dalam lima tahap, yaitu:

1. Difusi reaktan dari fasa fluida ke permukaan katalis.
2. Adsorpsi reaktan ke permukaan katalis.
3. Reaksi dalam fasa teradsorpsi.
4. Desorpsi produk dari permukaan.
5. Difusi produk dari daerah interfasa.

Kelima tahap tersebut dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.1.

Reaksi fotokatalisis terjadi pada fasa teradsorpsi. Perbedaannya dengan katalisis konvensional hanyalah mode aktivasi katalis di mana aktivasi termal digantikan oleh aktivasi foton. Mode aktivasi ini tidak terdapat pada tahap 1, 2, 4

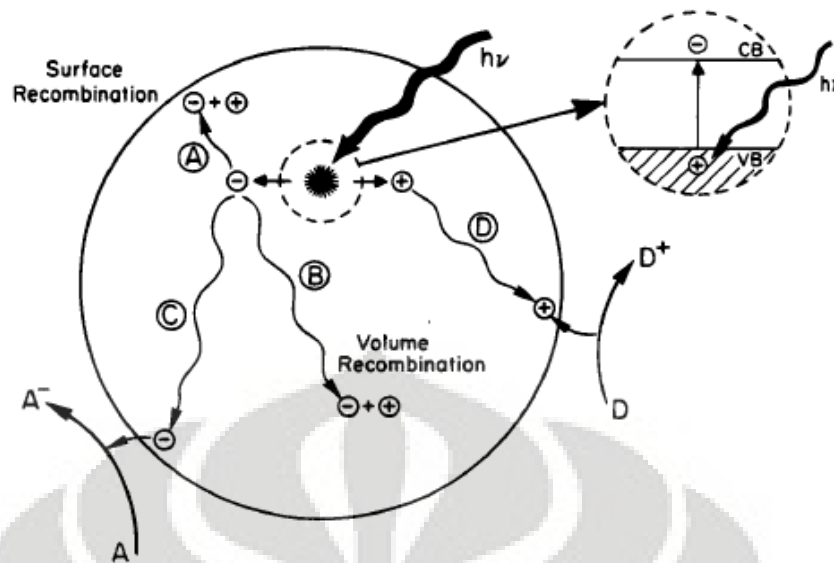
dan 5, walaupun kenyataannya ada fotoadsorpsi dan fotodesorpsi reaktan, terutama oksigen. (Ahmad F. Fasa, 2005)



Gambar 2.1. Tahapan dalam Reaksi Fotokatalisis Heterogen (Fogler, 1999)

Proses fotokatalitik heterogen secara umum dapat didefinisikan sebagai proses reaksi kimia yang dibantu oleh cahaya dan katalis padat. Satu atau lebih langkah reaksi melibatkan pasangan *electron-hole* (e^- dan h^+ , lubang positif-elektron) pada permukaan bahan semikonduktor. Definisi umum tersebut mempunyai implikasi bahwa beberapa langkah-langkah fotokatalisis adalah merupakan reaksi redoks yang melibatkan pasangan e^- dan h^+ . (Jarnuzi, 2001)

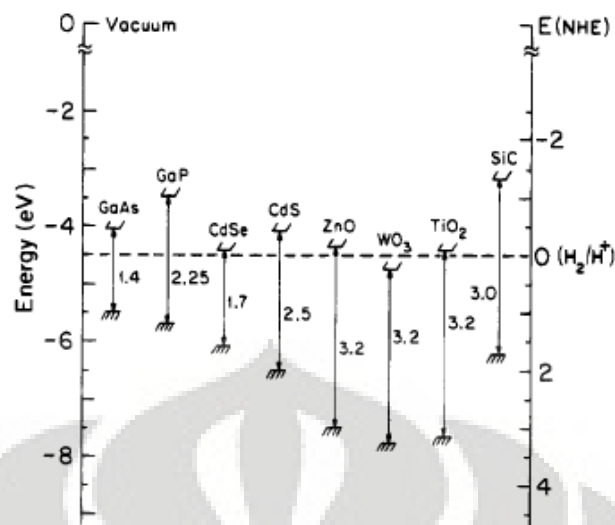
Secara umum, fenomena fotokatalisis pada permukaan semikonduktor dapat difahami dengan penjelasan sederhana berikut ini (Gambar 2.2). Jika suatu semikonduktor dikenai cahaya ($h\nu$) dengan energi yang sesuai, maka elektron (e^-) pada pita valensi akan pindah ke pita konduksi, dan meninggalkan lubang positif ($hole^+$, disingkat sebagai 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. (Jarnuzi, 2001)



Gambar 2.2. Ilustrasi Skematis Proses Foto-Eksitasi dan De-Eksitasi pada Suatu Semikonduktor
(Linsebigler, 1995)

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

Ketika katalis semikonduktor diiluminasi dengan foton yang memiliki energi yang sama atau lebih tinggi dari *band gap* energy, E_G , ($h\nu \geq E_G$), maka foton akan diabsorpsi dan terbentuk pasangan elektron, e^- , dan hole, h^+ , yang dipisahkan menjadi fotoelektron bebas pada pita konduksi dan fotohole pada pita valensi. Gambar 2.3 memperlihatkan besarnya celah-celah pita energi dan posisi-posisi pita untuk beberapa semikonduktor. (Linsebigler, 1995)

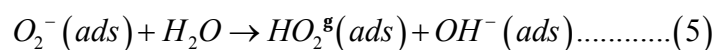
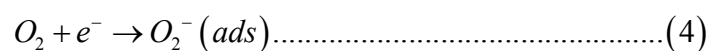
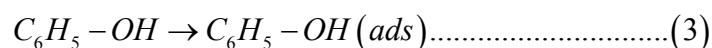
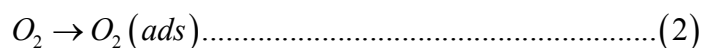
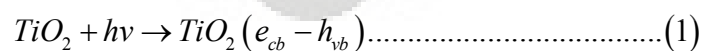


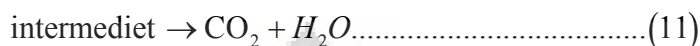
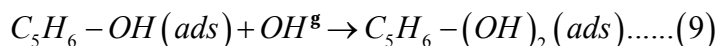
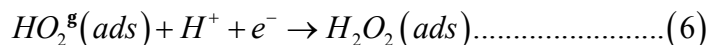
Gambar 2.3. Posisi Energi Potensial beberapa Semikonduktor dalam Kontaknya dengan Larutan Elektrolit pada pH 1 (Linsebigler, 1995)

2.2. Mekanisme Degradasi Fenol dengan Fotokatalisis TiO₂

Pada proses fotokatalisis akan terbentuk pasangan elektron-hole yang terjadi pada saat semikonduktor TiO₂ dikenai sinar. Hole yang terbentuk akan mengadsorb molekul-molekul organik yang terdapat pada permukaan katalis, sehingga akan terbentuk radikal OH[•]. Radikal OH[•] ini akan menyerang cincin fenol terlebih dulu dan selanjutnya akan mempermudah reaksi fenol dengan radikal bebas OH[•] tersebut. Reaksi tersebut akan menghasilkan senyawa intermediet yang bersifat sementara untuk kemudian menjadi mineral lain seperti CO₂ dan H₂O. Senyawa fenol memiliki nilai potensial oksidasi sebesar 0,8 V (E^o vs NHE) (Slamet, 2004).

Secara sederhana reaksi fotokatalisis untuk mendegradasi senyawa fenol dalam air limbah dapat dituliskan sebagai berikut. (Ahmad F. Fasa, 2005)





Keterangan: (ads) adalah adsorpsi.

2.3. Pengolahan Limbah Cair dengan Teknik Ozonasi

Teknik ozonasi dalam pengolahan limbah cair pada dasarnya merupakan salah satu metode pengolahan secara oksidasi kimiawi menggunakan ozon sebagai oksidator. Oksidator konvensional lain yang digunakan untuk oksidasi kimiawi pada pengolahan limbah cair antara lain adalah klorin (Cl_2), hidrogen peroksida (H_2O_2), dan kalium permanganat ($KMnO_4$) (Rice & Browning, 1981; Eckenfelder, 1989). Penggunaan ozon dalam pengolahan limbah dapat berlangsung berdasarkan tiga fungsi utama ozon, seperti terlihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Fungsi Ozon dan Aplikasinya dalam Pengolahan Air Minum dan Limbah

Fungsi Utama	Aplikasi
Biosida	<ul style="list-style-type: none"> - Desinfeksi bakteri - Inaktivasi virus - Pengendalian alga
Oksidan konvensional/klasik	<ul style="list-style-type: none"> - Oksidasi besi (Fe) dan mangan (Mn) terlarut - Menghilangkan bau, warna dan rasa - Penyisihan mikropolutan organik, misalnya pestisida, detergen, senyawa fenolik - Penyisihan sianida
Perlakuan awal atau pasca-perlakuan	<ul style="list-style-type: none"> - Penyisihan zat padat terlarut (suspended solids) atau koagulasi - Peningkatan kemampuan biodegradasi zat organik terlarut (dissolved organics) - Menghilangkan potensi pembentukan Tri Halo Metana (THM) dan halida organik - Mengurangi Kebutuhan klorin

(Rice & Browning, 1981; Langlais et. Al, 1991)

2.4. Ozon (O_3)

Ozon telah dikenal ratusan tahun yang lalu sebagai bau aneh yang timbul setelah terjadi badai disertai kilatan. Ozon pertama kali ditemukan oleh CF Schonbein pada tahun 1840. Penamaan ozon diambil dari bahasa Yunani *ozein* yang berarti *smell* atau bau dan dikenal sebagai gas yang tidak memiliki warna (Contreras, 2002). Ozon (O_3) pertama kali digunakan dalam pengolahan air, sebagai senyawa disinfeksi dalam pengolahan air minum di Nice, Prancis pada tahun 1906 (Langlais, 1991). Oksidator ini dapat digunakan sebagai disinfektan utama untuk mematikan mikroorganisme patogen dan untuk mengoksidasi besi, mangan, komponen-komponen yang menghasilkan rasa dan bau dalam air, warna dan zat organik yang sukar hilang.

Ozon merupakan oksidator yang sangat kuat dan juga virisida. Mekanisme disinfeksi dengan menggunakan ozon mencakup (____, EPA, 1999):

1. Oksidasi/ penghacuran dinding sel secara langsung
2. Reaksi dengan produk samping dekomposisi ozon yang radikal
3. Perusakan muatan dari asam nukleat (purine dan pyrimidine)
4. Pemutusan ikatan karbon-nitrogen

Seiring dengan berkembangnya teknologi dan rekayasa pembuatan ozon senyawa ini dapat digunakan dalam berbagai proses, diantaranya pengolahan limbah industri, penghilang bau, zat pemutih, dan pengolahan air.

Keunggulan penggunaan ozon yaitu (Metcalf & Eddy, 1999):

1. Ozon merupakan oksidator kuat
2. Oksidasi dengan ozon tidak menimbulkan produk samping senyawa-senyawa THM (trihalometana) yang bersifat karsinogenik.
3. Efluen yang dihasilkan hampir tidak mengandung residu ozon karena sifatnya yang mudah terdekomposisi menjadi oksigen, dan penggunaan ozon sesuai untuk pelaksanaan kontrol otomatis.
4. O_3 dibangkitkan on-site menggunakan generator ozon, sehingga tidak ada masalah bahaya penyimpanan.

Kekurangan penggunaan ozon diantaranya yaitu biaya besar, ozon tidak dapat disimpan karena sifatnya yang tidak stabil, kemungkinan terjadi interferensi

kimiawi pada limbah campuran. Namun pengolahan limbah menggunakan ozon, efektif dilakukan pada konsentrasi awal limbah yang tinggi (Metcalf & Eddy, 1999).

2.4.1. Sifat Fisika Ozon

Ozon (O_3) adalah bentuk alotropik dari oksigen (O_2) dan sering disebut juga oksigen teraktivasi. Senyawa ini merupakan gas tak berwarna (pada suhu kamar) yang dapat mengembun membentuk suatu cairan biru pada suhu $-112^\circ C$ dan akan membeku pada $-251,4^\circ C$. Pada suhu diatas $100^\circ C$ akan dengan cepat mengalami dekomposisi.

Tabel 2.2. Sifat Fisik Ozon

Sifat Fisik	Nilai
1. Berat Molekul	48
2. Titik Didih (101 kPa)	-111.9
3. Titik Leleh	-192.7
4. Temperatur kritis	-12.1
5. Tekanan kritis	5.53 Mpa
6. Berat Jenis, gas ($0^\circ C$, 101 kPa)	2.144 kg.m^{-3}
7. Berat Jenis, cair ($-112^\circ C$)	1358 kg.m^{-3}
8. Tegangan permukaan ($-183^\circ C$)	$3,84 \times 10^{-2} \text{ N.mm}$
9. Viskositas, cair ($-183^\circ C$)	$1.57 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$
10. Kapasitas panas, cair (-183 sampai $-145^\circ C$)	$1884 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
11. Kapasitas panas, gas ($25^\circ C$)	$818 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
12. Kapasitas panas penguapan	$15,2 \text{ kJ.mol}^{-1}$

(Contreras, 2002)

Ozon merupakan gas yang mempunyai bau seperti pedas (pungent), tajam (acid), tidak enak, seperti bahan pemutih klor, dan seperti sesuatu yang menusuk dalam-dalam lubang hidung. Ozon merupakan zat yang sangat beracun, lebih beracun daripada sianida (KCN atau NaCN), dan karbonmonoksida. Spesifikasi ozon dapat dilihat pada Tabel 2.2.

2.4.2. Sifat Kimia Ozon

Ozon berbentuk pada gas pada suhu dan tekanan normal. Kelarutan ozon didalam air mirip sebagaimana oksigen, bergantung pada temperatur dan tekanan *partial* ozon didalam fase gas disamping pengaruh dari pH cairan. Kelarutan ozon dan oksigen dalam air disajikan dalam Tabel 2.3. berikut :

Tabel 2.3. Kelarutan Ozon dan Oksigen di dalam Air

Temperatur (°C)	Kelarutan Ozon (mg/L)	Kelarutan Oksigen (mg/L)
0	20	6,9
2	10	6,6
20	8,92	4,3
28	1,5	3,7

(Rice & Browning, 1981)

Sebagai senyawa yang tidak stabil, yang mudah terdekomposisi kembali menjadi oksigen, laju reaksi dekomposisi ozon akan bertambah besar sesuai dengan kenaikan suhu dan pH. Ozon juga mempunyai nilai potensial oksidasi yang cukup kuat sebagaimana terlihat pada Tabel 2.4. yang membandingkan ozon dengan senyawa lain yang memiliki potensial oksidasi yang tinggi.

Tabel 2.4. Potensial Oksidasi dari beberapa Oksidan

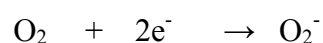
Jenis Oksidan	Potensial Oksidasi (eV)
<i>Flourine</i>	3,06
OH Radikal	2,80
Oksigen (O ₂)	2,42
Ozon	2,07
Hidrogen Peroksida	1,77
Perhidroksil radikal	1,70
<i>Hypochlorous acid</i>	1,49
Klorin	1,36

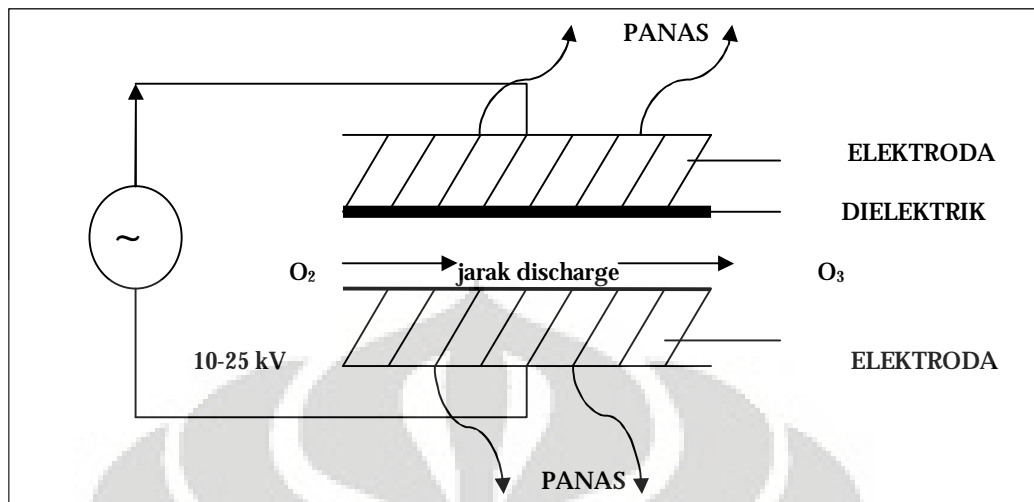
(Contreras, 2002)

2.4.3. Pembuatan Ozon

Ozon dihasilkan dengan cara pemutusan ikatan molekul oksigen yang stabil menjadi dua atom oksigen yang berumur pendek. Atom oksigen yang reaktif (radikal oksigen) ini bereaksi dengan molekul oksigen membentuk ozon. Pada umumnya pembuatan ozon yang paling efisien adalah dengan menggunakan bahan baku udara atau oksigen murni yang dilewatkan diantara dua buah elektroda yang saling berdekatan yang dialiri arus listrik bertegangan tinggi (6000-20000 V) seperti tampak pada Gambar 2.4.

Dengan reaksi sebagai berikut :





Gambar 2.4. Skema Sederhana dari Generator Ozon

Parameter penting yang harus diperhatikan dalam pembangkitan ozon dengan menggunakan ozonator untuk mendapatkan konsumsi energi listrik yang lebih efisien adalah sebagai berikut (<http://www.ozoneapplication.com>).

1. Laju alir gas masukan

Penambahan laju alir gas masukan akan mengakibatkan kenaikan jumlah ozon yang dihasilkan ozonator per satuan waktu dan per satuan energi listrik yang dibutuhkan.

2. Temperatur

Temperatur yang terlalu tinggi akan menyebabkan ozon yang dihasilkan dalam ozonator akan mudah terdekomposisi kembali menjadi oksigen.

3. Gas masukan

Penggunaan oksigen sebagai umpan gas masukan akan lebih baik dibandingkan dengan menggunakan udara

2.4.4. Kontak Ozon dalam Air

Ozon dapat larut dalam media cair sehingga kontak antara ozon dan air ditandai dengan adanya gelembung pada larutan cair tersebut. Faktor yang mempengaruhi perpindahan massa (efek kelarutan) ozon ke dalam larutan cair adalah sebagai berikut :

- Daya kelarutan ozon pada cairan yang mengandung zat tertentu
- Konsentrasi ozon di dalam gas

- Jenis masukan umpan: udara atau oksigen
- Metode kontak yang digunakan
- Waktu kontak
- Ukuran gelembung gas
- Tekanan dan temperatur operasi

Ada beberapa metode injeksi ozon ke dalam fasa cair. Injeksi ozon ke dalam fasa cair dapat dilakukan dengan menggunakan injektor jenis venturi. Karakteristik dari injektor jenis venturi ini adalah (Salam, 2000):

- Laju perpindahan massa ozon sangat tinggi (mencapai 90% lebih)
- Membutuhkan pompa air untuk menginisiasi suction
- Efisiensinya jarang berkurang dari waktu ke waktu
- Lebih hemat dibandingkan dengan metode injeksi lain
- Konstruksi yang sederhana hanya terdiri dari satu unit, jarang bermasalah dalam pengoperasiannya.

2.4.5. Reaksi Ozon dengan Fenol

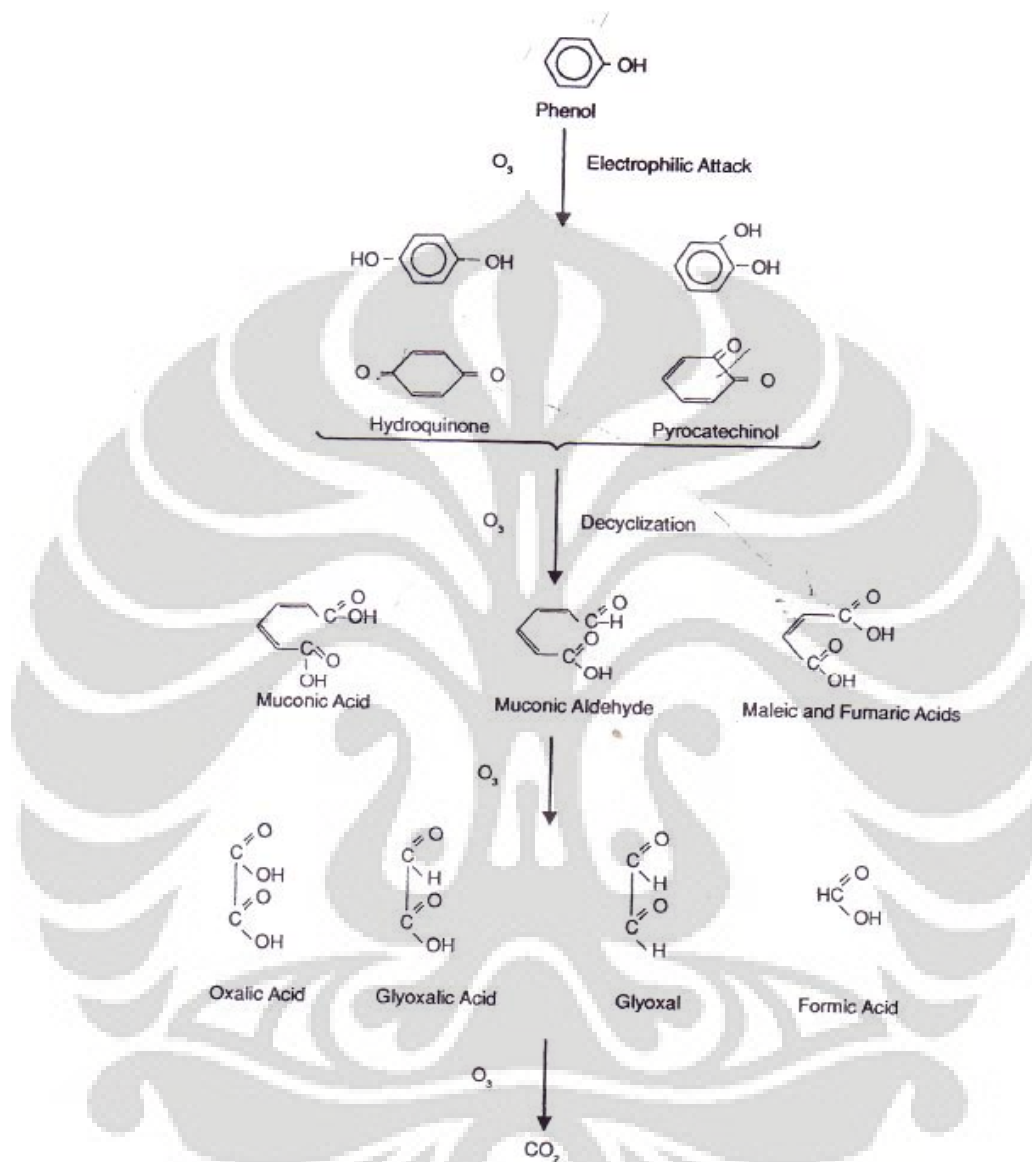
Fenol merupakan senyawa organik yang tidak dapat terdegradasi secara hayati. Mekanisme oksidasi senyawa organik yang terlarut dalam air dengan menggunakan ozon adalah sebagai berikut (Langlais, 1991):

1. Oksidasi senyawa alkohol membentuk aldehid yang diteruskan hingga terbentuk asam karboksilat.
2. Substitusi sebuah atom oksigen ke dalam cincin aromatis.
3. Pemecahan atau pemutusan ikatan ganda ($C = C$).

Pada proses penyisihan senyawa fenol dalam air limbah menggunakan ozon di dalam limbah cair terjadi reaksi antara fenol dengan ozon. Reaksi tersebut terjadi karena adanya interaksi antara fenol dengan ozon. Reaksi tersebut terjadi karena adanya interaksi antara gugus fenil dan hidroksil pada fenol menyebabkan senyawa ini sangat reaktif dengan berbagai senyawa, termasuk ozon. Terdapat dua mekanisme penyerangan fenol oleh ozon, yaitu (Langlais, 1991):

1. Pada pH asam atau netral, terjadi mekanisme penyerangan elektrofilik pada atom karbon reaktif (posisi orto dan para).
2. Pada pH netral atau basa, selain mekanisme tersebut di atas juga terjadi penyerangan elektrofilik pada ion fenat atau ion hidroksil.

Oksidasi akan menghasilkan produk antara berupa produk hasil dari hidroksilasi aromatik, seperti difenol dan quinon serta produk hasil dari pemutusan cincin, seperti asam mukonat dan turunannya.



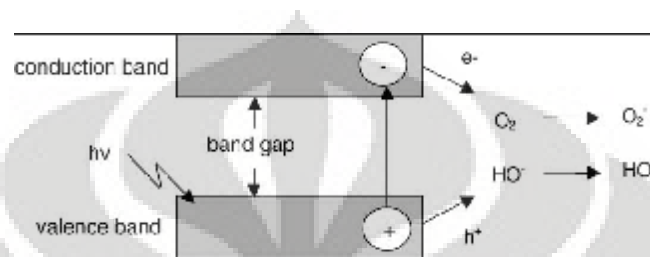
Gambar 2.5. Skema Reaksi Ozonasi Fenol

(Langlais et al., 1991)

Proses dengan menggunakan ozon didasarkan pada dua mekanisme reaksi baik reaksi secara langsung maupun tidak langsung (Contreras, 2002). Ini merupakan konsekuensi dari disintegrasi ozon dalam air, menjadi OH-radikal. Radikal ini mempunyai waktu tinggal yang sangat singkat tetapi lebih kuat dalam mengoksidasi dari pada ozon itu sendiri.

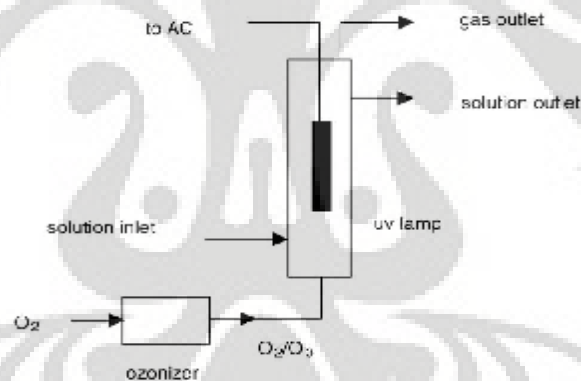
2.5. Fotokatalisis dan Ozonasi

Degradasi secara fotokatalitik telah terbukti menjadi sebuah teknologi yang menjanjikan mendegradasi berbagai senyawa organik. Dengan membandingkan metoda oksidasi kimia konvensional lainnya, fotokatalisis lebih efektif karena semikonduktor murah dan mampu memineralisasi berbagai senyawa yang sulit terurai. (Augustina *et al.*, 2005)



Gambar 2.6. Konduksi dan Pita Valensi dan Pembentukan Pasangan Lubang Elektron pada Semikonduktor.

(Augustina *et al.*, 2005)



Gambar 2.7. Skala Laboratorium yang Dibuat untuk Fotokatalisis Ozonasi

(Augustina *et al.*, 2005)

Reaksi fotokatalisis terjadi ketika pemisahan muatan di dalam bandgap semikonduktor oleh eksitasi radiasi-radiasi ultra bandgap. Dengan cara ini, serapan cahaya oleh fotokatalis yang lebih besar dari bandgap energinya mengeksitasi suatu elektron dari pita valensi pada partikel yang tersinari ke pita hantar nya, pembentukkan suatu lubang yang bermuatan positif di pita valensi dan suatu elctron di pita konduksi ditunjukkan pada Gambar 2.6. Lubang di pita valensi boleh bereaksi dengan air yang diserap di permukaan untuk membentuk hidroksil radikal, dan di sisi lain elctron pita konduksi dapat mengurangi oksigen

yang diserap untuk membentuk anion peroksida radikal yang lebih lanjut dapat terdisproporsionasi membentuk $\text{OH}\cdot$ melalui/sampai berbagai langkah reaksi. Sepanjang proses fotokatalitik, oksigen lain yang mengandung radikal juga terbentuk anion radikal *superoxide* dan radikal *hydroperoxide*. Sebagai tambahan, ikatan elektron boleh juga bereaksi secara langsung dengan zat-pencemar dengan cara proses-proses reduksi. Umumnya dapat diterima bahwa adsorpsi substrat di permukaan dari semikonduktor berperan penting dalam oksidasi fotokatalitik (Augustina *et al.*, 2005).

Keefektifan fotokatalisis dalam mendegradasi limbah dapat mencapai hingga baku mutu yang diinginkan tetapi prosesnya berjalan lambat. Di lain pihak, penggunaan ozon efektif dalam mendegradasi limbah organik dengan konsentrasi tinggi tetapi harus dikombinasikan dengan metode lainnya untuk mencapai baku mutu limbah yang diinginkan. Berdasarkan hal tersebut, maka fotokatalisis dan ozonasi diaplikasikan secara simultan untuk mendapatkan hasil yang lebih efektif dalam mendegradasi limbah organik. Karena kombinasi ozon dan fotokatalis dapat meningkatkan pembentukan $\text{OH}\cdot$ radikal yang sangat cepat dalam mendegradasi fenol (Augustina *et al.*, 2005). Fenol yang teradsorpsi diserang langsung oleh ozon. Selain oksidasi dengan ozon, UV dan katalis membentuk radikal hidroksil yang berkontribusi untuk oksidasi reaksi-reaksi intermediet yang terdeteksi.

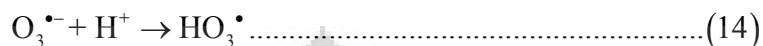
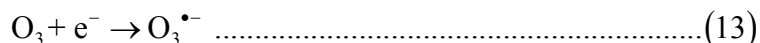
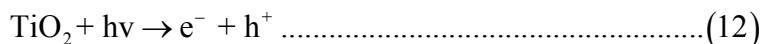
Sejak proses ini melibatkan kombinasi dari UV, O_3 dan TiO_2 , mekanisme yang nyata mungkin lebih dipersulit. Dalam kombinasi ini, pemisahan muatan dianggap sebagai proses yang paling efektif untuk mempromosikan degradasi secara fotokatalitik, walaupun kontribusi dalam penambahan OH radikal yang terbentuk melalui penerimaan elektron oleh O_3 tidaklah jelas. (Tanaka *et al.*, 1996)

Bertentangan dengan dugaan umum yang menyebutkan bahwa proses yang fotokatalitik adalah lambat dan hanya dapat digunakan untuk solusi dari konsentrasi yang rendah, hal tersebut telah ditunjukkan di studi ini bahwa metoda yang fotokatalitik dikombinasikan dengan *ozonation* menyediakan penurunan yang cepat (Tanaka *et al.*, 1996).

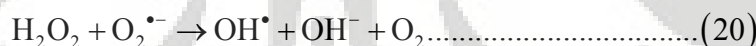
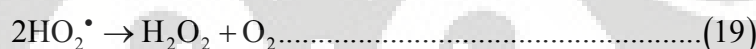
2.5.1. Mekanisme Degradasi Fenol dengan Proses Fotokatalisis-Ozonasi

Mekanisme yang mungkin terjadi dari penggabungan kedua metode ini dijelaskan secara rinci oleh Augustina *et al.* yaitu (Augustina *et al.*, 2005) :

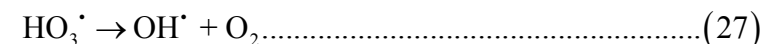
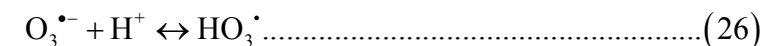
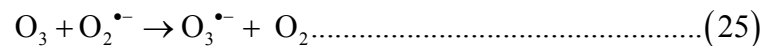
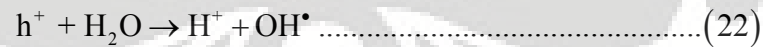
1. Perpindahan transfer elektron secara langsung dari TiO_2 ke molekul ozon dimana akan menghasilkan OH^\bullet radikal selama pembentukan ozonida radikal ($\text{O}_3^{\bullet-}$):



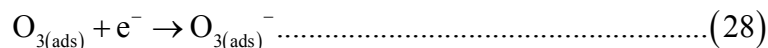
Dalam fotokatalisis, radikal hidroksil pada umumnya adalah yang menyerang senyawa organik tersebut. Maka harus dipertimbangkan bahwa radikal OH dapat bereaksi dengan O_3 .



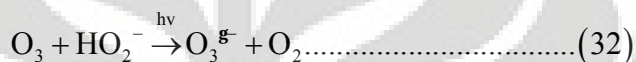
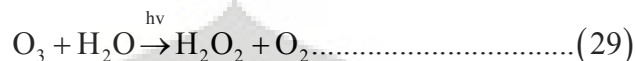
2. Transfer elektron dari TiO_2 ke molekul oksigen untuk membentuk $\text{O}_2^{\bullet-}$, lalu $\text{O}_2^{\bullet-}$ bereaksi dengan ozon membentuk OH^\bullet radikal selama pembentukan ozonida radikal



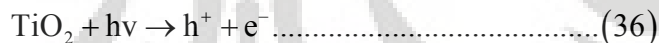
3. Rekombinasi elektron dan hole dapat dicegah dari reaksi antara ozon dan elektron pada permukaan TiO_2 , sehingga dihasilkan senyawa radikal untuk mempercepat terjadinya reaksi fotokatalisis.



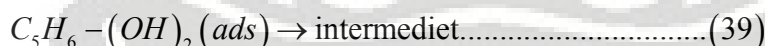
4. Pembentukan hidrogen peroksida dan OH radikal meningkat dengan penyinaran UV terhadap ozon.



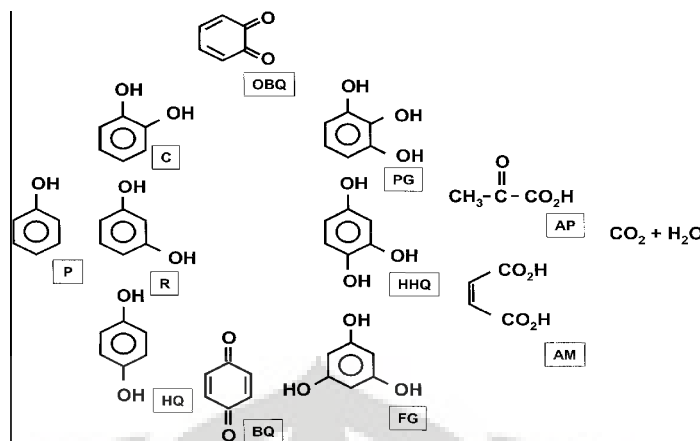
5. OH^\bullet radikal terbentuk dari reaksi terserapnya air dengan hole pada permukaan TiO_2 diiluminasi cahaya.



Radikal OH^\bullet sangat reaktif menyerang fenol.



Pada degradasi fenol akan terbentuk senyawa-senyawa intermediet, yang pada tahap akhir fenol akan didegradasi menjadi CO_2 dan H_2O . Produk-produk degradasi yang terdeteksi ditunjukkan pada skema dibawah ini :



Gambar 2.8. Skema Produk Intermediet pada Degradasi Fenol
(Villasenor *et al.*, 2002)

Keterangan :

P	= phenol	PG	= pyrogallol
C	= catechol	FG	= phloroglucinol
R	= resorcinol	HHQ	= hydroxyhydroquinone
HQ	= hidroquinone	AP	= pyruvic acid
OBQ	= 1,2-benzoquinone	AM	= maleic acid
BQ	= 1,4-benzoquinone		

2.5.2. Parameter yang mempengaruhi Fotokatalisis-Ozonasi

Parameter yang mempengaruhi fotokatalisis-ozonasi dalam mendegradasi limbah organik antara lain :

1. Ozon

Ozon berpengaruh pada degradasi limbah organik. Dengan meningkatnya dosis ozon, maka efisiensi degradasi TOC dan DOC akan meningkat (Li, 2005). Kerc *et al.* (2003) juga menyimpulkan bahwa makin besar laju ozon maka degradasi limbah organik pun akan semakin optimum.

2. pH

Variabel lain yang berpengaruh dalam mendegradasi limbah organik secara fotokatalitik ozonasi adalah pH, dari penelitian yang telah banyak dilakukan bertambahnya nilai pH akan mempercepat ozon dalam memproduksi OH radikal (indirect), dimana OH radikal ini lebih efektif mendegradasi limbah organik dibandingkan dengan ozon itu sendiri (direct). Dapat disimpulkan bahwa dalam mendegradasi limbah organik secara fotokatalitik ozonasi pada pH netral hasilnya

lebih baik dibandingkan dengan fotokatalitik pada pH rendah dan ozonasi pada pH yang tinggi. Hal ini dapat dibuktikan yaitu pada pH 7 dengan menggunakan fotokatalitik ozonasi degradasi limbahnya lebih cepat 1,5 kali dibandingkan dengan ozonasi pada pH yang optimum (pH 11), dan juga 3 kali lebih cepat dibandingkan dengan fotokatalisis pada pH 3,4-3,5. (Augustina *et al.*, 2005)

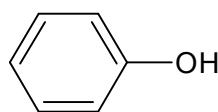
3. Loading Katalis

Variabel yang juga mempengaruhi fotokatalisis-ozonasi dalam mendegradasi limbah organik yaitu loading katalis. Sanchez *et al* (1998), dari hasil penelitiannya dalam mendegradasi anniline, menyebutkan bahwa loading katalis kurang mempengaruhi degradasi, kecuali pada waktu operasi yang lama. Dengan loading katalis yang lebih rendah degradasi TOC pun akan lebih sedikit, namun akan didapatkan titik optimum loading katalis dalam mendegradasi anniline. Laura Sanchez *et al* (1998) menggunakan variasi loading katalis (TiO_2) 3 g/l, 2 g/l, 1 g/l dan 0.1 g/l dimana didapatkan degradasi TOC terbaik selama ± 5 jam pada loading 3 g/l, namun pada jam ke-7 didapatkan degradasi TOC terbaik dengan loading 2 g/l. (Sanchez, 1998)

2.6. Fenol

Senyawa fenol ($\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$) pada limbah buangan industri tidak pernah dijumpai dalam keadaan murni, tetapi pada umumnya bergabung dengan senyawa-senyawa turunannya seperti pentaklorofenol (PCP), 2,4,6-triklorofenol (TCP), nitrofenol, dinitrofenol (DNP), dan lain-lain.

Fenol memiliki rumusan umum ArOH , dimana Ar adalah fenil. Fenol berbeda dengan alkohol dalam penggunaan gugus $-\text{OH}$ yang dipasang langsung pada cincin aromatiknya. Fenol secara umum dinamai sebagai turunan yang paling sederhana dari grupnya (senyawa organik aromatik). Fenol merupakan senyawa organik aromatik dengan rumus molekul $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$ atau $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$, dimana gugus OH terikat pada cincin benzen. (Morrison & Boyd, 1992)



Gambar 2.9. Struktur kimia fenol

2.6.1. Sifat-Sifat Fisika dan Kimia Fenol

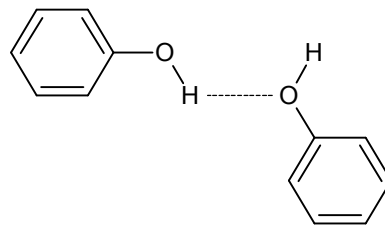
Fenol mempunyai bentuk padatan kristal putih dengan bau menyengat. Warna fenol yang tidak murni dipengaruhi oleh udara dan warna fenol dengan mudah berubah menjadi merah muda bila terkena cahaya matahari. Senyawa fenol menguap lebih lambat dari air dan pada udara terbuka akan menyerap uap air (higroskopis). Fenol larut dalam alkohol, air, eter, kloroform, gliserol, karbon, disulfida, petroleum, minyak, dan alkali. Sifat-sifat fisik fenol antara lain dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5. Sifat-sifat fisik fenol

Sifat Fisik	Nilai
Berat Molekul	94,144
Titik beku, °C	40,91
Titik didih, °C	181,84
Densitas :	
d_{4}^{25} (padat), g/cm ³	1,132
d_{4}^{41} (cair), g/cm ³	1,0576
d_{4}^{60} (cair), g/cm ³	1,0413
Temperatur kritis, °C	419
Tekanan kritis, MPa	6,11
Kalor jenis, J/(g.K)	
pada 4°C (padat)	1,24
pada 22,7°C (padat)	1,41
pada 70 – 74 °C (cair)	2,22
Viskositas, mm ² /s	
pada 60°C	2,47
pada 80°C	1,56
pada 100°C	1,09
Kalor pembentukan, J/g	122,1
Kalor penguapan pada titik didih, J/g	487,9
Solubility, g/100g H ₂ O at 25 ⁰ C	9,3
Ka	$1,1 \times 10^{-10}$

(Thurman, 1994; Morrison & Boyd, 1992)

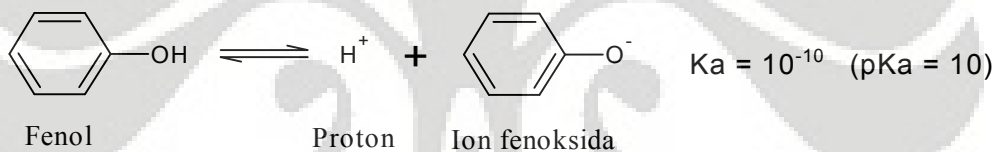
Fenol dapat berupa cairan atau padatan yang bertitik lebur rendah karena adanya ikatan hidrogen. Fenol sedikit terlarut dalam air, kiranya disebabkan oleh ikatan hidrogen dengan air, pada dasarnya kebanyakan fenol lainnya tidak dapat larut dalam air. (Morrison & Boyd, 1992)



Gambar 2.10. Ikatan Hidrogen antara 2 Molekul Fenol
(Carey, 1992)

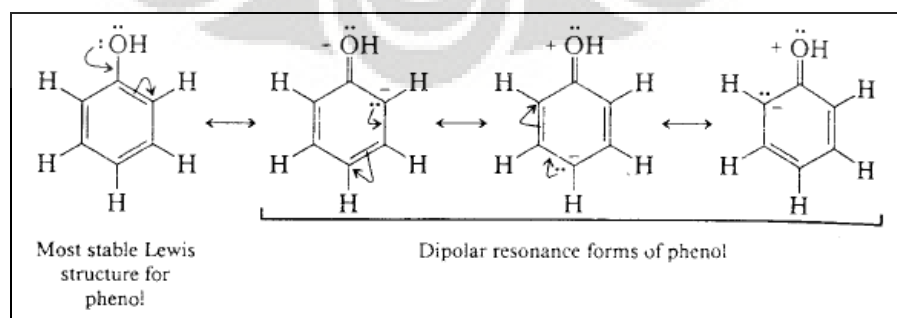


Gambar 2.11. Ikatan Hidrogen antara Air dan Molekul Fenol
(Carey, 1992)



Gambar 2.12. Reaksi Hidrolisis Fenol menjadi Proton dan Ion Fenoksida
(Carey, 1992)

Muatan negatif dalam ion fenoksida distabilkan oleh pelarutan dan delokalisasi elektron dalam cincin aromatiknyanya. Delokalisasi dari muatan negatifnya menstabilkan ion fenoksida dengan kuat. Delokalisasi elektron pada fenoksida ditunjukkan oleh resonansi antara struktur-strukturnya :



Gambar 2.13. Delokalisasi Elektron pada Fenoksida
(Carey, 1992)

Fenol dalam udara terbuka dapat teroksidasi tetapi fenol dalam air sangat sulit dioksidasi oleh oksigen maupun udara. Fenol merupakan zat yang dapat dibakar. Bila dipanaskan, fenol menghasilkan uap yang dapat terbakar secara eksplosif pada konsentrasi 3% sampai 10% di udara (Thurman, 1994).

2.6.2. Pengaruh Senyawa Fenol

Limbah fenol biasanya berasal dari industri polimer plastik, kertas organik pestisida, pulp, dan industri kimia lainnya. Limbah fenol pada konsentrasi 0,002 mg dapat menimbulkan rasa dan bau pada air. Pemerintah Indonesia melalui SK Menteri Lingkungan Hidup No: KEP 51/MENLH/10/1995 telah menetapkan ambang batas senyawa fenol dalam lingkungan air limbah di Indonesia adalah 0,5 sampai 1 mg/l dan Peraturan Pemerintah No. 20 tanggal 5 Juni 1990 menetapkan ambang batas senyawa fenol dalam air bahan baku air minum adalah 0,002 mg/l (Baku mutu Limbah Cair bagi Kegiatan Industri, 1995).

Kandungan fenol di dalam perairan memberi pengaruh buruk terhadap makhluk hidup di sekitarnya. Pada konsentrasi yang rendah senyawa fenol dapat merusak bau dan rasa. Pada konsentrasi 0,2 ppm (mg/L) menyebabkan rasa ikan kurang sedap dimakan (*fainting*). Ikan akan mengalami gangguan fisiologi berupa hambatan pertumbuhan dan reproduksi pada konsentrasi fenol dalam air yang lebih dari 1 ppm. Oleh karena itu ambang batas konsentrasi fenol pada perairan yang ditujukan untuk usaha perikanan dan untuk air minum ditetapkan sebesar 0,002 ppm (Bismo S., 2000).

Toksisitas fenol sangat dipengaruhi oleh faktor fisika dan kimia air yang dicemarinya. Pada temperatur tinggi dan kelarutan oksigen dalam air rendah toksisitasnya terhadap biota akuatik akan bertambah tinggi.

Fenol pada konsentrasi tinggi dapat mengakibatkan kematian jika tertelan terhisap, atau terserap oleh kulit. Senyawa ini dapat mempengaruhi sistem saraf pusat dan menyebabkan kerusakan pada hati dan ginjal. Fenol juga mengakibatkan iritasi pada kulit tetapi mempunyai efek bius (anestetik) lokal, sehingga rasa sakit tak terasa pada saat awal bersentuhan. Selain itu, fenol juga dapat mengakibatkan gangguan-gangguan seperti: kulit terkelupas, gangguan pada kornea mata, gangguan sistem pencernaan, rasa mual, gangguan pemapasan,

kerusakan ginjal dan liver, sakit kepala, nafsu makan berkurang, sulit tidur (insomnia), penurunan berat badan, iritasi pada mata, hidung, dan tenggorokan.

2.7. Reaktor fotokatalisis

Telah banyak jenis reaktor fotokatalisis yang dikembangkan baik di dalam maupun di luar negeri. Dari sekian banyak jenis-jenis reaktor fotokatalisis yang telah dirancang tersebut pada dasarnya dapat digolongkan hanya dalam beberapa kelompok saja. Secara umum, berdasarkan ukurannya reaktor fotokatalisis dibagi menjadi reaktor fotokatalisis skala laboratorium, skala pilot dan skala industri komersial. Sedangkan berdasarkan sistem mode alirannya, dibagi menjadi dua kelompok, yaitu reaktor batch dan reaktor *one pass through* (kontinyu). Pembagian selanjutnya yaitu berdasarkan sistem katalis yang digunakan, dibagi dalam dua kelompok besar, yaitu reaktor sistem *slurry suspended* dan reaktor sistem *supported* (sistem *packed bed* termasuk ke dalam reaktor sistem *supported*). (Ahmad F. Fasa, 2005)

Pada perkembangan selanjutnya, pengelompokan reaktor fotokatalisis difokuskan pada sistem pemusatan/pengkonsentrasian terhadap cahaya baik dari lampu maupun matahari yang dibagi ke dalam dua kelompok besar, yaitu *Reaktor Concentrating* dan *non-Concentrating*. Reaktor *non-Concentrating* dibagi lagi menjadi dua kelompok yaitu reaktor *non-Concentrating* dengan reflektor dan reaktor *non-Concentrating* tanpa reflektor. Pengelompokan jenis reaktor berdasarkan sistem pemusatan/pengkonsentrasian terhadap cahaya dapat dilihat pada Tabel 2.6. Di dalam subbab ini akan dibahas jenis-jenis reaktor fotokatalitik, yang menjadi dasar dalam perancangan Reaktor TVC yang berasal dari publikasi-publikasi ilmiah serta sekilas tentang Reaktor TVC itu sendiri. (Ahmad F. Fasa, 2005)

Tabel 2.6. Pengelompokan Jenis Reaktor Berdasarkan Property Pemusatan/ Pengkonsentrasian Cahayanya

Properti Pengkonsentrasian Cahaya	Fotokatalisis	
	Suspended	Supported
<i>Concentrating Reactor</i>	<i>Parabolic Trough Reactor (PTR), Failing Film Reactor</i>	<i>Parabolic Trough Reactor (PTR)</i>
<i>Non-Concentrating Reactor dengan reflektor</i>	<i>Compound Parabolic Collecting Reactor (CPCR)</i>	<i>Tubular Reactor, Fiber Optic Cable Reactor</i>
<i>Non-Concentrating Reactor tanpa reflektor</i>	<i>Tubular Reactor, Flat Plat Reactor, Double-Skin-Sheet-Reacto, Failing Film Reactor,</i>	<i>Flat Plat Reactor, Thin-Film-Fix Bed Reactor</i>

(Ahmad F. Fasa, 2005)

2.7.1. *Parabolic Through Reactor (PTR)*

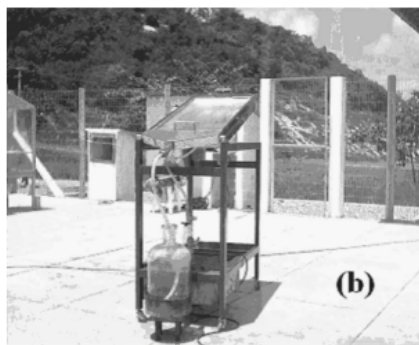
Reaktor PTR merupakan reaktor fotokatalisis yang terdiri atas pipa reaktor dan sebuah pemantul cahaya (reflektor) yang berbentuk parabola dengan pipa reaktor terletak di bagian tengah dari parabola tersebut. Sebagai konsekuensinya adalah hanya radiasi (sinar matahari) langsung yang masuk ke dalam parabola yang kemudian akan difokuskan pada pipa reaktor (Ahmad F. Fasa, 2005).

Sebuah reaktor PTR dapat mengkonsentrasikan sinar yang datang secara langsung pada bagian UV aktif dengan spektrum mencapai faktor 20-50 dan dapat dikarakterisasi sebagai tipe reaktor *plug flow*. Pada panjang gelombang yang dapat digunakan untuk mengeksitasi TiO_2 (UV-A, 300-400 nm), bagian radiasi cahaya matahari yang diffuse ($E_{\text{diff}(300-400)} = 24,3 \text{ W/m}^2$) dan yang direct ($E_{\text{dir}(300-400)} = 25,0 \text{ W/m}^2$) dapat mencapai permukaan bumi pada keadaan yang hampir sama. Artinya, sistem pengkonsentrasian cahaya secara umum hanya dapat menerima setengah dari radiasi cahaya yang tersedia pada interval spektrum partikular ini. (Ahmad F. Fasa, 2005)



Gambar 2.14. Solar Parabolic Through Reactor (PTR)

(Claudio *et al.*, 2007)



Gambar 2.15. *Solar Falling Film Reactor*

(Claudio *et al.*, 2007)

Reaktor jenis PTR telah dipilih untuk solar detoxification di beberapa tempat di dunia seperti di Colorado, AS (oleh National Renewable Energy Laboratory, NREL dan subkontraktor), di Albuquerque, AS (oleh Lawrence Livermore National Laboratories) dan di Almeria, Spanyol (oleh the Plataforma Solar de Almeria, PSA). (Ahmad F. Fasa, 2005)

PTR yang digunakan untuk penelitian Goslich, dkk. dibuat di PSA, Spanyol. PTR tersebut terdiri dari 6 modul HELIOMAN yang dihubungkan dalam satu baris dengan rasio konsentrasi 6. Di sini cahaya matahari dikonsentrasikan oleh parabola yang berasal dari kaca atau alumina dengan luas kontak dengan cahaya sebesar 32 m² dan difokuskan pada pipa borosilicate glass yang diisi oleh kontaminan (air yang mengandung limbah) yang mengandung TiO₂ tersuspensi. Pipa tersebut memiliki panjang 6,1 m dan diameter 5,1 cm. Adanya losses yang disebabkan oleh pemantulan yang tidak merata dan sistem error menyebabkan foton dari sinar UV hanya mencapai kontaminan tersuspensi sekitar 58% dari intensitas sinar keseluruhan yang masuk ke dalam bidang kontak dengan cahaya. (Ahmad F. Fasa, 2005)

Eksperimen yang dilakukan oleh Goslich, dkk. ini menggunakan flow rate kontaminan antara 500 dan 3000 L/jam. Biasanya, eksperimen dilakukan dengan mode sistem single pass, yaitu kontaminan dipompa ke dalam sistem reaktor dan melewati pipa reaktor secara keseluruhan hanya satu kali. Konsentrasi awal dari kontaminan diukur pada stok kontainer, sementara konsentrasi final diukur setelah keluar dari modul terakhir. Adapun total volume pipa reaktor secara keseluruhan adalah 838 liter. (Ahmad F. Fasa, 2005)



Gambar 2.16. Skema Reaktor PTR

Reaktor PTR secara umum meningkatkan efisiensi penggunaan radiasi cahaya matahari langsung dan sebagai keuntungan tambahan, energi termal yang dikumpulkan dari radiasi yang terkonsentrasi dapat secara simultan digunakan untuk aplikasi lain. Selain itu ukuran reaktor ini kecil jika dibandingkan dengan jumlah energi yang diterima per unit volume. Alirannya turbulen dan komponen-komponen yang volatil tidak menguap dengan cepat, sehingga penanganan dan kontrol liquid yang akan diolah menjadi sederhana dan murah (Malato *et al.*, 2002 dalam Ahmad F. Fasa, 2005). Adapun kekurangan utama yang dimiliki oleh reaktor PTR adalah sebagai berikut.

- (i) Hanya dapat digunakan untuk radiasi langsung.
- (ii) Harga konstruksi relatif mahal.
- (iii) Memiliki efisiensi optik dan *quantum efficiencies* yang rendah (untuk aplikasi TiO_2).

Beberapa substansi yang berbeda telah sukses didegradasi dengan menggunakan reaktor jenis ini, di antaranya yaitu Cr(VI) , dichloroacetic acid, phenol, 4-chlorophenol (CP), dll. (Ahmad F. Fasa, 2005). Bahkan Cr(VI) dan fenol dengan menggunakan asam telah berhasil diolah secara simultan oleh Slamet, dkk. (Slamet, 2003) pada skala laboratorium meskipun bukan dengan menggunakan reaktor jenis ini.

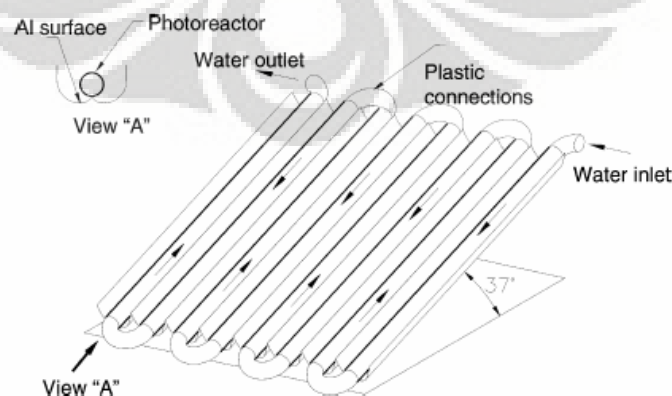
2.7.2. Compound Parabolic Collecting Reactor (CPCR)

Compound Parabolic Collecting Reactor (CPCR) adalah reaktor fotokatalisis yang memiliki dua reflektor parabola yang dipasang bersebelahan.

Garis pusat (yang ekuivalen dengan sumbu tengah pada PTR) terletak dekat di atas sambungan kedua parabola. Bentuk ini menjadikan cahaya yang masuk hampir dari segala arah dapat dipantulkan pada garis pusat CPCR sehingga dapat terjadi reaksi fotokatalisis di dalam pipa reaktor. Salah satu reaktor CPCR yang telah terpublikasi secara ilmiah adalah yang dibuat di PSA, Spanyol. Reaktor CPCR ini terdiri atas enam reflektor paralel yang terbuat dari aluminium yang mengkilat. Material ini memiliki properti refleksi yang bagus khususnya pada rentang panjang gelombang sinar UV. Pada range spektrum 295-387 nm, material ini memiliki efisiensi pemantulan mencapai 83,2%. (Ahmad F. Fasa, 2005)

Selain itu material ini juga memiliki reflektifitas UV (R) yang tinggi pada range UV yang digunakan ($0,8291 \leq R \leq 0,890$ antara 300 sampai 400 nm). Adapun satu buah reflektor CPCR memiliki panjang 1,22 m dan lebar 0,152 m. Sedangkan luas efektif yang terkena sinar pada satu modul adalah mencapai $1,48 \text{ m}^2$. Maka jika ada 6 modul, luas total adalah sekitar $8,4 \text{ m}^2$ (Ahmad F. Fasa, 2005).

Pipa reaktor yang digunakan dalam CPCR ini merupakan pipa transparan yang dibuat dari fluoropolimer (Teflon) yang diletakkan di garis tengah tiap-tiap reflektor. Pemilihan bahan ini dikarenakan inert secara kimia dan memiliki stabilitas UV dan transmisivitas T yang sangat baik ($0,735 \leq T \leq 0,846$ antara 300 dan 400 nm). Pipa reaktor ini memiliki panjang yang sama dengan reflektor yaitu 1,22 m dan diameter dalam 48 mm, sehingga volume yang teriluminasi adalah 2,21 liter per pipa. Luas permukaan silinder dari keenam pipa adalah $1,47 \text{ m}^2$ dan konektor yang menghubungkan antar pipa adalah pipa polipropilena. (Ahmad F. Fasa, 2005)

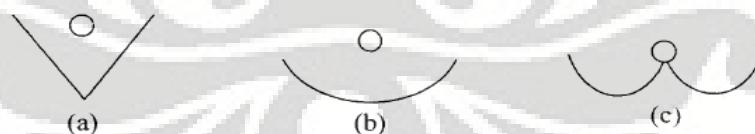


Gambar 2.17. Skema Reaktor CPC

Sistem pemasangan katalis yang dilakukan di PSA ini adalah dengan sistem slurry yaitu katalis TiO_2 Degussa P25 dengan konsentrasi 0,2 g/L dicampur dengan kontaminan yang akan diolah yang dalam hal ini adalah 2,4-D dan benzofuran. Kontaminan yang sudah tersuspensi katalis tersebut selanjutnya dialirkan dan disirkulasi ke dalam sistem reaktor dengan laju alir 3,5 m³/th. (Ahmad F. Fasa, 2005)

2.7.3. Reaktor Tubular “V” Collectors (TVC)

Jenis fotoreaktor yang dipilih dalam penelitian ini adalah reaktor fotokatalitik jenis *Tubular “V” Collectors* (TVC) yang bersifat fleksibel. Fleksibilitas yang dimaksud adalah memiliki alternatif dalam hal sumber UV (lampu atau matahari), sudut reflektor (90°, 120° atau 150°), tipe reaktor (pipa dengan anulus atau tanpa anulus), jenis limbah (Cr(VI), fenol atau gabungan keduanya), dan sistem katalisnya (*suspended* atau *immobile*). Reaktor jenis ini memiliki kemiripan dengan reaktor jenis *Parabolic Trough Reactor* (PTR) yang dikembangkan oleh Alfano, dkk. dan *Compound Parabolic Collecting Reactor* (CPCR) yang dikembangkan oleh Herrmann, dkk. untuk mengolah limbah 2,4-dichlorophenoryaceticacid (2,4-D) dan benzofuran. Perbedaan utamanya terletak pada jenis reflektor yang digunakan. Reaktor PTR menggunakan reflektor berbentuk parabola, reaktor CPCR menggunakan reflektor berbentuk gabungan dua parabola, sedangkan reaktor TVC menggunakan reflektor berbentuk V. Perbedaannya dapat dilihat pada Gambar 2.18. (Ahmad F. Fasa, 2005)



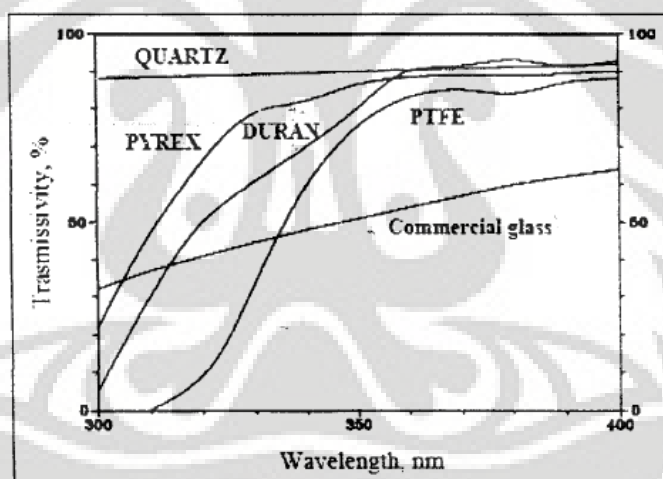
Gambar 2.18. Bentuk Reflektor Sinar pada Reaktor (a) TVC, (b) PTR dan (c) CPCR.

Fungsi utama reflektor adalah untuk memantulkan (mengumpulkan atau memusatkan) radiasi sinar matahari kepada reaktor fotokatalitik sehingga dapat lebih optimal dalam proses fotokatalisisnya. Maka syarat utama suatu reflektor adalah mengkilap dan memiliki nilai reflektansi yang baik. Seperti halnya reflektor pada reaktor PTR dan CPCR, bahan reflektor yang dipilih untuk reaktor TVC adalah lembaran alumunium mengkilap karena memiliki nilai reflaktansi

yang tinggi bahkan untuk reflektor jenis VC memiliki *mirror reflectance* sama dengan CPC dan lebih baik dari PC. (Ahmad F. Fasa, 2005)

Material ini memiliki properti refleksi yang bagus khususnya pada rentang panjang gelombang sinar UV. Pada range spektrum 295-387 nm, material ini memiliki efisiensi pemantulan mencapai 83,2%. Selain itu material ini juga memiliki reflektifitas UV (R) yang tinggi pada range UV yang digunakan ($0,829 \leq R \leq 0,890$ antara 300 sampai 400 nm). (Ahmad F. Fasa, 2005)

Persamaan yang lain antara jenis reaktor TVC dengan jenis reaktor PTR dan CPCR terletak pada reaktornya yang berbentuk tubular (pipa) yang terbuat dari bahan yang tranparan sehingga dapat ditembus oleh sinar UV sebagai sumber utama foton yang akan mengeksitasi katalis semikonduktor yang digunakan untuk reaksi fotokatalisis. Pipa reaktor ini berfungsi sebagai tempat terjadinya reaksi fotokatalitik antara limbah dan katalis TiO_2 Degussa P-25 dengan bantuan foton dari sinar UV. (Ahmad F. Fasa, 2005)

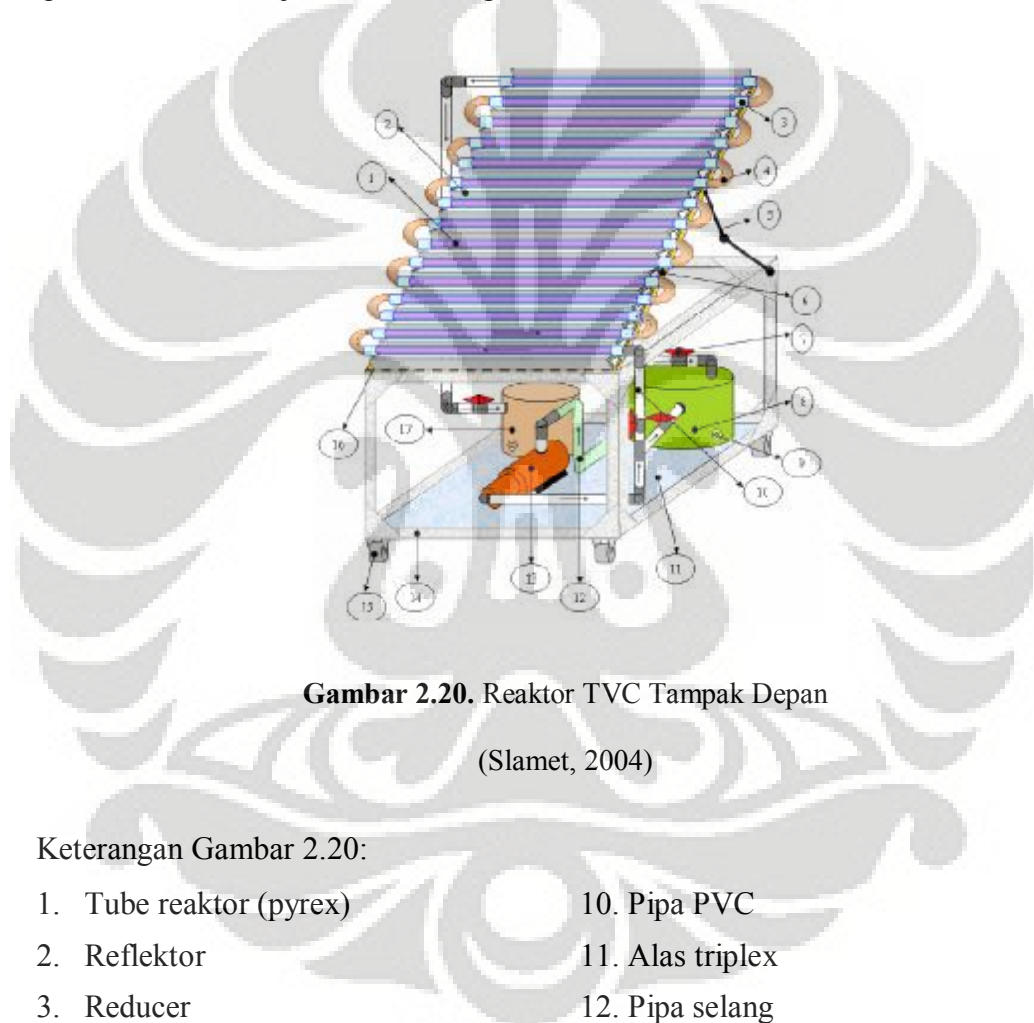


Gambar 2.19. Nilai Transmitan Material yang Umum Digunakan sebagai Bahan Fotoreaktor (300-400 nm)
(Ahmad F. Fasa, 2005)

Bahan pipa reaktor yang dipilih untuk reaktor TVC adalah gelas duran. Duran dipilih sebagai material reaktor karena memiliki kemampuan transmitivitas yang tinggi (di bawah quartz dan pyrex) terhadap sinar matahari pada panjang gelombang 300-400 nm. Hal ini memungkinkan sampainya sinar UV-A (315-400 nm) yang berasal dari matahari ke dalam reaktor untuk terjadinya proses fotokatalitik. Di sisi lain, bahan duran memiliki kekuatan dan ketahanan terhadap

suhu tinggi (s.d. 550°C), bersifat inert terhadap zat-zat kimia, tahan terhadap asam serta memiliki harga yang relatif lebih murah dibandingkan dengan quartz yang memiliki properti lebih baik. Secara umum posisi transmitivitas beberapa material yang biasa digunakan sebagai bahan fotoreaktor pada panjang gelombang 300-400 nm dapat dilihat pada Gambar 2.19.

Pada Gambar 2.19. tampak bahwa nilai transmitivitas duran pada panjang gelombang 350-400nm (termasuk range UV-A) hampir sama dengan pyrex dan quartz. Hal ini menjadi alasan atas pemilihan duran untuk reaktor fotokatalitik.



Gambar 2.20. Reaktor TVC Tampak Depan
(Slamet, 2004)

Keterangan Gambar 2.20:

- | | |
|---------------------------|-------------------------------|
| 1. Tube reaktor (pyrex) | 10. Pipa PVC |
| 2. Reflektor | 11. Alas triplex |
| 3. Reducer | 12. Pipa selang |
| 4. Selang Silicon | 13. Pompa. |
| 5. Penyangga unit reaktor | 14. Besi kerangka |
| 6. Penyangga reflektor | 15. Roda |
| 7. Valve | 16. Engsel |
| 8. Reservoir sistem batch | 17. Reservoir sistem kontinyu |
| 9. Tempat sampel | |

Pemilihan jenis reaktor TVC dalam penelitian ini didasarkan pada keunggulannya yang bersifat fleksibel serta tipe reaktornya yang tertutup. Sifat fleksibilitas memungkinkan kita untuk mencari konfigurasi yang paling efektif dalam mengolah limbah sehingga dapat mengoptimalkan kontak antara limbah, katalis dan sinar UV. Sedangkan tipe reaktor yang berupa pipa tertutup dapat mengurangi peristiwa penguapan jika menggunakan matahari sebagai sumber UV meskipun dalam waktu yang relatif lama (± 6 jam) yaitu pada waktu efektif sinar UV sampai ke permukaan bumi (\pm pukul 09:00-15:00).

Dari penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa kondisi operasi optimal dari reaktor PVC untuk mencapai baku mutu limbah cair yang telah ditentukan adalah sebagai berikut (Ahmad F. Fasa, 2005):

1. Sumber cahaya menggunakan sinar matahari.
2. Sudut reflektor alumunium sebesar 150° . (Untuk penggunaan lampu UV Sudut reflektor alumunium sebesar 90°).
3. Laju sirkulasi sebesar 15,84 L/menit.
4. Loading sebesar 0,5 g/L.
5. Volume awal sebesar 10 liter dan konsentrasi awal 20 ppm selama 6 hingga 7 jam.
6. Intensitas minimal $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (cuaca terang) untuk konsentrasi awal 20 ppm selama 6-7 jam.

2.8. UV-Vis Spectrophotometer

Spectrophotometer adalah photometer (alat yang digunakan untuk mengukur intensitas cahaya) yang dapat mengukur intensitas sebagai fungsi dari warna, atau lebih spesifik lagi, panjang gelombang dari cahaya (Slamet *et al.*, 2004). Komponen penting pada suatu spektrofotometer terdiri dari sumber energi, monokromator, sel kuvet, detektor dan rekorder. Detektor merupakan bagian yang berfungsi untuk menyerap sinar jatuh yang mengenainya dan mengubah energi cahaya menjadi sinyal listrik. Rekorder merupakan alat yang berfungsi mencatat hasil analisa sampel dari output sinyal listrik detektor melalui alat bantu amplifier yang berfungsi untuk memperbesar sinyal listrik. Secara umum cara kerja alat spektrofotometer dapat digambarkan seperti berikut ini.

Sumber sinar → Monokromator → Detektor → Sel kuvet → Rekorder

Spectrophotometer biasanya digunakan untuk mengukur absorpsi cahaya tetapi bisa juga digunakan untuk mengukur difusifitas atau *specular reflectance*. *Spectrophotometer* biasanya dibagi menjadi dua tipe yaitu, *single beam* dan *double beam*. *Double beam spectrophotometer* mengukur rasio intensitas cahaya pada dua jalur cahaya, sedangkan *single beam spectrophotometer* mengukur intensitas cahaya absolut. Meskipun pengukuran rasio lebih mudah dan stabil, peralatan *single beam* memiliki keuntungan yaitu, memiliki rentang dinamik yang lebih luas.

Spectrophotometer biasanya digunakan pada rentang UV dan Visible dari spektrum, dan beberapa instrumen ini juga beroperasi pada dekat rentang infrared. *Spectrophotometer* untuk infrared berbeda karena tipe fotosensor yang digunakan juga berbeda untuk tiap daerah spektral yang berbeda. Penggunaan rentang infrared juga cukup menarik, karena semua benda memancarkan sinar IR sebagai radiasi termal, terutama pada panjang gelombang melebihi 5 μm .

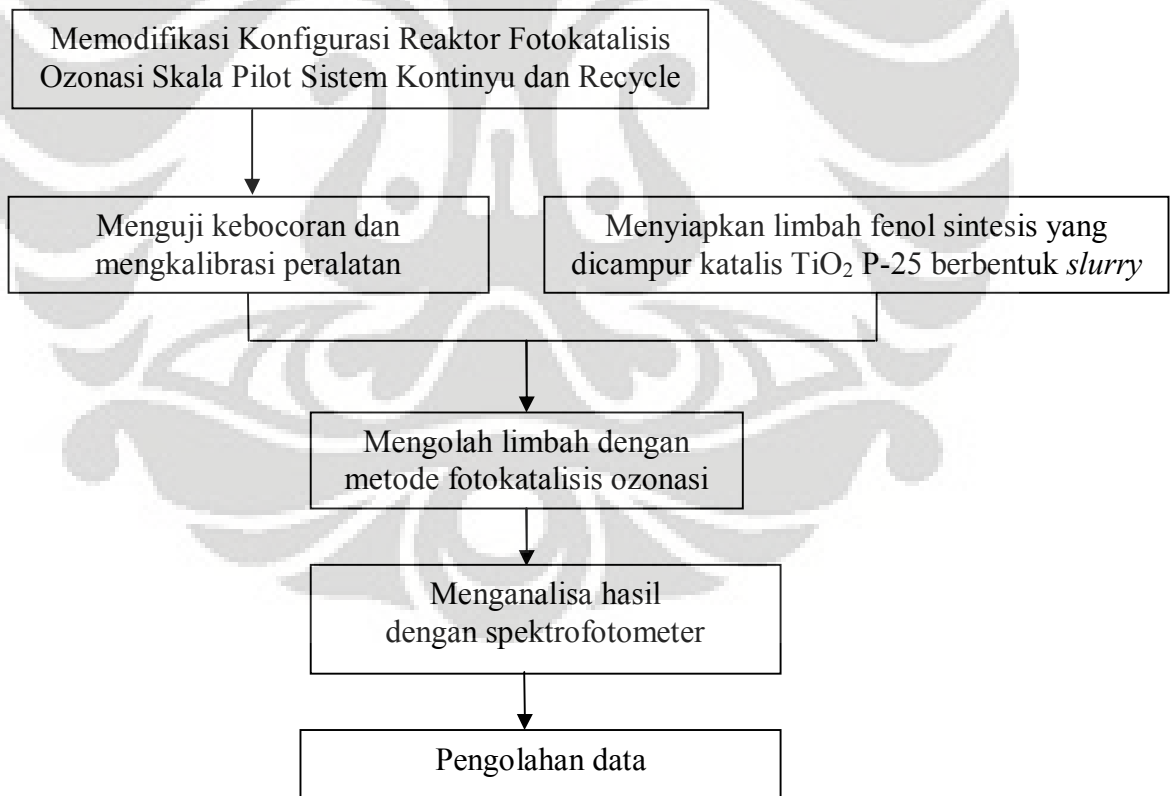
Banyak *spectrophotometer* menggunakan monochromator untuk menganalisa spektrum, tetapi ada juga *spectrophotometer* yang menggunakan *arrays of photosensors* dan terutama di IR, terdapat *spectrophotometer* yang menggunakan teknik *Fourier transform* untuk mendapatkan informasi spektral yang dinamakan FTIR.

Spectrophotometer mengukur fraksi cahaya yang melewati larutan secara kuantitatif. Dalam *spectrophotometer*, cahaya dari lampu sekitar IR/VIS/UV (biasanya *deuterium gas discharge lamp*) akan melewati monochromator yang memilih cahaya dari panjang gelombang tertentu dari spektrum kontinyu. Cahaya inilah yang akan melewati sampel yang akan diukur. Setelah intensitas cahaya dari cahaya yang tersisa diukur menggunakan *photodiode* atau sensor cahaya lainnya, *transmittance* dan panjang gelombang ini dihitung.

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian dilakukan di Laboratorium RPKA (Rekayasa Produk Kimia dan Alam), Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok. Secara keseluruhan penelitian ini diawali dengan tahap perancangan dan modifikasi reaktor fotokatalisis *Tubular "V" Collectors* (TVC) dengan penambahan unit injektor dan ozonator (AOSBN, China) dengan sistem *batch*, persiapan katalis dan sampel fenol yang akan digunakan serta dilanjutkan dengan persiapan alat dan bahan yang akan digunakan, setelah itu dilakukan pengolahan limbah dengan kombinasi metode fotokatalisis-ozonasi, kemudian hasilnya dianalisa untuk mengetahui penurunan konsentrasi senyawa fenol. Diagram alir penelitian secara umum dapat dilihat pada Gambar 3.1 di bawah ini.



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

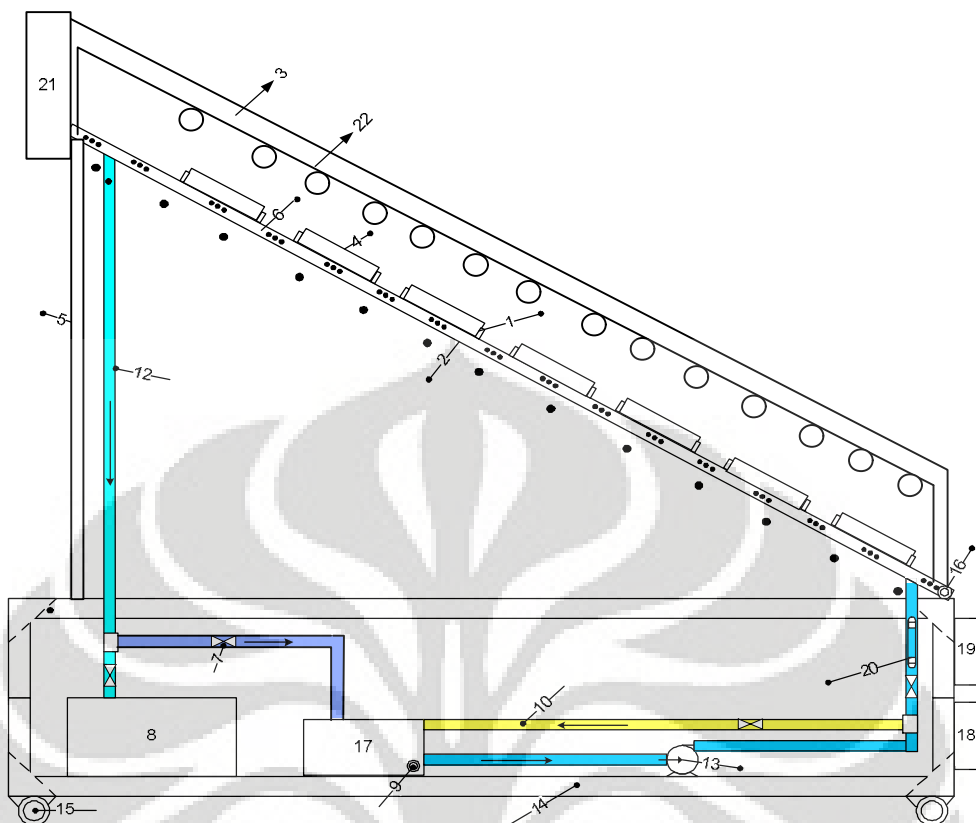
3.2. Peralatan dan Bahan yang Digunakan

3.2.1. Peralatan

Dalam Penelitian ini digunakan reaktor *Tubular V Collector* (TVC) dengan sistem kontinu yang dilengkapi 14 buah lampu UV *Phillips black light lamp* berdaya @ 18 watt ($\lambda = 365$ nm) dan intensitas iluminasi rata-rata tiap lampu $50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, ozonator, dan injektor (sebagai tempat bertemunya ozon dengan limbah fenol) sebagai alat utama. Selain itu digunakan juga berbagai peralatan pendukung seperti gelas kimia, botol sampel, pipet ukur, pipet tetes, termometer, labu ukur, kuvet, stop watch, dan pH meter. Sedangkan peralatan analisa yang digunakan untuk mendeteksi kadar fenol sintesis baik sebelum maupun setelah didegradasi dengan metode fotokatalisis-ozonasi adalah UV-VIS *Spectrophotometer*.



Gambar 3.2. Reaktor *Tubular 'V' Collector* (TVC) yang telah Dilengkapi Injektor dan Ozonator



Gambar 3.3. Skema Aliran Reaktor *Tubular 'V' Collectors (TVC)* Tampak Samping yang Dilengkapi dengan Ozonator

Keterangan Gambar 3.3 :

- | | |
|----------------------------------|--|
| 1. <i>Tube</i> reaktor (pyrex) | 12. Pipa selang |
| 2. <i>Reflektor</i> | 13. Pompa |
| 3. Besi kerangka penyangga lampu | 14. Besi kerangka |
| 4. Selang <i>Silicon</i> | 15. Roda |
| 5. Penyangga unit reaktor | 16. Engsel |
| 6. Penyangga reflektor | 17. Reservoir sistem <i>batch</i> |
| 7. <i>Valve</i> | 18. Ozonator 1 |
| 8. Reservoir sistem kontinyu | 19. Ozonator 2 |
| 9. Tempat sampel | 20. Injektor |
| 10. Pipa PVC | 21. Panel Lampu UV |
| 11. Alas triplex | 22. Lampu UV (<i>black light lamp</i>) |

Reaktor Tubular “V” Collectors (TVC)

Reaktor Tubular ‘V’ Collectors (TVC) yang tersedia di Lab RPKA, dilengkapi dengan sistem lampu *black light lamp* yang dapat dengan mudah dibongkar pasang sehingga jika cuaca tidak memungkinkan untuk menggunakan energi matahari, maka reaktor dapat dioperasikan di dalam ruangan dengan menggunakan sistem lampu tersebut. Sistem lampu yang dirancang terdiri dari 14 buah lampu *black lamp* yang masing-masing memiliki daya 18 watt merk Philips dengan panjang gelombang 365nm. Lampu tersebut dipasang tepat diatas masing-masing tabung reaktor dengan jarak ± 5 cm. Agar penggunaan lampu efektif, maka sistem lampu dilengkapi dengan tutup yang diperkirakan dapat mencegah masuknya pengaruh cahaya dari luar ketika uji kinerja reaktor TVC dilakukan. Masing-masing lampu pada jarak 5 cm tersebut memberikan tersebut memberikan nilai intensitas UV $\pm 50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ yang diukur dengan UV Light meter merk Lutron dengan interval panjang gelombang 290-390 nm (UV-A dan UV-B).

Sistem aliran reaktor TVC dapat dilakukan kontinyu ataupun *batch* dan terbuka. Reaktor dilengkapi dengan kontainer limbah yang terbuat dari ember berukuran ± 20 L. Untuk mengalirkan limbah digunakan pompa dengan laju alir maksimum ± 42 L/menit. Sampel limbah yang mengandung fenol dialirkan dari bagian bawah dan keluar dari bagian atas reaktor. Sedangkan laju alir dari limbah dibuat konstan dengan menggunakan *valve*.

3.2.2. Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah TiO_2 Degussa P25 sebagai katalis, larutan fenol dari kristal fenol (Merck), NH_4OH (Merck), 4-aminoantipirin (Merck), $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ (Merck), dan aquadest.

3.3. Prosedur Penelitian

Prosedur-prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini diantaranya: prosedur modifikasi Reaktor TVC, kalibrasi dan uji kebocoran reaktor, pembuatan larutan fenol, uji penyisihan fenol, pengukuran dan analisis fenol dengan menggunakan UV-VIS *Spectrophotometer*, pembuatan larutan standar, kalibrasi spektrofotometer dan prosedur analisis sampel. Prosedur-prosedur ini akan lebih lanjut dibahas sebagai berikut :

3.3.1. Prosedur Modifikasi Reaktor TVC

Tahapan-tahapan kegiatan yang dilakukan dalam persiapan dan memodifikasi reaktor TVC adalah sebagai berikut :

- a. Mempersiapkan reflektor reaktor disesuaikan sumber foton yang digunakan (sudut 150° optimum untuk matahari dan sudut 90° optimum untuk lampu).
- b. Membersihkan dan mengeringkan tabung dan selang silikon.
- c. Memasang kembali sambungan selang silikon dengan pipa-pipa tabung dan memperkuat sambungan dengan kawat/klem.
- d. Memasang pompa stainless steel dan memasang pipa aliran masuk, *water mur*, dari *reservoir* dan pipa aliran keluaran pompa baik untuk sirkulasi maupun *by pass*.
- e. Memasang injektor untuk ozon pada satu titik yaitu setelah *valve* keluaran sirkulasi.
- f. Memasang akrilik untuk tempat ozonator.
- g. Memasang 2 ozonator pada akrilik.

3.3.2. Prosedur kalibrasi dan uji kebocoran reaktor

Kalibrasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah kalibrasi laju alir. Uji kebocoran dilakukan bersamaan dengan kalibrasi. Tujuan kalibrasi adalah untuk mendapatkan seberapa besar laju alir utama limbah yang digunakan dalam pengolahan limbah fenol dengan metode fotokatalisis ozonasi. Prosedur kalibrasi laju alir adalah sebagai berikut:

- a. Mengecek kesiapan alat dan mengatur bukaan *valve* termasuk *valve by pass*.
- b. Memasukan 20 liter air dalam tangki penampung.
- c. Menyalakan pompa dan membiarkan alirannya sampai konstan.
- d. Mengukur volume air yang keluar persatuan waktu untuk mendapatkan laju alir.

3.3.3. Prosedur Pembuatan Larutan Fenol

Limbah yang digunakan adalah limbah fenol sintetis, pembuatannya dilakukan dengan membuat 10000 ppm larutan fenol induk dengan cara melarutkan 10 g fenol dalam 1 liter aquadest. Untuk konsentrasi larutan fenol yang digunakan adalah 20 ppm yaitu dengan cara pengenceran dari larutan 10000 ppm tersebut.

3.3.4. Prosedur Uji Penyisihan Fenol

- a. Membuat limbah fenol konsentrasi 20 ppm yaitu dengan mengencerkan 40 ml larutan induk fenol ke dalam 20 liter *reservoir* reaktor.
- b. Menambahkan katalis TiO_2 (Degussa P25).
- c. Mengaduk yaitu dengan menyalakan pompa sirkulasi (*valve* sirkulasi ditutup full dan *valve* by pass dibuka full).
- d. Mengukur pH awal limbah fenol yang didapatkan dengan menggunakan indikator universal atau pH meter.
- e. Menyalakan lampu UV jika cahaya yang digunakan adalah cahaya lampu UV. Mengukur intensitasnya pada saat awal dan akhir proses penyisihan fenol.
- f. Mempersiapkan konfigurasi reaktor disesuaikan dengan arah datang sinar matahari.
- g. Menyalakan ozonator untuk mengalirkan ozon dengan laju alir tertentu.
- h. Menyalakan pompa untuk sampel fenol yang telah dicampurkan katalis serta mengatur *valve* bypass dan laju alir utama limbah.
- i. Mengalirkan limbah dengan laju alir dijaga konstan dan mengambil sampel fenol hasil penyisihan pada menit ke 10, 20, 30, 40, 50, 60 dan setiap 30 menit berikutnya selama 4 atau 8 jam proses penyisihan.
- j. Hasil yang masih tercampur dengan katalis yang berbentuk padatan, di *centrifuge*.
- k. Hasil siap untuk dianalisa dengan UV-Vis Spektrofotometer.
- l. Mengulang prosedur uji penyisihan fenol untuk setiap variasi pengujian yang dilakukan.

3.3.5. Prosedur Pengukuran dan Analisis Fenol Menggunakan UV-VIS

Spectrophotometer.

Fenol sebelum dan sesudah didegradasi dianalisis dengan UV-Vis Spektrofotometer. Dari hasil analisis, didapat data absorbansi sampel yang diambil tiap selang waktu tertentu yang kemudian dikonversi menjadi data konsentrasi fenol. Hal ini dilakukan dengan membuat terlebih dahulu kurva kalibrasi absorbansi terhadap konsentrasi fenol dari larutan standar fenol. Kemudian setiap data absorbansi sampel diplot ke kurva kalibrasi tersebut sehingga diperoleh konsentrasi masing-masing sampel.

3.3.6. Prosedur Pembuatan Larutan Standar

Pembuatan larutan standar yang digunakan untuk analisis fenol sebagai berikut :

- a. Larutan NH_4OH 0,5 M dibuat dengan mengencerkan larutan NH_4OH pekat.
- b. Larutan Buffer Phospat dibuat dengan melarutkan 10,45 gr K_2HPO_4 dan 7,23 gram KH_2PO_4 dalam 100 ml aquadest.
- c. Larutan 4-aminoantipirin 2% dibuat dengan melarutkan 0,06 gram kristal 4-aminoantipirin dalam 3 ml aquadest.
- d. Larutan $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 8% dibuat dengan melarutkan 0,24 gram kristal $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ dalam 3 ml aquadest.

3.3.7. Prosedur Kalibrasi Spektrofotometer

Sebelum melakukan analisis, harus dilakukan kalibrasi spektrofotometer untuk larutan standar fenol, yaitu dengan terlebih dahulu membuat larutan fenol 100 ppm dari 1 ml larutan induk (10000 ppm) diencerkan dengan aquadest dalam labu ukur 100 ml. Dari larutan fenol 100 ppm diambil 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25 dan 1,5 ml yang masing-masing diencerkan sampai volume 5 ml. Kelima larutan tersebut mempunyai konsentrasi 5, 10, 15, 20, 25 dan 30 ppm. Masing-masing sampel diambil 1 ml dan ditambahkan 9 ml aquadest kemudian ditambahkan 0,26 ml larutan NH_4OH 0,5 M dilanjutkan dengan penambahan 0,24 ml larutan buffer phospat, kemudian 0,1 ml larutan 4-aminoantipirin 2% dan terakhir 0,1 ml larutan $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 8% sampai terbentuk warna kemerahan. Setelah itu dimasukkan ke dalam spektrofotometer untuk dianalisis. Untuk fenol panjang gelombang (λ) yang digunakan 500 nm.

3.3.8. Prosedur Analisis Sampel

Prosedur analisis limbah fenol adalah sebagai berikut:

- a. Masukkan secara urut 1 ml hasil, 9 ml aquadest, 0,26 ml NH_4OH 0,1 M, 0,24 ml buffer phospat, 0,1 ml aminoantipirin 2 % dan 0,1 ml $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 8 %.
- b. Setelah dimasukkan semua, kocok hingga larutan tercampur secara homogen dan diamkan hingga 15 menit kemudian lakukan analisa dengan menggunakan spektrofotometer.

3.4. Parameter yang Divariasi

Parameter yang akan divariasi pada penelitian ini adalah:

- Loading katalis yang digunakan (0,1 – 1 g/L)
- Sumber energi foton (UV dan sinar matahari)
- Proses yang digunakan (fotokatalisis, ozonasi dan fotokatalisis-ozonasi)
- pH larutan fenol yang digunakan (pH 5-6 dan pH 10)

3.5. Data Penelitian dan Cara Pengambilan Data

Data yang diambil pada penelitian ini adalah:

- a. Konsentrasi limbah sebelum dan sesudah degradasi pada selang waktu tertentu dengan pengukuran dilakukan dengan alat UV-VIS *Spectrophotometer* buatan Hitachi Tipe *Spectro UV-VIS RS*.
- b. Laju sirkulasi limbah dijaga konstan menggunakan *valve* dan diukur menggunakan gelas ukur dan stopwatch.
- c. pH awal limbah fenol diukur menggunakan pH meter.
- d. Intensitas lampu UV diukur menggunakan UV Light Meter untuk panjang gelombang antara 290-390 nm (UV-340, Lutron).

3.6. Pengolahan Data Penelitian

Analisis sampel menggunakan UV-VIS *Spectrophotometer* didapatkan nilai absorbansi terhadap sinar dengan panjang gelombang 500 nm. Pengolahan data tersebut hingga mendapat konsentrasi fenol adalah sebagai berikut :

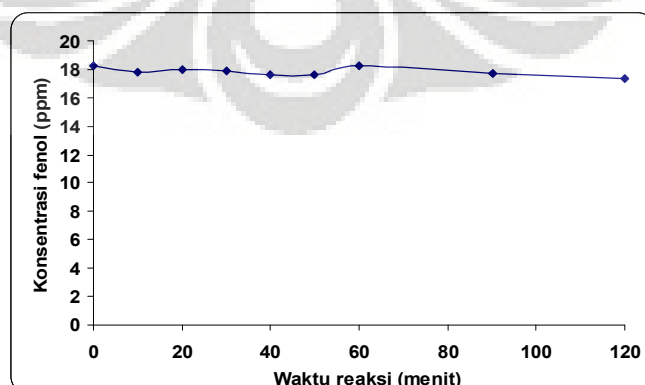
- a. Membuat kurva kalibrasi absorbansi vs konsentrasi fenol dari larutan standar.
- b. Memplot setiap titik data absorbansi hasil ke kurva tersebut dan didapatkan konsentrasi untuk masing-masing sampel.
- c. Membuat grafik degradasi fenol antara waktu reaksi (sumbu x) vs konsentrasi fenol (sumbu y) untuk setiap variasi.
- d. Menganalisa grafik yang diperoleh.

BAB 4 PEMBAHASAN

Percobaan yang dilakukan tidak seluruhnya menggunakan matahari sebagai sumber foton dikarenakan dalam penentuan beberapa kondisi optimal Reaktor TVC dibutuhkan intensitas cahaya yang konstan. Percobaan yang dilakukan dengan menggunakan matahari dilakukan pada berbagai kondisi *loading* katalis. Percobaan yang dilakukan diantaranya adalah uji blanko, variasi proses (fotokatalisis, ozonasi dan kombinasi fotokatalisis ozonasi), uji kinerja Reaktor TVC dengan menggunakan matahari, pengaruh *loading* katalis, pengaruh sumber UV yang digunakan (matahari atau lampu) dan pengaruh pH pada kombinasi proses fotokatalisis dan ozonasi. Data lengkap hasil seluruh percobaan dapat dilihat di Lampiran.

4.1. Uji Blanko

Uji blanko yang dilakukan pada percobaan ini bertujuan untuk mengetahui fenomena adsorpsi fisis yang terjadi pada permukaan katalis TiO_2 . Fenomena adsorpsi ini diperkirakan dapat mempengaruhi konversi limbah fenol. Semakin banyak adsorpsi, maka penurunan konsentrasi fenol akan terdeteksi semakin banyak pula, tetapi belum tentu menunjukkan bahwa proses fotokatalisis telah berperan secara efektif. Percobaan ini dilakukan dengan mengolah limbah fenol pada konsentrasi awal berkisar 20 ppm, volume total 10 L dan *loading* katalis 0,5 g/L. Uji blanko ini disebut juga *dark reaction* karena dilakukan pada keadaan gelap tanpa UV. Hasil uji blanko ditunjukkan oleh Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Penurunan Konsentrasi Fenol pada Uji Blanko

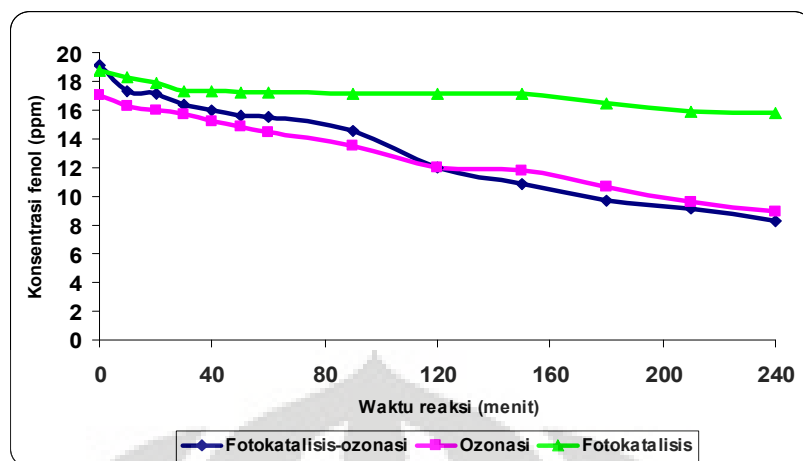
Hasil uji blanko menunjukkan adanya penurunan konsentrasi fenol kira-kira 0,9 ppm. Hal ini disebabkan adanya adsorpsi fisis limbah fenol tersebut oleh partikel TiO_2 (Ahmad F. Fasa, 2005).

4.2. Pengaruh Metode yang Digunakan terhadap Penyisihan Senyawa Fenol

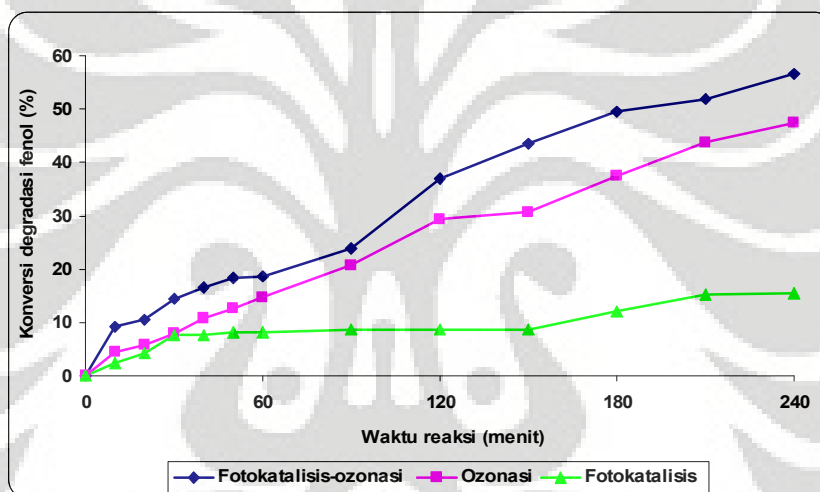
Percobaan ini dilakukan dengan tujuan untuk membandingkan metode yang digunakan untuk mendegradasi fenol (antara fotokatalisis-ozonasi, ozonasi dan fotokatalisis).

Percobaan ini dilakukan dengan memvariasikan metode yaitu fotokatalisis, ozonasi dan fotokatalisis ozonasi dengan konsentrasi awal limbah fenol berkisar 20 ppm, *loading* katalis 0,5 g/L dan volume limbah 20 liter. Perbandingan antara metode fotokatalisis, metode ozonasi dan metode fotokatalisis ozonasi terhadap penyisihan senyawa fenol dapat dilihat pada Gambar 4.2, sedangkan untuk perbandingan % penyisihan dapat dilihat pada Gambar 4.3.

Pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 menunjukkan bahwa metode fotokatalisis, metode ozonasi dan metode fotokatalisis ozonasi efektif dalam melakukan penyisihan limbah fenol. Berdasarkan hasil percobaan, pada konsentrasi berkisar 20 ppm, *loading* katalis 0,5 g/L, volume awal limbah 20 L selama 4 jam dengan menggunakan fotokatalisis diperoleh persen penyisihan sebesar 15,448%, dengan ozonasi sebesar 44,307% dan dengan gabungan kedua metode tersebut diperoleh 56,577%. Dari hasil tersebut terlihat perbedaan yang cukup signifikan antara proses fotokatalisis dengan kombinasi proses fotokatalisis-ozonasi. Sedangkan untuk proses ozonasi dengan proses fotokatalisis-ozonasi memberikan perbedaan hasil degradasi fenol yang lebih kecil. Hal ini menunjukkan bahwa dalam metode ozonasi memberikan pengaruh lebih besar dari pada metode fotokatalisis dalam mendegradasi fenol. Dengan menggunakan metode fotokatalisis ozonasi penyisihan fenol jauh lebih cepat dibandingkan dengan metode fotokatalisis dan metode ozonasi. Hal ini disebabkan pada metode fotokatalisis ozonasi, akan terbentuk OH radikal yang jauh lebih banyak dibandingkan dengan kedua metode yang digunakan.



Gambar 4.2. Kurva Perbandingan Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada Variasi proses



Gambar 4.3. Kurva Perbandingan Konversi Degradasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada Variasi Proses

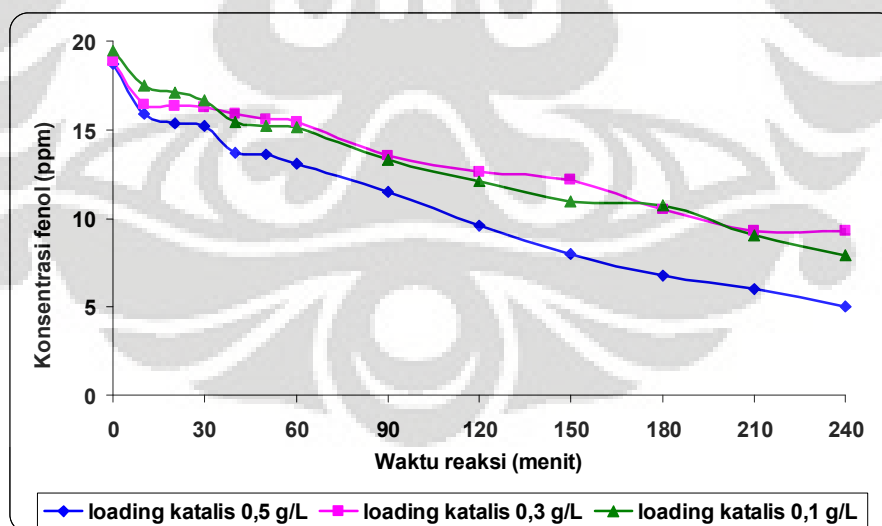
Pada metode fotokatalis, terjadi rekombinasi antara hole dan elektron di permukaan dan di dalam partikel sehingga kinetika proses fotokatalisis tidak begitu efektif dalam mendegradasi fenol. Sedangkan pada metode ozonasi, fenol yang tersubstitusi oleh elektron donor (OH^\bullet), mempunyai densitas elektron yang tinggi pada senyawa karbon di posisi ortho dan para, karenanya dengan kondisi ini fenol dapat bereaksi secara aktif dengan ozon. Ozon yang merupakan oksidator kuat sehingga akan mengoksidasi fenol, yaitu dengan pembentukan radikal OH^\bullet .

Metode fotokatalis ozonasi merupakan gabungan dari kedua metode tersebut, dimana metode fotokatalis yang tidak begitu banyak menghasilkan

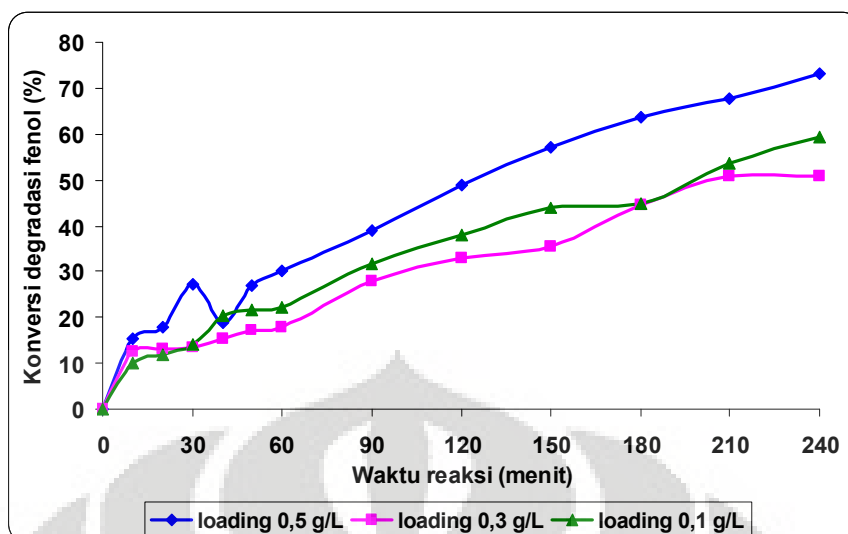
radikal OH^\bullet ditambahkan ozon sebagai *electron trapper*. Ozon ini akan mencegah terjadinya rekombinasi antara *hole* dan elektron sehingga OH^\bullet yang terbentuk semakin banyak. Reaksi yang melibatkan radikal OH^\bullet dan *hole* akan berlangsung jauh lebih cepat dibandingkan dengan reaksi yang hanya melibatkan *hole* atau radikal OH^\bullet .

4.3. Uji kinerja reaktor TVC menggunakan cahaya matahari

Percobaan ini dilakukan dengan tujuan untuk menguji kinerja reaktor TVC dan mengetahui pengaruh *loading katalis* dengan menggunakan cahaya matahari sebagai sumber foton. Pemilihan menggunakan matahari sebagai sumber foton dikarenakan selain memiliki energi yang besar untuk meningkatkan laju pembentukan elektron dan *hole*, juga memiliki nilai ekonomis yang tinggi serta merupakan sumber cahaya yang ramah lingkungan. Selain itu, matahari juga merupakan salah satu sumber energi alternatif sebagai pengganti sumber-sumber energi lainnya yang semakin menipis. Percobaan ini dilakukan dengan menggunakan sinar matahari sebagai sumber foton dengan variasi *loading katalis* (0,1; 0,3; 0,5 g/L), konsentrasi awal fenol berkisar 20 ppm, pH 5-6, laju sirkulasi 1/8 bukaan *valve* sirkulasi dan *full* bukaan *valve bypass*).



Gambar 4.4. Kurva Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi Pada *Running* Fotokatalisis-Ozonasi dengan Matahari pada Berbagai *Loading Katalis*.



Gambar 4.5. Kurva % *Removal* Fenol terhadap Waktu Reaksi pada *Running* Fotokatalisis-Ozonasi Dengan Matahari pada Berbagai *Loading* Katalis.

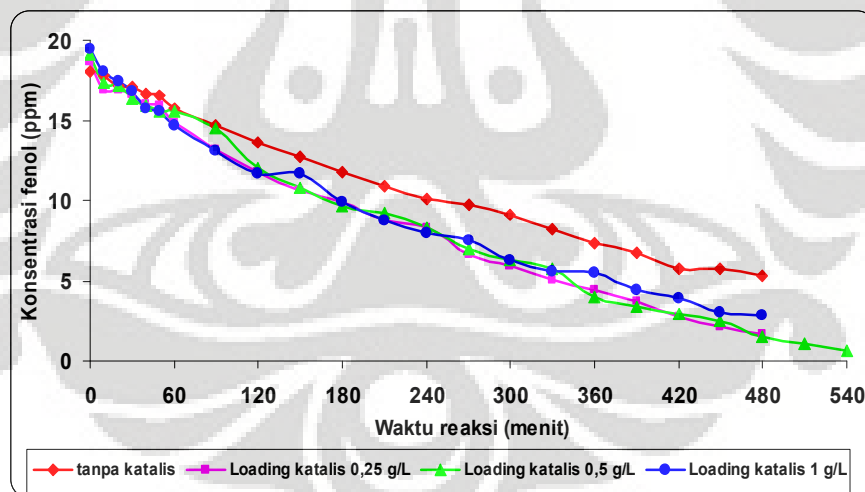
Berdasarkan Gambar 4.4 dan Gambar 4.5, ternyata proses fotokatalisis-ozonasi pada loading katalis 0,1; 0,3; 0,5 g/L dengan menggunakan cahaya matahari dalam waktu 4 jam dapat menurunkan konsentrasi fenol dengan % *removal* di atas 50 %. Hal ini menunjukkan bahwa selain kelebihan-kelebihan matahari yang telah disebutkan, cahaya matahari sebagai sumber foton juga efektif dalam mendegradasi fenol. Setelah 4 jam waktu reaksi ternyata pada saat *loading* katalis 0,5 g/L dengan intensitas matahari yang lebih kecil dari pada *loading* katalis 0,3 g/L dan 0,1 g/L menghasilkan konversi yang paling tinggi (73,04 %). Hal ini disebabkan oleh banyaknya katalis TiO_2 yang digunakan untuk mengoksidasi fenol. Secara umum semakin banyaknya TiO_2 berarti semakin banyak pula foton yang terabsorpsi oleh partikel TiO_2 dan jumlah molekul fenol yang diadsorpsi oleh partikel TiO_2 juga semakin banyak. Maka dengan penambahan *loading* katalis akan memperluas area permukaan untuk terjadinya adsorpsi dan reaksi fotokatalisis serta meningkatkan laju pembentukan elektron dan *hole* yang dibutuhkan dalam proses oksidasi. Tetapi konversi setelah 4 jam pada saat *loading* katalis 0,3 g/L lebih kecil (50,8 %) dari pada *loading* katalis 0,1 g/L (59,14 %). Hal ini dapat disebabkan oleh intensitas pada saat *loading* katalis 0,3 g/L lebih kecil dari pada 0,1 g/L, dengan perbedaan intensitas rata-rata $135,4 \mu\text{w}/\text{cm}^2$. Sehingga semakin kecilnya nilai intensitas UV tersebut menyebabkan lebih sedikitnya energi foton yang sampai ke permukaan katalis tiap

satuan luas yang sama. Sehingga akan lebih sedikit pula elektron dan hole yang dihasilkan melalui proses eksitasi pada satuan waktu dan luas yang sama.

Oleh karena intensitas cahaya matahari setiap harinya berbeda-beda sehingga untuk mendapatkan *loading* katalis yang optimum harus menggunakan lampu sebagai sumber foton.

4.4. Pengaruh *loading* katalis

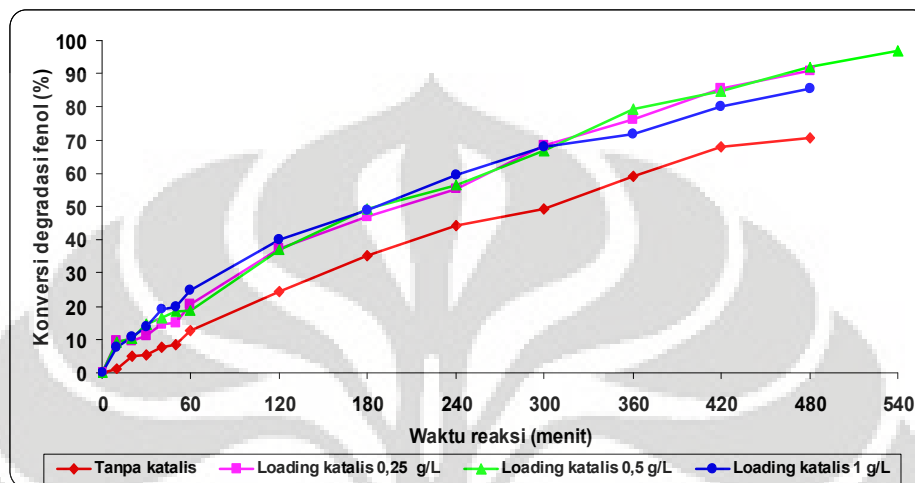
Loading katalis adalah banyaknya katalis yang digunakan (dalam satuan gram) per volume limbah (liter) yang akan didegradasi. Untuk mengetahui pengaruh *loading* katalis dan seberapa besar *loading* katalis optimum pada reaktor *Tubular "V" Collector*, maka dilakukan percobaan dengan memvariasikan *loading* katalis. Limbah yang diolah adalah fenol sintetik dengan konsentrasi awal limbah berkisar 20 ppm, volume reaktor 20 L dan menggunakan kombinasi proses fotokatalisis-ozonasi. Kondisi yang lain adalah pH 5-6 serta dengan menggunakan UV *black light lamp*. Variasi *loading* yang dilakukan adalah 0; 0,25; 0,5 dan 1 g/L. Hasil penurunan konsentrasi fenol terhadap waktu reaksi ditampilkan pada Gambar 4.6.



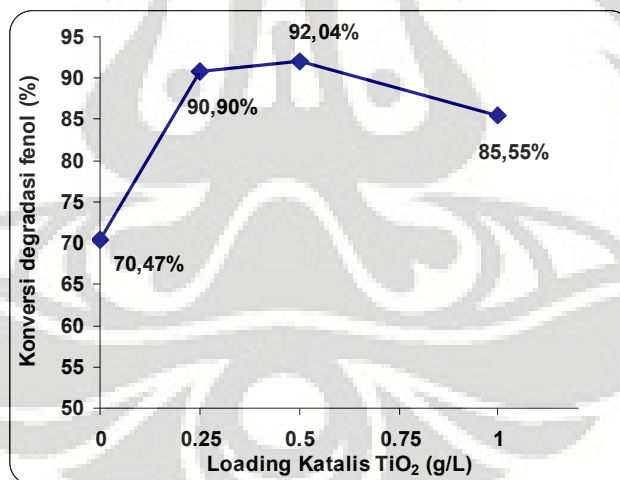
Gambar 4.6. Perbandingan Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada *Running* Fotokatalisis-Ozonasi dengan Variasi *Loading* Katalis (g/L)

Berdasarkan percobaan yang ditunjukkan pada Gambar 4.8, *loading* katalis TiO_2 pada proses kombinasi fotokatalisis ozonasi mempunyai pengaruh yang signifikan dan menunjukkan nilai maksimumnya. Berdasarkan hasil percobaan yang ditunjukkan oleh Gambar 4.6 dapat terlihat bahwa semakin bertambahnya

loading katalis pada awalnya akan meningkatkan laju oksidasi fenol hingga pada *loading* 0,5 g/L. Akan tetapi setelah *loading* ditambah lagi menjadi 1 g/L, laju degradasi fenol menjadi lebih kecil dibandingkan dengan *loading* 0,5 g/L. Hal ini dapat lebih jelas lagi jika melihat hubungan pengaruh *loading* katalis terhadap konversi degradasi fenol pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8.



Gambar 4.7. Perbandingan % Konversi Degradasi Fenol terhadap waktu pada *Running* Fotokatalisis-Ozonasi Variasi *Loading* Katalis.



Gambar 4.8. Perbandingan Konversi Degradasi Fenol terhadap *Loading* Katalis TiO₂ pada Proses Fotokatalisis-Ozonasi (Konsentrasi Fenol Awal ± 20 ppm; pH 5-6; Volume Limbah 20 L; t = 8 jam).

Kenaikan konversi reduksi fenol pada *loading* 0 g/L sampai 0,5 g/L setelah waktu reaksi selama 8 jam terjadi disebabkan semakin banyaknya katalis TiO₂ yang digunakan untuk mengoksidasi fenol menjadi CO₂ dan H₂O. Secara umum

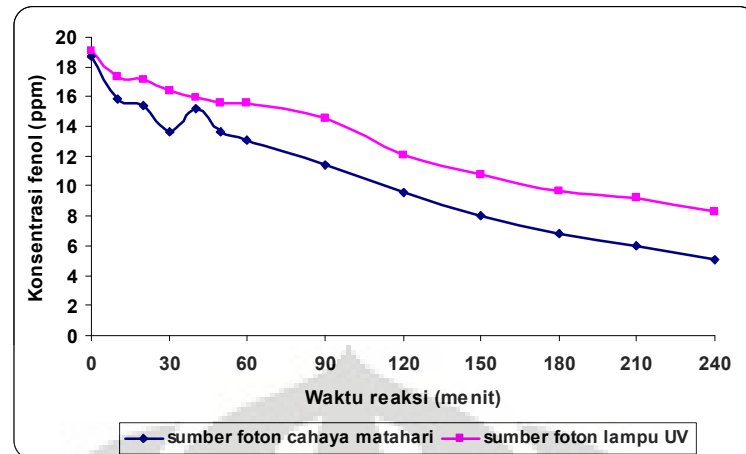
semakin banyaknya TiO_2 berarti semakin banyak pula foton yang terabsorpsi oleh partikel TiO_2 dan jumlah molekul fenol yang diadsorpsi oleh partikel TiO_2 juga semakin banyak. Maka dengan penambahan *loading* katalis akan memperluas area permukaan untuk terjadinya adsorpsi dan reaksi fotokatalisis serta meningkatkan laju pembentukan elektron dan *hole* yang dibutuhkan dalam proses oksidasi.

Akan tetapi, setelah mencapai *loading* katalis diatas 0,5 g/L, yaitu 1 g/L, konversi fenol selama 8 jam mengalami penurunan dibandingkan dengan konversi pada *loading* 0,5 g/L sebesar 6,48 %. Hal ini dikarenakan telah terlalu banyak jumlah TiO_2 dalam suspensi limbah dan katalis sehingga menyebabkan meningkatnya kekeruhan lerutan sehingga foton akan terhalangi untuk sampai ke dalam katalis dan menyebabkan oksidasi fenol yang tidak meningkat lagi. Fenomena ini biasa disebut sebagai efek *screening* atau bayangan. Jadi dapat disimpulkan *loading* katalis maksimum adalah 0,5 g/L.

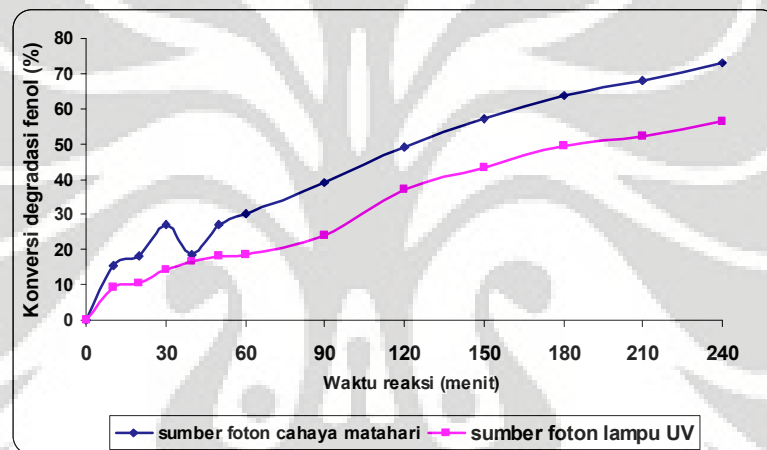
Jika dibandingkan antara konversi antara *loading* 0,25 dengan 0,5 g/L tidak terjadi perbedaan yang signifikan sehingga dapat disimpulkan untuk *loading* yang efektif untuk digunakan adalah *loading* 0,25 g/L.

4.5. Pengaruh perbedaan sumber UV (antara *black light lamp* dan matahari)

Percobaan ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh perbedaan sumber UV (antara *black light lamp* dan matahari). Hal ini dilakukan untuk menentukan apakah reaktor TVC lebih efektif dengan menggunakan matahari atau lampu *black light lamp*. Sistem lampu yang dirancang terdiri dari 14 buah lampu *black lamp* @18 watt merk Philips dengan panjang gelombang 365 nm. Lampu tersebut dipasang tepat diatas masing-masing tabung reaktor dengan jarak ± 5 cm. Agar penggunaan lampu efektif, maka sistem lampu dilengkapi dengan tutup (kertas berwarna putih) yang diperkirakan dapat mencegah masuknya pengaruh cahaya dari luar dan keluarnya cahaya lampu ketika uji kinerja reaktor TVC dilakukan. Masing-masing lampu pada jarak 5 cm tersebut memberikan nilai intensitas UV $\pm 50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ yang diukur dengan UV Light meter merk Lutron.



Gambar 4.9. Kurva Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada *Running* Fotokatalisis-Ozonasi Variasi Sumber Foton pada *Loading* Katalis 0,5 g/L.



Gambar 4.10. Kurva % Konversi Degradasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada *Running* Fotokatalisis-Ozonasi Variasi Sumber Foton pada *Loading* Katalis 0,5 g/L.

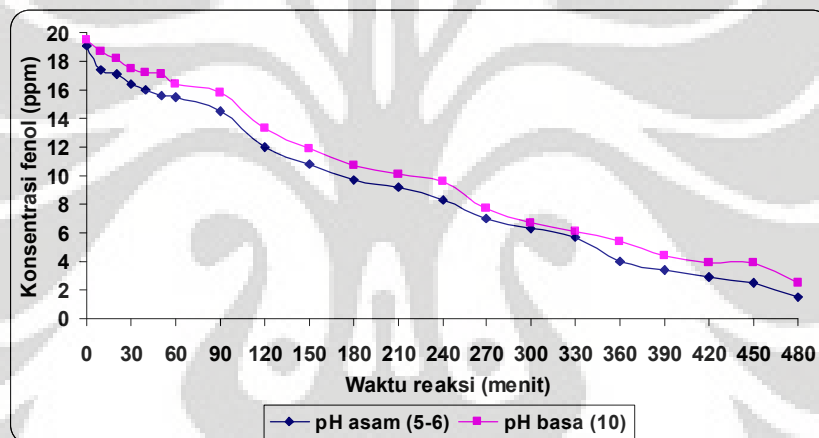
Berdasarkan hasil percobaan yang ditunjukkan oleh Gambar 4.9 dan Gambar 4.10, dapat disimpulkan bahwa penggunaan sinar matahari sangat efektif untuk mengoksidasi fenol menjadi senyawa intermediet dan kemudian menjadi CO_2 dan H_2O dimana konversi untuk *loading* katalis 0,5 g/L dengan proses fotokatalisis-ozonasi selama 4 jam menghasilkan konversi sebesar 73,04 % (untuk sumber foton matahari) dan 56,58 % (untuk sumber foton lampu *black light lamp*). Hal ini dikarenakan nilai intensitas UV yang berasal dari matahari sangatlah besar ($584,44 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) jika dibandingkan dengan nilai intensitas UV yang berasal dari *black light lamp* ($\pm 50 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ untuk setiap lampu). Besarnya nilai intensitas UV tersebut menyebabkan lebih banyaknya energi foton yang sampai ke permukaan katalis tiap satuan luas yang sama. Sehingga akan lebih

banyak pula elektron dan *hole* yang dihasilkan yang dihasilkan melalui proses eksitasi pada satuan waktu dan luas yang sama.

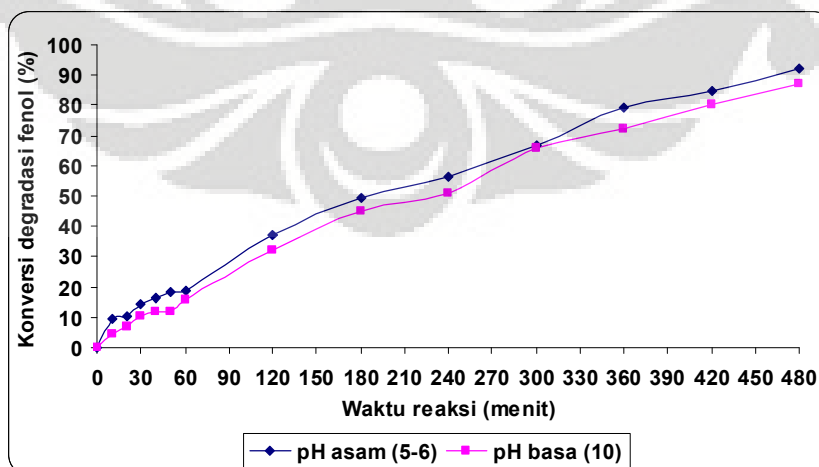
4.6. Pengaruh pH

Limbah yang diolah adalah fenol sintetik dengan konsentrasi awal limbah \pm 20 ppm, volume reaktor 20 L dan menggunakan kombinasi proses fotokatalisis-ozonasi. Kondisi yang lain adalah pH 5-6 dan pH 10 serta dengan menggunakan UV *black light lamp*. Larutan NaOH 5 N ditambahkan untuk meningkatkan nilai pH hingga mencapai pH 10.

Berdasarkan Gambar 4.11 dan 4.12, dapat terlihat bahwa degradasi fenol dengan menggunakan kombinasi proses fotokatalisis dan ozonasi pada pH 5-6 lebih baik dari pada pada pH 10.



Gambar 4.11. Pengaruh pH terhadap Degradasi Fenol untuk Proses Fotokatalisis-Ozonasi

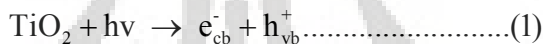


Gambar 4.12. Pengaruh pH terhadap Konversi Degradasi Fenol (%) untuk Kombinasi Proses Fotokatalisis-Ozonasi

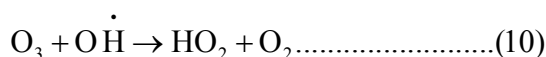
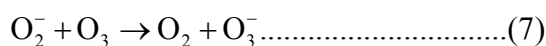
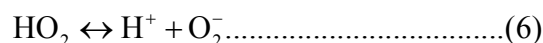
Banyak penelitian menyebutkan bahwa dengan meningkatnya pH akan mempercepat dekomposisi ozon untuk menghasilkan radikal OH, dimana radikal OH itu akan mendegradasi senyawa-senyawa organik lebih efektif dari pada ozon itu sendiri. Untuk proses fotokatalisis, pada umumnya memiliki efek yang bervariasi dalam proses dan diharapkan dengan meningkat atau menurunnya pH akan mempengaruhi laju degradasi karena adsorpsi yang bervariasi dengan pH. Pada saat substansinya berupa asam lemah, degradasi fotokatalitik meningkat pada pH rendah karena akan meningkatkan adsorpsi. (Augustina *et al.*, 2005)

Berdasarkan hasil percobaan, dapat terlihat jelas pada % konversi degradasi fenol pada kombinasi proses fotokatalisis dan ozonasi pada pH 5-6 selama 8 jam adalah 92,038% lebih baik dari pada % konversi degradasi fenol pada pH 10 yaitu 87,115%. Hal ini dapat disebabkan oleh penurunan degradasi fenol pada proses fotokatalisis jauh lebih besar dari pada kenaikan degradasi pada proses ozonasi atau dapat pula pada pH 10 pada proses fotokatalisis berefek menghambat terjadinya oksidasi terhadap fenol yang secara tidak langsung menghambat pembentukan radikal OH.

Pada fotokatalisis reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut : (Jarnuzi, 2001)



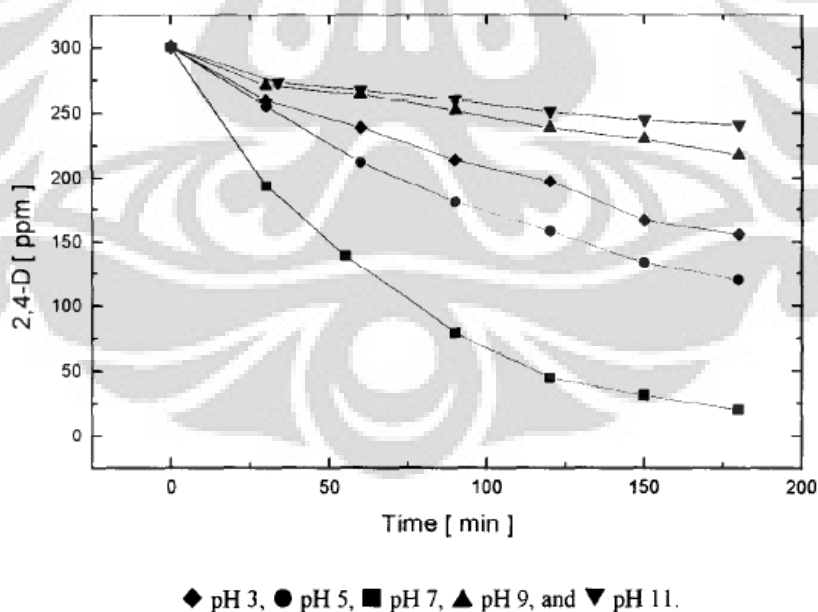
Makin besar pH, laju dekomposisi ozon makin besar pula. Mekanisme reaksi dekomposisi ozon di dalam air diperlihatkan oleh persamaan-persamaan reaksi berikut (Tae-Shin *et. al.*, 1999 dalam Eva F., 2001)



Persamaan 5 – 10 di atas memperlihatkan bahwa ion hidroksil (OH^-) merupakan inisiator reaksi berantai yang menghasilkan oksidator lain, terutama radikal hidroksil (OH^\bullet), jika ozon berada dalam larutan (air). Selain berperan dalam reaksi dekomposisi ozon, ion hidroksil juga merupakan inisiator pembentukan ion fenat yang bersifat lebih reaktif terhadap ozon melalui serangan elektrofilik atau dapat juga menghasilkan radikal hidroksil.

Berdasarkan reaksi-reaksi di atas pada pH 10, ion hidroksil (OH^-) yang merupakan inisiator reaksi berantai yang menghasilkan radikal hidroksil (OH^\bullet) pada reaksi dekomposisi ozon terhambat karena ion hidroksil (OH^-) bereaksi dengan *hole* di pita konduksi pada reaksi fotokatalisis yang pada reaksi akhirnya (persamaan reaksi 4) akan menghasilkan radikal hidroksil, sehingga degradasi fenol pada pH 10 akan menurun dibandingkan degradasi fenol pada pH 5-6.

Pengaruh pH terhadap degradasi senyawa organik dengan menggunakan kombinasi proses fotokatalisis ozonasi telah diteliti sebelumnya oleh Muller *et al.* (Muller *et al.*, 1998), senyawa organik yang didegradasi adalah 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D).



Gambar 4.13. Degradasi 2,4-D pada pH yang Berbeda dengan Menggunakan Kombinasi Proses Fotokatalisis-Ozonasi

(Muller *et al.*, 1998)

Berdasarkan Gambar 4.13, dapat dilihat bahwa dengan menggunakan kombinasi proses fotokatalisis ozonasi pada pH 7 menunjukkan kondisi optimum dalam mendegradasi 2,4-D. Sedangkan jika dibandingkan antara pH 5 dengan pH 11, degradasi 2,4-D lebih baik pada kondisi pH 5 dari pada pH 11, hal ini dapat terlihat dari penurunan konsentrasi 2,4-D (ppm) pada Gambar 4.13.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

1. Metode fotokatalisis, metode ozonasi dan metode fotokatalisis ozonasi yang dilakukan dalam reaktor TVC baik dengan cahaya matahari atau lampu UV dapat mendegradasi limbah fenol.
2. Penyisihan fenol dengan menggunakan metode fotokatalisis ozonasi lebih cepat dibandingkan dengan metode fotokatalisis dan metode ozonasi. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat efek sinergis antara proses fotokatalisis dan ozonasi.
3. Proses fotokatalisis ozonasi dalam penyisihan fenol dengan menggunakan sinar matahari sebagai sumber foton lebih efektif dari pada dengan lampu UV.
4. Penambahan katalis TiO_2 (untuk penyisihan fenol pada proses fotokatalisis-ozonasi dengan menggunakan sumber lampu UV) tidak memberikan perbedaan yang signifikan. Hal ini dapat ditunjukkan oleh % *removal* fenol selama 8 jam secara berurut berdasarkan kenaikan variasi loading katalis: 0; 0,25; 0,5; 1 g/L adalah 70,469; 90,902; 92,038; 85,552 %.
5. Loading optimum untuk proses fotokatalitik ozonasi adalah 0,25 g/L.

5.2. Saran

1. Mendapatkan data penunjang pengaruh pH terhadap degradasi fenol pada proses kombinasi fotokatalisis ozonasi agar mengetahui seberapa besar pengaruh ozonasi dan pengaruh fotokatalisis pada pH basa.
2. Menambahkan 1 ozonator pada titik lain agar dapat mendegradasi fenol hingga mencapai baku mutu dengan lebih cepat.

REFERENSI

- Agustina, T.E., Ang, H.M., Vareek, V.K. (2005). *A Review of Synergistic Effect of Photocatalysis and Ozonation on Wastewater Treatment*. Journal Photochem photobiol C : Photochemistry reviews, 6; 264-273.
- _____, (1995). *Baku Mutu Limbah Cair bagi Kegiatan Industri*, Badan Pengendalian Dampak Lingkungan, KEP MENLH No. 51/MENLH/10/1995.
- Bismo, S. (2000). *Pengolahan Limbah Cair yang Mengandung Senyawa Fenol dan Turunannya dengan Ozon dalam Kolom Sistem Injeksi Berganda*, Laporan Kemajuan Penelitian RUT VI tahun 1999/2000, Jakarta.
- Carey, Francis A. (1992) *Organic Chemistry*, Second Edition. Mc Graw-Hill, Inc. New York.
- Contreras, S. (2002). *Degradation and Biodegradability Enhancement of Nitrobenzene and 2,4 Dichlorophenol by Means of Advanced Oxidation Processes Based on Ozone*, Universitat de Barcelona.
- Eckenfelder, W. W. (1989). *Industrial Water Pollution Control, 2nd ed.*, McGraw-Hill International Editions, New York.
- Esplugas, S., Gimenez, J., Contreras, S. (2002). *Comparison of Different Advanced Oxidation Processes for Phenol Degradation*, Wat. Res, vol.36, pp. 1034-1042.
- Fathul, Eva, K. (2001). *Identifikasi Proses Penyisihan Fenol dengan Ozon dan Ozon/UV dalam Suasana Basa: Studi Kasus pada Reaktor Aliran Kontinyu*. Thesis, FT UI, Depok.
- Fernando J. Beltran, F. Javier Rivas and Olga, (2005), *Comparison between photocatalytic ozonation and other oxidation processes for the removal of phenols from water*, J. Chem Technol Biotechnol 80:973–984.
- Firdaus, A. Fasa, (2005). *Uji Kinerja Reaktor Tubular “V” Collectors Untuk Mengolah Limbah Cr(VI) dan Fenol pada Sistem Slurry Menggunakan Energi Surya*. Skripsi, TGP, FT UI.
- Fogler, H. S. (1999). *Elements of Chemical Reaction Engineering*, Third ed., Prentice Hall, Inc., USA.
- Gunlazuardi, Jarnuzi, (2001). *Fotokatalisis Pada Permukaan TiO₂ : Aspek Fundamental dan Aplikasinya*, Prosiding Seminar Nasional Kimia Fisika II, Jakarta.
- Kerc, A., Bekbolet, M., Saatci, A.M. (2003). *Ozone Sci. Eng*, 25. 497-504.

- Langlais, Bruno., David A. Recklow, Deborah R. Brink, (1991). *Ozone in Water Treatment, Application and Engineering*, Cooperative Research Report, Lewis Publishers.
- Lee, K., N.H.Lee, Shing, S., & H.G. Kee, S. K. (2006). *Hydrothermal Synthesis and Photocatalytic Characterizations of Transition Metals Doped Nano TiO₂ Sols*. *J.Catal*, B, 109-115.
- Li, L., Zhu., W., Zhang, P. (2003). *Photocatalytic Oxidation and Ozonation of Catechol Over Carbon-Black-Modified Nano-TiO₂ Thin Films Supported on Al Sheet*. *Wat. Res.*, vol 37, pp. 3646-3651.
- Li, L., Wangpeng Zhu., Chen Le., Pengyi Zhang, Zhongyin Chen. (2005). *Photocatalytic Ozonation of Dibutyl phthalate Over TiO₂ Film*, *J. Photochem. Photobiol. C*. pp. 172-177.
- Linsebigler, A.L, L Guangquan, and J.T. Yates. Jr. (1995). *Photocatalysis on TiO₂ Surface: Principle, Mechanism, and Selected Result*, *Chem. Rev.* 95.
- Metcalf & Eddy, (1999). *Wastewater Engineering 3rd Ed*, New York : McGraw-Hill International Edition.
- Morrison, R.T., and Boyd, R.N. (1992). *Organic Chemistry*, Sixth Edition, Prentice-Hall International, New York.
- Muller, T.S., Sun, Z., Kumar, G.M.P., Itoh, K., Murabayashi, M. (1998). *The Combination of Photocatalysis and Ozonolysis as a New Approach for Cleaning 2,4-Dichlorophenoxyaceticacid Polluted Water*. *Chemosphere*, 36, 2043-2055.
- Nascimento, Claudio, A.O., Carlos, Teixeira, S.C., Guardani, R., Frank, H. Quina., Chiavone-Filho, O., André, M. Braun. (2007). *Industrial Wastewater Treatment by Photochemical Processes Based on Solar Energy*. *J. Solar Energy Eng.*, Vol. 129.
- Rice, R.G., Browning, M.E. (1981). *Ozone treatment in industrial wastewater*, Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey.
- Salam, Amir, (2000). *Ozon Oxidation Capabilities*, Ozomax LTD.
- Sanchez, L., Peral, J. (1998). *Aniline degradation by combined photocatalysis and ozonation*, *Applied catalysis B: Environmental*, 19, 59-65.
- Slamet, (2004). *Pengolahan Limbah Jamak (Logam Berat, Organik, dan Asam), secara Simultan dengan Fotoreaktor Ber-energi Surya*. Laporan Pelaksanaan RUT XI.1 2004 dan Rencana Kerja RUT XI.1 2005- Kementrian Riset dan Teknologi dan Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia.

- Slamet, Arbianti, R., Syah, M.I. (2003). *Reduksi Logam Berat Cr(VI) dan Degradasi Fenol secara Simultan dengan Fotokatalisis Serbuk TiO₂ Degussa P25*, Prosiding Seminar Nasional Teknologi Proses Kimia V, TGP FTUI, Jakarta, hal. 1-8.
- Tanaka, Keiichi, Keiji Abe, Teruaki Hisanaga, (1996). *Photocatalytic Water Treatment on Immobilized TiO₂ Combined with Ozonation*, J. Photochem. Photobiol.
- Tong, S., Xie, D., Wei, H., Liu, W, (2005). *Ozone Sci. Eng.* 27 233-238.
- Villasenor, Jeorge, Patricio Reyes, Gina Pecchi. (2002). *Catalytic and Photocatalytic Ozonation of Phenol on MnO₂ Supported Catalysis*. Elsevier.
- Wang, S., Shiraishi F., Nakano, K. (2002). *A synergistic effect of photocatalysis and ozonation on decomposition of formic acid in an aqueous solution*, *Chemical Engineering Journal* 87, 261-271.
- Wastewater Technology Fact Sheet: (1999). *Ozone disinfection*, EPA.
www.nl-ind.com/kronos/
<http://www.ozoneapplication.com>

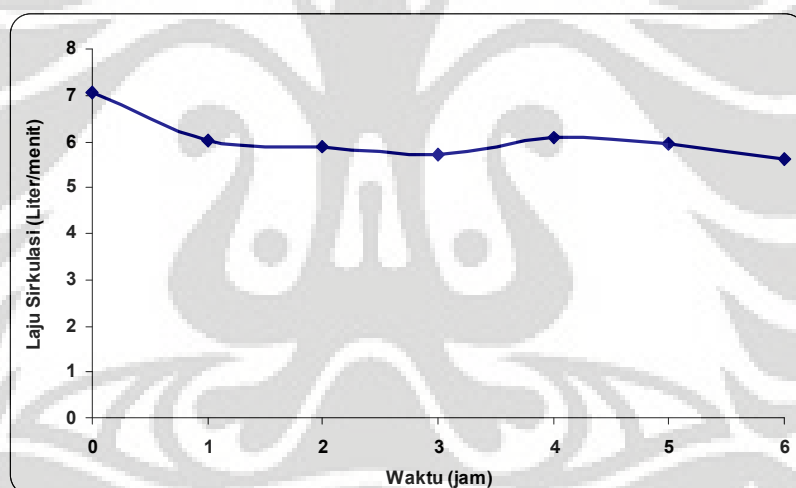


LAMPIRAN

1. Kalibrasi Laju Sirkulasi Reaktor TVC (Liter/menit)

Tabel 1. Data Kalibrasi Laju Sirkulasi Reaktor TVC terhadap Waktu

Jam ke-	Laju Sirkulasi (Liter/menit)
0	7,055
1	6,027
2	5,873
3	5,725
4	6,083
5	5,957
6	5,610

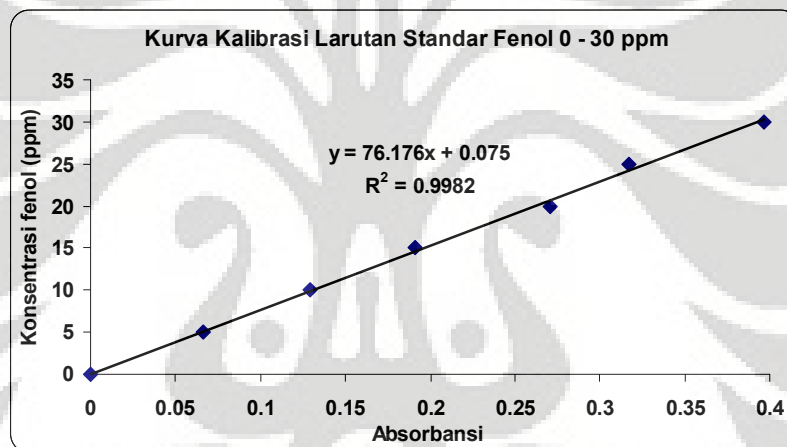


Gambar 1. Kurva Kalibrasi Laju Sirkulasi Reaktor TVC dengan Volume 20 Liter pada Buka-an 1/8 Valve Sirkulasi dan Buka-an Full Valve Aliran By Pass

2. Kalibrasi spektrofotometer untuk limbah fenol

Tabel 2. Data Kalibrasi Spektrofotometer untuk Limbah Fenol Sintetik

Konsentrasi Larutan Standar Fenol (ppm (x))	Absorbansi 1	Absorbansi 2	Absorbansi rata-rata
0	0	0	0
5	0,066	0,066	0,066
10	0,128	0,130	0,129
15	0,191	0,192	0,1915
20	0,270	0,272	0,271
25	0,317	0,318	0,3175
30	0,395	0,398	0,3965



Gambar 2. Kurva Kalibrasi Spektrofotometer untuk Larutan Standar Fenol

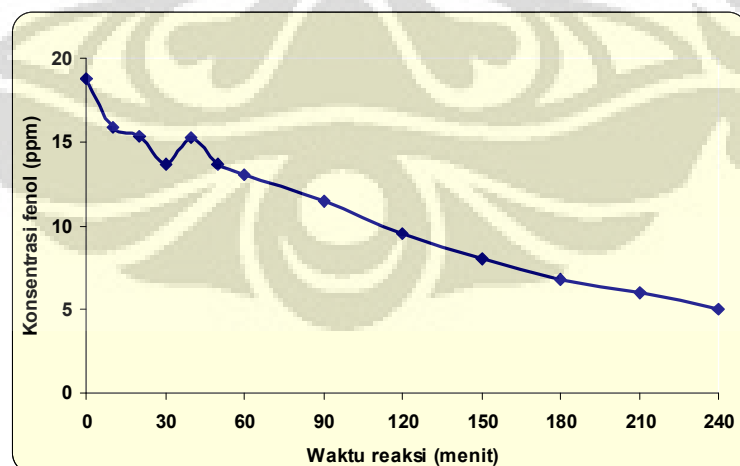
Jadi diperoleh persamaannya adalah $y = 76,176 x + 0,075$. Dimana variabel x adalah variabel terikat yaitu absorbansi dan y adalah variabel bebas yaitu konsentrasi (konsentrasi fenol).

Uji Kinerja Reaktor Tubular “V” Collector (TVC) Untuk Degradasi Fenol Menggunakan Sumber Foton Cahaya Matahari Dengan Variasi Loading Katalis (0,1; 0,3; 0,5 g/L). Pada Bukaannya 1/8 Valve Sirkulasi dan Bukaannya Full pada Valve Aliran By Pass

3. Running Fotokatalisis-Ozonasi (loading katalis 0,5 g/L; pH 5-6; konsentrasi awal fenol \pm 20 ppm; volume limbah 20 L)

Tabel 3. Data Absorbansi dan Konsentrasi Fenol untuk *Running* Fotokatalisis-Ozonasi dengan *Loading* Katalis 0,5 g/L dan Volume Limbah 20 L

No	Menit ke-	Absorbansi 1	Absorbansi 2	Absorbansi 3	Absorbansi rata-rata	Konsentrasi (ppm)
1	0	0,245	0,245	0,245	0,245	18,738
2	10	0,208	0,207	0,207	0,207	15,869
3	20	0,200	0,201	0,201	0,201	15,361
4	30	0,177	0,179	0,178	0,178	13,634
5	40	0,199	0,199	0,199	0,199	15,234
6	50	0,178	0,178	0,179	0,178	13,660
7	60	0,170	0,171	0,171	0,171	13,076
8	90	0,149	0,149	0,150	0,149	11,451
9	120	0,124	0,124	0,125	0,124	9,546
10	150	0,104	0,104	0,105	0,104	8,023
11	180	0,088	0,088	0,089	0,088	6,804
12	210	0,079	0,077	0,078	0,078	6,017
13	240	0,066	0,065	0,065	0,065	5,052

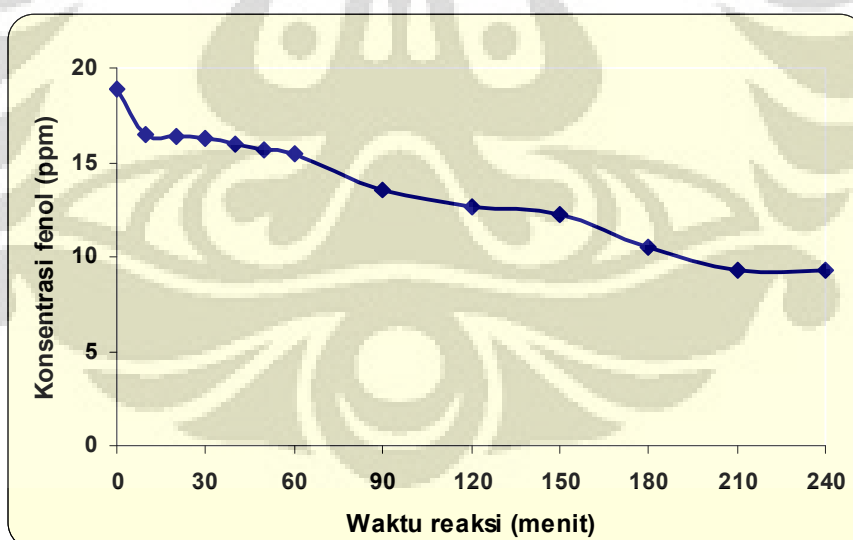


Gambar 3. Kurva Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada *Running* Fotokatalisis-Ozonasi dengan *Loading* Katalis 0,5 g/L

4. Running Fotokatalis-Ozonasi (*loading* katalis 0,3 g/L; pH 5-6; konsentrasi awal fenol \pm 20 ppm; volume limbah 20 L)

Tabel 4. Data Absorbansi dan Konsentrasi Fenol untuk *Running* Fotokatalisis-Ozonasi dengan *Loading* Katalis 0,3 g/L

No	Menit ke-	Absorbansi 1	Absorbansi 2	Absorbansi 3	Absorbansi rata-rata	Konsentrasi (ppm)
1	0	0,247	0,246	0,246	0,246	18,840
2	10	0,215	0,215	0,215	0,215	16,453
3	20	0,214	0,214	0,214	0,214	16,377
4	30	0,213	0,213	0,213	0,213	16,300
5	40	0,208	0,208	0,208	0,208	15,920
6	50	0,204	0,204	0,204	0,204	15,615
7	60	0,202	0,202	0,202	0,202	15,462
8	90	0,177	0,177	0,177	0,177	13,558
9	120	0,165	0,165	0,165	0,165	12,644
10	150	0,159	0,159	0,159	0,159	12,187
11	180	0,136	0,137	0,136	0,136	10,460
12	210	0,121	0,121	0,120	0,121	9,267
13	240	0,120	0,121	0,121	0,121	9,267

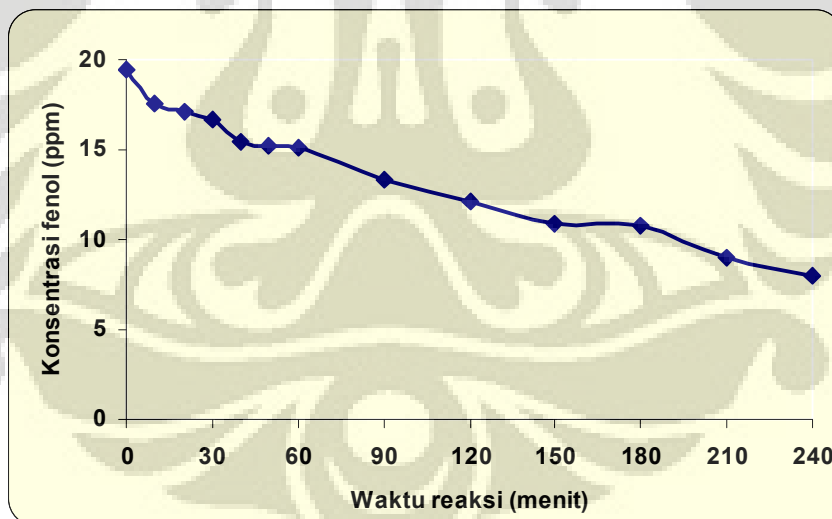


Gambar 4. Kurva Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada *Running* Fotokatalisis-Ozonasi dengan *Loading* Katalis 0,3 g/L.

5. Running Fotokatalis-Ozonasi (*loading* katalis 0,1 g/L; pH 5-6; konsentrasi awal fenol \pm 20 ppm; volume limbah 20 L)

Tabel 5. Data Absorbansi dan Konsentrasi Fenol untuk *Running* Fotokatalisis-Ozonasi dengan *Loading* Katalis 0,1 g/L

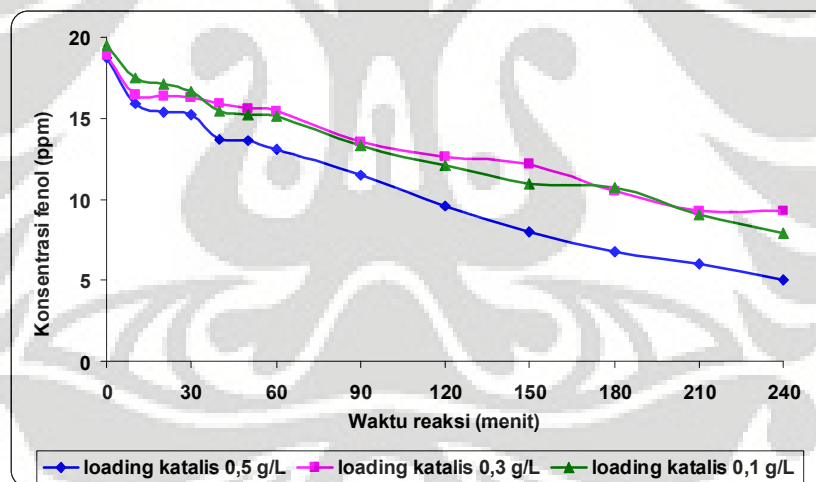
No	Menit ke-	Absorbansi 1	Absorbansi 2	Absorbansi 3	Absorbansi rata-rata	Konsentrasi (ppm)
1	0	0,254	0,254	0,255	0,254	19,449
2	10	0,229	0,229	0,229	0,229	17,519
3	20	0,223	0,224	0,224	0,224	17,113
4	30	0,218	0,218	0,218	0,218	16,681
5	40	0,202	0,202	0,202	0,202	15,462
6	50	0,199	0,199	0,198	0,199	15,209
7	60	0,197	0,198	0,197	0,197	15,107
8	90	0,173	0,173	0,174	0,173	13,279
9	120	0,158	0,157	0,157	0,157	12,060
10	150	0,142	0,142	0,143	0,142	10,917
11	180	0,140	0,140	0,140	0,140	10,740
12	210	0,117	0,118	0,117	0,117	9,013
13	240	0,102	0,103	0,105	0,103	7,946



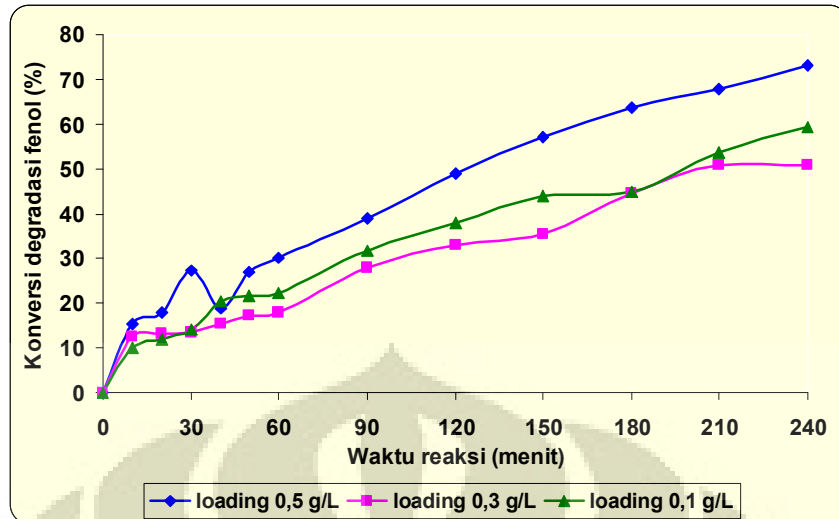
Gambar 5. Kurva Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada *Running* Fotokatalisis-Ozonasi dengan *Loading* Katalis 0,1 g/L

Tabel 6. Data Konsentrasi dan % Removal Fenol untuk Running Fotokatalisis-Ozonasi dengan Variasi *Loading* Katalis dengan Cahaya Matahari pada pH 5-6 dengan volume limbah 20 L

Menit ke-	Degradasi fenol menggunakan proses fotokatalisis-ozonasi					
	konsentrasi fenol			% removal		
	<i>Loading</i> katalis (g/L)			<i>Loading</i> katalis (g/L)		
	0.5	0.3	0.1	0.5	0.3	0.1
0	18,738	18,840	19,449	0,000	0,000	0,000
10	15,869	16,453	17,519	15,313	12,669	9,922
20	15,361	16,377	17,113	18,023	13,074	12,011
30	15,234	16,300	16,681	27,237	13,478	14,231
40	13,660	15,920	15,462	18,700	15,500	20,497
50	13,634	15,615	15,209	27,102	17,117	21,803
60	13,076	15,462	15,107	30,219	17,926	22,325
90	11,451	13,558	13,279	38,891	28,034	31,725
120	9,546	12,644	12,060	49,055	32,886	37,992
150	8,023	12,187	10,917	57,185	35,312	43,867
180	6,804	10,460	10,740	63,690	44,477	44,781
210	6,017	9,267	9,013	67,890	50,812	53,659
240	5,052	9,267	7,946	73,040	50,812	59,142



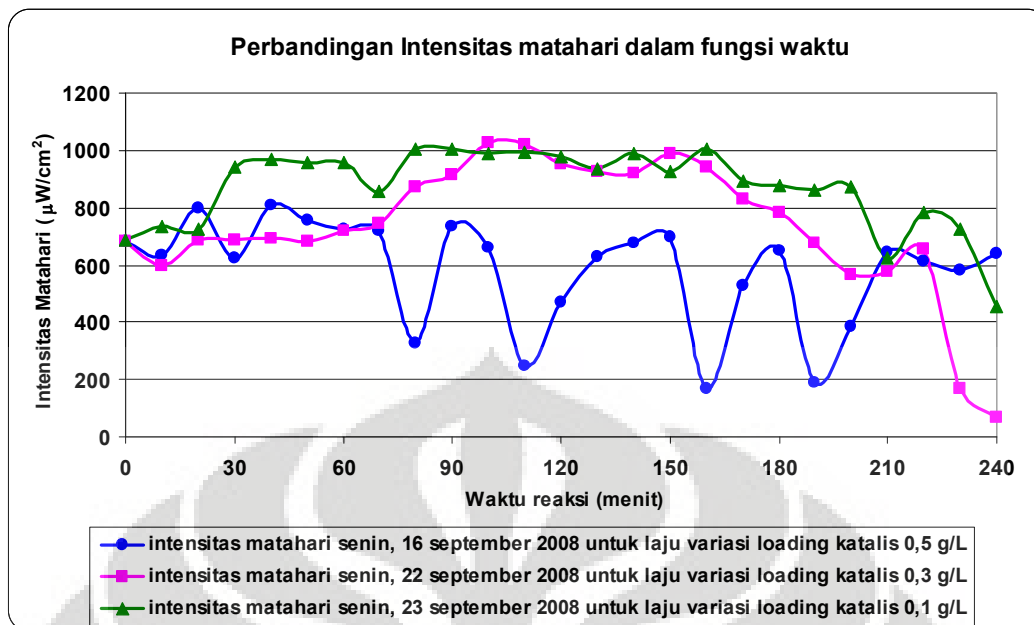
Gambar 6. Kurva Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada *Running* Fotokatalisis-Ozonasi dengan Variasi *Loading* Katalis.



Gambar 7. Kurva % *Removal* Fenol terhadap Waktu Reaksi pada *Running* Fotokatalisis-Ozonasi dengan Variasi *Loading* Katalis.

Tabel 7. Data Pengukuran Intensitas Matahari ($\mu\text{w}/\text{cm}^2$)

Menit ke-	loading 0,5 g/L	loading 0,3 g/L	loading 0,1 g/L
0	680	680	689
10	632	597	737
20	797	685	722
30	623	689	942
40	810	690	968
50	756	684	958
60	726	719	958
70	720	746	859
80	329	872	1004
90	736	914	1006
100	660	1024	988
110	250	1020	996
120	473	954	977
130	630	924	936
140	675	918	988
150	700	989	924
160	170	940	1005
170	531	832	894
180	651	784	877
190	188	676	864
200	387	566	874
210	646	576	625
220	615	655	785
230	584	167	725
240	642	71	456
rata-rata	584,44	734,88	870,28



Gambar 8. Kurva Perbandingan Intensitas Matahari dalam Fungsi Waktu

Tabel 8. Data Pengukuran Laju Sirkulasi

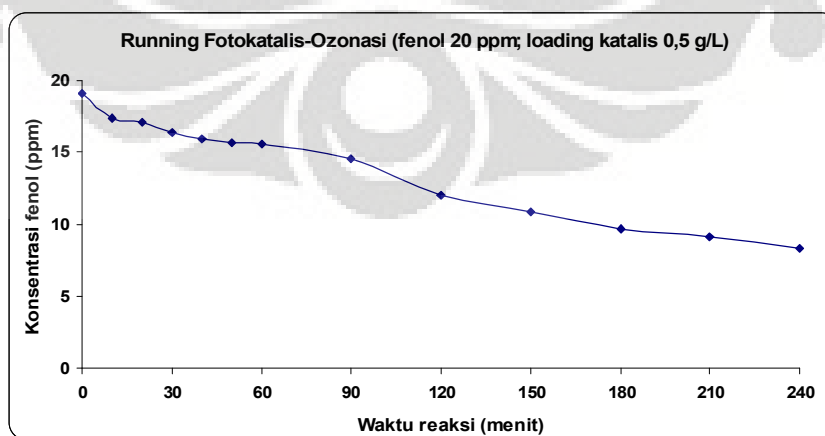
Tanggal running	Laju Sirkulasi rata-rata (Liter/min)
9/16/2008 (<i>loading</i> katalis 0,5)	5,8949
9/22/2008 (<i>loading</i> katalis 0,3)	6,2524
9/23/2008 (<i>loading</i> katalis 0,1)	6,6397

Uji Kinerja Reaktor Tubular “V” Collector (TVC) Untuk Degradasi Fenol Menggunakan Sumber Foton Lampu UV Dengan Variasi Proses (Fotokatalis-Ozonasi; Fotokatalisis; Ozonasi), Pada Buka-an 1/8 Valve Sirkulasi dan Buka-an Full pada Valve Aliran By Pass

6. Running Fotokatalis-Ozonasi (konsentrasi awal fenol \pm 20 ppm; loading katalis 0,5 g/L; pH larutan 5-6; volume limbah 20 L)

Tabel 9. Data Absorbansi dan Konsentrasi Fenol untuk *Running* Fotokatalisis-Ozonasi dengan *Loading* Katalis 0,5 g/L

No	Menit ke-	Absorbansi 1	Absorbansi 2	Absorbansi rata-rata	Konsentrasi (ppm)	Konversi
1	0	0,250	0,250	0,2500	19,1189	0,000
2	10	0,227	0,227	0,2270	17,3668	9,164
3	20	0,224	0,224	0,2240	17,1383	10,359
4	30	0,214	0,214	0,2140	16,3766	14,344
5	40	0,208	0,209	0,2085	15,9576	16,535
6	50	0,204	0,204	0,2040	15,6148	18,328
7	60	0,203	0,203	0,2030	15,5386	18,726
8	90	0,190	0,190	0,1900	14,5483	23,906
10	120	0,157	0,157	0,1570	12,0346	37,054
11	150	0,141	0,141	0,1410	10,8157	43,429
12	180	0,126	0,126	0,1260	9,6731	49,405
13	210	0,119	0,120	0,1195	9,1780	51,995
14	240	0,108	0,108	0,1080	8,3020	56,577

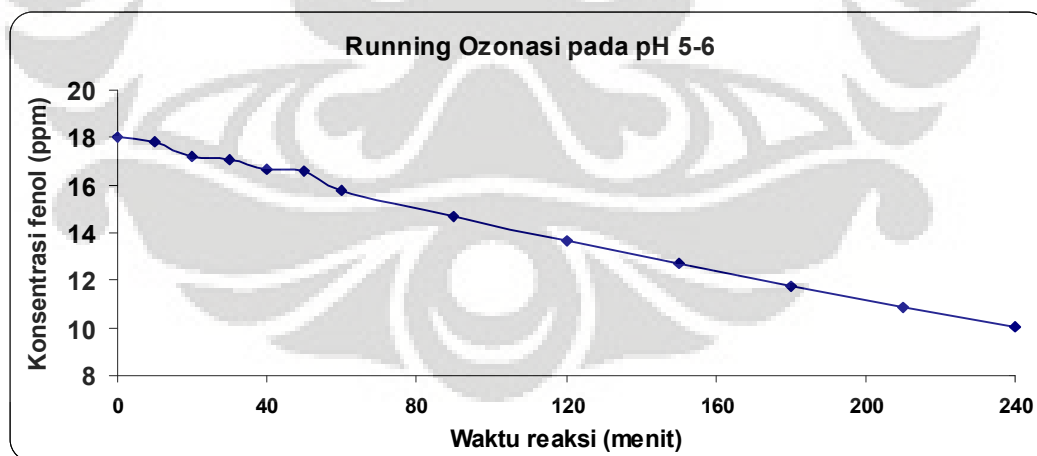


Gambar 9. Kurva Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Degradasi dengan Proses Fotokatalisis-Ozonasi

7. Running Ozonasi (fenol \pm 20 ppm; pH larutan 5-6; volume 20 L)

Tabel 10. Data Absorbansi dan Konsentrasi Fenol selama 4 Jam untuk *Running Ozonasi*

No	Menit ke-	Absorbansi 1	Absorbansi 2	Absorbansi rata-rata	Konsentrasi (ppm)	Konversi Degradasi (%)
1	0	0,236	0,236	0,2360	18,0524	0,000
2	10	0,233	0,233	0,2330	17,8239	1,266
3	20	0,224	0,225	0,2245	17,1764	4,853
4	30	0,223	0,223	0,2230	17,0621	5,486
5	40	0,217	0,218	0,2175	16,6432	7,806
7	50	0,216	0,217	0,2165	16,5670	8,228
8	60	0,206	0,206	0,2060	15,7672	12,659
9	90	0,192	0,192	0,1920	14,7007	18,567
10	120	0,178	0,178	0,1780	13,6342	24,474
11	150	0,166	0,166	0,1660	12,7201	29,538
12	180	0,153	0,153	0,1530	11,7299	35,023
13	210	0,142	0,142	0,1420	10,8919	39,665
14	240	0,131	0,131	0,1310	10,0540	44,307

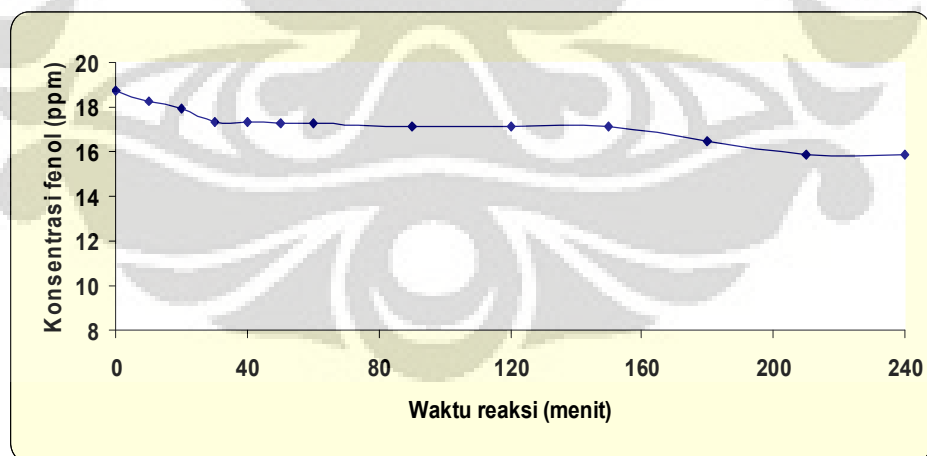


Gambar 10. Kurva Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Degradasi dengan Proses Ozonasi

8. Running Fotokatalis (fenol \pm 20 ppm; loading katalis 0,5 g/L; pH larutan 5-6; volume limbah awal 20 L)

Tabel 11. Data Absorbansi dan Konsentrasi Fenol untuk *Running* Fotokatalisis dengan Loading Katalis 0,5 g/L

No	Menit ke-	Absorbansi 1	Absorbansi 2	Absorbansi 3	Absorbansi rata-rata	Konsentrasi (ppm)
1	0	0,245	0,245	0,245	0,2450	18,7380
2	10	0,239	0,239	0,239	0,2390	18,2809
7	20	0,234	0,235	0,235	0,2347	17,9509
3	30	0,226	0,226	0,227	0,2263	17,3161
8	40	0,226	0,226	0,227	0,2263	17,3161
4	50	0,225	0,225	0,226	0,2253	17,2399
6	60	0,225	0,225	0,226	0,2253	17,2399
5	90	0,223	0,224	0,224	0,2237	17,1129
10	120	0,223	0,224	0,224	0,2237	17,1129
11	150	0,223	0,224	0,224	0,2237	17,1129
12	180	0,214	0,216	0,216	0,2153	16,4781
13	210	0,207	0,208	0,208	0,2077	15,8941
14	240	0,207	0,207	0,207	0,2070	15,8433



Gambar 11. Kurva Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Degradasi dengan Proses Fotokatalisis

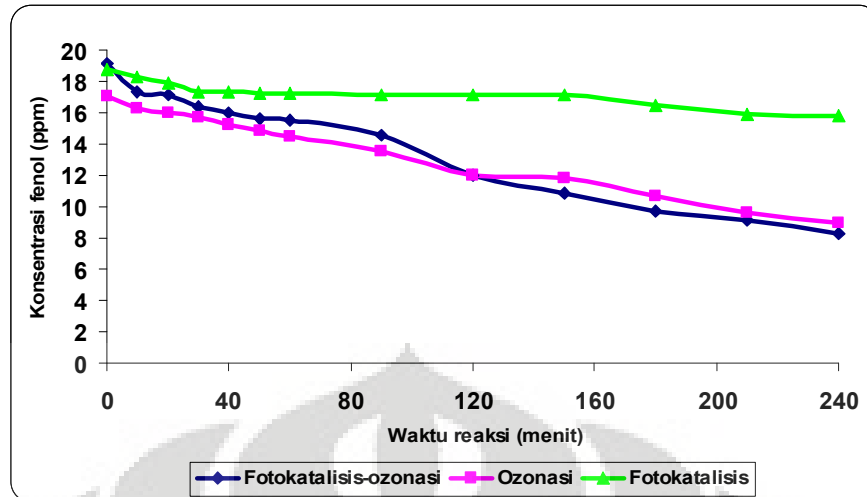
Tabel 12. Data Konsentrasi dan % *Removal* Fenol selama 4 Jam untuk Variasi Proses dengan *Loading* Katalis 0,5 g/L dengan Cahaya Lampu UV

Menit ke-	Degradasi fenol menggunakan proses fotokatalisis-ozonasi					
	konsentrasi fenol			% removal		
	<i>Loading</i> katalis (g/L)			<i>Loading</i> katalis (g/L)		
	FO	O	F	FO	O	F
0	19,119	18,052	18,738	0,000	0,000	0,000
10	17,367	17,824	18,281	9,164	1,266	2,439
20	17,138	17,176	17,951	10,359	4,853	4,201
30	16,377	17,062	17,316	14,344	5,486	7,589
40	15,958	16,643	17,316	16,535	7,806	7,589
50	15,615	16,567	17,240	18,328	8,228	7,995
60	15,539	15,767	17,240	18,726	12,659	7,995
90	14,548	14,701	17,113	23,906	18,567	8,673
120	12,035	13,634	17,113	37,054	24,474	8,673
150	10,816	12,720	17,113	43,429	29,538	8,673
180	9,673	11,730	16,478	49,405	35,023	12,060
210	9,178	10,892	15,894	51,995	39,665	15,177
240	8,302	10,054	15,843	56,577	44,307	15,448

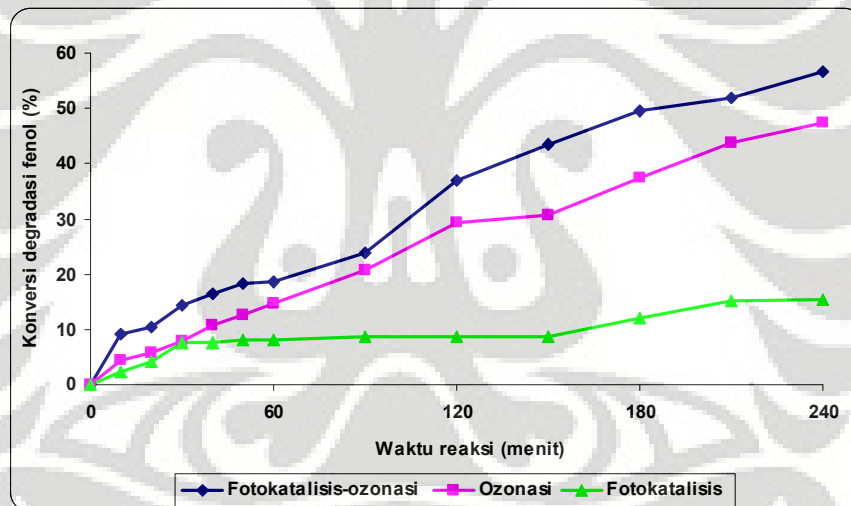
Dimana : FO (Fotokatalisis-Ozonasi)

O (Ozonasi)

F (Fotokatalisis)



Gambar 12. Perbandingan Metode Fotokatalitik, Metode Ozonasi dan Metode Fotokatalisis-Ozonasi terhadap Degradasi Fenol per Satuan Waktu



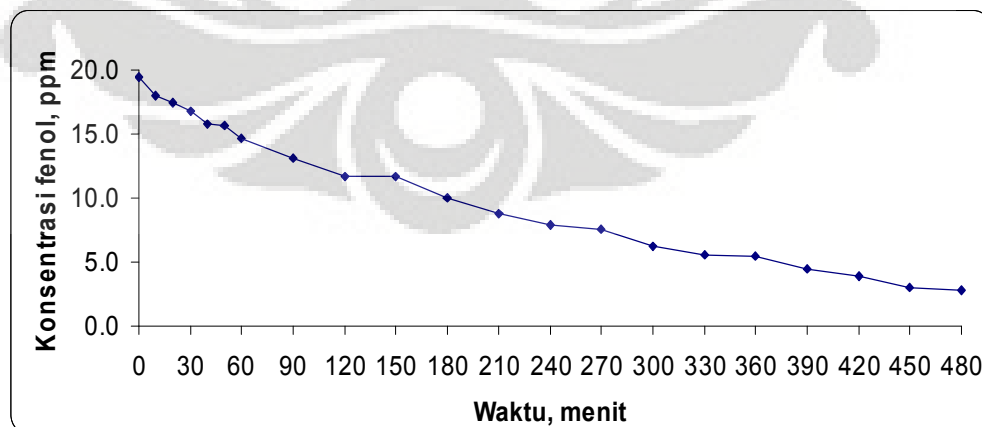
Gambar 13. Perbandingan Metode Fotokatalitik, Metode Ozonasi dan Metode Fotokatalisis-Ozonasi terhadap Konversi Degradasi Fenol (%) per Satuan Waktu

9. Running Fotokatalisis-Ozonasi

(Konsentrasi awal fenol 20 ppm; *loading* katalis 1 g/L; pH 6,35; laju sirkulasi 1/8 bukaan valve = 7,814 liter/menit)

Tabel 13. Data Absorbansi dan Konsentrasi Fenol untuk Running Fotokatalisis-Ozonasi dengan *Loading* Katalis 1 g/L.

No	Menit ke-	Absorbansi 1	Absorbansi 2	Absorbansi 3	Absorbansi rata-rata	Konsentrasi (ppm)
1	0	0,255	0,255	0,255	0,2550	19,4998
2	10	0,235	0,236	0,236	0,2357	18,0270
3	20	0,228	0,228	0,228	0,2280	17,4430
4	30	0,219	0,220	0,220	0,2197	16,8082
5	40	0,206	0,206	0,206	0,2060	15,7672
6	50	0,204	0,204	0,204	0,2040	15,6148
7	60	0,191	0,191	0,192	0,1913	14,6499
8	90	0,171	0,172	0,171	0,1713	13,1264
9	120	0,152	0,152	0,152	0,1520	11,6537
10	150	0,152	0,152	0,152	0,1520	11,6537
11	180	0,129	0,130	0,130	0,1297	9,9524
12	210	0,114	0,114	0,115	0,1143	8,7844
13	240	0,103	0,103	0,103	0,1030	7,9211
14	270	0,097	0,098	0,098	0,0977	7,5148
15	300	0,081	0,081	0,081	0,0810	6,2452
16	330	0,072	0,072	0,072	0,0720	5,5596
17	360	0,071	0,071	0,071	0,0710	5,4835
18	390	0,057	0,057	0,057	0,0570	4,4170
19	420	0,050	0,050	0,050	0,0500	3,8838
20	450	0,039	0,039	0,039	0,0390	3,0458
21	480	0,036	0,036	0,036	0,0360	2,8173



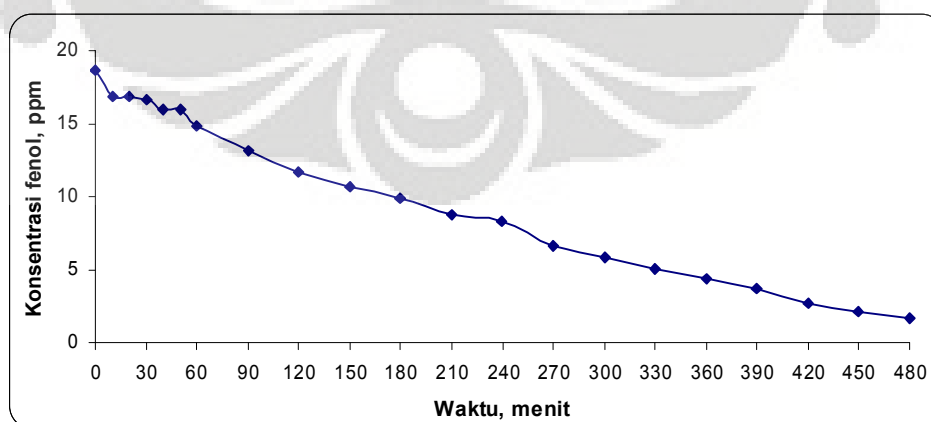
Gambar 14. Perbandingan Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada Running Fotokatalisis-Ozonasi dengan *Loading* Katalis 1 g/L

10. Running Fotokatalisis-Ozonasi

(Konsentrasi awal fenol \pm 20 ppm; *loading* katalis 0,25 g/L; pH 6,05; laju sirkulasi 1/8 bukaan valve = 7,205 Liter/menit)

Tabel 14. Data absorbansi dan konsentrasi fenol untuk running fotokatalisis-ozonasi dengan *loading* katalis 0,25 g/L

No	Menit ke-	Absorbansi 1	Absorbansi 2	Absorbansi 3	Absorbansi rata-rata	Konsentrasi (ppm)
1	0	0,245	0,244	0,244	0,244	18,687
2	10	0,221	0,221	0,221	0,221	16,910
3	20	0,221	0,221	0,221	0,221	16,910
4	30	0,217	0,217	0,217	0,217	16,605
5	40	0,209	0,209	0,209	0,209	15,996
6	50	0,208	0,208	0,208	0,208	15,920
7	60	0,193	0,194	0,194	0,194	14,828
8	90	0,172	0,172	0,172	0,172	13,177
9	120	0,153	0,153	0,153	0,153	11,730
10	150	0,139	0,139	0,139	0,139	10,663
11	180	0,129	0,129	0,129	0,129	9,902
12	210	0,114	0,114	0,114	0,114	8,759
13	240	0,108	0,109	0,109	0,109	8,353
14	270	0,085	0,086	0,086	0,086	6,601
15	300	0,076	0,076	0,077	0,076	5,890
16	330	0,065	0,066	0,066	0,066	5,077
17	360	0,056	0,056	0,059	0,057	4,417
18	390	0,048	0,048	0,049	0,048	3,757
19	420	0,035	0,035	0,035	0,035	2,741
20	450	0,027	0,027	0,027	0,027	2,132
21	480	0,022	0,020	0,022	0,021	1,700



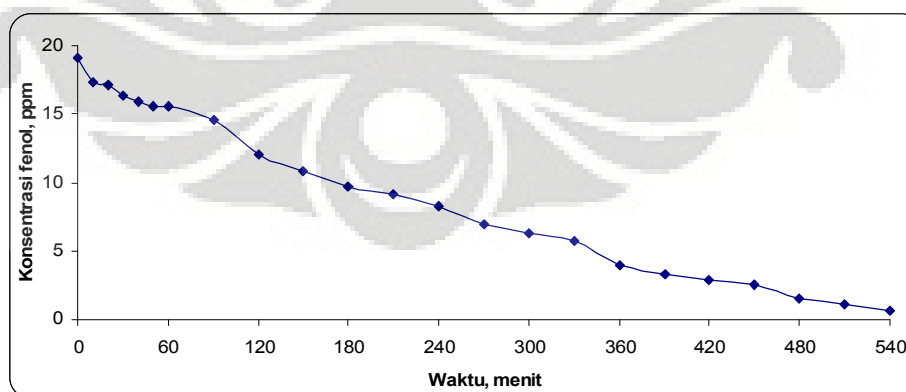
Gambar 15. Perbandingan Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada Running Fotokatalisis-Ozonasi dengan *Loading* Katalis 0,25 g/L.

11. Running Fotokatalisis-Ozonasi

(Konsentrasi awal fenol \pm 20 ppm; volume limbah 20 L; *loading* katalis 0,5 g/L; pH 5 - 6; laju sirkulasi 1/8 bukaan valve = 7,045 liter/menit)

Tabel 15. Data Absorbansi dan konsentrasi Fenol untuk Running Fotokatalisis-Ozonasi dengan *Loading* Katalis 0,5 g/L.

No	Menit ke-	Absorbansi 1	Absorbansi 2	Absorbansi rata-rata	Konsentrasi (ppm)
1	0	0,250	0,250	0,250	19,119
2	10	0,227	0,227	0,227	17,367
3	20	0,224	0,224	0,224	17,138
4	30	0,214	0,214	0,214	16,377
5	40	0,208	0,209	0,209	15,958
6	50	0,204	0,204	0,204	15,615
7	60	0,203	0,203	0,203	15,539
8	90	0,190	0,190	0,190	14,548
9	120	0,157	0,157	0,157	12,035
10	150	0,141	0,141	0,141	10,816
11	180	0,126	0,126	0,126	9,673
12	210	0,119	0,120	0,120	9,178
13	240	0,108	0,108	0,108	8,302
14	270	0,091	0,091	0,091	7,007
15	300	0,082	0,082	0,082	6,321
16	330	0,074	0,074	0,074	5,712
17	360	0,051	0,051	0,051	3,960
18	390	0,043	0,043	0,043	3,351
19	420	0,037	0,037	0,037	2,893
20	450	0,032	0,032	0,032	2,513
21	480	0,019	0,019	0,019	1,522
22	510	0,013	0,013	0,013	1,065
23	540	0,007	0,007	0,007	0,608

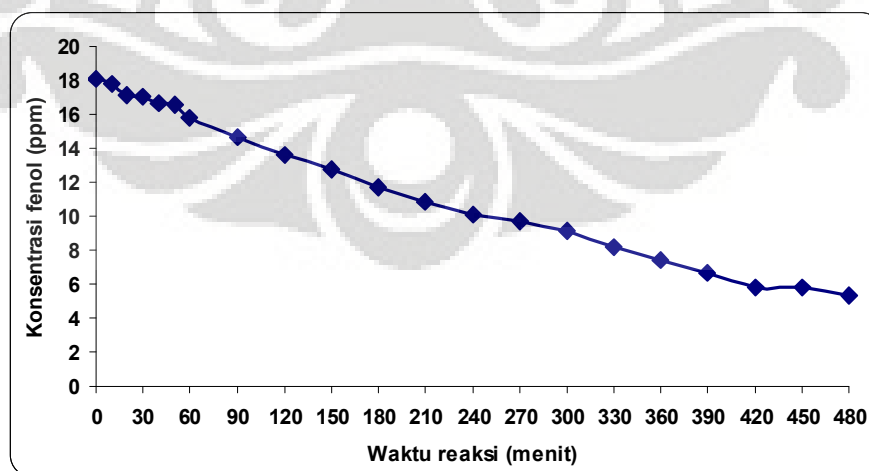


Gambar 16. Perbandingan Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada Running Fotokatalisis-Ozonasi dengan *Loading* Katalis 0,5 g/L.

12. Running Ozonasi (tanpa penambahan katalis)

Tabel 16. Data Absorbansi dan Konsentrasi Fenol untuk Running Ozonasi dengan Volume Limbah 20 L.

No	Menit	Absorbansi 1	Absorbansi 2	Absorbansi rata-rata	Konsentrasi (ppm)	% removal
1	0	0,236	0,236	0,236	18,052	0,000
2	10	0,233	0,233	0,233	17,824	1,266
3	20	0,224	0,225	0,225	17,176	4,853
4	30	0,223	0,223	0,223	17,062	5,486
5	40	0,217	0,218	0,218	16,643	7,806
6	50	0,216	0,217	0,217	16,567	8,228
7	60	0,206	0,206	0,206	15,767	12,659
8	90	0,192	0,192	0,192	14,701	
9	120	0,178	0,178	0,178	13,634	24,474
10	150	0,166	0,166	0,166	12,720	
11	180	0,153	0,153	0,153	11,730	35,023
12	210	0,142	0,142	0,142	10,892	
13	240	0,131	0,131	0,131	10,054	44,307
14	270	0,127	0,127	0,127	9,749	
15	300	0,119	0,119	0,119	9,140	49,370
16	330	0,107	0,107	0,107	8,226	
17	360	0,096	0,096	0,096	7,388	59,076
18	390	0,087	0,087	0,087	6,702	
19	420	0,087	0,087	0,075	5,788	67,937
20	450	0,075	0,075	0,075	5,788	
21	480	0,069	0,069	0,069	5,331	70,469

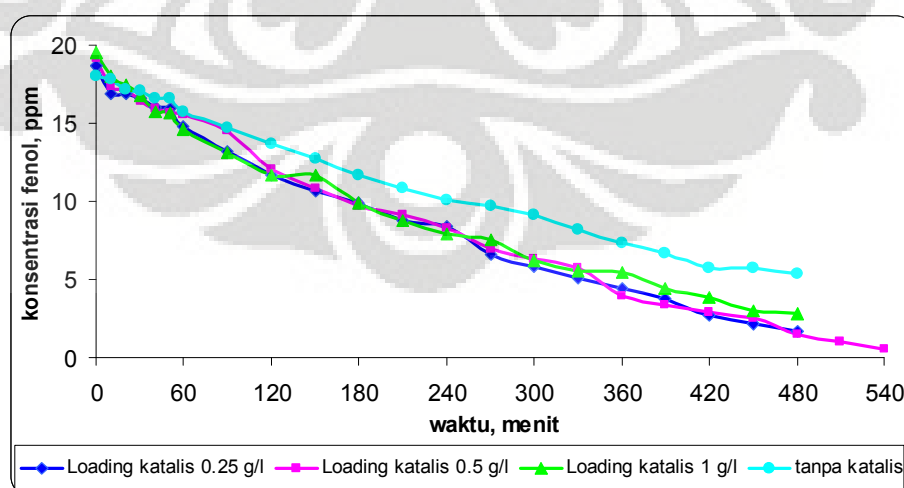


Gambar 17. Perbandingan Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada Running Ozonasi

Pengaruh *loading* katalis terhadap degradasi fenol

Tabel 17. Data Penurunan Konsentrasi Fenol Variasi *Loading* Katalis Menggunakan Kombinasi Proses Fotokatalisis-Ozonasi dengan Cahaya Lampu UV

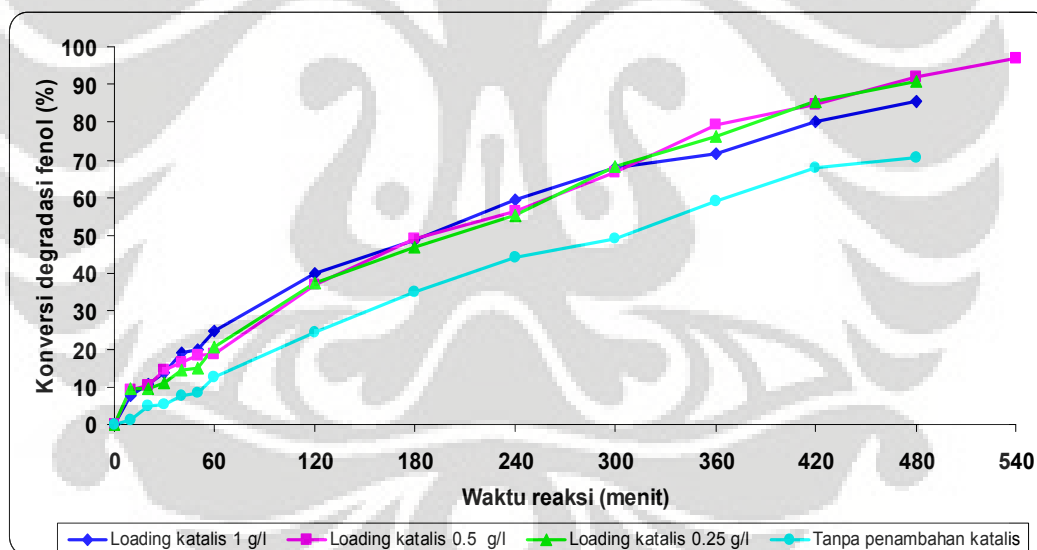
Waktu (menit)	Penurunan konsentrasi fenol terhadap waktu dengan variasi <i>loading</i> katalis selama 8 jam			
	tanpa katalis/ ozonasi saja	<i>loading</i> katalis 0,25 g/L	<i>loading</i> katalis 0,5 g/L	<i>loading</i> katalis 1 g/L
0	18,052	18,687	19,119	19,500
10	17,824	16,910	17,367	18,027
20	17,176	16,910	17,138	17,443
30	17,062	16,605	16,377	16,808
40	16,643	15,996	15,958	15,767
50	16,567	15,920	15,615	15,615
60	15,767	14,828	15,539	14,650
90	14,701	13,177	14,548	13,126
120	13,634	11,730	12,035	11,654
150	12,720	10,663	10,816	11,654
180	11,730	9,902	9,673	9,952
210	10,892	8,759	9,178	8,784
240	10,054	8,353	8,302	7,921
270	9,749	6,601	7,007	7,515
300	9,140	5,890	6,321	6,245
330	8,226	5,077	5,712	5,560
360	7,388	4,417	3,960	5,483
390	6,702	3,757	3,351	4,417
420	5,788	2,741	2,893	3,884
450	5,788	2,132	2,513	3,046
480	5,331	1,700	1,522	2,817
510			1,065	
540			0,608	



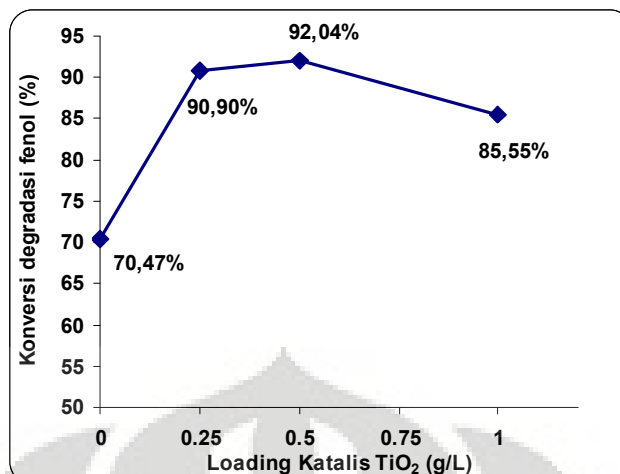
Gambar 18. Perbandingan Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi Pada Running Fotokatalisis-Ozonasi dengan Variasi *Loading* Katalis (g/L)

Tabel 18. Konversi Degradasi (%) Fenol Variasi *Loading* Katalis Menggunakan Kombinasi Proses Fotokatalisis-Ozonasi dengan Cahaya Lampu UV

Waktu (menit)	Konversi degradasi fenol terhadap waktu dengan variasi <i>loading</i> katalis selama 8 jam			
	<i>loading</i> katalis 1 g/L	<i>loading</i> katalis 0,5 g/L	<i>loading</i> katalis 0,25 g/L	tanpa katalis/ Ozonasi saja
0	0,000	0,000	0,000	0,000
10	7,553	9,164	9,511	1,266
20	10,548	10,359	9,511	4,853
30	13,803	14,344	11,142	5,486
40	19,142	16,535	14,403	7,806
50	19,923	18,328	14,811	8,228
60	24,871	18,726	20,653	12,659
120	40,237	37,054	37,231	24,474
180	48,961	49,405	47,014	35,023
240	59,379	56,577	55,302	44,307
300	67,973	66,936	68,483	49,370
360	71,879	79,288	76,363	59,076
420	80,083	84,866	85,331	67,937
480	85,552	92,038	90,902	70,469
540		96,819		



Gambar 19. Perbandingan Konversi Degradasi Fenol pada Variasi *Loading* Katalis terhadap Waktu



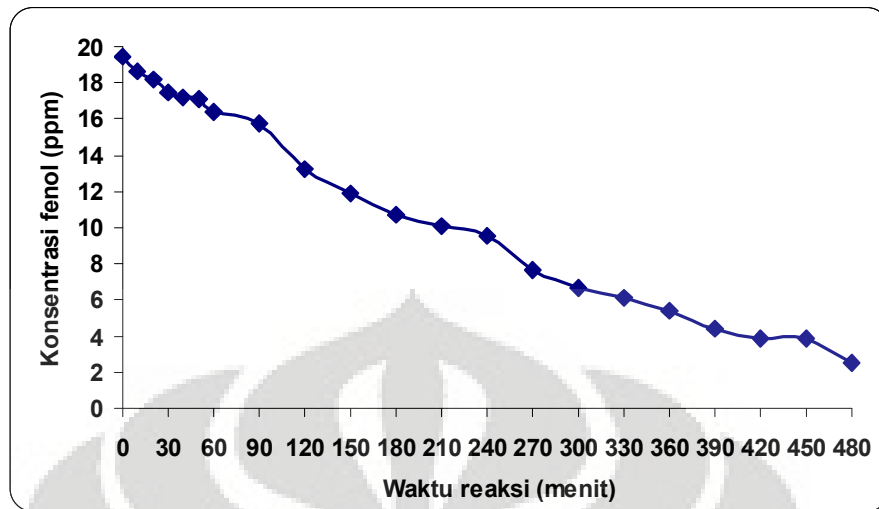
Gambar 20. Perbandingan Konversi Degradasi Fenol terhadap *Loading* Katalis TiO₂ pada Proses Fotokatalisis-Ozonasi (Konsentrasi Fenol Awal ± 20 ppm; pH 5-6; Volume Limbah 20 L; t = 8 jam).

Pengaruh pH terhadap degradasi fenol

13. Running Fotokatalisis-ozonasi (konsentrasi awal fenol ± 20 ppm; pH 10; loading katalis 0,5 g/L; volume limbah 20 L)

Tabel 19. Data Penurunan Konsentrasi Fenol Menggunakan Kombinasi Proses Fotokatalisis-Ozonasi dengan Cahaya Lampu UV pada pH 10

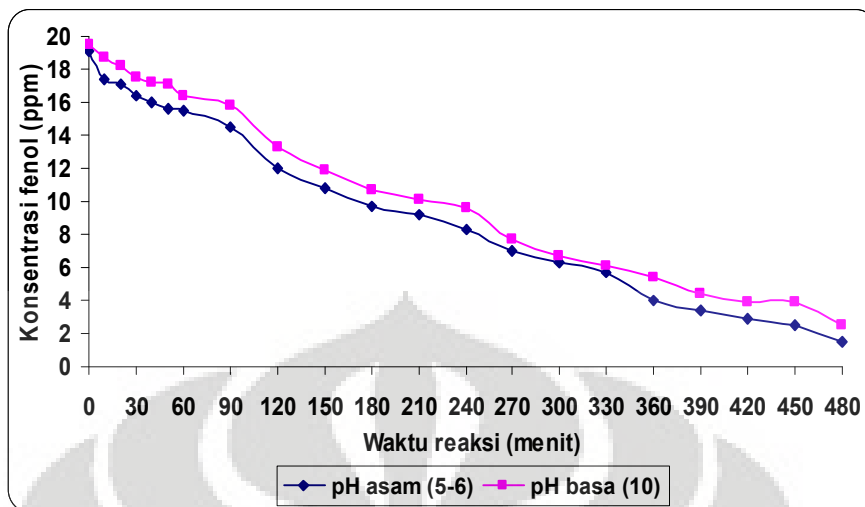
Menit	Absorbansi 1	Absorbansi 2	Absorbansi rata-rata	Konsentrasi (ppm)	% removal
0	0,255	0,255	0,255	19,500	0,000
10	0,244	0,244	0,244	18,662	4,297
20	0,237	0,238	0,238	18,167	6,836
30	0,229	0,229	0,229	17,519	10,157
40	0,225	0,225	0,225	17,214	11,719
50	0,224	0,224	0,224	17,138	12,110
60	0,214	0,214	0,214	16,377	16,017
90	0,206	0,206	0,206	15,767	
120	0,173	0,173	0,173	13,253	32,033
150	0,155	0,155	0,155	11,882	
180	0,140	0,139	0,140	10,701	45,120
210	0,132	0,132	0,132	10,130	
240	0,124	0,125	0,125	9,559	50,980
270	0,100	0,100	0,100	7,693	
300	0,087	0,087	0,087	6,702	65,629
330	0,079	0,079	0,079	6,093	
360	0,070	0,070	0,070	5,407	72,270
390	0,057	0,057	0,057	4,417	
420	0,050	0,050	0,050	3,884	80,083
450	0,050	0,050	0,050	3,884	
480	0,032	0,032	0,032	2,513	87,115



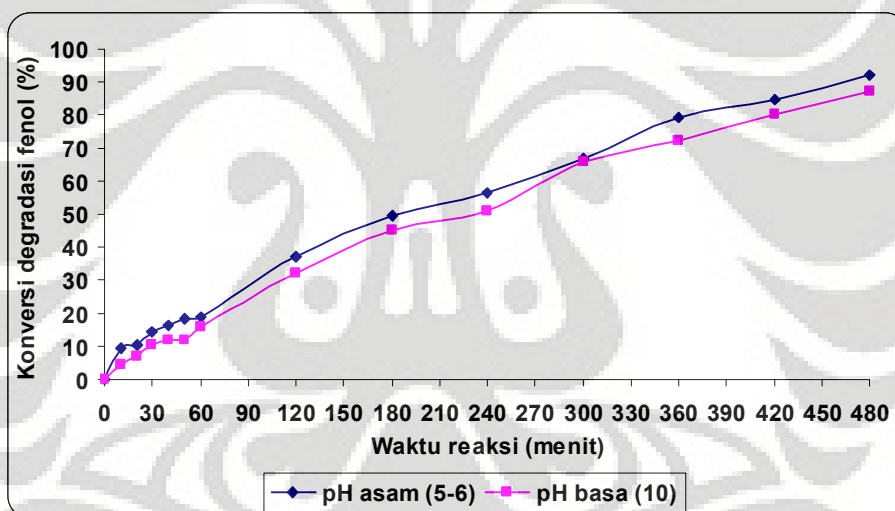
Gambar 21. Perbandingan Konsentrasi Fenol terhadap Waktu Reaksi pada *Running* Fotokatalisis-ozonasi dengan Cahaya Lampu UV pada pH 10

Tabel 20. Data Perbandingan Penurunan Konsentrasi Fenol dan % Removal Menggunakan Proses Fotokatalisis-Ozonasi dengan Cahaya Lampu UV pada pH 10 dan pH (5-6)

Menit	pH (5-6)		pH 10	
	Konsentrasi (ppm)	% removal	Konsentrasi (ppm)	% removal
0	19,119	0,000	19,500	0,000
10	17,367	9,164	18,662	4,297
20	17,138	10,359	18,167	6,836
30	16,377	14,344	17,519	10,157
40	15,958	16,535	17,214	11,719
50	15,615	18,328	17,138	12,110
60	15,539	18,726	16,377	16,017
90	14,548	23,906	15,767	19,142
120	12,035	37,054	13,253	32,033
150	10,816	43,429	11,882	39,065
180	9,673	49,405	10,701	45,120
210	9,178	51,995	10,130	48,050
240	8,302	56,577	9,559	50,980
270	7,007	63,351	7,693	60,551
300	6,321	66,936	6,702	65,629
330	5,712	70,124	6,093	68,754
360	3,960	79,288	5,407	72,270
390	3,351	82,475	4,417	77,348
420	2,893	84,866	3,884	80,083
450	2,513	86,858	3,884	80,083
480	1,522	92,038	2,513	87,115
510	1,065	94,428		
540	0,608	96,819		



Gambar 22. Pengaruh pH terhadap Degradasi Fenol untuk Proses Fotokatalisis-Ozonasi



Gambar 23. Pengaruh pH terhadap Konversi Degradasi Fenol (%) untuk Kombinasi Proses Fotokatalisis-Ozonasi