

**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENYISIHAN FENOL DENGAN MENGGUNAKAN PROSES  
OKSIDASI LANJUT OZONASI/KAVITASI (HIDRODINAMIK  
DAN ULTRASONIK)**

**SKRIPSI**

**LINDA TJAHHADI  
0606076551**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JULI 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PENYISIHAN FENOL DENGAN MENGGUNAKAN PROSES  
OKSIDASI LANJUT OZONASI/KAVITASI (HIDRODINAMIK  
DAN ULTRASONIK)**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana**

**LINDA TJAHHADI  
0606076551**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JULI 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Linda Tjahjadi

NPM : 0606076551

Tanda Tangan :

Tanggal : 7 Juli 2010

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Linda Tjahjadi  
NPM : 0606076551  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Penyisihan Fenol dengan Menggunakan Proses Oksidasi Lanjut Ozonasi/Kavitasi (Hidrodinamik dan Ultrasonik)

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Prof.Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA ( )

Pembimbing II : Ir. Eva F. Karamah, M.T. ( )

Penguji : Ir. Sutrasno K. MSc, PhD ( )

Penguji : Dr. Ir. Nelson Saksono, MT ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Juli 2010

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat, rahmat, penyertaan, dan bimbingan-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya. Skripsi dengan judul **“Penyisihan Fenol dengan Menggunakan Proses Oksidasi Lanjut Ozonasi/Kavitasi (Hidrodinamik dan Ultrasonik)”** ini disusun sebagai salah satu persyaratan akademis untuk meraih gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Kimia FTUI.

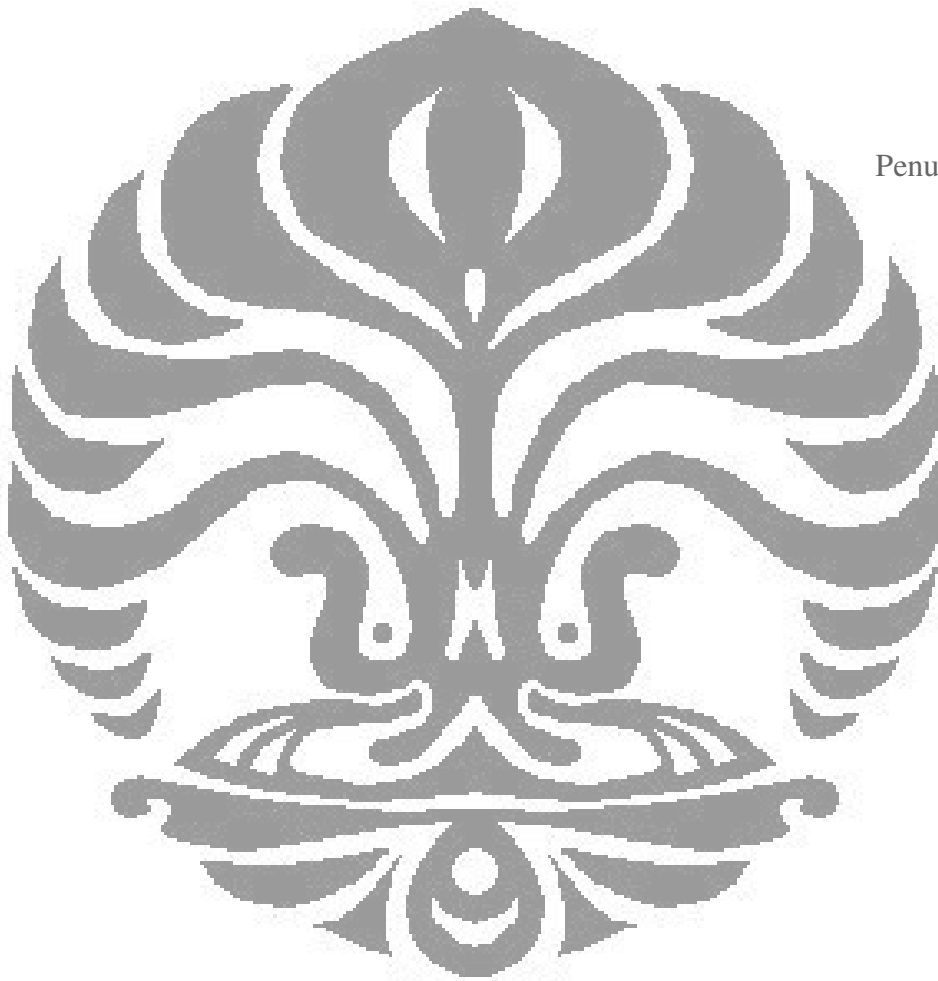
Penulis sepenuhnya menyadari bahwa, tanpa adanya bantuan, bimbingan dan doa dari berbagai pihak sangat sulit bagi penulis untuk dapat menyelesaikan skripsi ini. Karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ungkapan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Ir Setijo Bismo, DEA dan Ibu Ir. Eva Fathul Karamah, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini;
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI;
3. Bapak Ir. Yuliusman, M.Eng. selaku kordinator skripsi Teknik Kimia FTUI;
4. Kedua orang tua, kakak tercinta, dan Ade Putera yang selalu memberikan semangat, doa, dukungan moral, dan material sehingga skripsi ini dapat selesai;
5. Monik dan Sarah, teman satu tema penelitian yang telah bersama-sama menjalani suka duka melakukan penelitian dan saling menghibur dalam menyusun skripsi;
6. Eka, Farhan, Bondan, Jainal, Bagus, Kifer, Reza, Kevin, Fatur, Ikhsan, Mba Ani, Mba Novi dan rekan-rekan riset grup Teknologi Intensifikasi Proses lainnya yang telah banyak memberi semangat dan hiburan terutama pada saat melakukan penelitian;
7. Mang Ijal, Kang Jajat, Mas Heri, Mas Eko, Mas Opik dan Mbak Tiwi yang telah banyak membantu penelitian dari awal hingga akhir;

Penulis berharap tulisan ini dapat bermanfaat bagi setiap orang yang membacanya. Disadari masih banyak terdapat kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat penulis harapkan agar perbaikan dapat terus dilakukan untuk mencapai hasil yang lebih baik lagi.

Depok, 7 Juli 2010

Penulis



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

---

---

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

Nama : Linda Tjahjadi  
NPM : 06060676551  
Program Studi : Teknik Kimia  
Departemen : Teknik Kimia  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

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

**Penyisihan Fenol dengan Menggunakan Proses Oksidasi Lanjut Ozonasi/Kavitasi (Hidrodinamik dan Ultrasonik)**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 7 Juli 2010

Yang menyatakan

( Linda Tjahjadi )

## ABSTRAK

Nama : Linda Tjahjadi  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul : Penyisihan Fenol dengan Menggunakan Proses Oksidasi Lanjut Ozonasi/Kavitasi (Hidrodinamik dan Ultrasonik)

Ozonasi merupakan teknik oksidasi kimiawi yang menggunakan ozon sebagai oksidator kuat untuk mendegradasi fenol. Kekurangan dari penggunaan ozon adalah kelarutan dan stabilitasnya yang relatif rendah. Salah satu cara untuk meningkatkan kelarutan ozon adalah dengan kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik). Kavitasi merupakan fenomena pembentukan, pertumbuhan, dan hancurnya gelembung mikro dalam cairan. Pada penelitian ini dilakukan studi penyisihan fenol pada proses gabungan ozonasi dan kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) dengan variasi laju alir gas, intensitas ultrasonik, konsentrasi awal fenol, dan jenis asam yang digunakan. Dari penelitian yang dilakukan, penurunan jumlah absolut fenol optimum diperoleh pada laju alir gas 400 L/h, intensitas ultrasonik tinggi, konsentrasi awal fenol 100 ppm, dan penggunaan asam klorida (HCl).

Kata kunci:

Ozonasi, kavitasi hidrodinamik, ultrasonik, fenol

## ABSTRACT

Name : Linda Tjahjadi  
Study Program : Chemical Engineering  
Title : Degradation of Phenol by Means of Advanced Oxidation Processes Ozonation/Cavitation (Hydrodynamic and Ultrasonic)

Ozonation is a chemical oxidation process that using ozone as a strong oxidant to remove phenol. The weakness of ozonation process is about its relatively low solubility and stability in water. Cavitation is the phenomenon of the formation, growth, and collapse of micro bubbles in the liquid, which can be used to increase the solubility of ozone. In this study, a combined process of ozonation and cavitation (hydrodynamic and ultrasonic) for removing phenol by varying the gas flow rate, ultrasonic intensity, initial phenol concentration, and type of acid used was conducted. The result showed that the highest degradation of phenol was obtained at gas flow rate of 400 L/h, high-intensity ultrasound, initial phenol concentration of 100 ppm, and the use of hydrochloric acid (HCl).

Keywords:

ozonation, hydrodynamic cavitation, ultrasonic, phenol



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
ABSTRAK.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
<b>1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	5
1.4. Batasan Masalah.....	5
1.5. Model Operasional Penelitian .....	5
<b>2. TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>7</b>
2.1. Fenol.....	7
2.1.1. Pengaruh Senyawa Fenol.....	7
2.2. Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Ozon.....	8
2.2.1. Ozon.....	9
2.2.2. Ozonasi dalam Air .....	12
2.2.3. Injeksi Ozon dalam Air.....	15
2.3. Kavitasi.....	17
2.3.1. Kavitasi Ultrasonik .....	17
2.3.1.1. Pembentukan Gelembung pada Kavitasi Ultrasonik.....	18
2.3.1.2. Faktor yang Mempengaruhi Kavitasi Ultrasonik.....	22
2.3.2. Kavitasi Hidrodinamik.....	26
2.4. Ozonasi dan Kavitasi.....	27
2.5. Mekanisme Reaksi Fenol .....	28

<b>3. METODE PENELITIAN.....</b>	<b>31</b>
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	31
3.2. Deskripsi Alat Penelitian.....	32
3.2.1. Ozonator.....	32
3.2.2. Injektor.....	33
3.2.3. Reaktor Kaca dan Pompa.....	33
3.2.4. Ultrasonic Processor.....	33
3.3. Rancangan Penelitian.....	34
3.4. Alat dan Bahan Penelitian.....	35
3.4.1. Alat Penelitian.....	35
3.4.2. Bahan Penelitian.....	35
3.5. Prosedur Penelitian.....	36
3.5.1. Penyisihan Fenol dengan Proses Ozonasi/Kavitasi (Hidrodinamik dan Ultrasonik) dengan Variasi Laju Alir Gas.....	36
3.5.2. Penyisihan Fenol dengan Proses Ozonasi/Kavitasi (Hidrodinamik dan Ultrasonik) dengan Variasi Intensitas Ultrasonik.....	37
3.5.3. Penyisihan Fenol dengan Proses Ozonasi/Kavitasi (Hidrodinamik dan Ultrasonik) dengan Variasi Konsentrasi Awal Fenol.....	38
3.5.4. Penyisihan Fenol dengan Proses Ozonasi/Kavitasi (Hidrodinamik dan Ultrasonik) dengan Variasi Jenis Asam.....	40
3.6. Analisis Sampel.....	41
3.6.1. Analisis Konsentrasi Fenol.....	41
3.6.1.1. Alat.....	42
3.6.1.2. Bahan.....	42
3.6.1.3. Prosedur.....	42
3.6.2. Analisis Konsentrasi Ozon pada Keluaran Gas ( <i>Off Gas</i> ).....	43
3.6.2.1. Alat.....	43
3.6.2.2. Bahan.....	43
3.6.2.3. Prosedur.....	43
3.6.3. Analisis Konsentrasi Hidrogen Peroksida (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ).....	44
3.6.3.1. Alat.....	44
3.6.3.2. Bahan.....	44

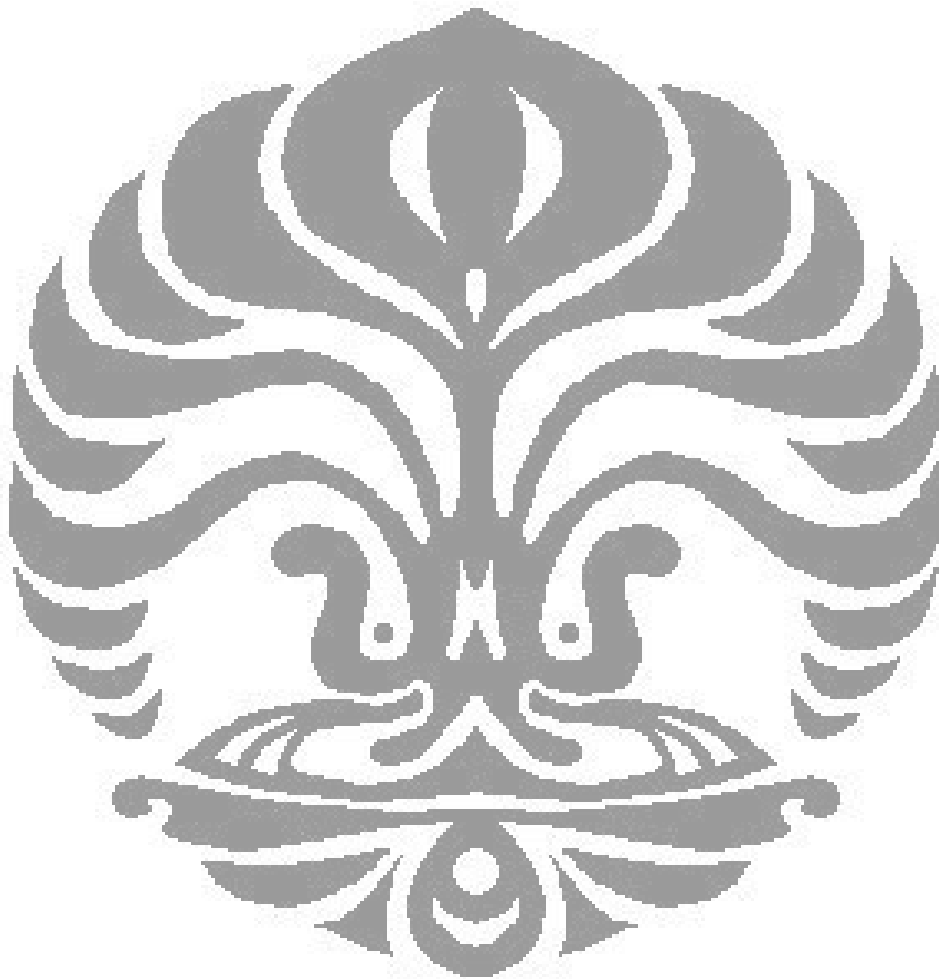
3.6.3.3. Prosedur.....	44
3.7. Pengolahan Data.....	45
3.7.1. Persentase Penyisihan Fenol ( $C/C_0$ ).....	45
3.7.2. Konsentrasi Ozon Terlarut Terhadap Waktu.....	45
3.7.3. Konsentrasi Ozon pada Keluaran Gas Terhadap Waktu.....	45
3.7.4. Konsentrasi Hidrogen Peroksida ( $H_2O_2$ ) Terhadap Waktu.....	46
3.7.5. pH Terhadap Waktu.....	46
3.7.6. Konsentrasi Oksigen Terlarut Terhadap Waktu.....	46
3.7.7. Temperatur Terhadap Waktu.....	46
<b>4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>47</b>
4.1. Variasi Laju Alir Gas.....	47
4.1.1. Persentase Penyisihan Fenol.....	49
4.1.2. Konsentrasi Ozon Terlarut (Ozon Residual).....	52
4.1.3. Konsentrasi Ozon pada Keluaran Gas ( <i>Off Gas</i> ).....	53
4.2. Variasi Intensitas Ultrasonik.....	54
4.2.1. Persentase Penyisihan Fenol.....	55
4.2.2. Konsentrasi Ozon Terlarut (Ozon Residual).....	58
4.2.3. Konsentrasi Ozon pada Keluaran Gas ( <i>Off Gas</i> ).....	59
4.3. Variasi Konsentrasi Awal Fenol.....	60
4.3.1. Persentase Penyisihan Fenol.....	61
4.3.2. Konsentrasi Ozon Terlarut (Ozon Residual).....	63
4.3.3. Konsentrasi Ozon pada Keluaran Gas ( <i>Off Gas</i> ).....	65
4.4. Variasi Jenis Asam.....	66
4.4.1. Persentase Penyisihan Fenol.....	66
4.5. Parameter – Parameter Lainnya.....	68
4.5.1. Konsentrasi Hidrogen Peroksida ( $H_2O_2$ ).....	68
4.5.2. pH.....	70
4.5.3. Konsentrasi Oksigen Terlarut ( <i>Dissolve Oxygen</i> ).....	71
<b>5. KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>73</b>
5.1. Kesimpulan.....	73
5.2. Saran.....	73

**DAFTAR PUSTAKA..... 75**

**LAMPIRAN A**

**LAMPIRAN B**

**LAMPIRAN C**



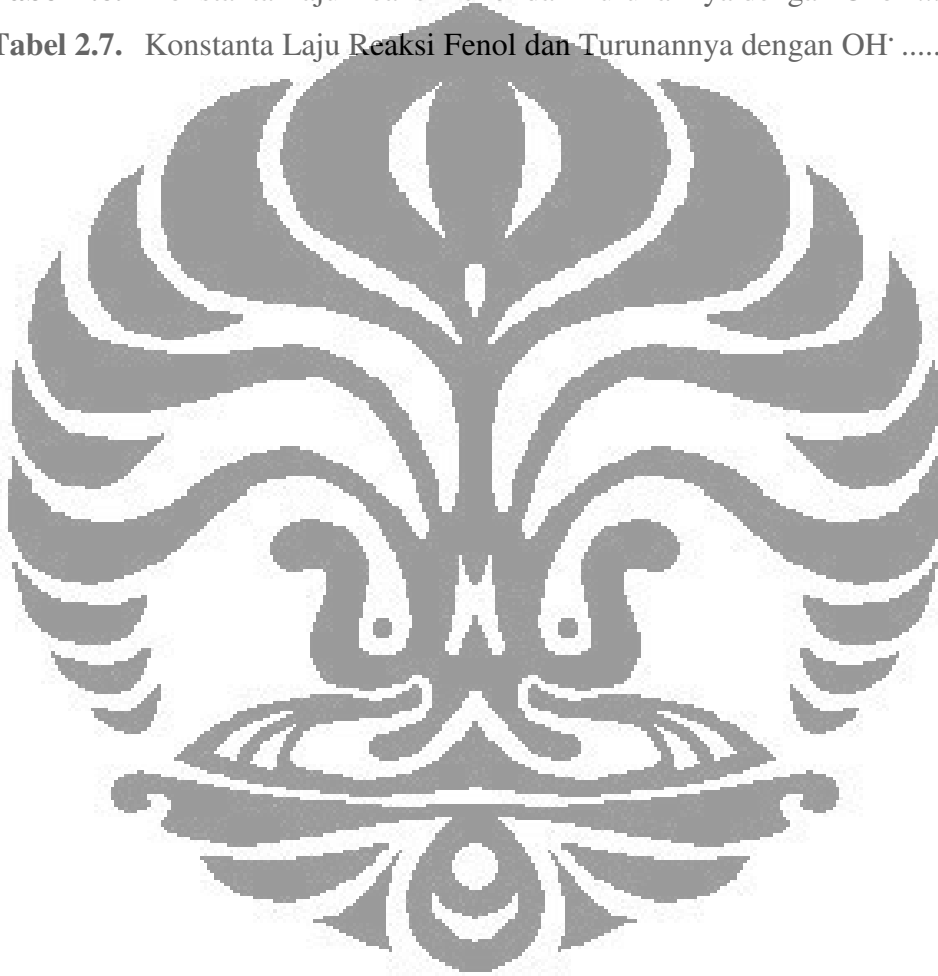
## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1.</b>	Struktur Resonansi Molekul Ozon.....	11
<b>Gambar 2.2.</b>	Injektor Venturi.....	16
<b>Gambar 2.3.</b>	<i>Bubble Diffuser</i> .....	17
<b>Gambar 2.4.</b>	Pembentukan Gelembungan pada Kavitasi Ultrasonik.....	21
<b>Gambar 2.5.</b>	Daerah Terjadinya Reaksi Kimia Pada Kavitasi Ultrasonik.....	22
<b>Gambar 2.6.</b>	Mekanisme Reaksi Fenol dengan Ozon.....	29
<b>Gambar 3.1.</b>	Diagram Alir Penelitian .....	31
<b>Gambar 3.2.</b>	Rangkaian Alat Penelitian.....	34
<b>Gambar 4.1.</b>	Mekanisme Reaksi Fenol Pada Proses Ozonasi/Kavitasi (Hidrodinamik dan Ultrasonik).....	49
<b>Gambar 4.2.</b>	Hubungan Antara Konsentrasi Fenol dengan Laju Alir Gas Terhadap Waktu.....	50
<b>Gambar 4.3.</b>	Hubungan Antara $C/C_0$ Fenol dengan Laju Alir Gas Terhadap Waktu.....	50
<b>Gambar 4.4.</b>	Kurva Persentase Penyisihan Fenol Pada Variasi Laju Alir Gas..	51
<b>Gambar 4.5.</b>	Hubungan Antara Konsentrasi Ozon Terlarut dengan Laju Alir Gas Terhadap Waktu.....	52
<b>Gambar 4.6.</b>	Hubungan Antara Konsentrasi <i>Off Gas</i> dengan Laju Alir Gas Terhadap Waktu.....	54
<b>Gambar 4.7.</b>	Hubungan Antara Konsentrasi Fenol dengan Intensitas Ultrasonik Terhadap Waktu.....	56
<b>Gambar 4.8.</b>	Hubungan Antara $C/C_0$ dengan Intensitas Ultrasonik Terhadap Waktu.....	56
<b>Gambar 4.9.</b>	Kurva Persentase Penyisihan Fenol Pada Variasi Intensitas Ultrasonik.....	57
<b>Gambar 4.10.</b>	Hubungan Antara Konsentrasi Ozon Terlarut dengan Intensitas Ultrasonik Terhadap Waktu.....	58
<b>Gambar 4.11.</b>	Hubungan Antara Konsentrasi <i>Off Gas</i> dengan Intensitas Ultrasonik Terhadap Waktu.....	60

<b>Gambar 4.12.</b>	Hubungan Antara Konsentrasi Fenol dengan Konsentrasi Awal Fenol Terhadap Waktu.....	61
<b>Gambar 4.13.</b>	Hubungan Antara $C/C_0$ dengan Konsentrasi Awal Fenol Terhadap Waktu.....	61
<b>Gambar 4.14.</b>	Kurva Persentase Penyisihan Fenol Pada Variasi Konsentrasi Awal Fenol .....	62
<b>Gambar 4.15.</b>	Hubungan Antara Konsentrasi Ozon Terlarut dengan Konsentrasi Awal Fenol Terhadap Waktu .....	63
<b>Gambar 4.16.</b>	Hubungan Antara Konsentrasi <i>Off Gas</i> dengan Konsentrasi Awal Fenol Terhadap Waktu.....	65
<b>Gambar 4.17.</b>	Struktur Asam Sitrat .....	66
<b>Gambar 4.18.</b>	Hubungan Antara Konsentrasi Fenol dengan Jenis Asam Terhadap Waktu.....	67
<b>Gambar 4.19.</b>	Hubungan Antara $C/C_0$ dengan Jenis Asam Terhadap Waktu....	67
<b>Gambar 4.20.</b>	Kurva Persentase Penyisihan Fenol dengan Variasi Jenis Asam..	67
<b>Gambar 4.21.</b>	Hubungan Antara Konsentrasi Hidrogen Peroksida ( $H_2O_2$ ) dengan Variasi Laju Alir Gas Terhadap Waktu .....	69
<b>Gambar 4.22.</b>	Hubungan Antara pH dengan Variasi Laju Alir Gas Terhadap Waktu.....	71
<b>Gambar 4.23.</b>	Hubungan Antara Konsentrasi Oksigen Terlarut ( <i>Dissolve Oxygen</i> ) dengan Variasi Laju Alir Gas Terhadap Waktu.....	72

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b> Sifat Fisika dan Kimia Fenol.....	7
<b>Tabel 2.2.</b> Potensial Oksidasi-Reduksi di dalam Air.....	9
<b>Tabel 2.3.</b> Sifat Fisika Ozon .....	10
<b>Tabel 2.4.</b> Agen Pengoksidasi dan Potensial Oksidasinya .....	10
<b>Tabel 2.5.</b> Kelarutan Ozon dan Oksigen Dalam Air.....	12
<b>Tabel 2.6.</b> Konstanta Laju Reaksi Fenol dan Turunannya dengan Ozon .....	30
<b>Tabel 2.7.</b> Konstanta Laju Reaksi Fenol dan Turunannya dengan OH <sup>-</sup> .....	30



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Keberadaan air bersih mempunyai peranan yang sangat penting dalam kehidupan manusia. Untuk dapat memenuhi kebutuhan sehari-hari, manusia sangat bergantung pada keberadaan air bersih. Namun, belakangan ini sangat sulit untuk mendapatkan air bersih. Perkembangan teknologi dan industri dewasa ini menyebabkan pencemaran lingkungan, termasuk pencemaran air. Air tersebut biasanya tercemar dikarenakan oleh adanya polusi air. Berdasarkan Surat Keputusan Menteri Negara Kependudukan dan Lingkungan Hidup Nomor: KEP-02/MENKLH/I/1988 Tentang Penetapan Baku Mutu Lingkungan, polusi air merupakan peristiwa masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat energi, unsur atau komponen lainnya kedalam air sehingga kualitas air turun sampai tingkat tertentu yang menyebabkan air tidak dapat dimanfaatkan lagi sesuai dengan peruntukannya.

Salah satu limbah yang berbahaya bagi makhluk hidup dan lingkungannya adalah limbah organik seperti fenol. Senyawa fenolik merupakan salah satu kontaminan yang banyak ditemukan pada limbah cair dan merupakan senyawa yang digolongkan dalam golongan limbah B3 (Bahan Beracun dan Berbahaya) karena sifat toksisitasnya. Dewasa ini banyak industri yang menggunakan fenol sebagai bahan utama dalam proses manufaktur. Beberapa industri yang menghasilkan limbah fenol pada proses produksinya, antara lain adalah industri farmasi, pestisida organik, sintetik resin, peleburan logam, industri plastik dan polimer, industri cat, dan industri pulp dan kertas.

Fenol merupakan senyawa yang sangat beracun, sulit didegradasi, dan menyebabkan bau dan rasa pada air meskipun dalam konsentrasi yang sangat kecil (0,002 mg/L) (Linsebigler Amy L., *et all*, 1995). Selain itu, fenol dapat menghambat aktivitas mikroorganisme dan memberi dampak negatif bagi kesehatan manusia, terutama berupa kerusakan hati dan ginjal, gangguan tekanan darah pelemahan detak jantung, hingga berujung pada kematian (Nasru.A.A., 2006). Karena sifat toksisitasnya itu, Kantor Menteri Negara Lingkungan Hidup



di dalam peraturan KEP-51/MENLH/10/1995 tentang Baku Mutu Limbah Cair Bagi Kegiatan Industri menetapkan konsentrasi senyawa fenolik yang diperbolehkan dalam air limbah kegiatan industri sebelum dibuang ke lingkungan tidak boleh melebihi 0,5 mg/L untuk industri golongan I dan 1 mg/L untuk industri golongan II. Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 416/Menkes/Per/IX/1990 tentang Syarat-Syarat dan Pengawasan Kualitas Air menetapkan bahwa konsentrasi fenol maksimum di dalam air sungai untuk air baku air minum adalah 0,002 mg/L.

Salah satu metode yang efektif untuk mengolah limbah fenol adalah dengan menggunakan teknik ozonasi, yang merupakan teknik oksidasi kimiawi yang menggunakan ozon sebagai oksidator kuat untuk mendegradasi fenol. Ozon merupakan oksidator yang paling kuat setelah radikal hidroksil ( $\cdot\text{OH}$ ). Ozon akan dengan cepat mengoksidasi senyawa-senyawa fenolik karena sifatnya yang sangat reaktif dan dapat menghilangkan warna, bau, serta rasa. Kelebihan lain dari teknik ozonasi ini adalah teknologi ini merupakan teknologi yang ramah lingkungan, tidak memerlukan pemakaian bahan kimia lain, dan proses pengolahan yang relatif cepat.

Kemampuan ozon untuk mendegradasi senyawa organik sangat bergantung pada kondisi pH. Ozon dapat mengoksidasi senyawa organik melalui dua cara, yaitu dengan reaksi langsung (*direct selective reaction*) pada kondisi asam dan reaksi tidak langsung pada kondisi basa. Pada kondisi asam ozon bereaksi sebagai molekul  $\text{O}_3$  dengan reaksi yang lambat dan hanya dapat mengoksidasi senyawa-senyawa tertentu dalam air (reaksi langsung oleh ozon). Sedangkan pada kondisi basa secara cepat ozon akan terdekomposisi menjadi radikal bebas hidroksil ( $\cdot\text{OH}$ ) yang dapat bereaksi dengan mikropolutan organik maupun anorganik (reaksi tidak langsung oleh radikal hidroksil).

Kekurangan dari penggunaan ozon adalah sifat ozon yang sukar larut dalam air dan hanya dapat bereaksi dengan senyawa tertentu dalam air, seperti amonia, pestisida, senyawa-senyawa aromatik, dan pelarut terklorinasi (Von Gunten, 2003a). Akibat sifat kelarutan dan selektivitasnya (hanya dapat bereaksi dengan senyawa tertentu dalam air), dalam beberapa kasus, terjadi mineralisasi yang tidak sempurna sehingga menghasilkan produk-produk oksidasi parsial (Li-

Bing Chu, et.al., 2007). Untuk mengimbangi kelarutan ozon yang rendah dalam air, biasanya digunakan dosis ozon yang berlebih. Hal ini menyebabkan borosnya penggunaan ozon yang menjadi salah satu faktor penyebab tingginya biaya proses ozonasi. Selain itu, penggunaan dosis ozon berlebih juga memicu terbentuknya *bromat* yang merupakan produk samping berbahaya karena sifatnya yang karsinogenik dan sulit terdegradasi.

Untuk mengatasi kekurangan yang dimiliki oleh ozon tersebut, maka dikembangkan suatu metode alternatif yang dapat digunakan untuk mendegradasi limbah fenolik, yaitu dengan menggunakan Proses Oksidasi Lanjut (*Advanced Oxidation Processes/AOPs*). Proses Oksidasi Lanjut (AOPs) diartikan sebagai suatu metode oksidasi fasa larutan yang berdasarkan pada prinsip pembentukan dan pemanfaatan radikal hidroksil ( $\text{OH}$ ) sebagai oksidator utama untuk menghancurkan senyawa pencemar, dan dapat diterapkan secara terpisah atau dikombinasikan antara metode yang satu dan lainnya. AOPs sendiri dapat terdiri dari proses berbasis  $\text{H}_2\text{O}_2$  ( $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{UV}$ , *Fenton*, *photo-Fenton* dan proses *Fenton* lainnya), fotolisis, fotokatalisis, proses berbasis ozon ( $\text{O}_3$ ,  $\text{O}_3 + \text{UV}$  dan  $\text{O}_3 + \text{katalis}$ ) (Pera, 2003). Untuk penelitian ini dilakukan proses berbasis ozon yang akan menggabungkan ozonasi dengan kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik).

Kavitasi merupakan fenomena pembentukan, pertumbuhan, dan hancurnya gelembung mikro dalam cairan. Gelembung mikro merupakan gelembung dengan diameter kurang dari puluhan mikron, sedang gelembung konvensional memiliki diameter beberapa milimeter. Kondisi kavitasi yang ekstrem dapat dimanfaatkan untuk menghancurkan molekul-molekul. Jika fenomena ini terjadi karena adanya gelombang suara dengan frekuensi tinggi pada suatu aliran disebut kavitasi akustik (ultrasonikasi), dan jika terjadi akibat variasi tekanan pada cairan yang mengalir akibat perubahan geometri pada sistem yang mengalir, maka disebut sebagai kavitasi hidrodinamik (Jyoti dan Pandit, 2003).

Salah satu tujuan penggabungan proses ozonasi dan kavitasi adalah untuk meningkatkan laju perpindahan massa ozon. Laju perpindahan massa ozon dapat ditingkatkan dengan memperbesar luas permukaan kontak melalui penggunaan gelembung yang memiliki diameter kecil, atau disebut sebagai gelembung mikro. Selain itu, kavitasi juga dapat mempercepat laju dekomposisi ozon menjadi

radikal hidroksil ( $\cdot\text{OH}$ ). Dengan semakin banyaknya radikal hidroksil yang dihasilkan dari reaksi dekomposisi ozon, maka persentase penyisihan senyawa pengotor pada air akan semakin besar karena kinerja ozon lebih maksimal.

Selain itu, panas yang dihasilkan dari ledakan gelembung mikro akan mendekomposisi air menjadi atom hidrogen dan radikal hidroksil yang sangat reaktif. Jika pada ozonasi radikal hidroksil yang terbentuk berasal dari dekomposisi ozon, maka pada proses kavitasi radikal hidroksil yang terbentuk berasal dari molekul air yang terdekomposisi secara termal. Sehingga dapat dikatakan bahwa pembentukan radikal hidroksil dari ozon dan kavitasi akan memiliki tiga sumber, yaitu:

- (1) Dekomposisi normal dari ozon.
- (2) Dekomposisi uap air dari dalam gelembung mikro oleh kavitasi.
- (3) Dekomposisi termal ozon dari dalam gelembung mikro oleh kavitasi.

Pada penelitian ini, akan dilakukan uji kinerja penyisihan fenol melalui proses oksidasi lanjut yang menggabungkan ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) pada kondisi asam. Pada kondisi asam, terjadi reaksi langsung oleh ozon sebagai oksidator kuat untuk menyisihkan senyawa fenol. Namun, dengan penggabungan ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) dihasilkan radikal hidroksil dari dekomposisi uap air dalam gelembung mikro dan dekomposisi termal ozon dalam fasa gas dalam gelembung mikro, yang akan meningkatkan efektivitas penyisihan senyawa fenol. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan analisis terhadap signifikansi pengaruh proses oksidasi lanjut ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) pada proses penyisihan fenol dengan melihat pengaruh variabel bebas, seperti laju alir gas, intensitas ultrasonik, konsentrasi awal fenol, dan jenis asam.

## 1.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah bagaimana kinerja penyisihan fenol pada proses oksidasi lanjut yang menggabungkan ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) pada kondisi asam yang dievaluasi dari persentase penyisihan fenol.

### 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah mempelajari dan menganalisa pengaruh laju alir gas, intensitas ultrasonik, konsentrasi awal fenol, dan jenis asam pada penyisihan fenol dengan menggunakan proses oksidasi lanjut ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) pada kondisi asam.

### 1.4. Batasan Masalah

Pada penelitian ini, penulis membatasi masalah sebagai berikut:

- (1) Proses ini berlangsung secara semi-batch dengan sirkulasi liquid.
- (2) Air limbah yang digunakan sebagai sampel merupakan limbah sintetik.
- (3) Ozonator yang digunakan merupakan ozonator rancangan Prof. Dr. Setijo Bismo dengan produktivitas sebesar 22 gram/jam.
- (4) Air yang digunakan adalah aquadest.
- (5) Gas yang diinjeksikan ke dalam ozonator adalah udara (oksigen 21%).
- (6) Injektor yang digunakan adalah *injektor mazzei*.
- (7) Alat sonikasi yang digunakan adalah Ultrasonic Processor (UP-800).
- (8) Aliran fluida fasa gas dan cair pada reaktor adalah aliran searah (*co-current*) dari bawah ke atas.

### 1.5. Metode Operasional Penelitian

Penelitian diawali dengan rancang bangun peralatan skala laboratorium berupa generator ozon sebagai alat pembangkit ozon, injektor sebagai pembangkit gelembung (kavitasi hidrodinamik), reaktor gelas sebagai tempat terjadinya reaksi antara fenol dengan ozon dan radikal hidroksil, Ultrasonic Processor sebagai pembangkit gelembung (kavitasi ultrasonik), dan pompa

Pembangkitan ozon dilakukan dengan mengalirkan udara yang sebelumnya dilewatkan melalui *silica gel* untuk menghilangkan kandungan air menuju generator ozon. Proses ozonasi dilakukan dengan mengkontakkan antara ozon dengan larutan. Larutan kemudian dialirkan melewati *injektor mazzei* sehingga dihasilkan yang selanjutnya masuk ke dalam reaktor kaca. Ultrasonic

Processor ditempatkan di bagian paling atas dari reaktor kaca dan berfungsi untuk memperbanyak pembentukan gelembung mikro dalam reaktor gelas.

Parameter yang akan dianalisa dari proses penggabungan ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) ini adalah persentase penyisihan fenol pada pH rendah dengan menggunakan variabel bebas sebagai berikut; intensitas ultrasonik (tinggi dan rendah), laju alir gas ( $O_G$ ), konsentrasi fenol ( $C_{p0}$ ), dan jenis asam (asam klorida dan asam sitrat). Parameter lain yang akan dianalisa adalah konsentrasi ozon terlarut (ozon residual), konsentrasi ozon pada keluaran gas (*off gas*), konsentrasi hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ), konsentrasi oksigen terlarut (*dissolve oxygen*), pH, dan temperatur.



## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Fenol

Senyawa fenol ( $C_6H_5OH$ ) 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. Berikut ini merupakan sifat fisika dan kimia dari fenol.

Tabel 2.1. Sifat fisika dan kimia fenol

Sifat	Nilai
Berat molekul, gr/mol	194,44
Titik beku, °C	40,91
Titik didih, °C	181,84
Densitas, kg/cm <sup>3</sup>	
D 25 (padat)	1,132
D 41 (cair)	1,0576
D 60 (cair)	1,0413
Temperatur kritis, °C	419
Tekanan kritis, Mpa	6,11
Kalor jenis, J/gK	
Pada 4 °C	1,24
Pada 22,7 °C	1,41
Pada 70-74 °C	2,22
Viskositas, Pa.s	
Pada 60 °C	2,47
Pada 80 °C	1,56
Pada 100 °C	1,09
Kalor pembentukan, J/g	122,1
Kalor pembakaran, J/g	-32,428
Kalor penguapan, J/g	487,9
Flash point, °C	79-85
Autoignition point, °C	715
Tekanan uap jenuh, mmHg	0,36

(Sumber: Encyclopedia of Chemical Technology)

##### 2.1.1. 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/L 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.

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. Jika pH air tinggi maka laju degradasi fenol akan menjadi rendah pula. Hal ini terjadi karena pada pH yang rendah, aktivitas mikroorganisme akan terhambat, selain itu pengaruh oksigen yang tidak dapat larut pada pH air rendah mengakibatkan kurangnya persediaan oksigen yang diperlukan mikroorganisme untuk menguraikan senyawa fenol dalam perairan.

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. Area kontak biasanya menjadi putih dan dapat menjadi luka bakar.

Selain itu, fenol juga dapat mengakibatkan gangguan-gangguan seperti: kulit terkelupas, gangguan pada kornea mata, gangguan sistem pencernaan, rasa mual, gangguan pernapasan, kerusakan ginjal dan liver, sakit kepala, nafsu makan berkurang, sulit tidur (insomnia), penurunan berat badan, iritasi pada mata, hidung, dan tenggorokan.

## 2.2. Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Ozon

Proses Oksidasi Lanjut (AOPs) diartikan sebagai suatu metode oksidasi fasa larutan yang berdasarkan pada prinsip pembentukan dan pemanfaatan radikal hidroksil ( $\text{OH}^\cdot$ ) sebagai oksidator utama untuk menghancurkan senyawa pencemar, dan dapat diterapkan secara terpisah atau dikombinasikan antara metode yang satu dan lainnya. Radikal hidroksil merupakan salah satu agen pengoksidasi yang paling reaktif (Tabel 2.2) dalam air dengan laju reaksi antara  $10^{10} - 10^{13} \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . Radikal hidroksil sangat reaktif dalam air, maka waktu tinggal

dari radikal hidroksil hanya berkisar beberapa mikrosekon, sehingga konsentrasi dari radikal hidroksil dalam air tidak akan pernah mencapai di atas  $10^{-12}$  M selama proses ozonasi berlangsung (Urs Von Gunten, 2002).

**Tabel 2.2.** Potensial oksidasi-reduksi di dalam air

Spesi Oksidan	E <sup>o</sup> , Volts
Fluorin	3,0
Radikal OH	2,8
Oksigen	2,1
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1,8
Potassium Permanganat	1,7
Asam Hipoklorit	1,5
Chlorine dioksida	1,5
Klorin	1,4
Oksigen	1,2

(Sumber: Hunsberger, 1977)

### 2.2.1. Ozon

Ozon yang berada pada bagian atas dan bawah dari lapisan stratosfer melindungi bumi dari radiasi berlebihan sinar ultraviolet, namun pada lapisan troposfer ozon merupakan polutan dan sangat berbahaya bagi makhluk hidup. Karena toksisitasnya, *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) telah menetapkan paparan batasan maksimum untuk manusia terhadap ozon, yaitu sebanyak 0,06 ppm dalam periode delapan jam, lima hari seminggu, dan untuk dosis maksimum 0,30 ppm dalam 15 menit (Suslow, 2004).

Ozon pertama kali ditemukan oleh peneliti Eropa C. F. Schonbein pada tahun 1839. Ozon pertama kali digunakan secara komersial pada tahun 1907 pada pengolahan air kota di Nice dan pada tahun 1910 di St. Petersburg (Kogelschatz, 1988). Sifat fisis ozon murni diberikan pada Tabel 2.3. Ozon merupakan agen pengoksidasi umum kedua yang paling kuat seperti ditunjukkan pada Tabel 2.4



**Tabel 2.3.** Sifat fisika ozon

Karakteristik	Nilai
Berat molekul	48 gr/mol
Tekanan kritis	5460 kPa
Temperature kritis	-12,10 °C
Densitas (0°C dan 1 atm)	2,143 kg/m <sup>3</sup>
Densitas relative (di udara)	1,667 kg/m <sup>3</sup>
Energi	142,3 kJ/mol (34,15 kcal/kmol)
Potensial oksidasi	2,07 volt
Waktu paruh dalam larutan cair (20°C)	20 – 30 menit
Waktu paruh (pada udara kering)	12 jam

(Sumber: <http://www.wikipedia.com>)

**Tabel 2.4.** Agen pengoksidasi dan potensial oksidasinya

Agen Pengoksidasi	Potensial Oksidasi (mV)
Fluorin	3,06
Ozon	2,07
Permanganat	1,67
Klorin dioksida	1,50
Asam hipokloro	1,49
Gas klorin	1,36

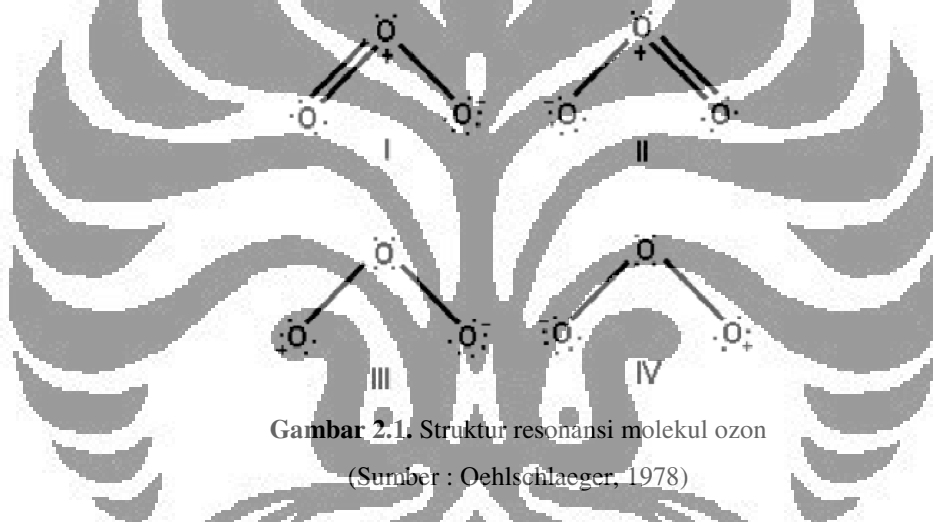
(Sumber : Manley dan Niegowski, 1967)

Ozon (O<sub>3</sub>) adalah bentuk alotropik dari oksigen (O<sub>2</sub>) yang tidak berwarna (pada suhu kamar) yang dapat mengembun membentuk suatu cairan biru pada suhu -112°C dan akan membeku pada suhu -251,4°C. Pada suhu di atas 100°C akan dengan cepat mengalami dekomposisi. Ozon merupakan gas yang mempunyai bau seperti pedas (*pungent*), tajam (*acrid*), tidak enak, seperti bahan pemutih klor. Bau ini biasanya terdeteksi oleh hidung manusia pada konsentrasi antara 0,01 dan 0,04 ppm (Suslow, 2004).

Ozon terbentuk dalam stratosfer, smog fotokimia dan pada lampu sterilisasi UV, pancaran listrik tegangan tinggi, dan radiasi gamma (Mustafa, 1990). Pada temperatur ruang, ozon terdekomposisi dengan cepat sehingga tidak berakumulasi tanpa pembuatan ozon yang berkesinambungan (Peleg, 1976). Ozon

ditemukan dalam konsentrasi rendah di alam. Ozon mempunyai waktu paruh yang lebih lama ketika berupa gas dibandingkan dalam larutan yang mengandung air (Rice, 1986). Ozon dalam air murni cukup cepat terurai menjadi oksigen, dan bahkan lebih cepat dalam larutan tidak murni. Kelarutan ozon dalam air 13 kali daripada oksigen pada 0 – 30 °C dan semakin lebih cepat larut dalam air dingin (Rice, 1986). Dekomposisi ozon lebih cepat dalam temperatur air lebih tinggi (Rice, 1986).

Tiga atom oksigen pada molekul ozon tersusun pada suatu sudut tumpul di mana atom oksigen pusat terikat dengan dua atom oksigen dengan jarak yang ekuivalen; sudutnya berkisar  $116^{\circ} 49'$  dan panjang ikatannya adalah  $1,278 \text{ \AA}$ . Empat struktur ozon ditunjukkan pada Gambar 2.1:



Gambar 2.1. Struktur resonansi molekul ozon  
(Sumber : Oehlschlaeger, 1978)

Ozon berbentuk gas pada suhu dan tekanan normal. Seperti halnya oksigen, kelarutan ozon dalam air juga bergantung pada temperatur dan tekanan parsial ozon pada fasa gas disamping adanya pengaruh pH cairan. Kelarutan ozon dan oksigen pada air disajikan pada Tabel 2.5:

Tabel 2.5. Kelarutan ozon dan oksigen 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

(Sumber: Rice dan Browning, 1981)

Sebagai senyawa yang tidak stabil, ozon mudah terdekomposisi kembali menjadi oksigen, dan laju dekomposisinya akan bertambah besar sesuai dengan kenaikan suhu dan pH. Selain itu, kelarutan ozon pada air juga sebanding dengan waktu kontak yang diperlakukan.

Secara kimiawi, ozon merupakan senyawa yang tidak stabil, sangat reaktif dan mudah sekali terdekomposisi kembali menjadi oksigen setelah terbentuk pada ozonator. Oleh karena itu, ozon harus dibuat dalam ozonator yang jaraknya dekat dengan instalasi pengolahan air minum (*on-site*) (Rice dan Browning, 1981). Fenomena terurainya ozon dalam air digambarkan melalui reaksi sebagai berikut (Metcalf & Eddy, 1991):



Untuk dapat menghasilkan ozon, satu molekul oksigen diatomik harus dipisah. Oksigen radikal bebas tadi bebas untuk bereaksi dengan oksigen diatomik yang lain untuk membentuk molekul ozon triatomik. Bagaimanapun, supaya dapat mematahkan ikatan O–O memerlukan banyak energi.

### 2.2.2. Ozonasi dalam Air

Ozon merupakan salah satu jenis oksidator terkuat. Penggunaan ozon telah banyak dimanfaatkan untuk penghilangan rasa dan bau dari air minum, selain itu ozon juga dimanfaatkan untuk penghilangan polutan organik dan anorganik dalam air minum dan pengolahan air limbah (Kasprzyk-Hordern *et al.*, 2003). Ozonasi merupakan suatu proses absorpsi gas yang melibatkan reaksi kimia, dimana laju

reaksi total dipengaruhi oleh dua faktor utama, yaitu kinetika reaksi dan perpindahan massa (Zhou dan Smith, 2000).

Aplikasi dari pemanfaatan ozon untuk proses pengolahan air telah dikenal hampir diseluruh penjuru dunia. Alasan utama dari penggunaan ozon untuk pengolahan air minum karena sifat ozon sebagai disinfektan dan sebagai oksidan (dapat mengontrol rasa dan bau, penghilang warna, dan penghilang mikropolutan) atau kombinasi dari keduanya. Sama halnya seperti jenis disinfektan lainnya pada air, seperti *chlorine* atau *chlorine dioxide*, ozone tidak stabil dalam air dan dapat membentuk reaksi lain dengan komponen-komponen lain dalam air. Namun, disamping sifat tidak stabil dalam air yang dimilikinya, ozon juga memiliki kelebihan lain, yaitu ozon dapat terdekomposisi membentuk radikal hidroksil ( $\cdot\text{OH}$ ), yang merupakan oksidator kuat dalam air.

Oleh karena itu, penekanan dari proses ozonasi di dalam air selalu melibatkan dua spesies, yakni ozon dan radikal hidroksil. Namun, pemilihan kedua spesies tersebut juga bergantung dari tujuan yang ingin dicapai dengan menggunakan proses ozonasi. Jika ingin memanfaatkan ozon sebagai disinfektan, maka proses ozonasi akan melibatkan kedua oksidan, yaitu ozon dan radikal hidroksil. Ozon merupakan oksidan yang sangat selektif (hanya dapat bereaksi dengan senyawa tertentu dalam air). Sedangkan radikal hidroksil dapat bereaksi dengan mikropolutan organik maupun anorganik dalam air.

Saat ozon larut dalam air, ozon akan mengalami tiga reaksi secara bersamaan, yaitu (Bollyky, 2002):

- Disinfeksi

Proses disinfeksi pada air dapat menghilangkan bakteri, virus, dan parasit. Ozon merupakan disinfektan yang paling efektif dalam penghilangan bakteri, virus, dan parasit dalam air.

- Oksidasi

Ozon merupakan pengoksidasi yang kuat dan efektif, terutama untuk penghilangan rasa dan bau akibat adanya pencemar organik maupun anorganik. Konsentrasi ozon yang dibutuhkan dan lama reaksi oksidasi tergantung pada jenis dan konsentrasi polutan dan kualitas air tersebut.

- Dekomposisi

Ozon merupakan senyawa yang tidak stabil pada suhu kamar atau suhu yang mendekati suhu kamar. Pada suhu kamar, ozon akan terdekomposisi dengan cepat menjadi oksigen. Laju dekomposisi ozon akan dipengaruhi oleh suhu air dan pH.

Kemampuan ozon untuk mengoksidasi senyawa anorganik tergantung dari beberapa faktor, seperti temperatur dan pH. Pada pH rendah ( $<7$ ), ozon bereaksi sebagai molekul  $O_3$  dengan reaksi yang lambat dan hanya dapat mengoksidasi senyawa-senyawa tertentu dalam air, melalui reaksi elektrofilik, nukleofilik, atau reaksi tambahan dipolar (reaksi langsung oleh ozon), sedangkan pada pH yang tinggi ( $>8$ ) secara cepat ozon akan terdekomposisi menjadi radikal bebas hidroksil (radikal  $OH$ ) yang dapat bereaksi dengan mikropolutan organik maupun anorganik (reaksi tidak langsung oleh radikal hidroksil). Umumnya, pada kondisi asam ( $pH < 4$ ) ozonasi langsung lebih mendominasi. Dalam rentang pH 4-9 baik ozonasi langsung maupun tidak langsung terjadi bersamaan, serta pada kondisi basa ( $pH > 9$ ) reaksi tidak langsung oleh radikal hidroksil lebih banyak terjadi.

Sampai saat ini penggunaan ozonasi untuk pemurnian air minum dimaksudkan untuk hal-hal berikut (Langlais, 1991):

1. Desinfeksi dan pengontrolan alga
2. Oksidasi dari polutan anorganik, seperti amonia dan merkuri
3. Oksidasi dari mikropolutan organik, meliputi:
  - Rasa dan bau
  - Polutan fenol
  - Senyawa-senyawa organik terhalogenasi dan pestisida
4. Oksidasi dari makropolutan organik
  - Penghilangan warna
  - Meningkatkan *biodegradabilitas* dari senyawa organik
  - Penghancuran *trihalomethane formation potential* (THMFP), *total organic halide formation potential* (TOXFP), dan klor
5. Sebagai *coagulant aid*

Penggunaan ozon dalam pengolahan air juga akan meningkatkan biodegradabilitas dari senyawa-senyawa organik (van der Aa, Achari, Rietveld,

Siegers, van Dick, 2004). Selain itu ozon juga relatif tidak berbahaya jika dibandingkan dengan desinfektan lain seperti klor. Ozon tidak akan membentuk akumulasi pada produk air minum yang akan dihasilkan sehingga mengurangi jumlah aditif kimia yang berbahaya bagi kesehatan manusia.

### 2.2.3. Injeksi Ozon dalam Air

Kontak antara ozon dan air ditandai dengan adanya gelembung pada larutan tersebut. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi perpindahan massa ozon ke dalam larutan, yaitu:

- Daya kelarutan ozon pada cairan tertentu
- Konsentrasi ozon dalam gas
- Jenis masukan umpan : Udara atau oksigen
- Metode kontak yang digunakan
- Waktu kontak
- Ukuran gelembung gas
- Tekanan dan temperatur operasi

Injeksi ozon ke dalam cairan dapat dilakukan dengan menggunakan injektor . Injektor yang paling umum digunakan ialah injektor jenis venturi dan *diffuser*. Kedua injektor ini bekerja berdasarkan perbedaan tekanan.

Penjelasan mengenai keduanya adalah sebagai berikut :

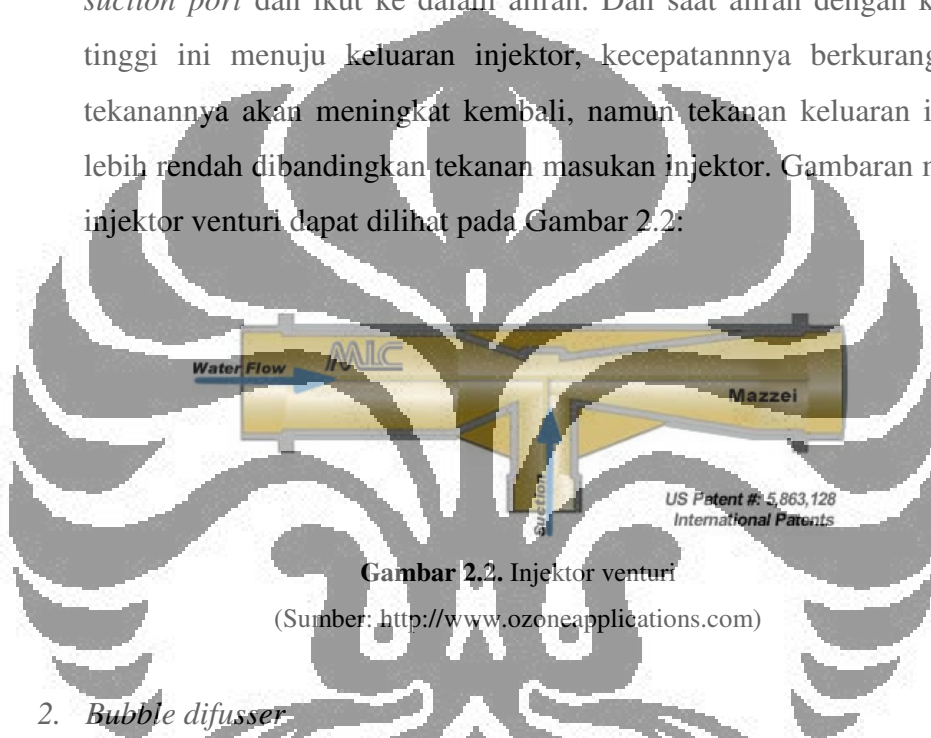
#### 1. Injektor venturi

Perbedaan tekanan antara masukan dan keluaran injektor jenis ini akan menciptakan kondisi vakum pada badan injektor yang akan menginisiasi penghisapan pada *suction port*.

Keuntungan dari injektor jenis ini adalah diperolehnya laju perpindahan massa ozon yang tinggi (hingga 90%), efisiensi cenderung tetap, konstruksinya yang sederhana dan tidak membutuhkan aliran listrik. Bahan yang dapat digunakan untuk membuat injektor venturi yaitu PVDF, *polypropylene* dan *stainless stell 316* (ozone, 2009). Alat ini dapat digunakan pada berbagai laju aliran, mulai dari 0,5 GPM hingga 4000 GPM, dan hanya membutuhkan perbedaan tekanan yang kecil antara

masuk dan keluar injektor untuk menginisiasi kondisi vakum pada *suction*.

Cara kerja injektor adalah sebagai berikut : ketika cairan operasi bertekanan masuk ke dalam injektor, aliran ini ditarik menuju arah ruang injeksi dan berubah menjadi aliran dengan kecepatan yang sangat tinggi. Peningkatan kecepatan yang melalui ruang injeksi akan menurunkan tekanan, yang demikian akan memungkinkan ozon dimasukkan ke dalam *suction port* dan ikut ke dalam aliran. Dan saat aliran dengan kecepatan tinggi ini menuju keluar injektor, kecepatannya berkurang namun tekanannya akan meningkat kembali, namun tekanan keluaran ini masih lebih rendah dibandingkan tekanan masukan injektor. Gambaran mengenai injektor venturi dapat dilihat pada Gambar 2.2:



**Gambar 2.2.** Injektor venturi

(Sumber: <http://www.ozoneapplications.com>)

## 2. *Bubble diffuser*

Alat ini bekerja dengan cara melepaskan ozon melalui suatu kolom gelembung yang terdiri dari ratusan gelembung dibawah permukaan air. Konstruksi alat bubble diffuser ini sederhana dan cocok untuk aliran dengan kecepatan tinggi. Seiring dengan meningkatnya kedalaman air, efisiensinya akan meningkat. Namun, laju perpindahan massa ozon yang diperoleh lebih rendah bila dibandingkan dengan injektor venturi, yaitu hanya sekitar 10-15 % dan bubble diffuser ini membutuhkan wadah yang tinggi untuk meningkatkan efisiensinya. Selain itu, lubang-lubang difusi dapat tersumbat dan akan menurunkan efisiensi perpindahan. Contoh dari *bubble diffuser* dapat dilihat pada Gambar 2.3:



**Gambar 2.3.** *Bubble diffuser*

(Sumber: lenntech, 2009)

### 2.3. Kavitas

Kavitas merupakan fenomena terjadinya pembentukan, pertumbuhan dan hancurnya gelembung mikro dalam cairan. Kondisi kavitas yang ekstrem dapat dimanfaatkan untuk menghancurkan molekul-molekul polutan dan senyawa organik. Jika fenomena ini terjadi karena adanya gelombang suara dengan frekuensi tinggi disebut kavitas akustik (ultrasonikasi), dan jika terjadi akibat variasi tekanan pada cairan yang mengalir akibat perubahan geometri pada sistem yang mengalir, maka disebut sebagai kavitas hidrodinamik.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, kavitas dapat menghasilkan gelembung mikro yang akan meningkatkan efektivitas dari proses ozonasi. Gelembung mikro ini memiliki luas permukaan yang besar, densitas gelembung yang sangat besar, kecepatan naik di fasa liquid yang kecil, dan tekanan dalam (*inner pressure*) yang tinggi (Li-Bing Chu *et.al.*, 2008).

#### 2.3.1. Kavitas Ultrasonik

Aplikasi dari ultrasonikasi telah digunakan dalam berbagai bidang dan tujuan. Selain itu, saat ini ultrasonik merupakan salah satu bidang ilmu yang paling pesat perkembangannya. Ultrasonikasi telah digunakan dalam bidang komunikasi dengan binatang (siulan untuk anjing), proses pengobatan, dan mendeteksi kerusakan pada bangunan beton. Walaupun telah banyak diaplikasikan untuk berbagai bidang dan tujuan, ternyata studi mengenai ultrasonik masih tergolong baru.



Ultrasonik pertama kali dikenal pada awal abad ke-20. Perkembangan ultrasonik selanjutnya dimulai pada tahun 1930 hingga Perang Dunia ke-2. Saat itu, ultrasonik dimanfaatkan untuk emulsifikasi dan pembersih permukaan. Barulah pada tahun 1960 ultrasonik dikembangkan secara komersil. Pada tahun 1960 industri menggunakan ultrasonik dalam proses pembersihan dan pembentukan plastik. Akhir-akhir ini ultrasonik telah dikembangkan untuk dapat diterapkan dalam teknologi makanan, pembentukan senyawa kimia, ekstraksi material, teknologi nano, pemisahan fasa, terapi, dan pengolahan air bersih (Timothy Mason, 2003).

Ultrasonik didefinisikan sebagai berbagai jenis suara yang memiliki frekuensi diatas frekuensi rata-rata yang dapat direpson oleh telinga manusia (diatas 16 kHz). Terdapat tiga rentang frekuensi ultrasonik yang berbeda, yaitu: (i) frekuensi tinggi, atau ultrasonik diagnostik (2-10 MHz), (ii) frekuensi rendah atau tenaga konvensional ultrasonik (20-100 kHz), dan (iii) frekuensi medium atau ultrasonik "efek-sonokimia" (300-1000kHz). Pada rentang frekuensi medium atau ultrasonik "efek-sonokimia" inilah terjadi proses reaksi kimia terkatalis pada tekanan dan temperatur yang ekstrem yang mengakibatkan pembentukan, pertumbuhan, dan hancurnya gelembung-gelembung mikro (N.H. Ince *et al.*, 2000). Energi ultrasonik merupakan jenis energi mekanikal yang tidak dapat diabsorb oleh molekul.

#### **2.3.1.1. Pembentukan Gelembung pada Kavitasasi Ultrasonik**

Ultrasonik akan ditransmisikan melewati medium dengan menginduksikan gelombang suara ke dalam medium sehingga molekul akan bergetar. Akibat adanya getaran itu, struktur dari molekul akan meregang dan terkompresi. Selain itu, jarak antar molekul juga akan berubah akibat adanya getaran molekul pada posisi awal. Jika intensitas gelombang ultrasonik di dalam air terus ditingkatkan, maka akan dicapai suatu kondisi maksimum dimana gaya intramolekul tidak dapat lagi menahan struktur molekul seperti keadaan awalnya. Akibatnya molekul itu akan pecah dan terbentuklah lubang (*cavity*). Lubang (*cavity*) ini disebut gelembung kavitasasi.

Irradiasi ultrasonik dalam air akan mengakibatkan pertumbuhan dan hancurnya gelembung mikro sehingga akan menghasilkan temperatur dan tekanan yang tinggi, yang akan memicu terbentuknya radikal bebas (radikal OH) melalui disosiasi termal dari air dan oksigen. Radikal bebas ini akan masuk ke dalam air dan mengoksidasi senyawa-senyawa kontaminan yang terkandung dalam air. Radikal bebas ini akan bergabung dengan atom hidrogen dalam air sehingga akan menghasilkan senyawa hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) (Langenhore, 1998; Jang *et al.*, 2002; Visscher *et al.*, 2004). Komponen yang mudah menguap lebih mudah untuk berdifusi membentuk gelembung kavitasi dan akan terdegradasi lebih cepat melalui reaksi pirolisis. Sementara itu, komponen yang kurang volatil akan membutuhkan waktu yang lebih lama untuk membentuk gelembung kavitasi (Lifka *et al.*, 2003).

Kavitasi ultrasonik terdiri dari tiga tahap utama, yaitu nukleasi atau pembentukan gelembung, pertumbuhan gelembung, dan pecahnya gelembung (implosive collapse). Tahap pertama dari proses kavitasi ultrasonik ini adalah nukleasi atau pembentukan gelembung, yaitu tahapan dimana inti (*nuklei*) kavitasi akan dihasilkan dari partikel gelembung mikro yang terperangkap dalam celah-celah mikro dari partikel yang tersuspensi di dalam air.

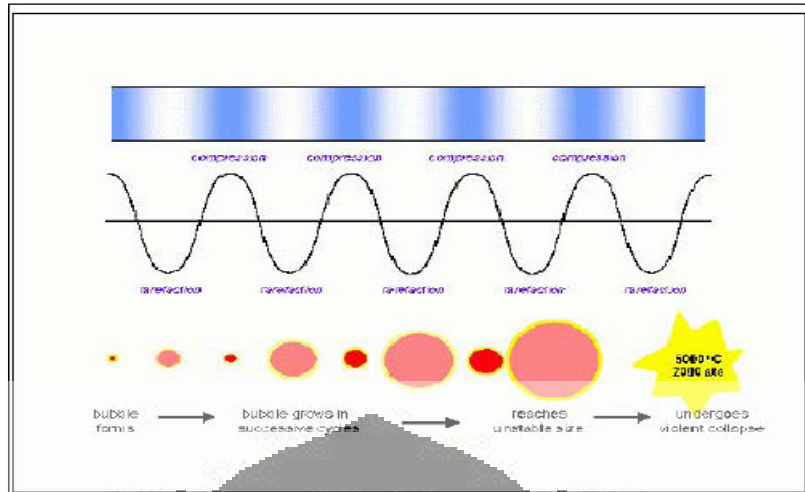
Pada tahap kedua, gelembung-gelembung mikro akan tumbuh dan membesar akibat adanya intensitas gelombang ultrasonik yang tinggi. Dengan ultrasonikasi pada intensitas tinggi, gelembung mikro akan tumbuh dengan sangat cepat. Sedangkan pada intensitas rendah, laju pertumbuhan dari gelembung lebih lambat. Hal ini dikarenakan gelembung akan melewati beberapa siklus akustik terlebih dahulu sebelum akhirnya bisa membesar.

Tahap ketiga dari kavitasi terjadi apabila intensitas dari gelombang ultrasonik melebihi batas ambang dari kavitasi ultrasonik (20 kHz untuk liquid pada umumnya). Pada tahap ini, gelembung mikro akan terus tumbuh hingga mencapai saat dimana gelembung mikro tidak dapat lagi mengabsorpsi energi yang dihasilkan oleh gelombang suara secara efisien dan akhirnya akan pecah. Tahap inilah yang disebut sebagai *catastrophic collapse*. Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa beberapa saat sebelum

terjadinya *catastrophic collapse*, gelembung mikro menghasilkan kilatan cahaya yang disebut sonoluminescence, yang memiliki panjang gelombang 310 nm.

Ada tiga teori berbeda mengenai kavitasi, yaitu teori hot-spot, teori elektrik, dan teori plasma. Dari ketiga teori tersebut, teori hot-spot merupakan teori yang paling populer. Teori hot-spot menyatakan bahwa pecahnya gelembung mikro berlangsung dalam waktu yang sangat singkat sehingga kompresi dari gas dan uap di dalam gelembung terjadi secara adiabatik. Akibatnya, pada saat gelembung mikro pecah temperatur dan tekanan sangatlah tinggi, yaitu mencapai 4200-5000 K dan 200-500 atm. Kondisi hot spot lokal dihasilkan karena pecahnya gelembung dalam waktu yang sangat cepat ( $<10\mu\text{s}$ ) (N.H. Ince *et al.*, 2000).

Gelombang ultrasonik melewati air secara berseri dari siklus kompresi dan ekspansi yang saling bergantian pada Gambar 2.5. Gelembung-gelembung mikro akan terbentuk pada saat amplitudo akustik cukup besar untuk dapat meregangkan molekul selama berlangsungnya siklus peregangan hingga sampai pada jarak yang lebih besar daripada jarak kritis molekul. Gelembung-gelembung mikro yang terbentuk selama siklus peregangan akan hancur akibat adanya siklus kompresi. Karena hancurnya gelembung mikro tersebut dalam waktu yang singkat, maka terjadi peningkatan temperatur dan tekanan yang ekstrem. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa saat kehancuran gelembung mikro tersebut temperatur dan tekanan lokalnya bisa mencapai lebih dari 5000 °C dan 1000 atm (Pandit dan Moholkar, 1996). Gambar 2.4 menunjukkan bagaimana gelombang ultrasonik dapat memperbesar ukuran gelembung dari waktu ke waktu hingga akhirnya gelembung tersebut hancur.

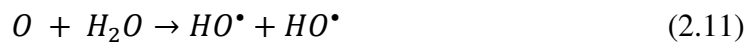


**Gambar 2.4.** Pembentukan gelembung pada kavitasi ultrasonik  
(Sumber: Pandit dan Moholkar, 1996)

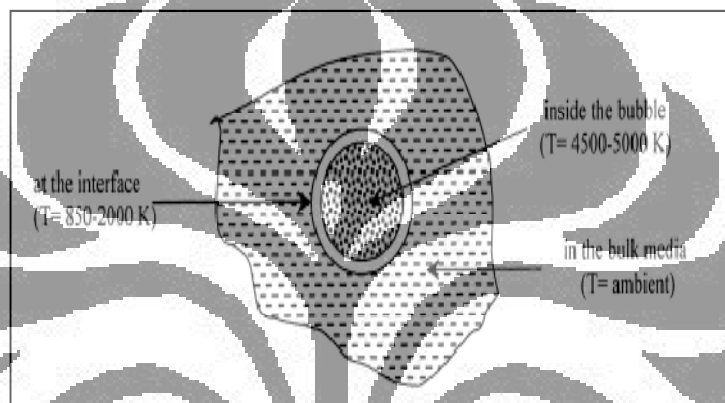
Selama proses hancurnya gelembung mikro dalam air, molekul gas dari air yang terjebak di dalam gelembung akan mengalami reaksi pirolisis yang menghasilkan radikal yang sangat reaktif seperti radikal hidroksil. Radikal hidroksil yang dihasilkan dari peristiwa kavitasi ini dapat bereaksi dalam (i) fasa gas, (ii) dikombinasikan pada daerah yang lebih dingin seperti permukaan interfasa gas-cairan, (iii) dan/atau fasa ruah larutan untuk menghasilkan hidrogen peroksida atau air. Reaksinya adalah sebagai berikut (N.H. Ince *et al.*, 2000) :



Jika air telah jenuh oleh oksigen dan peroksil, maka akan lebih banyak radikal hidroksil terbentuk di dalam fasa gas karena adanya dekomposisi molekul oksigen, dan radikal hidroksil yang telah terbentuk terlebih dahulu pada bagian interfasa gas-cair dan fasa ruah larutan akan mengalami rekombinasi satu sama lainnya sehingga membentuk hidrogen peroksida. Reaksinya adalah sebagai berikut (N.H. Ince *et al.*, 2000) :



Ada tiga daerah yang sangat potensial untuk tempat terjadinya reaksi kimia pada air yang diiradisikan ultrasonik seperti terlihat pada Gambar 2.6, yaitu : (i) gelembung kavitasi itu sendiri, (ii) selubung interfasa antara gelembung gas dan cairan di sekelilingnya, (iii) fasa ruah-larutan (N.H. Ince *et al.*, 2000) :



**Gambar 2.5.** Daerah terjadinya reaksi kimia pada kavitasi ultrasonik  
(Sumber: N.H. Ince *et al.*, 2000)

Pada proses pengolahan air, polutan organik dapat dihancurkan pada daerah di dalam gelembung kavitasi itu sendiri ataupun pada selubung interfasa dengan mengkombinasikan antara efek dekomposisi pirolitik dan hidroksilasi. Polutan organik juga dapat dihancurkan pada daerah fasa ruah-larutan dengan menggunakan degradasi oksidatif oleh radikal hidroksil dan hidrogen peroksida. Proses oksidasi pada fasa ruah-larutan ini dibatasi oleh jumlah radikal hidroksil (tidak berkombinasi dengan senyawa reaktif lainnya) yang ada dalam larutan, yang dipengaruhi oleh waktu hidup dan lamanya waktu yang diperlukan sampai gelembung kavitasi hancur.

### 2.3.1.2. Faktor yang Mempengaruhi Kavitasi Ultrasonik

Berikut ini adalah faktor-faktor utama yang mempengaruhi kavitasi ultrasonik, yang meliputi :

- 1) intensitas dari ultrasonik, seperti frekuensi dan amplitudo radiasi
- 2) sifat fisika dari air (viskositas, tegangan permukaan, dan tekanan uap)
- 3) suhu
- 4) kehadiran gas terlarut.

Optimasi dari proses kavitasi ultrasonik dapat dilakukan dengan mengatur frekuensi ultrasonik dan gas terjenuhkan selama proses sonikasi (Hua dan Hoffman, 1997).

Salah satu variabel yang mempengaruhi kinerja kavitasi ultrasonik adalah frekuensi gelombang ultrasonik. Hal ini akan mempengaruhi resonansi dari gelembung mikro. Radius resonansi gelembung mikro dari gelombang ultrasonik pada frekuensi rendah diperkirakan sebesar 170  $\mu\text{m}$  (pada 20 kHz), dan gelembung mikro pada frekuensi ini cenderung lebih stabil atau memiliki waktu hidup yang panjang, yaitu sekitar 10  $\mu\text{s}$ . Kavitasi jenis ini disebut sebagai *stable cavitation*. Pada jenis kavitasi ini, tahapan hancurnya gelembung mikro akan tertunda hingga melewati beberapa kali siklus ekspansi dan kompresi. Selama waktu penundaan ini sejumlah zat terlarut (seperti polutan) yang volatil dan uap dari pelarut akan berubah fasa menjadi gas. Pada frekuensi rendah, waktu yang dibutuhkan untuk tahap pertumbuhan dan hancurnya gelembung mikro akan semakin lama sehingga radikal hidroksil akan saling berikatan pada daerah selubung interfasa (seperti pada reaksi (7) - (9) dan (12)) dan akhirnya dapat menghambat perpindahan massa dari hidroksil dan komponen reaktif lainnya ke dalam larutan.

Oleh karena itu, kavitasi ultrasonik dengan frekuensi rendah hanya efektif bila digunakan untuk penghancuran polutan yang bersifat hidrofobik (tidak menyukai air), yang lebih mudah berdifusi ke dalam gelembung mikro untuk menjalani reaksi pirolisis, atau hidroksilasi dan dekomposisi termal pada selubung interfasanya, dimana tekanan dan temperatur pada selubung interfasa ini masih cukup tinggi sehingga memungkinkan terjadinya reaksi dekomposisi termal.

Pada frekuensi medium (300-1000 kHz), radius resonansi gelembung mikro sebesar 4,6  $\mu\text{m}$  (pada 500 kHz), dan memiliki waktu hidup yang sangat pendek (0,4  $\mu\text{s}$ ). Kavitasi jenis ini disebut sebagai *transient cavitation*. Pada jenis kavitasi ini, temperatur dan tekanan yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan

dengan kavitasasi pada frekuensi rendah. Energi yang dilepaskan ke sekitarnya pada *transient cavitation* jauh lebih besar dibandingkan dengan *stable cavitation*, yang disebabkan hancurnya gelembung mikro pada *transient cavitation* lebih cepat dan dahsyat dibandingkan *stable cavitation*.

Pada *transient cavitation* waktu hidup dari gelembung mikro sangat singkat sehingga radikal hidroksil tidak dapat saling berikatan pada daerah fasa gas ataupun selubung interfasa. Kavitasasi ini efektif untuk penghancuran polutan yang tidak volatil dalam larutan. Proses penghancuran polutan pada *transient cavitation* bergantung pada banyaknya radikal hidroksil yang ditransfer ke fasa ruah-larutan selama proses hancurnya gelembung mikro.

Dari penjelasan diatas, dapat disimpulkan bahwa pemilihan frekuensi gelombang ultrasonik yang tepat sangatlah penting untuk pengolahan air. Pemilihan frekuensi yang tepat sangat bergantung pada *physicochemical properties* dari senyawa kontaminan dalam air, seperti tekanan uap. Senyawa hidrofobik dengan tekanan uap yang tinggi memiliki kecenderungan yang sangat kuat untuk berdifusi ke dalam gelembung mikro, maka daerah yang paling efektif untuk penghancuran senyawa hidrofobik adalah gelembung kavitasasi itu sendiri atau pada selubung interfasanya. Senyawa hidrofobik memiliki sifat mudah menguap (volatil) sehingga lebih efektif menggunakan gelombang ultrasonik pada frekuensi rendah atau *conventional power* untuk penghancuran senyawa kontaminan melalui proses termal dan oksidasi pada fasa gas atau permukaan interfasa gas-cair.

Sebaliknya, senyawa hidrofilik memiliki sifat non-volatil sehingga cenderung berada pada daerah fasa ruah-larutan selama kavitasasi ultrasonik berlangsung. Maka daerah yang paling berpotensi untuk reaksi kimia adalah pada medium cairnya (fasa ruah-larutan) melalui proses degradasi oksidatif dengan menggunakan radikal hidroksil yang ditransfer ke fasa ruah-larutan ketika gelembung mikro hancur. Radikal hidroksil yang ditransfer ke medium cairan (fasa ruah-larutan) akan mencapai jumlah maksimum pada *transient cavitation*, atau ketika menggunakan gelombang ultrasonik berfrekuensi sedang (*sonochemical-effects*).

Faktor lain yang mempengaruhi kavitasasi ultrasonik adalah jenis gas yang dilarutkan ke dalam proses kavitasasi. Pada jenis air murni yang tidak mengandung senyawa terlarut di dalamnya, proses dimulainya kavitasasi membutuhkan waktu yang lebih lama. Hal ini dikarenakan proses pembentukan inti (*nuklei*) dipengaruhi oleh ada tidaknya senyawa terlarut di dalam air. Pembentukan inti (*nuklei*) terjadi karena adanya gelembung yang terperangkap pada retakan gelembung mikro dari senyawa yang terlarut dalam air. Oleh karena itu, adanya senyawa terlarut dalam air diperlukan pada proses kavitasasi. Senyawa terlarutnya dapat berupa gas atau padatan yang tersuspensi. Cara yang paling mudah untuk mendapatkan senyawa terlarut dalam air adalah dengan membuat larutan menjadi jenuh dengan menambahkan gas terlarut ke dalamnya.

Oleh karena itu, pemberian gas terlarut ke dalam larutan selama periode ultrasonikasi bertujuan untuk mempertahankan agar laju gas tetap konstan sehingga kondisi ekstrem yang dihasilkan ketika gelembung hancur dapat tetap dipertahankan. Pemilihan gas yang tepat sangatlah penting untuk kavitasasi ini, karena temperatur akhir pada saat gelembung hancur berhubungan erat dengan parameter-parameter gas, yang disebut sebagai polytropic ratio ( $\gamma$ ). Polytropic ratio merupakan perbandingan antara specific heats ( $C_p/C_v$ ) dari gas ambient yang terperangkap dalam gelembung. Temperatur yang tinggi diperoleh pada saat nilai  $\gamma$  juga tinggi. Dengan semakin tingginya temperatur, maka radikal bebas hidroksil yang dihasilkan juga akan semakin banyak.

Selain nilai  $\gamma$ , konduktivitas termal gas juga perlu dipertimbangkan dalam pemilihan gas terlarut yang tepat dalam kavitasasi. Konduktivitas termal dari suatu gas berbanding terbalik dengan temperatur di dalam gelembung. Berikut ini adalah nilai konduktivitas termal beberapa gas mulia:  $Xe < Kr < Ar < Ne < He$ . Semakin kecil nilai konduktivitas termal dari suatu gas, maka akan semakin sedikit pula jumlah panas yang dilepaskan ke lingkungan sehingga hancurnya gelembung mikro akan semakin mendekati kondisi adiabatik. Semakin mendekati kondisi adiabatik, maka temperatur pada saat hancurnya gelembung akan semakin tinggi dan radikal bebas yang dihasilkan juga akan semakin banyak.

Dari penjelasan diatas dapat disimpulkan bahwa untuk dapat menghasilkan radikal bebas dalam jumlah yang banyak, maka dapat dilakukan dengan



meningkatkan temperatur pada saat hancurnya gelembung mikro. Temperatur akan meningkat seiring dengan peningkatan rasio  $\gamma$ . Namun, radikal bebas yang dihasilkan akan menurun dengan kenaikan konduktivitas termal gas. Gas mulia (Xe, Kr, Ar, Ne, dan He) memiliki rasio  $\gamma$  yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan gas monoatomik dalam air.

Pada kavitasasi ultrasonik, konsentrasi radikal hidroksil pada permukaan gelembung bisa mencapai  $4 \times 10^{-3}$  M, yang  $10^8$ - $10^9$  kali lebih besar bila dibandingkan dengan teknologi oksidasi lanjut lainnya (Crittenden *et al.*, 2004). Selain itu, kavitasasi ultrasonik juga memiliki kelebihan lainnya, seperti tidak perlu penambahan zat aditif ke dalam sistem ultrasonik dan tidak ada produk samping yang dihasilkan dari teknologi ultrasonik ini, sehingga dapat dikatakan bahwa teknologi ini merupakan teknologi pengolahan air yang ramah lingkungan (Buchholz *et al.*, 1998).

### 2.3.2. Kavitasasi Hidrodinamik

Proses oksidasi yang terjadi pada kavitasasi hidrodinamik serupa dengan kavitasasi ultrasonik. Hanya saja kavitasasi hidrodinamik ini terjadi karena adanya perubahan bentuk geometri dari aliran, sementara itu kavitasasi ultrasonik terjadi karena adanya frekuensi ultrasonik yang diberikan pada aliran. Proses penghancuran polutan dalam kavitasasi hidrodinamik mirip seperti kavitasasi ultrasonik, yang melibatkan proses pirolisis pada temperatur tinggi karena hancurnya gelembung mikro, ataupun melalui dekomposisi uap air menjadi radikal hidroksil yang diikuti oleh mekanisme kimia.

Kavitasasi hidrodinamik ini memiliki tiga kelebihan utama bila dibandingkan dengan kavitasasi ultrasonik, yaitu :

- Peralatan yang digunakan dalam kavitasasi hidrodinamik cenderung lebih sederhana dibandingkan dengan kavitasasi ultrasonik.
- Biaya yang dibutuhkan untuk kavitasasi hidrodinamik lebih murah.
- Volume reaksi efektif lebih besar dan peralatannya mudah ditingkatkan.
- Tidak memerlukan penggunaan energi listrik dalam pengoperasiannya.

Namun, kavitasasi hidrodinamik juga memiliki kekurangan bila dibandingkan dengan kavitasasi ultrasonik, yaitu waktu yang diperlukan oleh

tekanan untuk dapat menghasilkan getaran dalam kavitasi hidrodinamik lebih lama bila dibandingkan dengan kavitasi ultrasonik. Akibatnya, proses pertumbuhan dan hancurnya gelembung mikro yang terjadi membutuhkan waktu yang lebih lama.

Proses pembentukan radikal hidroksil untuk proses oksidasi senyawa polutan dalam metode kavitasi hidrodinamik sama dengan proses pembentukan pada kavitasi ultrasonik. Yang membedakan kedua proses ini adalah bagaimanakah kondisi kavitasi itu dapat terbentuk. Pada kavitasi ultrasonik, kondisi kavitasi terjadi karena adanya frekuensi tinggi pada aliran. Sementara itu, pada kavitasi hidrodinamik, kondisi kavitasi tercapai karena adanya perubahan bentuk geometri aliran.

#### **2.4. Ozonasi dan Kavitasi**

Ozon dapat bereaksi secara langsung dan tidak langsung dalam air. Namun, ozon hanya dapat bereaksi dengan senyawa tertentu dalam air. Reaksi tidak langsung oleh ozon akan menghasilkan radikal hidroksil yang dapat bereaksi dengan mikropolutan organik maupun anorganik. Kekurangan yang dimiliki oleh ozon ini dapat diatasi oleh kavitasi, yang merupakan fenomena terjadinya pembentukan, pertumbuhan kemudian hancurnya gelembung mikro dalam cairan. Kondisi proses kavitasi yang ekstrem dapat dimanfaatkan untuk menghancurkan mikropolutan anorganik maupun organik dalam air.

Disamping itu, telah dilakukan penelitian lain yang menunjukkan bahwa sinergi antara proses ozonasi dan kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) mampu mengurangi konsentrasi ozon yang digunakan hingga menjadi setengah atau sepertiga dari yang dibutuhkan untuk proses disinfeksi tanpa kavitasi (Jyoti dan Pandit, 2004). Maka dalam penelitian ini, penggabungan antara kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) yang memanfaatkan gelembung mikro dan proses ozonasi memungkinkan tercapainya proses yang lebih efektif dan ekonomis.

Penggabungan ozonasi dan kavitasi selain untuk mempercepat laju dekomposisi ozon juga untuk meningkatkan laju perpindahan massa dari ozon ke dalam air. Proses ozonasi merupakan proses absorpsi gas yang terjadi melalui suatu mekanisme reaksi kimia, dimana laju reaksi total akan dipengaruhi oleh

kinetika reaksi dan transfer massa. Perpindahan massa ozon-air berkaitan dengan besarnya kelarutan ozon dalam air. Perpindahan massa ozon-air sendiri secara umum dipengaruhi oleh konsentrasi ozon dalam air, metode kontak yang digunakan, waktu kontak, kinetika dekomposisi ozon dalam air, tekanan dan temperatur operasi, dan jumlah serta ukuran gelembung ozon yang terbentuk. Efektivitas dari proses ozonasi ini dapat ditingkatkan dengan memperluas area permukaan kontak antara ozon dengan air dengan penggunaan gelembung yang lebih kecil (Shin *et al.*, 1999).

Penggabungan teknologi oksidasi lanjut berbasis ozonasi dan kavitasi akan membuat ozon terdekomposisi dalam gelembung mikro sesuai dengan reaksi sebagai berikut :



Atom oksigen yang terbentuk akan bereaksi dengan uap air dan akhirnya membentuk radikal hidroksil, sesuai dengan reaksi sebagai berikut :



Reaksi diatas terjadi di dalam gelembung mikro. Radikal hidroksil yang terbentuk kemudian akan bermigrasi ke daerah interfasa dari gelembung mikro dan nantinya juga akan ditransfer menuju fasa ruah larutan. Kombinasi antara ozon dengan kavitasi merupakan sistem oksidasi yang sangat efektif. Hal ini terlihat dari radikal hidroksil yang dihasilkan berjumlah dua molekul per satu molekul oksigen yang digunakan.

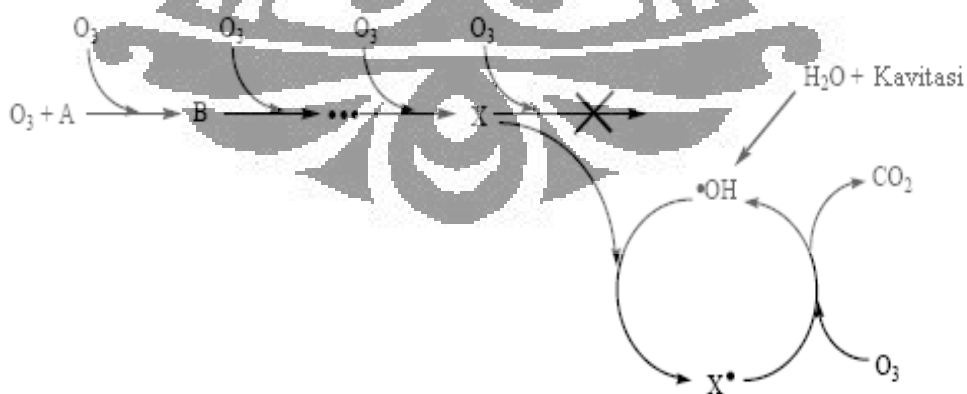
Sehingga dapat dikatakan bahwa pembentukan radikal hidroksil dari proses ozonasi dan kavitasi akan berasal dari tiga sumber, yaitu :

- Dekomposisi normal oleh ozon.
- Dekomposisi uap air dari dalam gelembung mikro oleh kavitasi.
- Dekomposisi termal ozon dari dalam gelembung mikro oleh kavitasi.

## 2.5. Mekanisme Reaksi Fenol

Adapun mekanisme reaksi fenol pada proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Pertama-tama fenol akan bereaksi dengan ozon melalui serangan elektrofilik. Proses oksidasi dari fenol dan produk samping yang dihasilkan dari degradasi fenol terjadi pada fasa ruah dari larutan melalui reaksi serangan langsung oleh ozon.
- Serangan elektrofilik pada posisi orto dan para menghasilkan anion trioksida hidroksil. Intermediet ini dapat kehilangan molekul oksigen sehingga membentuk senyawa dihidroksi benzen, catechol dan hidroquinon.
- Selanjutnya senyawa intermediet yang dihasilkan tadi akan mengalami reaksi pembukaan cincin sehingga membentuk *muconic acid*, *maleic acid*, dan asam karboksilat olefin lainnya.
- Proses ozonasi lebih lanjut pada produk intermediet ini akan menyebabkan dekarboksilasi dan pembentukan *glyoxal*, asam glioksilat, dan asam oksalat yang tidak dapat dioksidasi lebih lanjut oleh ozon.
- Proses ozonasi akan mengoksidasi fenol secara efisien melalui serangan langsung oleh ozon dan menghasilkan produk samping (by product), seperti glioksal, asam glioksalat, dan asam oksalat yang tidak dapat dioksidasi oleh ozon. Kombinasi dari ozonasi dan kavitasi menghasilkan senyawa oksidator kuat seperti radikal hidroksil yang mampu meningkatkan penyisihan produk samping tersebut.



**Gambar 2.6.** Mekanisme Reaksi Fenol dengan Ozon dan Radikal OH  
(Lesko, 2004)

Gambar 2.6 di atas menjelaskan skema penyisihan fenol dengan menggunakan proses ozonasi dan kavitasi. Penyisihan fenol terjadi melalui reaksi langsung antara fenol dengan ozon dan reaksi antara fenol dengan radikal hidroksil. Proses oksidasi dari fenol (A) dan produk samping fenol akan terjadi secara cepat di dalam larutan melalui reaksi langsung oleh ozon. Serangan langsung dari molekul ozon menghasilkan senyawa jenuh (X) yang tidak dapat dioksidasi lebih lanjut oleh ozon (Tabel 2.6), tapi dapat dioksidasi melalui serangan radikal hidroksil (Tabel 2.7) dan membentuk radikal bebas hasil oksidasi (X'). Radikal bebas hasil oksidasi inilah yang kemudian bisa teroksidasi lagi dengan ozon. Reaksi antara radikal bebas hasil oksidasi (X') dengan ozon akan membentuk radikal hidroksil yang akan meningkatkan proses penyisihan fenol dengan penggabungan ozonasi/kavitasi.

**Tabel 2.6.** Konstanta laju reaksi fenol dan turunannya dengan ozon

Senyawa	Konstanta Laju Reaksi ( $M^{-1}s^{-1}$ )
Fenol	$1,3 \times 10^3$
<i>Catechol</i>	$3,1 \times 10^5$
Hidroquinon	$1,5 \times 10^6$
Asam Maleat	$2,4 \times 10^4$
Format	$1,0 \times 10^2$
Glioksilat	1,9
Oksalat	$< 0,04$

(Sumber: Lesko, 2004)

**Tabel 2.7.** Konstanta laju reaksi fenol dan turunannya dengan OH<sup>-</sup>

Senyawa	Konstanta Laju Reaksi ( $M^{-1}s^{-1}$ )
Fenol	$6,3 \times 10^9$
<i>Catechol</i>	$6,1 \times 10^{10}$
Hidroquinon	$5,2 \times 10^9$
Benzoquinon	$1,2 \times 10^9$
Asam Maleat	$1,2 \times 10^9$
Format	$4,3,0 \times 10^9$
Glioksilat	$6,6 \times 10^7$
Oksalat	$4,7 \times 10^7$

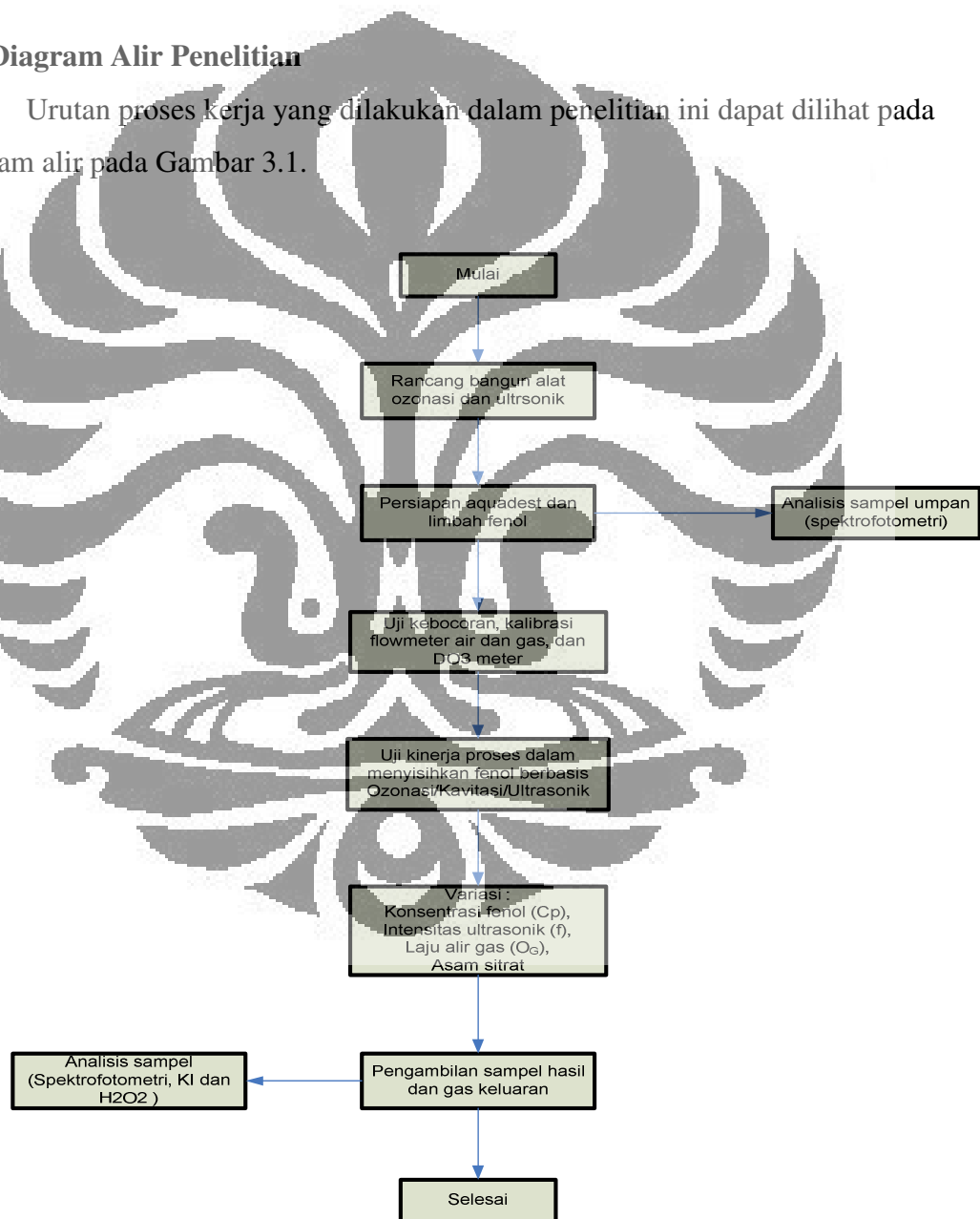
(Sumber: Lesko, 2004)

## BAB 3 METODE PENELITIAN

Pembahasan pada bab ini akan terdiri dari tujuh bagian utama, yaitu : diagram alir penelitian, deskripsi alat penelitian, rancangan penelitian, alat dan bahan penelitian, prosedur penelitian, analisis sampel, dan pengolahan data penelitian.

### 3.1. Diagram Alir Penelitian

Urutan proses kerja yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

### 3.2. Deskripsi Alat Penelitian

Sistem peralatan ini terdiri dari empat peralatan utama, yaitu: ozonator, injektor mazzei, reaktor kaca, pompa, dan Ultrasonic Processor (UP-800) yang dapat dilihat pada Gambar 3.2 di bawah ini.

#### 3.2.1. Ozonator

Ozonator yang digunakan dalam penelitian ini merupakan ozonator rancangan Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA. Ozonator ini menggunakan prinsip *corona discharge* dalam pembangkitan ozon dimana umpan yang digunakan, baik udara maupun oksigen murni, dilewatkan pada celah di antara dua elektroda yang dipisahkan oleh material dielektrik. Elektroda-elektroda ini terhubung dengan sumber tegangan tinggi *alternating-current* (AC). Tegangan tinggi yang dialirkan menuju dua elektroda ini menyebabkan terbentuknya *corona discharge*, dan membuat oksigen ataupun udara yang berada di celah *discharge* terkonversi menjadi ozon.

Ozonator dirancang untuk bekerja pada tegangan listrik bolak-balik (AC) 9–16 kilovolt, tekanan atmosferik dan temperatur kerja 15–40°C. Tabung ozonator terbuat dari bahan PVC yang didalamnya terdapat elektroda dan dielektriknya terbuat dari bahan *stainless steel*. Elektroda ini dihubungkan dengan sumber listrik tegangan tinggi. Panas akibat medan induksi elektromagnetik tinggi didinginkan dengan menggunakan air pendingin yang mengalir secara kontinyu. Arus listrik yang masuk (input) akan dinaikkan tegangannya oleh transformer sehingga menghasilkan tegangan yang tinggi. Ozonator diletakkan pada jarak yang sangat dekat dengan peralatan.

Udara yang mengandung 21% oksigen dialirkan menggunakan *compressor* menuju ozonator melalui gas flowmeter. Sebelum memasuki ozonator, udara terlebih dahulu dialirkan melewati *silica gel* untuk menghilangkan kandungan air. Gas umpan ozonator harus benar-benar kering. Kelembaban sedikit saja dapat memicu ledakan pada ozonator.

Di dalam ozonator, campuran gas (nitrogen, oksigen, dan ozon) akan mengalir dari bagian atas ke bagian bawah ozonator, sedangkan air pendingin akan mengalir dari bawah ke atas agar waktu kontak dalam perpindahan energi

panas lebih besar sehingga temperatur ozonator tidak terlalu tinggi dan dijaga agar relatif konstan.

### 3.2.2. Injektor

Injektor yang digunakan merupakan injektor tipe venturi Merk Mazzei, yang berfungsi untuk menginjeksikan ozon ke dalam aliran. Injektor mazzei dapat mengakibatkan terjadinya perubahan struktur geometri dari aliran karena adanya perbedaan tekanan masukan dan keluaran injektor sehingga terjadilah proses kavitasi hidrodinamik. Salah satu keuntungan menggunakan injektor mazzei adalah gelembung yang dihasilkan pada injektor jenis ini adalah gelembung mikro sehingga dapat meningkatkan laju perpindahan massa dari ozon ke air. Keunggulan lainnya dari injektor ini adalah efisiensinya yang cenderung konstan, konstruksinya yang sederhana, dan tidak membutuhkan aliran listrik.

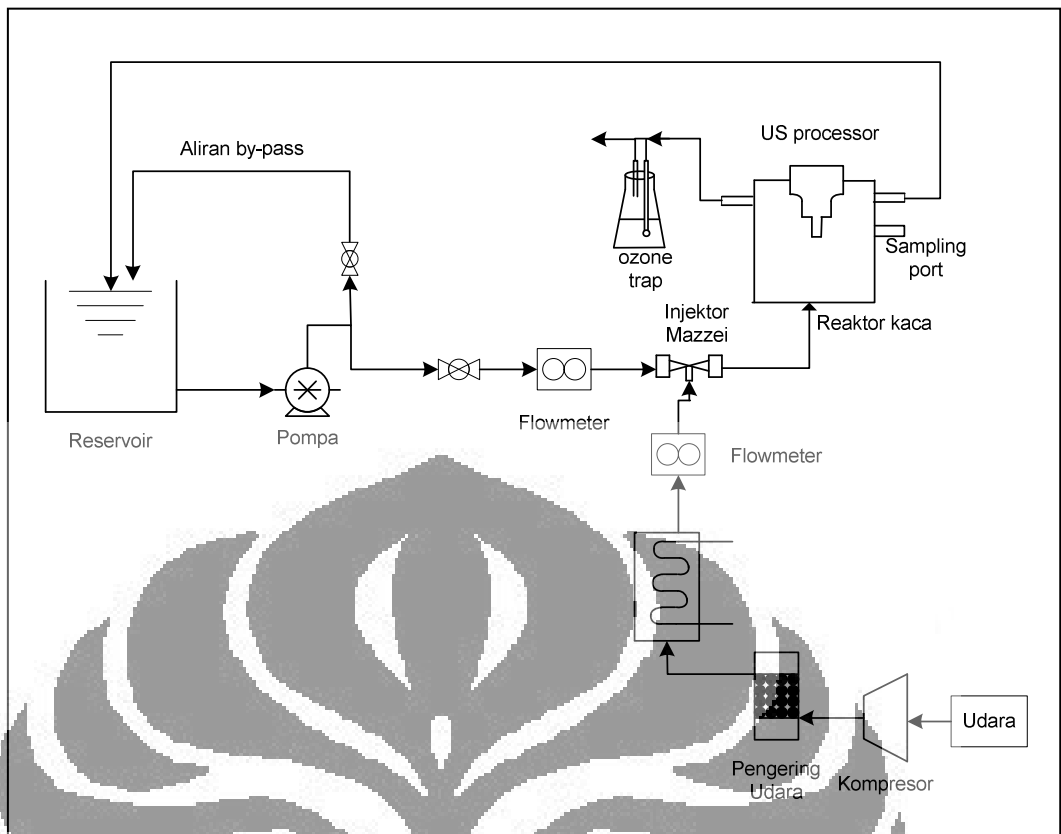
### 3.2.3. Reaktor Kaca dan Pompa

Reaktor kaca dirancang untuk mengamati perpindahan massa antara ozon dan air. Reaktor kaca dibuat dari bahan kaca untuk memudahkan pengamatan. Volume dari reaktor kaca ini sebesar 2,75 L. Reaktor kaca dilengkapi dengan *sampling port* untuk pengambilan sampel pada titik-titik tertentu. Reaktor ini dibuat sedemikian rupa sehingga memiliki sistem sirkulasi karena injektor mazzei yang digunakan hanya dapat bekerja pada aliran sirkulasi. Pompa yang digunakan terbuat dari bahan *stainless steel* karena tahan terhadap ozon.

### 3.2.4. Ultrasonic Processor

Jenis ultrasonik processor yang digunakan dalam penelitian ini adalah Ultrasonik UP-800. Rangkaian alat ultrasonik ini akan menghasilkan sinyal elektrik dengan frekuensi yang tinggi, yang akan diubah menjadi getaran mekanis. Getaran mekanis diperkuat oleh probe dan akan diteruskan ke sekitar larutan. Rangkaian alat ultrasonik ini akan membentuk gelembung mikro, yang akan berkembang dan akhirnya akan pecah dan menghasilkan radikal hidroksil.





Gambar 3.2. Rangkaian alat penelitian

### 3.3. Rancangan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menguji kinerja proses oksidasi lanjut ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) dalam menyisihkan fenol. Secara umum, penelitian ini dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu :

1. Penyisihan fenol melalui proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) dengan variasi laju alir gas ( $O_G$ ).
2. Penyisihan fenol melalui proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) dengan variasi intensitas ultrasonik.
3. Penyisihan fenol melalui proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) dengan variasi konsentrasi awal fenol ( $C_{p0}$ ).
4. Penyisihan fenol melalui proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) dengan variasi jenis asam.

### 3.4. Alat dan Bahan Penelitian

Peralatan dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

#### 3.4.1. Alat Penelitian

- 1) Sistem peralatan pada Gambar 3.2
- 2) Stop watch
- 3) Labu erlenmeyer
- 4) DO<sub>3</sub> meter
- 5) DO meter
- 6) pH meter
- 7) Spektrofotometer UV – Vis dengan panjang gelombang 500 dan 625 nm
- 8) Bubbler (ozon trap)

#### 3.4.2. Bahan Penelitian

- 1) Aquadest

Air yang digunakan dalam penelitian ini merupakan air aquadest. Aquadest digunakan karena di dalam aquadest tidak ada kandungan mineral-mineral dalam aquadest yang dapat mengganggu proses perpindahan massa ozon ke dalam air. aquadest yang digunakan memiliki pH 6, kandungan TDS nol, dan konduktivitas nol (mS).

- 2) Limbah Fenol

Limbah fenol yang digunakan merupakan limbah fenol sintetik dengan konsentrasi fenol 10.000 ppm (larutan induk fenol).

- 3) HCl 6M

HCl yang digunakan bertujuan untuk memberikan kondisi asam pada sistem.

#### 3.5. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan dibagi berdasarkan jenis penelitian yang dilakukan.

### 3.5.1. Penyisihan Fenol dengan Proses Ozonasi/Kavitasi (Hidrodinamik dan Ultrasonik) dengan Variasi Laju Alir Gas ( $O_G$ )

Adapun prosedur dari penelitian ini adalah :

- 1) Mengisi reservoir dengan aquadest sebanyak 7 L.
- 2) Menambahkan HCl 6 M ke dalam reservoir hingga diperoleh kondisi asam (pH pada sistem berkisar 3).
- 3) Menambahkan larutan induk fenol yang memiliki konsentrasi 10.000 ppm ke dalam reservoir sebanyak 70 mL hingga diperoleh konsentrasi fenol di dalam sistem sebesar 100 ppm.
- 4) Menyalakan pompa untuk memulai sirkulasi larutan di dalam sistem.
- 5) Mengatur valve menuju sistem dan valve *by-pass* sehingga diperoleh kecepatan aliran air sebesar 3 L/menit.
- 6) Menginjeksikan ozon ke dalam air dengan mengatur laju alir ozon (gas) yang disesuaikan dengan variasi laju alir gas yang diinginkan.
- 7) Mengukur ketinggian awal air dalam reaktor kaca.
- 8) Mengambil sampel air dari sample port.
  - a) Pengambilan sampel dilakukan setiap 5 menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 2 mL untuk mengukur konsentrasi fenol di dalam air.
  - b) Pengambilan sampel dilakukan setiap 5 menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 100 mL untuk mengukur pH dengan menggunakan pH meter dan kadar oksigen terlarut dengan menggunakan DO meter, sampel air kemudian dikembalikan ke dalam reservoir.
  - c) Pengambilan sampel dilakukan setiap 5 menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 5) sebanyak 200 mL untuk mengukur kadar ozon terlarut dalam air dengan

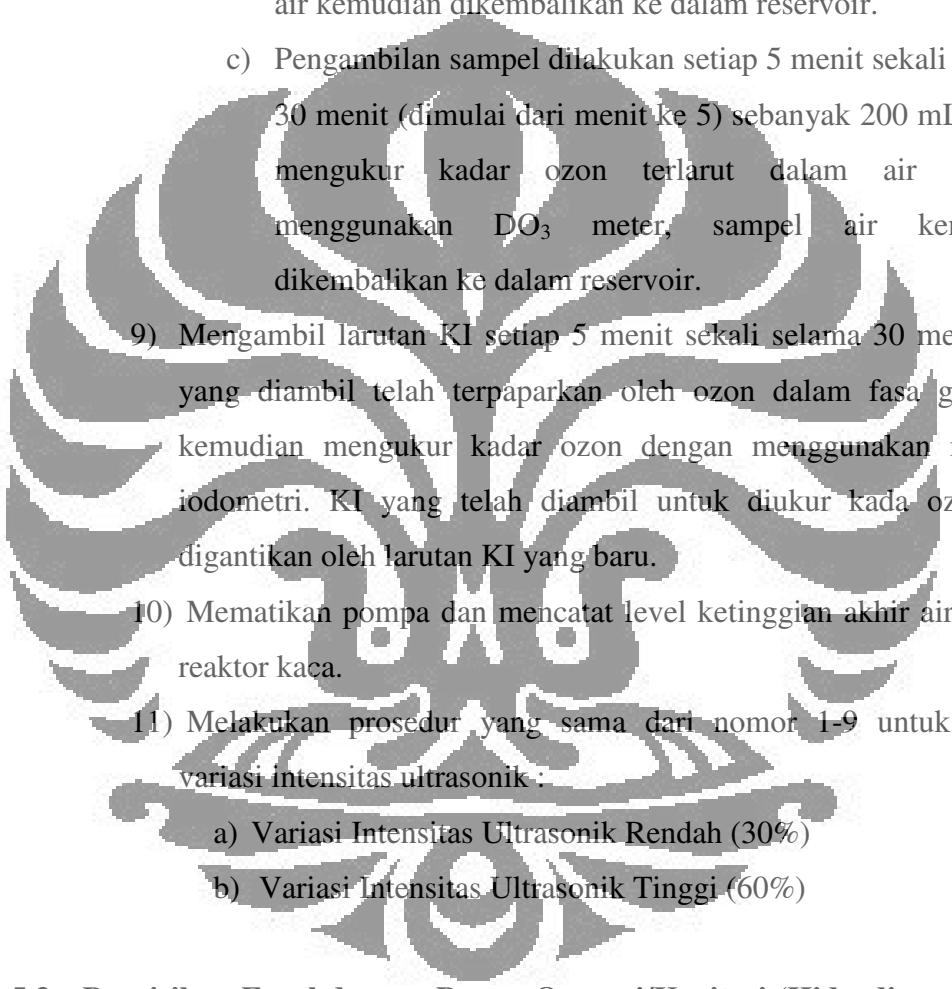
menggunakan DO<sub>3</sub> meter, sampel air kemudian dikembalikan ke dalam reservoir.

- 9) Mengambil larutan KI setiap 5 menit sekali selama 30 menit. KI yang diambil telah terpaparkan oleh ozon dalam fasa gas dan kemudian mengukur kadar ozon dengan menggunakan metode iodometri. KI yang telah diambil untuk diukur kadar ozonnya, digantikan oleh larutan KI yang baru.
- 10) Mematikan pompa dan mencatat level ketinggian akhir air dalam reaktor kaca.
- 11) Melakukan prosedur yang sama dari nomor 1-9 untuk setiap variasi laju alir gas (O<sub>G</sub>) :
  - a) Laju alir gas 200 L/jam.
  - b) Laju alir gas 400 L/jam.
  - c) Laju alir gas 600 L/jam.

### **3.5.2. Penyisihan Fenol dengan Proses Ozonasi/Kavitasi (Hidrodinamik dan Ultrasonik) dengan Variasi Intensitas Ultrasonik**

Adapun prosedur dari penelitian ini adalah :

- 1) Mengisi reservoir dengan aquadest sebanyak 7 L.
- 2) Menambahkan HCl 6 M ke dalam reservoir hingga diperoleh kondisi asam (pH pada sistem berkisar 3).
- 3) Menambahkan larutan induk fenol yang memiliki konsentrasi 10.000 ppm ke dalam reservoir sebanyak 70 mL hingga diperoleh konsentrasi awal fenol di dalam sistem sebesar 100 ppm.
- 4) Menyalakan pompa untuk memulai sirkulasi larutan di dalam sistem.
- 5) Mengatur valve menuju sistem dan valve *by-pass* sehingga diperoleh kecepatan aliran air sebesar 3 L/menit.
- 6) Menginjeksikan ozon ke dalam air dengan mengatur laju alir ozon sebesar 400 L/jam.
- 7) Mengukur ketinggian awal air dalam reaktor kaca.
- 8) Mengambil sampel air dari sample port.

- 
- a) Pengambilan sampel dilakukan setiap 5 menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 2 mL untuk mengukur konsentrasi fenol di dalam air.
  - b) Pengambilan sampel dilakukan setiap 5 menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 100 mL untuk mengukur pH dengan menggunakan pH meter dan kadar oksigen terlarut dengan menggunakan DO meter, sampel air kemudian dikembalikan ke dalam reservoir.
  - c) Pengambilan sampel dilakukan setiap 5 menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 5) sebanyak 200 mL untuk mengukur kadar ozon terlarut dalam air dengan menggunakan  $DO_3$  meter, sampel air kemudian dikembalikan ke dalam reservoir.
- 9) Mengambil larutan KI setiap 5 menit sekali selama 30 menit. KI yang diambil telah terpaparkan oleh ozon dalam fasa gas dan kemudian mengukur kadar ozon dengan menggunakan metode iodometri. KI yang telah diambil untuk diukur kada ozonnya, digantikan oleh larutan KI yang baru.
  - 10) Mematikan pompa dan mencatat level ketinggian akhir air dalam reaktor kaca.
  - 11) Melakukan prosedur yang sama dari nomor 1-9 untuk setiap variasi intensitas ultrasonik :
    - a) Variasi Intensitas Ultrasonik Rendah (30%)
    - b) Variasi Intensitas Ultrasonik Tinggi (60%)

### **3.5.3. Penyisihan Fenol dengan Proses Ozonasi/Kavitasi (Hidrodinamik dan Ultrasonik) dengan Variasi Konsentrasi Awal Fenol ( $C_{p0}$ )**

Adapun prosedur dari penelitian ini adalah :

- 1) Mengisi reservoir dengan aquadest sebanyak 7 L.
- 2) Menambahkan HCl 6 M ke dalam reservoir hingga diperoleh kondisi asam (pH pada sistem berkisar 3).

- 3) Menambahkan larutan induk fenol yang memiliki konsentrasi 10.000 ppm ke dalam reservoir. Penambahan larutan induk fenol bergantung pada konsentrasi fenol yang diinginkan.
  - Untuk variasi konsentrasi awal fenol 100 ppm ditambahkan 70 mL larutan induk fenol.
  - Untuk konsentrasi awal fenol 50 ppm ditambahkan 35 mL larutan induk fenol.
  - Untuk konsentrasi fenol 7 ppm ditambahkan 4,9 mL larutan induk fenol.
- 4) Menyalakan pompa untuk memulai sirkulasi larutan di dalam sistem.
- 5) Mengatur valve menuju sistem dan valve *by-pass* sehingga diperoleh kecepatan aliran air sebesar 3 L/menit.
- 6) Menginjeksikan ozon ke dalam air dengan mengatur laju alir ozon sebesar 400 L/jam.
- 7) Mengukur ketinggian awal air dalam reaktor kaca.
- 8) Mengambil sampel air dari sample port.
  - a) Pengambilan sampel dilakukan setiap 5 menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 2 mL untuk mengukur konsentrasi fenol di dalam air.
  - b) Pengambilan sampel dilakukan setiap 5 menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 100 mL untuk mengukur pH dengan menggunakan pH meter dan kadar oksigen terlarut dengan menggunakan DO meter, sampel air kemudian dikembalikan ke dalam reservoir.
  - c) Pengambilan sampel dilakukan setiap 5 menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 5) sebanyak 200 mL untuk mengukur kadar ozon terlarut dalam air dengan menggunakan  $DO_3$  meter, sampel air kemudian dikembalikan ke dalam reservoir.
- 9) Mengambil larutan KI setiap 5 menit sekali selama 30 menit. KI yang diambil telah terpaparkan oleh ozon dalam fasa gas dan

kemudian mengukur kadar ozon dengan menggunakan metode iodometri. KI yang telah diambil untuk diukur kada ozonnya, digantikan oleh larutan KI yang baru.

- 10) Mematikan pompa dan mencatat level ketinggian akhir air dalam reaktor kaca.
- 11) Melakukan prosedur yang sama dari nomor 1-9 untuk setiap variasi konsentrasi awal fenol ( $C_{p0}$ ) :
  - a) Konsentrasi awal fenol 7 ppm.
  - b) Konsentrasi awal fenol 50 ppm.
  - c) Konsentrasi awal fenol 100 ppm.

#### **3.5.4. Penyisihan Fenol dengan Proses Ozonasi/Kavitasi (Hidrodinamik dan Ultrasonik) dengan Variasi Jenis Asam**

Adapun prosedur dari penelitian ini adalah :

- 1) Mengisi reservoir dengan aquadest sebanyak 7 L.
- 2) Menambahkan larutan asam ke dalam reservoir hingga diperoleh kondisi asam (pH pada sistem berkisar 3).
- 3) Menambahkan larutan induk fenol yang memiliki konsentrasi 10.000 ppm ke dalam reservoir sebanyak 70 mL hingga diperoleh konsentrasi awal fenol di dalam sistem sebesar 100 ppm.
- 4) Menyalakan pompa untuk memulai sirkulasi larutan di dalam sistem.
- 5) Mengatur valve menuju sistem dan valve *by-pass* sehingga diperoleh kecepatan aliran air sebesar 3 L/menit.
- 6) Menginjeksikan ozon ke dalam air dengan mengatur laju alir ozon sebesar 400 L/jam.
- 7) Mengukur ketinggian awal air dalam reaktor kaca.
- 8) Mengambil sampel air dari sample port.
  - d) Pengambilan sampel dilakukan setiap 5 menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 2 mL untuk mengukur konsentrasi fenol di dalam air.

- e) Pengambilan sampel dilakukan setiap 5 menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 100 mL untuk mengukur pH dengan menggunakan pH meter dan kadar oksigen terlarut dengan menggunakan DO meter, sampel air kemudian dikembalikan ke dalam reservoir.
- f) Pengambilan sampel dilakukan setiap 5 menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 5) sebanyak 200 mL untuk mengukur kadar ozon terlarut dalam air dengan menggunakan DO<sub>3</sub> meter, sampel air kemudian dikembalikan ke dalam reservoir.
- 9) Mengambil larutan KI setiap 5 menit sekali selama 30 menit. KI yang diambil telah terpapar oleh ozon dalam fasa gas dan kemudian mengukur kadar ozon dengan menggunakan metode iodometri. KI yang telah diambil untuk diukur kadar ozonnya, digantikan oleh larutan KI yang baru.
- 10) Mematikan pompa dan mencatat level ketinggian akhir air dalam reaktor kaca.
- 11) Melakukan prosedur yang sama dari nomor 1-9 untuk setiap variasi jenis asam yang digunakan :
  - a) Asam Klorida 6 M
  - b) Asam Sitrat 6 M

### 3.6. Analisis Sampel

Parameter yang hendak dianalisis dari sampel adalah konsentrasi fenol, konsentrasi ozon pada keluaran gas (*off gas*), dan konsentrasi hidrogen peroksida (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).

#### 3.6.1. Analisis Konsentrasi Fenol

Sampel air diambil dari *sample port* bagian atas reaktor kaca. Sampel diambil setiap selang waktu 5 menit selama 30 menit (dimulai dari menit ke-0).



### 3.6.1.1. Alat

Peralatan yang digunakan pada analisis ini adalah:

1. Kuvet
2. Tabung reaksi 70 mL
3. Beaker glass 250 ml
4. Pipet ukur 0,1 ml, 1 ml dan 5 ml.
5. Kaca arloji
6. Pengaduk besi

### 3.6.1.2. Bahan

Bahan yang digunakan dalam analisa ini adalah:

1. 4-aminoantipirin
2.  $K_3Fe(CN)_6$
3.  $NH_4OH$  0.5 N
4. Buffer fosfat
5. Aquadest

### 3.6.1.3. Prosedur

Untuk analisis konsentrasi fenol dilakukan metode aminoantipirin dengan menggunakan spektrofotometer sinar tampak pada panjang gelombang 500 nm. Analisis konsentrasi fenol di dalam larutan dilakukan dengan metode aminoantipirin dengan prosedur sebagai berikut :

- Mengambil 1 mL larutan sampel.
- Ke dalam masing-masing tabung dimasukkan 9 mL aquadest.
- Menambahkan 0,26 mL larutan  $NH_4OH$  0,5N pada masing-masing labu.
- Menambahkan 0,24 mL larutan buffer fosfat.
- Menambahkan 0,1 mL 4-aminoantipirin 2% pada masing-masing labu.
- Menambahkan 0,1 mL  $K_3Fe(CN)_6$  8% pada masing-masing labu.

Metode aminoantipirin ini mereaksikan fenol dengan 4-aminoantipirin dengan adanya kehadiran Ikalium heksasianoferat ( $K_3Fe(CN)_6$ ) pada suasana basa (pH diatur berkisar  $7,9 \pm 0,1$  dengan menambahkan larutan penyangga fosfat). Reaksi ini akan menghasilkan antipirin yang berwarna. Absorbansi warna yang

dihasilkan dari reaksi inilah yang akan diukur dengan spektrofotometer pada panjang gelombang 500 nm. Konsentrasi fenol terukur didapatkan dengan membandingkan absorbansi yang didapat dengan kurva kalibrasi absorbansi yang sebelumnya telah dibuat.

### 3.6.2. Analisis Konsentrasi Ozon pada Keluaran Gas (*Off Gas*)

Sampel yang diambil merupakan sampel KI yang telah terpapar oleh ozon dalam fasa gas. Sampel diambil setiap selang waktu 5 menit selama 30 menit (dimulai dari menit ke-5).

#### 3.6.2.1. Alat

Peralatan yang digunakan dalam analisa ini adalah:

1. Buret 50 ml
2. Statip
3. Beaker glass 50 ml, 500 ml
4. Labu erlenmeyer 500 ml, 1000 ml
5. Gelas ukur 70 mL, 50 ml
6. Labu ukur 250 ml, 1000 ml

#### 3.6.2.2. Bahan

Bahan yang digunakan dalam analisa ini adalah:

1. Kalium iodida (KI) 0,12 N
2.  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
3.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  2 N
4. Indikator amylum

#### 3.6.2.3. Prosedur

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui apakah gas keluaran dari reaktor kaca masih banyak mengandung ozon atau tidak. Analisis gas keluaran dilakukan dengan metode KI (iodometri) dengan prosedur sebagai berikut :

- Menambahkan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  2 N sebanyak 4 mL ke dalam larutan KI yang telah terpapar ozon.

- Menambahkan indikator amilum sebanyak 3 tetes hingga larutan KI menjadi berwarna biru.
- Menitrasi sampel (larutan KI) dengan  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  hingga larutan menjadi bening.
- Mencatat volume  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  yang digunakan untuk menitrasi sampel.

### 3.6.3. Analisis Konsentrasi Hidrogen Peroksida ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )

Sampel diambil dari bagian atas *sample port* pada reaktor kaca. Sampel diambil setiap selang waktu 5 menit selama 30 menit (dimulai dari menit ke-0).

#### 3.6.3.1. Alat

Peralatan yang digunakan dalam analisa ini adalah:

1. Kuvet
2. Tabung reaksi 70 mL
3. Beaker glass 250 ml
4. Pipet
5. Pipet ukur 0,1 ml, 1 ml dan 5 ml.

#### 3.6.3.2. Bahan

Bahan yang digunakan dalam analisa ini adalah:

1. KI 2%
2. Indikator *toluidine blue* 0.01%
3. HCl 2 M
4.  $\text{CH}_3\text{COONa}$  2M
5. Aquadest

#### 3.6.3.3. Prosedur

Analisa kandungan  $\text{H}_2\text{O}_2$  dilakukan dengan menggunakan spektrofotometer. Prinsip yang digunakan adalah mereaksikan  $\text{H}_2\text{O}_2$  dengan KI dalam medium asam sehingga menghasilkan iodin yang akan melunturkan warna biru dari toluidin blue yang memiliki absorbansi maksimum pada 628 nm. Adapun prosedur percobaannya adalah :

- Menambahkan sampel sebanyak 5 tetes ke dalam tabung reaksi.
- Menambahkan 1 mL KI 2% ke dalam masing-masing sampel.
- Menambahkan 1 mL HCl 2 M ke dalam masing-masing sampel.
- Menambahkan 0,5 ml *toluidine blue* ke dalam masing-masing sampel.
- Menambahkan 2 ml CH<sub>3</sub>COONa 2M ke dalam masing-masing sampel.
- Mengaduk perlahan masing-masing sampel.
- Mengukur absorbansi masing-masing sampel pada panjang gelombang 628 nm.

### 3.7. Pengolahan Data

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai prosedur pengolahan data yang dilakukan dalam penelitian ini.

#### 3.7.1. Persentase Penyisihan Fenol

Data persentase penyisihan fenol yang telah didapat dari masing-masing variasi penelitian kemudian dibuat dalam bentuk grafik dengan memplotkan antara persentase penyisihan fenol ( $C/C_0$ ) (sumbu y) terhadap waktu (sumbu x).

#### 3.7.2. Konsentrasi Ozon Terlarut Terhadap Waktu (Ozon Residual)

Data konsentrasi ozon terlarut yang didapatkan dari masing-masing variasi penelitian kemudian dibuat dalam bentuk grafik dengan memplotkan antara konsentrasi ozon terlarut (sumbu y) terhadap waktu (sumbu x).

#### 3.7.3. Konsentrasi Ozon pada Keluaran Gas (*Off Gas*) Terhadap Waktu

Data konsentrasi ozon pada keluaran gas (*off gas*) yang didapatkan dari masing-masing variasi penelitian ini kemudian dibuat dalam bentuk grafik dengan memplotkan antara konsentrasi ozon pada keluaran gas (sumbu y) terhadap waktu (sumbu x).

#### **3.7.4. Konsentrasi Hidrogen Peroksida ( $H_2O_2$ ) Terhadap Waktu**

Data konsentrasi  $H_2O_2$  yang didapatkan dari masing-masing variasi penelitian kemudian dibuat dalam bentuk grafik dengan memplotkan antara konsentrasi  $H_2O_2$  (sumbu y) terhadap waktu (sumbu x).

#### **3.7.5. pH Terhadap Waktu**

Data pH yang didapatkan dari masing-masing variasi penelitian kemudian dibuat dalam bentuk grafik dengan memplotkan antara pH (sumbu y) terhadap waktu (sumbu x).

#### **3.7.6. Konsentrasi Oksigen Terlarut (*Dissolve Oxygen*) Terhadap Waktu**

Dari konsentrasi oksigen terlarut dari masing-masing variasi penelitian kemudian dibuat dalam bentuk grafik dengan memplotkan antara konsentrasi oksigen terlarut (sumbu y) terhadap waktu (sumbu x).

#### **3.7.7. Temperatur Terhadap Waktu**

Data temperatur yang didapatkan dari penelitian ini kemudian dibuat dalam bentuk grafik dengan memplotkan antara temperatur (sumbu y) terhadap waktu (sumbu x).

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Tujuan dari penelitian ini untuk menganalisa proses penyisihan fenol dengan menggunakan proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) pada kondisi asam. Parameter yang diamati dalam penelitian ini adalah persentase penyisihan fenol, konsentrasi ozon terlarut (ozon residual), konsentrasi ozon pada keluaran gas (*off gas*), konsentrasi hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ), konsentrasi oksigen terlarut (*dissolve oxygen*), pH, dan temperatur. Parameter-parameter ini akan diukur untuk masing-masing variasi proses penelitian, yaitu: variasi laju alir gas ( $Q_G$ ), intensitas ultrasonik, konsentrasi awal fenol ( $C_{p0}$ ), dan jenis asam yang digunakan.

#### 4.1. Variasi Laju Alir Gas ( $Q_G$ )

Pada proses ozonasi, kondisi pH sangat berpengaruh terhadap persentase penyisihan (degradasi) senyawa fenol. Ozon dapat mendegradasi senyawa organik dengan dua cara, yaitu dengan reaksi langsung (*direct selective reaction*) pada kondisi asam, dan reaksi tidak langsung dengan senyawa radikal bebas ( $OH\cdot$ ) yang terbentuk dari dekomposisi ozon.

Pada penelitian ini, pH diatur sedemikian rupa sehingga diperoleh kondisi asam (pH 4.3). Pada kondisi asam, reaksi langsung oleh ozon lebih dominan, sehingga ozon akan mengoksidasi langsung senyawa fenol. Penambahan proses kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) akan membentuk gelembung mikro yang akan memperbesar luas permukaan kontak sehingga meningkatkan perpindahan massa ozon ke dalam larutan. Selain itu, penggabungan proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) menghasilkan kondisi ekstrem (hotspot). Keberadaan hotspot ini akan memperbanyak jumlah radikal hidroksil ( $\cdot OH$ ) yang dihasilkan yang akan meningkatkan proses penyisihan fenol.

Kavitasi akan menghasilkan gelembung mikro pada air sehingga molekul gas dari air yang terjebak dalam gelembung yang tereksansi akan pecah dan menghasilkan senyawa radikal bebas yang sangat reaktif seperti radikal hidroksil ( $\cdot OH$ ) sesuai dengan persamaan sebagai berikut (N.H. Ince, 2000):



Radikal hidroksil yang dihasilkan ini dapat bereaksi di dalam gelembung atau saling berekombinasi pada daerah yang lebih dingin seperti pada permukaan gelembung atau pada fasa ruah larutan untuk menghasilkan hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ). Sedangkan penggabungan antara ozonasi/kavitasi akan memperbesar pembentukan radikal hidroksil melalui dekomposisi ozon di dalam gelembung sesuai dengan persamaan :



Atom oksigen yang terbentuk akan bereaksi dengan uap air dan membentuk radikal OH:



Penggabungan antara ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) lebih efektif melihat bahwa radikal hidroksil yang dihasilkan berjumlah dua molekul per satu molekul ozon yang digunakan (Mason, 2001). Berdasarkan penjelasan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa mekanisme pembentukan radikal hidroksil pada penggabungan ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) berasal dari tiga sumber, yaitu :

1. Dekomposisi ozon di dalam larutan.
2. Dekomposisi termal uap air di dalam gelembung mikro.
3. Dekomposisi termal ozon di dalam gelembung mikro.

Penyisihan fenol melalui proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) ini sebagian besar terjadi pada fasa ruah larutan (*bulk solution*), hal ini dikarenakan sifat fenol yang *hidrofilik* (suka akan air). Fenol adalah senyawa yang mudah larut dalam air dan memiliki tekanan uap yang rendah (Chowdhury, 2008) sehingga fenol sukar untuk berdifusi ke dalam gelembung kavitasi dan cenderung berada pada fasa ruah larutan.

Dari penjelasan di atas, maka dapat disimpulkan bahwa penyisihan senyawa fenol dengan menggabungkan proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) akan terjadi melalui dua cara, yaitu :

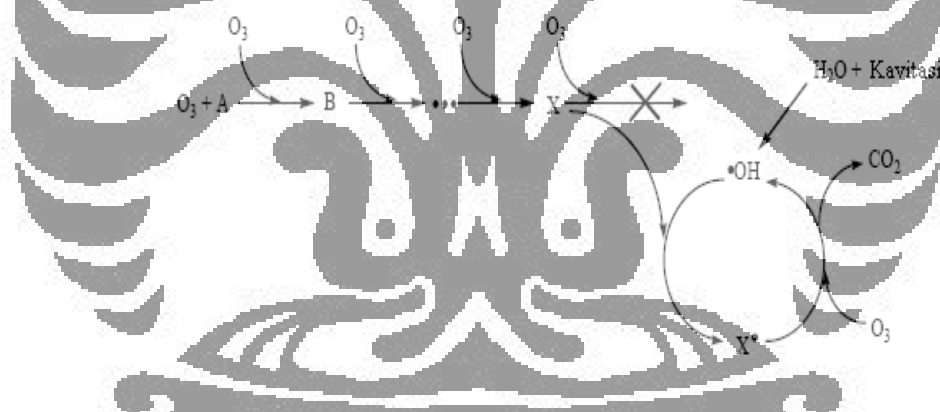
- Reaksi antara radikal hidroksil dan senyawa fenol pada fasa ruah larutan.
- Reaksi langsung oleh ozon dan hidrogen peroksida pada fasa ruah larutan.

Tahap ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh besarnya laju alir gas (ozon) terhadap proses penyisihan fenol. Penelitian ini dilakukan pada konsentrasi awal fenol 100 ppm, laju alir air 3 L/menit, volume awal 7 L, intensitas ultrasonik tinggi (60%), dan pH berkisar  $\pm 3$ . Laju alir gas yang diujikan pada penelitian ini adalah 200 L/jam, 400 L/jam, dan 600 L/jam.

Laju alir air 3 L/menit dipilih karena berdasarkan hasil penelitian transfer massa, laju alir ini memberikan hasil paling optimal. Pada laju alir air yang lebih kecil dikhawatirkan perpindahan massa tidak berlangsung dengan baik, sedang pada laju alir air yang lebih besar waktu tinggal air dalam reaktor akan menjadi lebih singkat sehingga perpindahan massa juga tidak berlangsung secara optimal.

#### 4.1.1. Persentase Penyisihan Fenol

Mekanisme reaksi fenol pada proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) adalah sebagai berikut :



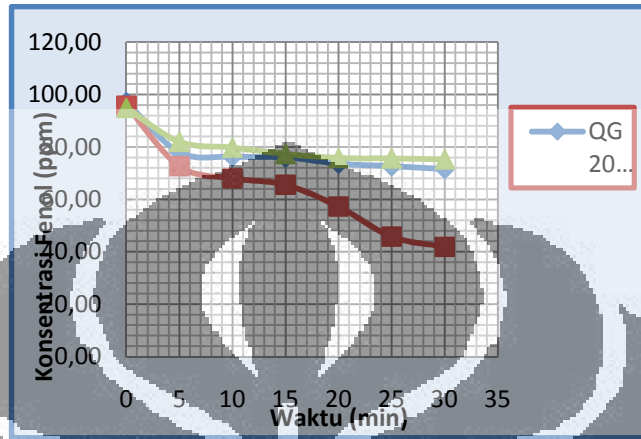
Gambar 4.1. Mekanisme reaksi fenol pada proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik)

Penyisihan fenol pada proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) terjadi melalui reaksi langsung antara fenol dengan ozon dan reaksi antara fenol dengan radikal hidroksil. Proses oksidasi dari fenol (A) dan produk samping fenol akan terjadi secara cepat di dalam larutan melalui reaksi langsung oleh ozon. Serangan langsung dari molekul ozon menghasilkan senyawa jenuh (X) yang tidak dapat dioksidasi lebih lanjut oleh ozon, tapi dapat dioksidasi melalui serangan radikal hidroksil dan membentuk radikal bebas hasil oksidasi (X<sup>\*</sup>). Radikal bebas hasil oksidasi inilah yang kemudian bisa teroksidasi lagi

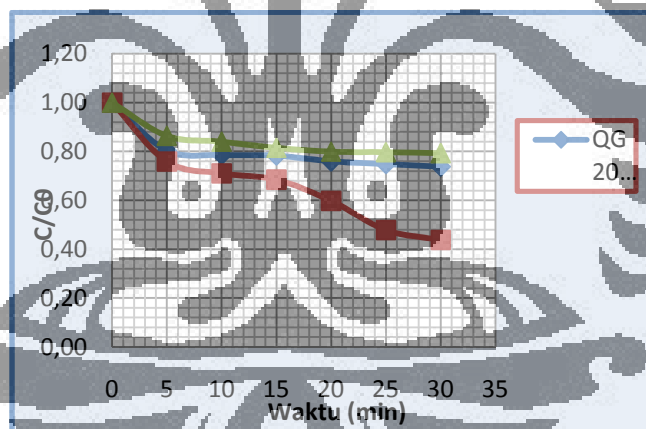


dengan ozon. Reaksi antara radikal bebas hasil oksidasi ( $X^{\cdot}$ ) dengan ozon akan membentuk radikal hidroksil yang akan meningkatkan proses penyisihan fenol dengan penggabungan ozonasi/kavitasi.

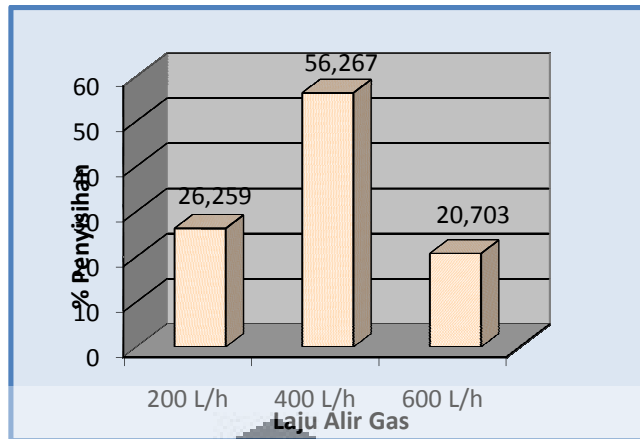
Konsentrasi fenol pada variasi laju alir gas dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Gambar 4. 2. Hubungan antara konsentrasi fenol dengan laju alir gas terhadap waktu



Gambar 4.3. Hubungan antara  $C/C_0$  dengan laju alir gas terhadap waktu



Gambar 4.4. Kurva persentase penyisihan fenol pada variasi laju alir gas

Pada Gambar 4.2, 4.3, dan 4.4 terlihat bahwa kurva konsentrasi fenol untuk setiap laju alir gas (200, 400, dan 600 L/jam) memiliki kecenderungan yang sama, yaitu akan terus mengalami penurunan. Penurunan konsentrasi fenol yang paling signifikan terlihat pada laju alir gas 400 L/jam, yaitu sebesar 56,27%. Untuk laju alir gas 200 dan 600 L/jam, persentase penyisihannya tidak terlalu berbeda jauh, yakni sebesar 26,26% untuk laju alir gas 200 L/jam dan 20,70% untuk laju alir gas 600 L/jam.

Hal ini dapat terjadi karena pada laju alir gas yang semakin besar, energi kinetik gas juga akan menjadi semakin besar. Bertambah besarnya energi kinetik ini mengakibatkan kemampuan gas untuk masuk/larut ke dalam fasa cair meningkat. Hal ini mendorong semakin banyaknya ozon yang larut ke dalam air yang akan mengoksidasi senyawa fenol. Akan tetapi, laju alir gas yang terlalu besar dapat mengakibatkan kontak antara ozon dengan air kurang optimal, sehingga perpindahan massa ozon dalam air pun kurang optimal. Selain itu, pada laju alir gas yang terlalu besar juga dapat menyebabkan waktu tinggal gas di dalam reaktor semakin cepat, sehingga kontak antara ozon dengan fenol pun kurang optimal.

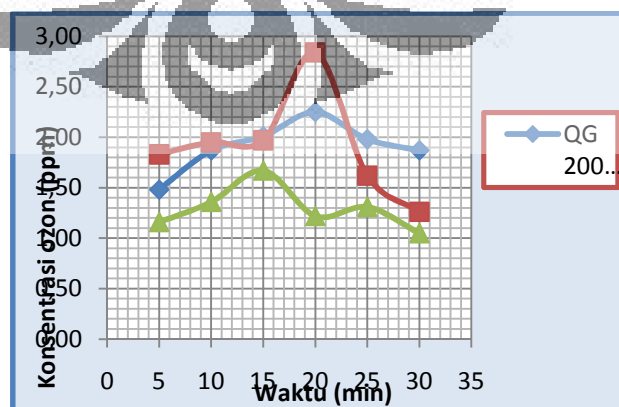
Berdasarkan hasil pengamatan selama penelitian, pada laju alir gas yang besar gelembung yang dihasilkan semakin besar pula. Hal ini diduga disebabkan oleh kecenderungan gelembung untuk saling bergabung pada laju alir gas yang lebih besar. Hal ini mengakibatkan perpindahan massa akan turun sehingga persentase penyisihan fenol pun kurang baik. Oleh karena itu, pada penelitian ini

laju alir gas yang paling ideal untuk penyisihan fenol sebesar 400 L/jam karena pada laju alir ini produktivitas ozon yang dihasilkan cukup tinggi dan perpindahan massa ozon paling optimal, yang ditandai dengan semakin banyaknya gelembung mikro yang terbentuk dibandingkan dua laju alir lainnya. Selain itu, pada laju alir gas 400 L/jam koefisien perpindahan massa ( $k_{La}$ ) juga paling tinggi yang didapatkan dari penelitian sebelumnya mengenai koefisien perpindahan massa ( $k_{La}$ ).

Selain mengambil data untuk mengetahui konsentrasi fenol, pada penelitian ini ada beberapa data lain yang diukur selama proses berlangsung. Adapun data-data lain yang diambil selama penelitian ini adalah konsentrasi ozon terlarut (ozon residual), konsentrasi ozon pada keluaran gas (*off gas*), konsentrasi hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ), pH, konsentrasi oksigen terlarut (*dissolve oxygen*), dan temperatur. Pada subbab ini, hanya akan ditampilkan data konsentrasi fenol, konsentrasi ozon terlarut (ozon residual), dan konsentrasi ozon pada keluaran gas (*off gas*). Sedangkan data-data lainnya akan ditampilkan pada subbab tersendiri.

#### 4.1.2. Konsentrasi Ozon Terlarut (Ozon Residual)

Ozon residual menyatakan banyaknya ozon yang tidak atau belum bereaksi dengan senyawa pencemar yang ada di dalam larutan. Konsentrasi ozon residual pada proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) untuk penyisihan fenol dengan variasi laju alir gas ( $Q_G$ ) dapat dilihat pada Gambar 4.5 di bawah ini :



Gambar 4.5. Hubungan antara konsentrasi ozon terlarut dengan laju alir gas terhadap waktu

Berdasarkan Gambar 4.5 diatas, didapatkan data bahwa konsentrasi ozon residual tertinggi diperoleh pada laju alir gas 400 L/jam, yang mencapai 2,84 ppm. Konsentrasi ozon residual menyatakan konsentrasi ozon yang tidak atau belum bereaksi dengan fenol. Konsentrasi ozon residual menyatakan efektivitas dari penyisihan fenol. Pada laju alir gas 400 L/jam diperoleh persentase penyisihan fenol tertinggi, yaitu sebesar 56,27%, dan ternyata konsentrasi ozon residual pada laju alir gas 400 L/h juga paling tinggi. Konsentrasi ozon pada laju alir gas tertinggi dikarenakan pada laju alir ini perpindahan massa antara ozon dengan air paling optimal dibandingkan kedua variasi laju alir gas lainnya karena kontak antara ozon dengan cairan paling optimal pada laju alir 400 L/jam.

Produktivitas ozon akan menurun dengan kenaikan laju alir gas. Berikut ini adalah data produktivitas ozon untuk setiap laju alir gas :

- Laju alir 200 L/jam = 12,74mg/L
- Laju alir 400 L/jam = 9,93 mg/L
- Laju alir 600 L/jam = 6,39 mg/L

Berdasarkan data produktivitas ozon di atas, seharusnya konsentrasi ozon terbesar diperoleh pada laju alir gas 200 L/jam. Namun ternyata konsentrasi tertinggi diperoleh pada laju alir gas 400 L/jam. Hal ini dapat terjadi dikarenakan pada laju alir 400 L/jam ada penambahan sekat pada masukkan reaktor yang mengakibatkan pembentukan gelembung mikro di dalam reaktor akan semakin banyak sehingga meningkatkan perpindahan massa ozon ke dalam larutan dan konsentrasi ozon terlarut pun akan semakin besar. Hal ini ditandai dengan semakin banyaknya gelembung mikro yang terlihat pada reaktor selama pengamatan penelitian.

Pada laju alir gas 600 L/jam konsentrasi ozon terlarut paling kecil. Hal ini dikarenakan produktivitas ozon pada 600 L/jam paling kecil sehingga konsentrasi ozon pun semakin kecil. Selain itu, pada laju alir 600 L/jam ini perpindahan massa ozon ke dalam cairan kurang optimal, hal ini ditandai dengan banyaknya gelembung besar pada reaktor kaca yang teramati selama proses penelitian berlangsung. Perpindahan massa kurang optimal sehingga konsentrasi ozon terlarut pada 600 L/jam pun akan semakin kecil. Pada laju alir gas yang kecil lebih banyak terbentuk gelembung mikro yang akan meningkatkan perpindahan

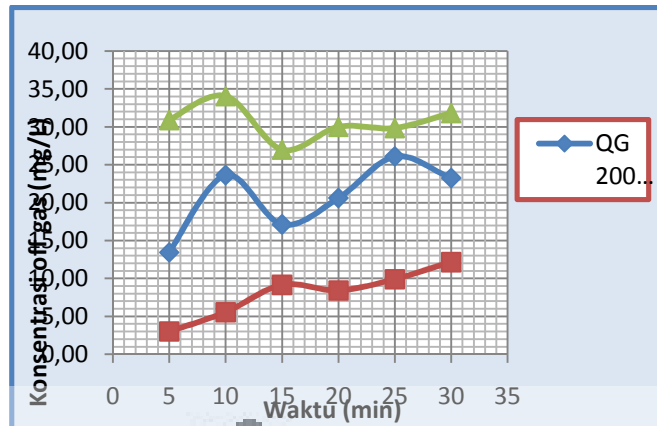
massa ozon. Hal ini juga didukung oleh penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, yaitu mengenai koefisien perpindahan massa ( $k_{La}$ ) ozon.

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, didapatkan hasil bahwa koefisien perpindahan massa ozon ( $k_{La}$ ) akan naik seiring dengan kenaikan laju alir gas, yang dikarenakan energi kinetik gas untuk larut dalam air juga meningkat.  $k_{La}$  pada laju alir gas 400 L/jam paling tinggi dibandingkan yang lainnya. Pada laju alir gas kecil banyak terdapat gelembung mikro sehingga meningkatkan perpindahan massa ozon ke dalam cairan sehingga  $k_{La}$  akan terus meningkat hingga laju alir gas 400 L/jam, kemudian mengalami penurunan yang tajam pada laju alir 600 L/jam. Hal ini juga dapat menjadi alasan dari penurunan konsentrasi ozon pada laju alir gas yang semakin besar, karena terjadi penurunan  $k_{La}$  pada laju alir 600 L/jam.

Ketiga kurva konsentrasi ozon residual di atas memiliki kecenderungan yang sama yaitu cenderung untuk naik kemudian turun. Pada awal proses ozon akan terdekomposisi ataupun langsung dengan fenol sehingga kenaikan konsentrasi ozon residual belum terlalu signifikan. Kemudian terjadi peningkatan yang cukup signifikan dari menit ke 15 hingga ke 20 karena konsentrasi fenol semakin berkurang namun laju alir gas tetap sehingga konsentrasi ozon cenderung mengalami peningkatan. Selain itu penyisihan fenol dengan ozon pada awal proses akan menghasilkan produk antara yang tidak dapat dioksidasi lebih lanjut oleh fenol dan hanya dapat dioksidasi oleh radikal hidroksil sehingga konsentrasi ozon residual meningkat. Kemudian setelah menit ke 20 konsentrasi ozon terlarut cenderung mengalami penurunan karena temperatur pada sistem semakin tinggi sehingga akan mendorong peningkatan laju dekomposisi ozon menjadi radikal hidroksil.

#### **4.1.3. Konsentrasi Ozon pada Keluaran Gas (*Off Gas*)**

Konsentrasi ozon pada keluaran gas (*off gas*) menyatakan jumlah ozon yang tidak terabsorpsi ke dalam larutan sehingga cenderung untuk keluar pada fasa gas. Berikut ini akan ditampilkan kurva konsentrasi *off gas* untuk variasi laju alir gas pada Gambar 4.6 di bawah ini :



Gambar 4.6. Hubungan antara konsentrasi *off gas* dengan laju alir gas terhadap waktu

Semakin rendahnya konsentrasi *off gas* menunjukkan bahwa ozon yang terabsorpsi ke dalam larutan untuk bereaksi dengan fenol semakin banyak dan proses penyisihan fenol juga akan semakin baik. Berdasarkan Gambar 4.6 untuk laju alir 400 L/jam memiliki konsentrasi *off gas* terkecil dibandingkan dengan laju alir lainnya. Pada laju alir gas 400 L/jam perpindahan massa ozon meningkat dikarenakan semakin banyaknya pembentukan gelembung mikro. Selain itu, berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya didapatkan hasil bahwa koefisien perpindahan massa ( $k_{La}$ ) untuk laju alir gas 400 L/jam paling tinggi dibandingkan pada laju alir yang lainnya. Dengan semakin tingginya  $k_{La}$ , maka menunjukkan bahwa perpindahan massa ozon ke dalam cairan meningkat sehingga ozon yang keluar dalam fasa gas pun akan semakin kecil.

Hal ini juga sesuai dengan pembahasan sebelumnya yang menyatakan bahwa persentase penyisihan fenol pada 400 L/jam lebih besar dibandingkan dua laju alir lainnya karena dengan laju alir ozon yang kontinu, konsentrasi *off gas* yang diperoleh paling kecil.

Sementara itu pada 600 L/jam konsentrasi *off gas* paling tinggi, hal ini dikarenakan pada laju alir ini produktivitas ozon paling kecil dan perpindahan massa ozon kurang optimal dikarenakan pada laju alir ini terbentuk gelembung-gelembung besar yang teramati selama penelitian berlangsung. Terbentuknya gelembung yang besar ini mengakibatkan kontak antara ozon dan cairan pun kurang optimal sehingga ozon banyak yang keluar dalam bentuk gas sehingga konsentrasi *off gas* pun lebih tinggi. Selain itu, berdasarkan penelitian sebelumnya

didapatkan hasil bahwa koefisien perpindahan massa ( $k_La$ ) ozon pada laju alir ini paling kecil dibandingkan dua laju alir lainnya.

## 4.2. Variasi Intensitas Ultrasonik

Penyisihan senyawa fenol melalui proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) sangat dipengaruhi oleh intensitas ultrasonik. Tahap ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh intensitas ultrasonik terhadap penyisihan fenol. Penelitian ini dilakukan pada konsentrasi awal limbah fenol 100 ppm, laju alir gas 400 L/jam, laju alir air 3 L/menit, volume awal 7 L, dan pH berkisar  $\pm 3$ . Pada penelitian ini digunakan variasi pada intensitas rendah (30%), dengan rentang frekuensi 30 – 100 kHz dan intensitas tinggi (60%), dengan rentang frekuensi 300 – 500 kHz. Laju alir gas yang dipilih adalah 400 L/jam, karena pada pembahasan sebelumnya telah didapatkan hasil penyisihan fenol terbesar diperoleh pada laju alir ini sehingga laju alir ini merupakan laju alir gas yang paling optimal.

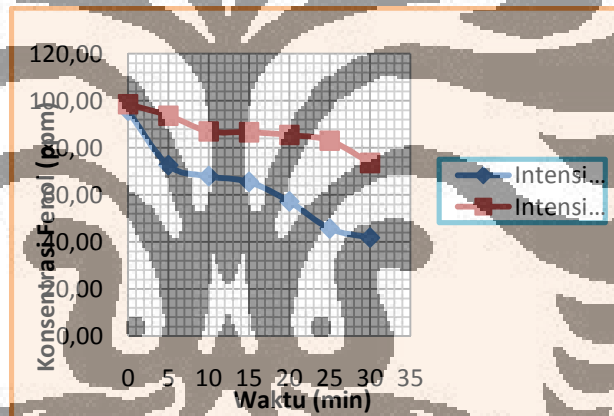
### 4.2.1. Persentase Penyisihan Fenol

Intensitas ultrasonik merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kavitasi. Intensitas ultrasonik akan mempengaruhi pembentukan gelembung mikro yang dihasilkan dari proses kavitasi. Pada intensitas rendah laju pertumbuhan gelembung akan lebih lambat, sementara pada intensitas tinggi pertumbuhan gelembung mikro sangat cepat karena siklus ekspansi dan kompresi pada intensitas tinggi lebih ekstrem (Ince, 2000).

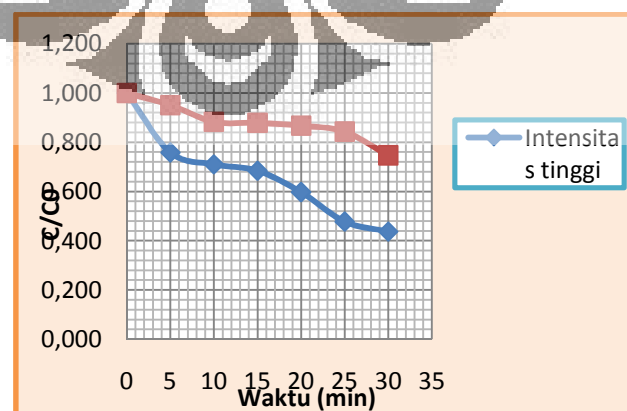
Intensitas ultrasonik juga akan mempengaruhi jenis kavitasi yang terjadi. Pada intensitas rendah gelembung yang dihasilkan lebih stabil dan memiliki waktu hidup yang lebih panjang, yaitu sekitar 10  $\mu$ s. Kavitasi jenis ini disebut sebagai *stable cavitation*. Pada kavitasi jenis ini tahap kehancuran gelembung akan tertunda hingga melewati beberapa siklus ekspansi dan kompresi. Pada intensitas ultrasonik tinggi akan menghasilkan gelembung dengan waktu hidup yang lebih singkat, yaitu hanya 0,4 $\mu$ s. Kavitasi jenis ini disebut sebagai *transient cavitation*. Pada jenis kavitasi ini, temperatur dan tekanan yang dihasilkan lebih tinggi. Energi yang dilepas ke sekitar pada *transient cavitation* jauh lebih besar dibandingkan dengan *stable cavitation*, yang disebabkan hancurnya gelembung

mikro pada *transient cavitation* lebih cepat dan dahsyat dibandingkan *stable cavitation*. Dengan semakin singkatnya waktu yang dibutuhkan gelembung mikro untuk hancur maka produksi radikal hidroksil juga akan lebih besar (Petrier, 1992).

Pada intensitas tinggi siklus kompresi dan ekspansi yang dialami gelembung juga lebih ekstrem sehingga gelembung-gelembung mikro tersebut akan cenderung untuk berosilasi terlebih dahulu di dalam larutan sebelum kemudian akhirnya pecah sehingga tranfer radikal hidroksil ke dalam larutan pun akan semakin besar karena adanya efek *microstreaming* ini (Hua dan Hoffman, 1997). Hasil percobaan penyisihan fenol pada proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) dengan variasi intensitas ultrasonik disajikan pada gambar di bawah ini :

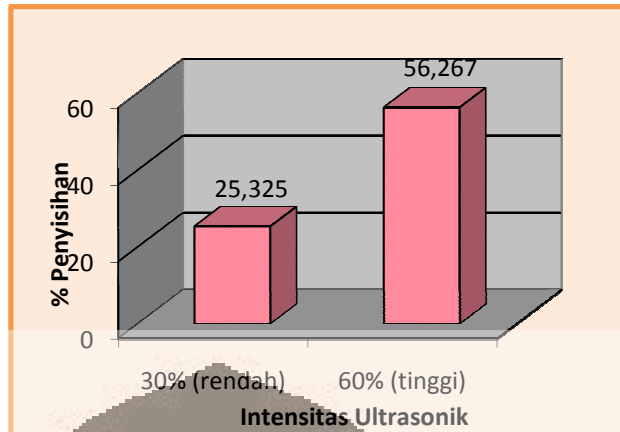


Gambar 4.7. Hubungan antara konsentrasi fenol dengan intensitas ultrasonik terhadap waktu



Gambar 4.8. Hubungan antara  $C/C_0$  dengan intensitas ultrasonik terhadap waktu





Gambar 4.9. Kurva persentase penyisihan fenol pada variasi intensitas ultrasonik

Pada Gambar 4.7 terlihat bahwa pada intensitas tinggi maupun intensitas rendah, konsentrasi fenol sama-sama memiliki kecenderungan untuk turun. Gambar diatas juga memperlihatkan bahwa pada 5 menit pertama proses, konsentrasi fenol pada intensitas tinggi langsung mengalami penurunan yang cukup signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa fenol langsung bereaksi baik secara langsung dengan ozon maupun dengan radikal hidroksil. Dari grafik 4.8 dan 4.9 di atas terlihat bahwa penyisihan fenol pada intensitas tinggi lebih besar dibandingkan intensitas rendah, dengan persentase penyisihan sebesar 56,27%. Sementara pada intensitas rendah persentase penyisihan fenol hanya sebesar 25,33%. Hal ini dikarenakan beberapa alasan sebagai berikut :

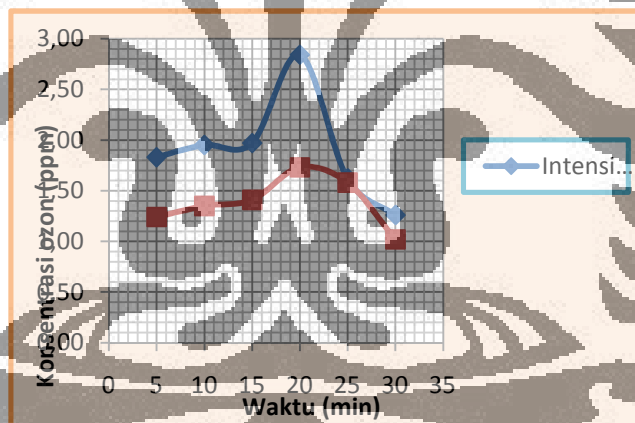
- Pada intensitas tinggi siklus ekspansi dan kompresi dari gelembung mikro akan lebih singkat sehingga waktu hidup gelembung mikro pun lebih singkat. Akibatnya akan meningkatkan pembentukan radikal hidroksil.
- Pada intensitas tinggi akan meningkatkan laju perpindahan massa ozon ke dalam larutan dikarenakan dengan gelembung yang dihasilkan memiliki ukuran lebih kecil dan karena adanya efek *microstreaming*.
- Pada intensitas tinggi kemungkinan radikal hidroksil untuk berpindah ke fasa ruah larutan semakin besar karena adanya efek *microstreaming* dari pecahnya gelembung mikro. Semakin banyaknya radikal hidroksil yang berada pada fasa ruah larutan akan meningkatkan penyisihan fenol. Seperti

yang telah dijelaskan sebelumnya, fenol merupakan senyawa yang bersifat hidrofilik sehingga proses penyisihan fenol akan lebih dominan terjadi pada fasa ruah larutan.

- Pada intensitas tinggi kavitasi yang terjadi adalah *transient cavitation*. Pada *transient cavitation* kenaikan temperatur akan lebih dahsyat dikarenakan pecahnya gelembung mikro yang lebih dahsyat pada *transient cavitation*. Kenaikan temperatur akan meningkatkan laju dekomposisi ozon sehingga proses penyisihan fenol akan semakin baik.

#### 4.2.2. Konsentrasi Ozon Terlarut (Ozon Residual)

Konsentrasi ozon terlarut atau ozon residual menyatakan konsentrasi ozon terlarut yang tidak atau belum bereaksi dengan fenol. Berikut ini akan ditampilkan kurva konsentrasi ozon terlarut (ozon residual) untuk variasi intensitas ultrasonik yang ditampilkan pada Gambar 4.10 berikut ini :



Gambar 4.10. Hubungan antara konsentrasi ozon terlarut (ozon residual) dengan intensitas ultrasonik terhadap waktu

Konsentrasi ozon residual dalam larutan diukur dengan menggunakan  $DO_3$  meter. Pada Gambar 4.10 di atas, terlihat bahwa konsentrasi ozon residual pada intensitas tinggi lebih besar dibandingkan pada intensitas rendah. Konsentrasi ozon terlarut pada intensitas tinggi lebih besar daripada pada intensitas rendah. Hal ini dikarenakan pada intensitas tinggi efek *microstreaming* pada larutan yang akan mendorong ozon dalam fasa gas untuk berpindah ke dalam fasa cair (larutan). Hal ini sesuai dengan pembahasan sebelumnya yang menyatakan bahwa

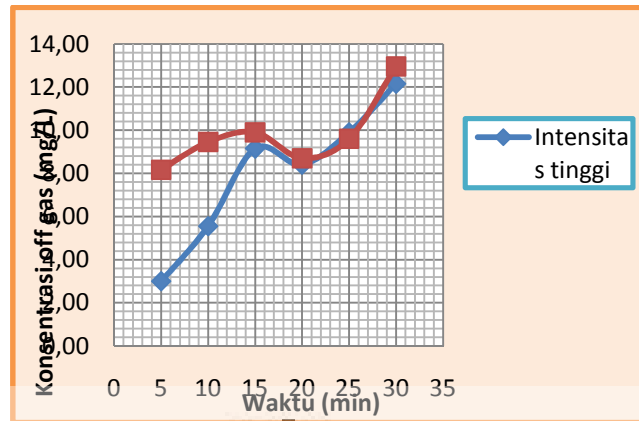
persentase penyisihan fenol pada intensitas tinggi lebih besar dibandingkan pada intensitas rendah.

Gambar 4.10 di atas juga memperlihatkan bahwa konsentrasi ozon residual pada kedua variasi (intensitas rendah dan tinggi) memiliki kecenderungan yang sama, yaitu cenderung untuk naik kemudian turun. Pada awal proses ozon akan terdekomposisi menjadi radikal hidroksil sehingga kenaikan konsentrasi ozon residual pada menit-menit awal proses tidak terlalu signifikan. Fenol akan bereaksi secara langsung dengan ozon maupun dengan radikal hidroksil. Kenaikan konsentrasi ozon diduga disebabkan konsentrasi awal fenol pada awal proses masih tinggi sehingga akan mendorong ozon dalam fasa gas untuk berpindah ke dalam fasa cair (larutan). Semakin lama konsentrasi fenol akan berkurang namun laju alir gas tetap sehingga konsentrasi ozon pun akan meningkat. Selain itu, semakin lama produk antara (*intermediate*) hasil oksidasi fenol dengan ozon akan semakin banyak. Produk antara ini tidak dapat dioksidasi lebih lanjut oleh ozon namun dapat dioksidasi oleh radikal hidroksil sehingga konsentrasi ozon mengalami kenaikan yang cukup signifikan pada menit ke 20.

Selanjutnya konsentrasi ozon akan mengalami penurunan hingga menit ke 30. Hal ini diduga disebabkan oleh konsentrasi fenol yang semakin berkurang seiring dengan waktu sehingga ozon dalam fasa gas akan semakin sedikit yang berpindah ke dalam fasa cair (larutan). Penurunan konsentrasi ozon terjadi karena temperatur dalam sistem meningkat sehingga dekomposisi ozon menjadi radikal hidroksil semakin besar dan konsentrasi ozon pun akan semakin kecil.

#### **4.2.3. Konsentrasi Ozon pada Keluaran Gas (*Off Gas*)**

Konsentrasi ozon pada keluaran gas (*off gas*) menyatakan seberapa banyak ozon yang tidak terabsorpsi ke dalam larutan. Semakin sedikit konsentrasi *off gas* maka proses penyisihan fenol akan semakin efektif. Berikut ini akan ditampilkan kurva konsentrasi *off gas* untuk variasi intensitas ultrasonik yang ditampilkan pada Gambar 4.11 berikut ini :



**Gambar 4.11.** Hubungan antara konsentrasi ozon pada keluaran gas (*off gas*) dengan intensitas ultrasonik terhadap waktu

Berdasarkan Gambar 4.11 di atas, terlihat bahwa pada intensitas rendah konsentrasi *off gas* lebih tinggi dibandingkan pada intensitas tinggi. Konsentrasi *off gas* berhubungan dengan persentase penyisihan fenol, dengan semakin rendah konsentrasi *off gas* maka persentase penyisihan fenol akan semakin baik. Hal ini sesuai dengan pembahasan sebelumnya yang menyatakan bahwa persentase penyisihan fenol terbaik diperoleh pada intensitas tinggi. Gambar 4.11 di atas juga menunjukkan bahwa penyisihan fenol pada proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) akan lebih efektif pada intensitas ultrasonik tinggi daripada pada intensitas rendah karena dengan laju alir gas dan produktivitas ozon yang sama konsentrasi *off gas* terendah diperoleh pada proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) dengan intensitas ultrasonik tinggi.

Konsentrasi *off gas* pada intensitas tinggi lebih besar daripada intensitas rendah, hal ini mengindikasikan bahwa ozon dalam fasa gas banyak yang berpindah ke dalam fasa cair (larutan). Hal ini dikarenakan pada intensitas tinggi perpindahan massa ozon dari fasa gas ke fasa cair akan semakin besar karena adanya efek *microstreaming* karena proses *transient cavitation* sehingga meningkatkan laju perpindahan massa ozon.

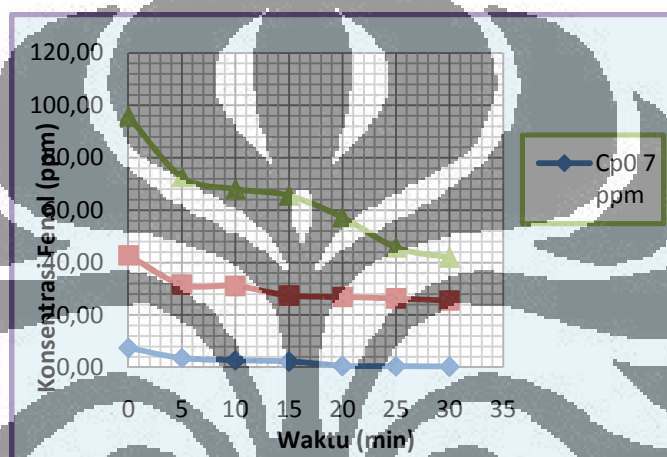
### 4.3. Variasi Konsentrasi Awal Fenol ( $C_{p0}$ )

Konsentrasi awal fenol yang diujikan dalam penelitian ini adalah 7, 50, dan 100 ppm. Tahap ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan penggabungan proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) pada variasi konsentrasi

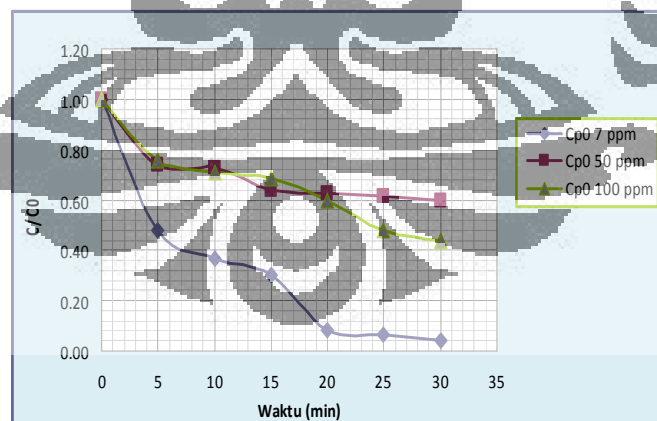
awal fenol dengan laju alir gas 400 L/jam, laju alir air 3 L/menit, volume 7 L, intensitas ultrasonik tinggi (60%), dan pH berkisar  $\pm 3$ . Laju alir air 3 L/menit dan laju alir gas 400 L/jam dipilih karena kedua laju alir ini paling optimal untuk proses penyisihan fenol.

#### 4.3.1. Persentase Penyisihan Fenol

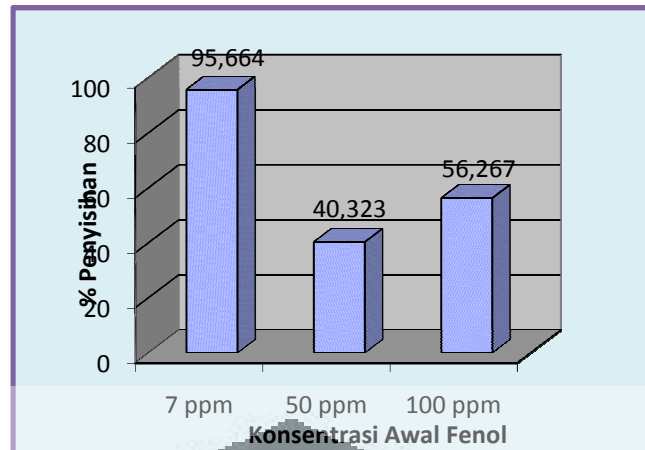
Hasil pengujian pengaruh konsentrasi awal terhadap persentase penyisihan fenol dapat dilihat pada Gambar 4.12, 4.13, dan 4.14 berikut ini :



**Gambar 4.12.** Hubungan antara konsentrasi fenol dengan konsentrasi awal fenol,  $C_{p0}$  terhadap waktu



**Gambar 4.13.** Hubungan antara  $C/C_0$  dengan konsentrasi awal fenol,  $C_{p0}$  terhadap waktu



Gambar 4.14. Kurva persentase penyisihan fenol pada variasi konsentrasi awal fenol,  $C_{p0}$

Berdasarkan gambar di atas, maka didapatkan hasil bahwa setelah 30 menit proses penyisihan fenol yang paling baik diperoleh pada konsentrasi awal fenol 7 ppm, dengan persentase penyisihan fenol sebesar 95,664%. Hal ini dikarenakan konsentrasi awal fenol yang terkandung dalam larutan sangat kecil, yakni hanya mencapai 7 ppm dalam 7 L larutan dengan laju alir ozon yang tetap. Dengan konsentrasi fenol dalam larutan yang kecil itu, yakni hanya 7 ppm, maka akan memudahkan proses penyisihan fenol oleh ozon.

Untuk konsentrasi awal fenol 50 ppm persentase penyisihan fenol lebih rendah dibandingkan dengan konsentrasi awal fenol 100 ppm. Pada konsentrasi 50 ppm dapat dilihat konsentrasi fenol di akhir proses tidak mengalami penurunan yang terlalu signifikan. Hal ini dapat dikarenakan semakin banyaknya produk antara dari proses ozonasi/kavitasi ini. Pada awal proses fenol akan langsung bereaksi baik dengan ozon ataupun dengan radikal hidroksil. Semakin lama, jumlah fenol akan semakin sedikit dan terjadi peningkatan produk antara dari proses penyisihan fenol. Produk antara yang dihasilkan ada yang sulit untuk di oksidasi lebih lanjut oleh ozon, sehingga hanya terjadi reaksi antara fenol dengan radikal hidroksil yang mengakibatkan penurunan fenol pada akhir proses tidak terlalu signifikan.

Peningkatan persentase penyisihan fenol dengan semakin besarnya konsentrasi awal fenol dapat disebabkan oleh perpindahan massa gas-liquid yang semakin baik. Pada konsentrasi awal fenol yang semakin besar maka akan mendorong ozon dalam fasa gas untuk berpindah ke dalam fasa cair (larutan).

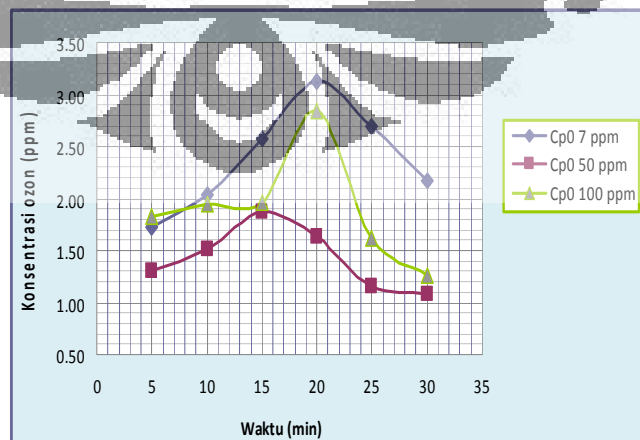
Dalam hal ini konsentrasi fenol berfungsi sebagai *driving force* untuk proses absorpsi ozon ke dalam cairan. Peningkatan absorpsi ozon ke dalam larutan akan mendorong pembentukan radikal hidroksil yang lebih banyak dari hasil dekomposisi ozon. Akibatnya persentase penyisihan fenol semakin besar pada konsentrasi awal fenol yang semakin tinggi. Selain itu dengan semakin tingginya konsentrasi awal fenol akan mengurangi kecenderungan radikal hidroksil untuk saling berikatan pada fasa ruah larutan sesuai dengan persamaan di bawah ini (Adewuyi, 2001):



Radikal hidroksil yang terbentuk pada fasa ruah larutan (*bulk solution*) akan cenderung untuk langsung bereaksi menyisihkan fenol daripada saling berekombinasi membentuk hidrogen peroksida ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) sehingga persentase penyisihan fenol juga akan semakin baik (Adewuyi, 2001). Hal ini dikarenakan konstanta laju reaksi fenol dengan radikal hidroksil ( $k = 6,6 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) lebih besar daripada konstanta laju reaksi radikal hidroksil untuk saling berekombinasi.

#### 4.3.2. Konsentrasi Ozon Terlarut (Ozon Residual)

Konsentrasi ozon terlarut (ozon residual) menyatakan sisa ozon yang belum atau tidak bereaksi dengan fenol. Pengaruh konsentrasi ozon terlarut (ozon residual) terhadap proses penyisihan fenol untuk variasi konsentrasi awal fenol ( $C_{p0}$ ) dapat dilihat pada Gambar 4.15 di bawah ini :



**Gambar 4.15.** Hubungan antara konsentrasi ozon terlarut dengan konsentrasi awal fenol,  $C_{p0}$  terhadap waktu

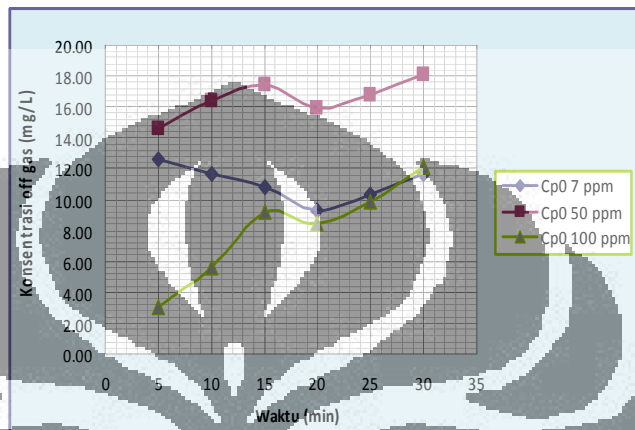
Gambar 4.15 diatas menunjukkan konsentrasi ozon residual untuk tiap variasi konsentrasi awal fenol yang berbeda. Berdasarkan kurva diatas, konsentrasi ozon residual tertinggi diperoleh pada konsentrasi awal fenol 7 ppm. Konsentrasi ozon residual menyatakan konsentrasi ozon yang belum atau tidak bereaksi dengan fenol sehingga pada konsentrasi 7ppm, fenol akan dengan cepat teroksidasi sehingga semakin lama jumlah ozon yang tidak bereaksi dengan fenol juga akan meningkat karena sudah tidak ada lagi fenol yang akan dioksidasi oleh ozon. Berdasarkan Gambar 4.15 di atas juga terlihat bahwa konsentrasi ozon terlarut pada 100 ppm lebih tinggi daripada 50 ppm. Konsentrasi ozon terlarut akan semakin tinggi dengan semakin tingginya konsentrasi awal fenol. Pada konsentrasi fenol yang tinggi akan meningkatkan perpindahan massa gas-cair, karena ozon pada fasa gas akan terdorong untuk berpindah ke dalam fasa cair (larutan).

Kurva konsentrasi ozon terlarut untuk kedua variasi  $C_{p0}$  juga memiliki kecenderungan yang sama, yaitu cenderung untuk naik kemudian mengalami penurunan yang cukup signifikan. Kenaikan kurva disebabkan pada awal proses ozon yang terlarut akan langsung bereaksi dengan fenol atau terdekomposisi menjadi radikal hidroksil. Pada  $C_{p0}$  100 ppm terjadi kenaikan yang cukup signifikan pada menit dari menit 15 hingga menit ke 20. Peningkatan ini dapat terjadi karena dua hal, yaitu karena konsentrasi fenol sudah cukup berkurang seiring dengan waktu dan dengan laju alir ozon yang tetap selama proses berlangsung maka konsentrasi ozon terlarut pun meningkat (persentase fenol sudah semakin menurun sehingga semakin sedikit ozon terlarut yang bereaksi dengan fenol), serta karena semakin tingginya temperatur yang akan meningkatkan pembentukan radikal hidroksil sehingga semakin banyak fenol yang bereaksi dengan radikal radikal dan kelarutan ozon di dalam air akan mengalami peningkatan. Setelah menit ke 20 konsentrasi ozon akan menurun karena temperatur pada sistem semakin tinggi sehingga mendorong dekomposisi ozon menjadi radikal hidroksil. Selain itu dengan semakin lamanya proses maka akan konsentrasi fenol semakin sedikit sehingga ozon dalam fasa gas juga akan semakin sedikit yang bergerak ke fasa cair (larutan).



### 4.3.3. Konsentrasi Ozon pada Keluaran Gas (*Off Gas*)

Berikut ini akan ditampilkan grafik konsentrasi ozon pada keluaran gas (*off gas*) untuk variasi konsentrasi awal fenol yang akan ditampilkan pada Gambar 4.16 berikut ini. Konsentrasi *off gas* menyatakan konsentrasi ozon yang tidak terabsorpsi dan cenderung keluar dalam fasa gas.



**Gambar 4.16.** Hubungan antara konsentrasi ozon pada keluaran gas (*off gas*) dengan konsentrasi awal fenol,  $C_{p0}$  terhadap waktu

Dapat dilihat pada Gambar 4.16 di atas bahwa kurva konsentrasi *off gas* untuk konsentrasi fenol 100 ppm memiliki nilai yang paling rendah. Konsentrasi *off gas* menyatakan ozon yang tidak terabsorpsi ke dalam larutan. Konsentrasi fenol yang semakin tinggi akan mendorong ozon dari fasa gas untuk pindah ke fasa cairan sehingga konsentrasi *off gas* akan lebih kecil pada konsentrasi fenol yang semakin tinggi. Konsentrasi *off gas* semakin kecil, maka ozon terlarut semakin besar dan persentase penyisihan fenol akan semakin tinggi. Pada konsentrasi 50 ppm konsentrasi *off gas* paling tinggi, namun berdasarkan teori seharusnya konsentrasi tertinggi ada pada konsentrasi 7 ppm karena konsentrasinya paling kecil sehingga perpindahan massa ozon ke dalam cairan pun semakin kecil. Hal ini dapat dikarenakan adanya kondisi proses penelitian yang tidak dapat diatur tetap sama. Pada penelitian ini, aliran *off gas* tidak dapat di atur pada kondisi yang sama.

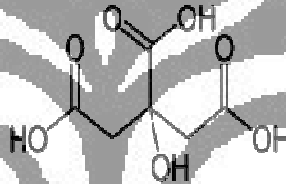
#### 4.4. Variasi Jenis Asam

Tahap ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan asam sitrat terhadap penyisihan fenol. Penelitian ini dilakukan pada konsentrasi awal limbah fenol 100 ppm, laju alir gas 400 L/jam, laju alir air 3 L/menit, volume awal 7 L, dan pH berkisar  $\pm 3$ . Pada penelitian ini digunakanlah asam sitrat yang menggantikan asam klorida (HCl) untuk membuat suasana asam pada sistem.

Laju alir air 3 L/menit dan laju alir gas yang dipilih 400 L/jam dipilih karena pada kedua laju alir ini persentase penyisihan fenol paling optimal.

##### 4.4.1. Persentase Penyisihan Fenol

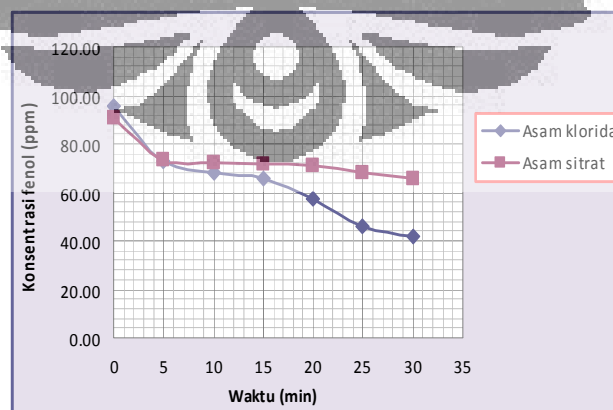
Asam sitrat merupakan jenis asam organik lemah dengan rumus kimia  $C_6H_8O_7$ . Struktur asam sitrat ditunjukkan pada gambar di bawah ini :



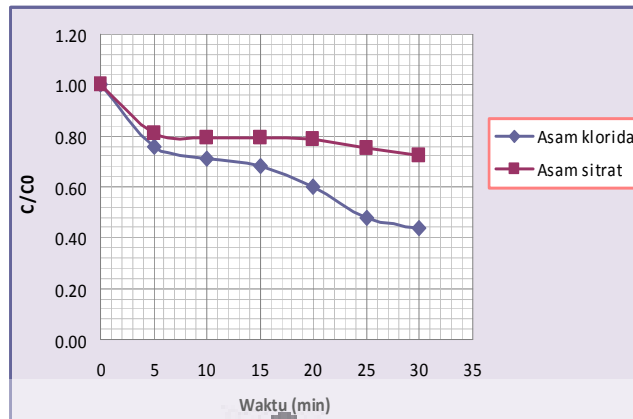
Gambar 4.17. Struktur asam sitrat

(Sumber: [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org))

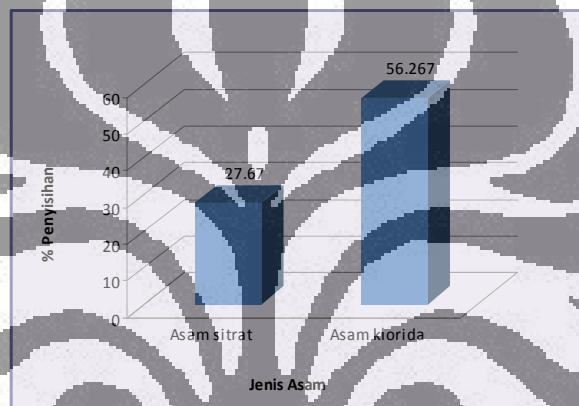
Hasil percobaan penyisihan fenol dengan proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) dengan penggunaan asam sitrat disajikan pada Gambar 4.18, 4.19, dan 4.20 sebagai berikut:



Gambar 4.18. Hubungan antara konsentrasi fenol dengan jenis asam terhadap waktu



Gambar 4.19. Hubungan antara  $C/C_0$  dengan jenis asam terhadap waktu



Gambar 4.20. Kurva persentase penyisihan fenol dengan variasi jenis asam

Berdasarkan gambar di atas, didapatkan hasil bahwa setelah 30 menit proses penyisihan fenol dengan menggunakan asam klorida lebih baik daripada penggunaan asam sitrat, dengan persentase penyisihan fenol sebesar 56,267%. Sedangkan untuk penyisihan fenol dengan menggunakan asam sitrat, hanya diperoleh persentase penyisihan fenol sebesar 27,670%. Hal ini mengindikasikan bahwa ternyata penggunaan asam klorida dalam proses penyisihan fenol memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan penggunaan asam sitrat. Hal ini dikarenakan asam sitrat merupakan asam organik sehingga penggunaan asam sitrat ini justru akan mengurangi keberhasilan proses penyisihan fenol ini. Asam sitrat merupakan senyawa organik, oleh karena itu ozon dan radikal hidroksil juga akan mendekomposisi asam sitrat. Sehingga terjadi persaingan antara fenol dan asam sitrat untuk bereaksi dengan ozon dan radikal hidroksil.

#### 4.5. Parameter – Parameter Lainnya

Selain parameter yang telah dijelaskan diatas, terdapat beberapa parameter lainnya dalam penelitian ini, yaitu :

##### 4.5.1. Konsentrasi Hidrogen Peroksida (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

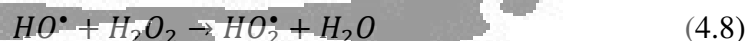
Parameter lain yang diukur dalam penelitian ini, yakni konsentrasi hidrogen peroksida (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Hidrogen peroksida dihasilkan dari rekombinasi antara radikal hidroksil dengan radikal hidroksil lainnya menurut reaksi sebagai berikut ini :



Konsentrasi hidrogen peroksida merupakan salah satu parameter penting untuk menentukan keberhasilan dari proses oksidasi lanjut untuk proses penyisihan polutan. Pada umumnya persentase penyisihan polutan akan meningkat dengan meningkatnya konsentrasi hidrogen peroksida (Kidak, R, 2007). Hidrogen peroksida merupakan senyawa yang memiliki peranan yang cukup menarik dalam dekomposisi ozon. Hidrogen peroksida merupakan agen inisiasi dari dekomposisi ozon dengan reaksi sebagai berikut (Lesko, 2004):



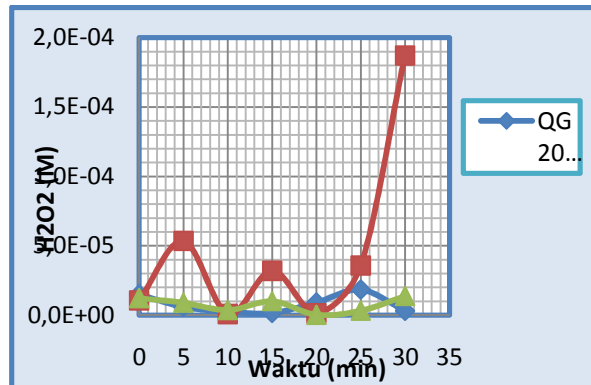
Reaksi di atas akan menginisiasi reaksi pembentukan radikal hidroksil. Hidrogen peroksida juga akan bertindak sebagai promotor sesuai dengan reaksi sebagai berikut (Beltran, 2004):



Hidrogen peroksida juga berfungsi sebagai *scavanger* yang akan bereaksi dengan radikal hidroksil dan menghasilkan radikal lain (Beltran, 2004).



Berdasarkan penjelasan di atas maka dapat disimpulkan bahwa hidrogen peroksida dapat berfungsi sebagai inisiator, promotor, dan juga sebagai *scavanger* dalam reaksi dekomposisi ozon ini. Hal inilah yang mengakibatkan hidrogen peroksida cenderung tidak stabil. Ketidakstabilan hidrogen peroksida ini dapat dilihat pada Gambar 4.21 berikut ini :



**Gambar 4.21.** Hubungan antara konsentrasi hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) dengan variasi laju alir gas terhadap waktu

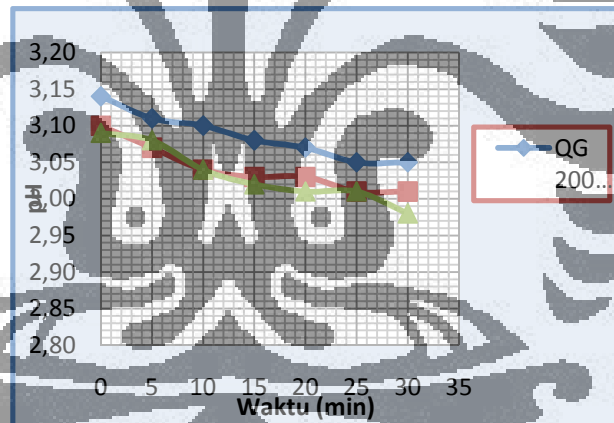
Berdasarkan gambar di atas dapat dilihat konsentrasi hidrogen peroksida untuk variasi laju alir gas ini cenderung naik dan turun. Hal ini menunjukkan bahwa kestabilan hidrogen peroksida masih sulit untuk diperkirakan. Konsentrasi hidrogen peroksida tertinggi diperoleh pada laju alir gas 400 L/jam walaupun kurvanya naik dan turun. Hal ini menunjukkan bahwa radikal OH paling banyak terbentuk pada proses penggabungan ini, sehingga persentase penyisihan fenol tertinggi diperoleh pada laju alir 400 L/jam. Selain itu konsentrasi hidrogen peroksida pada akhir proses untuk laju alir gas 400 L/jam memiliki kenaikan yang sangat signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa pada akhir proses konsentrasi fenol semakin sedikit sehingga radikal hidroksil cenderung untuk saling berekombinasi satu sama lain dan menghasilkan hidrogen peroksida sesuai dengan persamaan 4.5.

#### 4.5.2. pH

Pada penelitian ini pH awal larutan diatur dengan menambahkan larutan HCl 6 M sehingga diperoleh kondisi asam pada sistem (pH berkisar 3). Pengukuran pH untuk penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pH meter. Berdasarkan Gambar 4.22 dibawah ini terlihat bahwa untuk masing-masing variasi laju alir gas memiliki kecenderungan yang sama untuk pH, yaitu pH akan terus mengalami penurunan, walaupun penurunan pH yang terjadi selama proses penyisihan fenol berlangsung tidak terlalu signifikan. Kondisi yang sama juga berlaku untuk variasi penelitian yang lain sehingga kurva yang ditampilkan hanya

untuk variasi laju alir gas, namun kurva untuk variasi proses yang lainnya dapat dilihat pada bagian lampiran.

Penyisihan fenol dengan proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) akan mengoksidasi senyawa fenol sehingga menghasilkan produk antara (*intermediet*) yang bersifat asam, seperti asam karboksilat, asam oksalat, asam glikolat, dan lain-lain. Produk antara (*intermediet*) hasil degradasi fenol inilah yang mengakibatkan pH akan terus mengalami penurunan. Pada Gambar 4.22 ini dapat dilihat bahwa penurunan pH pada menit-menit awal cukup tajam. Hal ini dikarenakan adanya reaksi antara ozon dengan fenol yang menghasilkan produk antara yang bersifat asam yang tidak dapat di oksidasi lebih lanjut oleh ozon. Kemudian pada menit-menit akhir penurunan pH tidak terlalu signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa produk antara pada proses penyisihan fenol tersebut semakin menurun seiring dengan lamanya proses karena teroksidasi oleh radikal hidroksil.

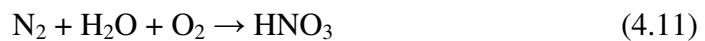


Gambar 4.22. Hubungan antara pH dengan variasi laju alir gas terhadap waktu

#### 4.5.3. Konsentrasi Oksigen Terlarut (*Dissolve Oxygen*)

Pengukuran oksigen terlarut (*dissolve oxygen*) pada penelitian ini menggunakan DO meter. Berdasarkan Gambar 4.23 di bawah ini, konsentrasi oksigen terlarut memiliki kecenderungan yang sama, yakni akan terus mengalami penurunan. Adapun penurunan kandungan oksigen terlarut yang terjadi diduga terjadi karena beberapa alasan, yaitu (i).Adanya reaksi antara nitrogen bebas ( $N_2$ )

di udara dengan air dan oksigen di dalam sistem. Adapun reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut (Lesko, 2004):



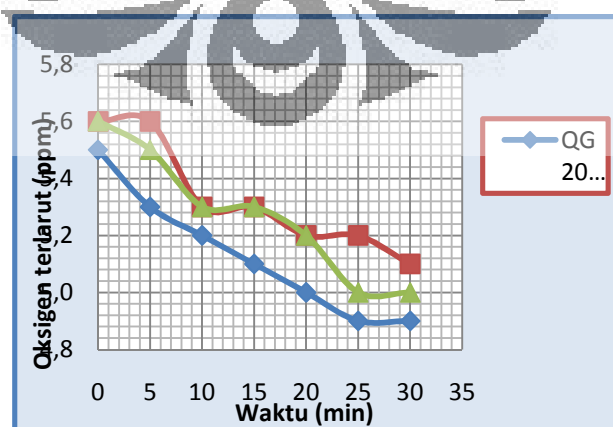
Selain itu, penurunan konsentrasi oksigen terlarut juga disebabkan (ii). Dekomposisi termal dari oksigen ( $\text{O}_2$ ) karena adanya kavitas yang menyebabkan kenaikan temperatur dalam sistem, dengan reaksi sebagai berikut (Adewuyi, 2001):



Berdasarkan reaksi di atas, ternyata dekomposisi termal oksigen akan menghasilkan radikal hidroksil yang membuat proses ozonasi/kavitas (hidrodinamik dan ultrasonik) menjadi semakin efektif. Penurunan konsentrasi oksigen terlarut juga dikarenakan (iii). Reaksi antara oksigen dengan radikal hidroksil karena radikal hidroksil sangat reaktif terhadap senyawa apapun, dengan reaksi sebagai berikut (Sivasankar, 2009):



Penurunan konsentrasi oksigen terlarut juga dapat terjadi karena adanya (iv). *Degassing*, yaitu fenomena berkurangnya kandungan senyawa terlarut pada proses kavitas karena senyawa tersebut menjadi inti (*nuklei*) dari pembentukan gelembung mikro. Inti gelembung mikro berasal dari ozon maupun molekul air, namun bisa juga berupa oksigen terlarut.



**Gambar 4.23.** Hubungan antara konsentrasi oksigen terlarut (*dissolve oxygen*) dengan variasi laju alir gas terhadap waktu

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Mekanisme reaksi ozonasi fenol pada pH rendah lebih didominasi oleh reaksi langsung oleh ozon untuk menyingkirkan fenol. Dengan penambahan proses kavitasi hidrodinamik/ultrasonik akan meningkatkan efektifitas proses karena akan meningkatkan pembentukan radikal hidroksil yang akan bereaksi dengan fenol.
2. Persentase penyisihan fenol dipengaruhi oleh intensitas ultrasonik. Intensitas ultrasonik tinggi (60%) memberikan persentase penyisihan fenol terbaik, yaitu sebesar 56,27%. Sedangkan pada intensitas rendah (30%) persentase penyisihan fenol hanya sebesar 25,33%.
3. Persentase penyisihan fenol juga dipengaruhi oleh laju alir gas. Laju alir gas yang terlalu kecil (200 L/jam) ataupun terlalu tinggi (600 L/jam) ternyata tidak memberikan persentase penyisihan fenol yang optimal. Nilai penyisihan fenol yang paling optimal diperoleh pada laju alir gas 400 L/jam, yaitu sebesar 56,27%.
4. Persentase penyisihan fenol terbesar diperoleh pada konsentrasi awal fenol 7 ppm, sebesar 95,66%. Namun, penurunan jumlah absolut fenol akan semakin baik dengan semakin tingginya konsentrasi awal fenol, yaitu pada konsentrasi awal fenol 100 ppm.
5. Penggunaan jenis asam organik (asam sitrat) ternyata mempengaruhi proses penyisihan fenol. Untuk penggunaan asam sitrat, persentase penyisihan fenol ternyata lebih rendah dibandingkan dengan penggunaan asam klorida.

#### 5.2. Saran

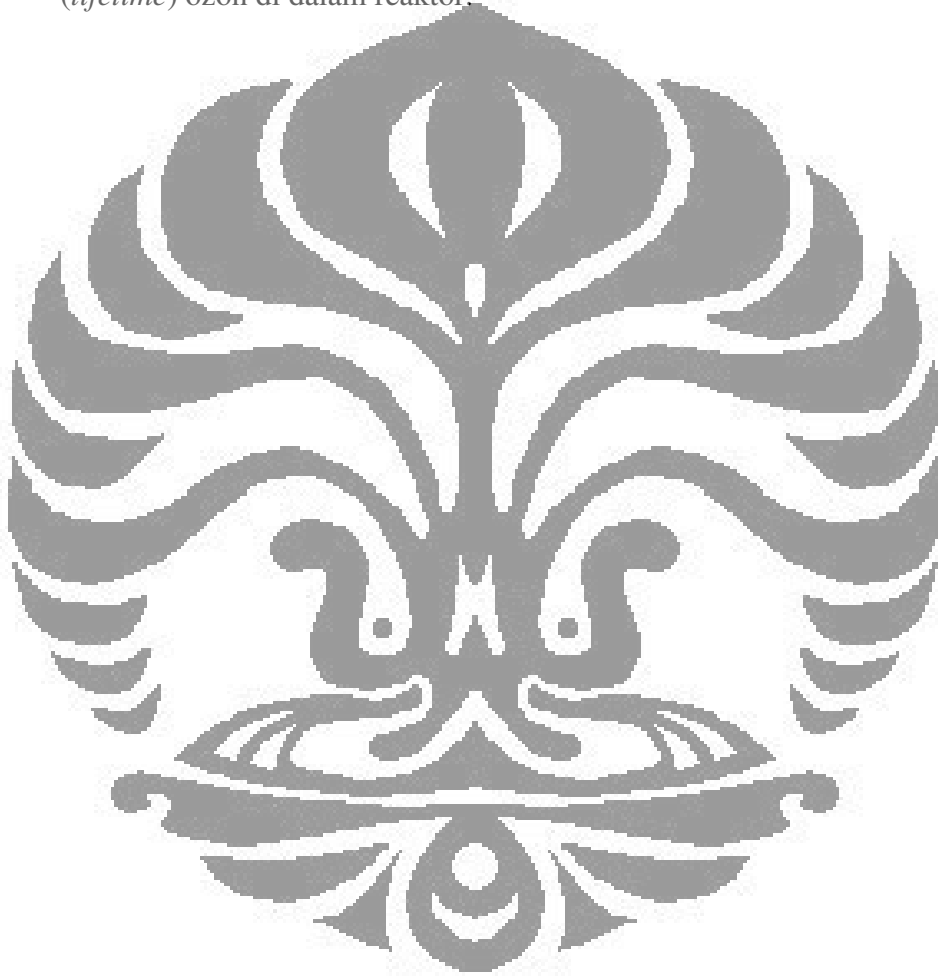
Saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk menganalisa hasil produk antara (*intermediate*) dari penyisihan fenol dengan proses ozonasi/kavitasi



(hidrodinamik dan ultrasonik) dengan menggunakan analisa TOC (*Total Organic Compound*).

2. Perlu dilakukan penelitian dengan variasi lamanya proses untuk mengetahui berapa lama waktu yang dibutuhkan oleh penyisihan fenol hingga memenuhi baku mutu konsentrasi fenol maksimum yang diperbolehkan pada air limbah industri (0,1 – 5 mg/L).
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui waktu tinggal (*lifetime*) ozon di dalam reaktor.



## DAFTAR PUSTAKA

- Adewuyi, Yusuf G. "Sonochemistry: Environmental Science and Engineering Applications". *Ind. Eng. Chem. Res.* 2001, 40, 4681-4715.
- Anonim. "Acoustic Cavitation". <http://www.enstimac.fr/cavitation/ultrasons.html>. (9 Juni 2009).
- Anonim. "Fenol". <http://www.wikipedia.com> (24 Mei 2010).
- Anonim. "Cavitation". <http://www.absoluteastronomy.com/topics/Cavitation> (9 Juni 2009).
- Anonim. "EPA Guidance Manual : Alternative Disinfectants and Oxidants". 1999.
- Anonim. "Mengamankan Air Minum Isi Ulang". <http://alumni-sttl.blogspot.com/2007/10/mengamankan-air-minum-isi-ulang.html> (2 Maret 2009).
- Anonim. "Sonochemistry". <http://en.wikipedia.org/sonochemistry> (9 Juni 2009).
- Anonim. "Sumber dan Bahan Pencemar Air". [http://www.chem-is-try.org/materi\\_kimia/kimia-lingkungan/pencemaran-air/sumber-dan-bahan-pencemar-air](http://www.chem-is-try.org/materi_kimia/kimia-lingkungan/pencemaran-air/sumber-dan-bahan-pencemar-air) (9 April 2009).
- Anonim. "Ultrasonics". <http://en.wikipedia.org/ultrasonics> (9 Juni 2009).
- Beltran, Fernando J. *Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Treatments*. Florida: Lewis Publishers; 2004.
- Bollyky, Joseph L. "Benefits of Ozone Treatment for Bottled Water". Stamford: Bollyky Associates, Inc., 2002.
- Dantas, Renato Falcao. *Ozonation of Emergent Contaminants*. Universitas de Barcelona; 2007
- Eagleton, Jim. "Ozone in Drinking Water Treatment". <http://hiproozone.com/documents/ozone.pdf>.
- Gottschalk, C., et al. *Ozonation of Water and Wastewater System*. Winhem: Wiley-VCH. 2000.
- Ince, N.H, et.al. "Ultrasound as a catalyzer of aqueous reaction systems: the state of the art and environmental applications". *Applied Catalysis B: Environmental* 29 (2001) 167–176.

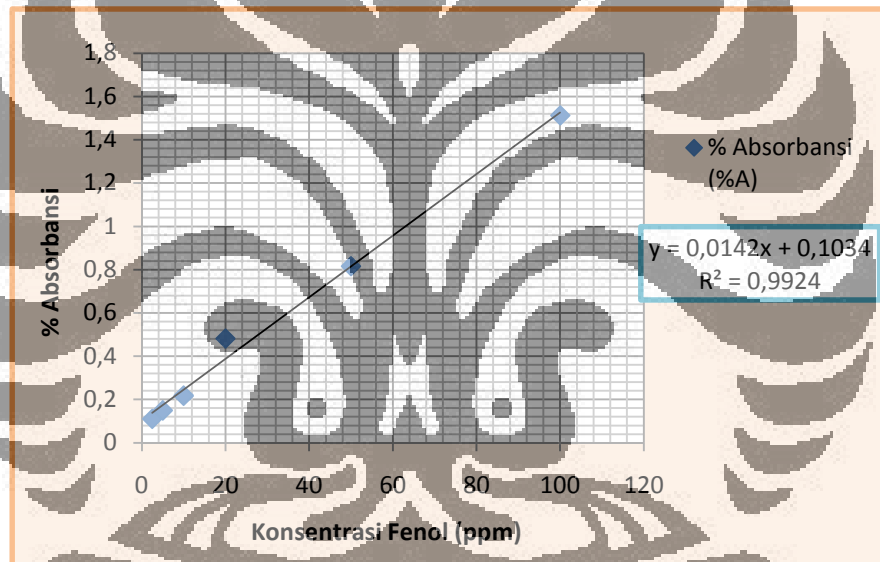
- Jyoti ,K.K., dan A.B Pandit. “Ozone and cavitation for water disinfection”.  
*Biochemical Engineering Journal* 18 (2004) 9–19.
- Klasson KT, et al. Ozone Treatment of Soluble Organics in Produced Water. Oak Ridge National Laboratory for US Department of Energy: 2002
- Kommineni, Sunil et.al. “Advanced Oxidation Processes”. n.d.
- Li-Bing Chu, et.al. “Enhanced ozonation of simulated dyestuff wastewater by microbubbles”. *Chemosphere* 68 (2007) 1854-1860.
- Lesko, Timothy et.al. “Sonochemical Decomposition of Phenol : Evidence for a Synergistic Effect of Ozone and Ultrasound for the Elimination of Total Organic Carbon from Water”. *Environ.Sci.Tech.*2006, 40, 6818-6823.
- Nasseri, S., et al. Determination of the ultrasonic effectiveness in advanced wastewater treatment. *Sci. Eng.*, 109-116. Department of Environmental Health Engineering: Iran.
- Nebel, C. *Encyclopedia of Chemical Technology*. New York: John Wiley & Sons; 1981, 683-713.
- Pera-Titus, Marc, et.al. “Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: a general review”. *Applied Catalysis B: Environmental* 47 (2004) 219–256.
- Sartor, M, et.al. “Demonstration of a new hybrid process for the decentralised drinking and service water production from surface water in Thailand”. *Desalination* 222 (2008) 528–540.
- Soemantojo, R.W. “Pencegahan dan Pengendalian Pencemaran dalam Industri”. Diktat kuliah. Departemen Teknik Gas dan Petrokimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok, 2000.
- Von Gunten, Urs. “Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation”. *Water Research* 37 (2003) 1443–1467
- Widaningroem, Roekmijati. “Pengolahan Limbah dan Pencegahan Pencemaran”. Diktat Kuliah. Departemen Teknik Gas dan Petrokimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok, 2004
- Young, FR. *Sonoluminescence*. CRC Press: London. 2005



### A.1. Data dan kurva kalibrasi absorbansi spektrofotometer untuk menghitung konsentrasi fenol

Tabel A.1. %Absorbansi Fenol

Konsentrasi Fenol (ppm)	% Absorbansi (%A)
2,5	0,111
5	0,150
10	0,218
20	0,482
50	0,816
100	1,512

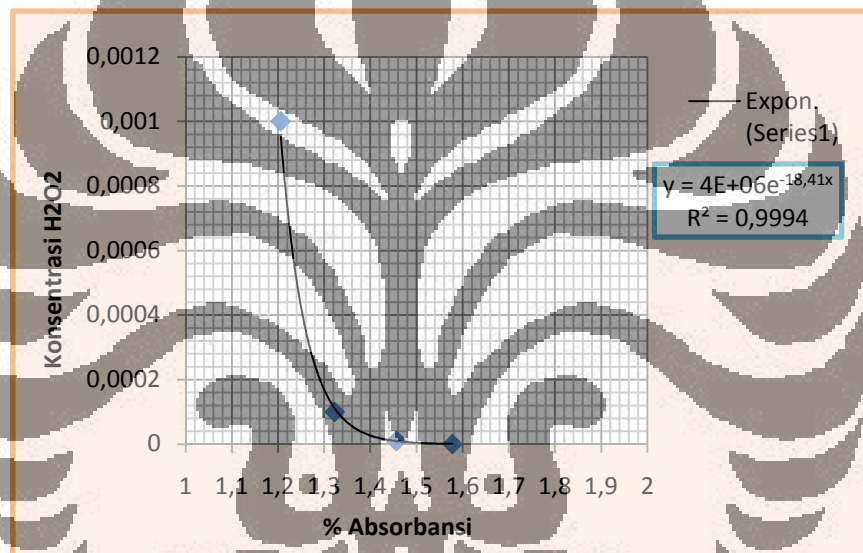


Gambar A.1. Grafik Konsentrasi Fenol

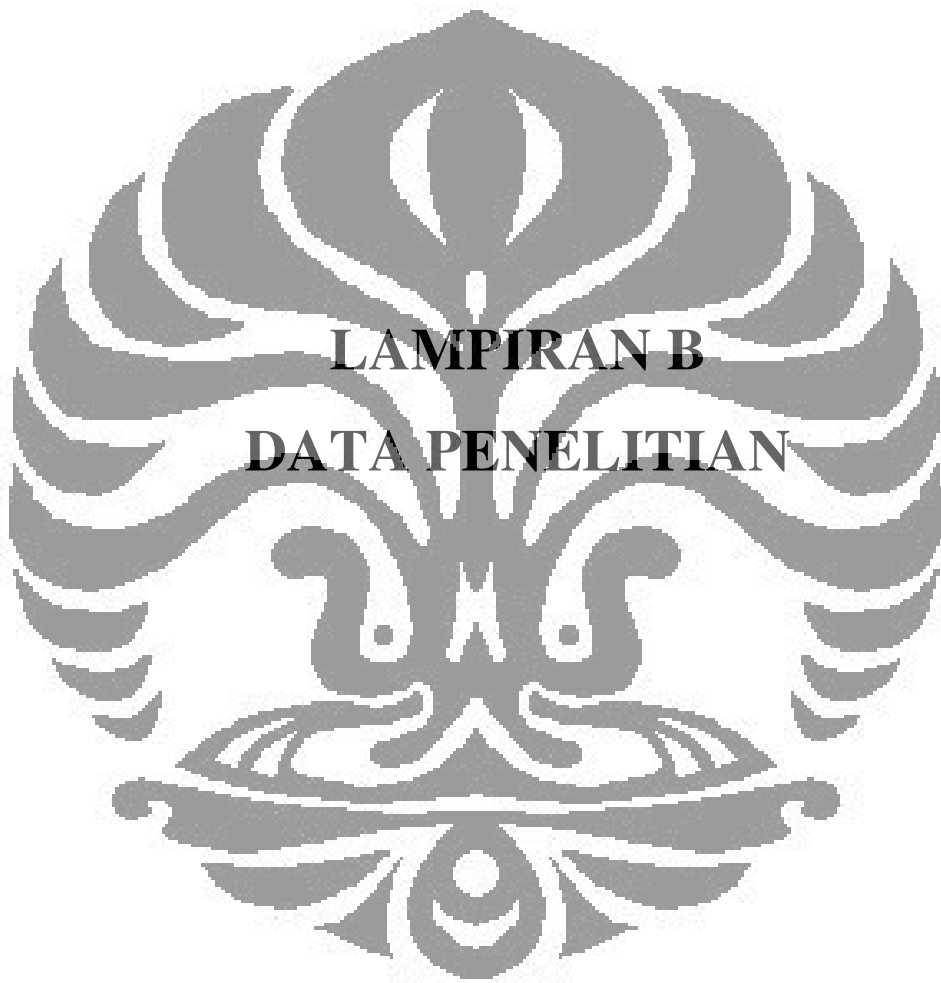
## A.2. Data dan kurva kalibrasi absorbansi spektrofotometer untuk menghitung konsentrasi hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ )

Tabel A.2. %Absorbansi Hidrogen Peroksida ( $H_2O_2$ )

% Absorbansi (%A)	Konsentrasi (M)
1,578	0,000001
1,457	0,00001
1,323	0,0001
1,206	0,001



Gambar A.2. Grafik Konsentrasi Hidrogen Peroksida ( $H_2O_2$ )



**LAMPIRAN B**  
**DATA PENELITIAN**

### Data Penelitian pada Proses Penyisihan Fenol dengan Proses Oksidasi Lanjut Ozonasi/Kavitasi Hidrodinamik/Ultrasonik

#### B.1. Variasi Laju Alir Gas ( $O_G = 200, 400, \text{ dan } 600 \text{ L/h}$ )

##### B.1.1. Pada $Q_L = 3 \text{ Lpm}$ ; $C_{p0} = 100 \text{ ppm}$ ; Intensitas Ultrasonik = 60% (Intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl

Tabel B.1. Data pada penyisihan fenol dengan variasi laju alir gas ( $Q_G = 200 \text{ L/h}$ )

t(min)	KI (mL)	DO <sub>3</sub> (ppm)	DO (ppm)	pH	T (°C)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%A)	KI (mg/L)	C/C <sub>0</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (M)
0	-	-	5,5	3,14	28,7	1,482	97,085	1,429	-	1	1,50206E-05
5	44,8	1,48	5,3	3,11	29,8	1,211	78,000	1,480	13,44	0,803	5,87388E-06
10	78,8	1,87	5,2	3,10	31,0	1,187	76,310	1,525	23,64	0,786	2,56527E-06
15	57,1	2,01	5,1	3,08	33,2	1,183	76,028	1,552	17,13	0,783	1,56048E-06
20	68,7	2,25	5,0	3,07	34,2	1,150	73,704	1,456	20,61	0,759	9,13721E-06
25	87,0	1,98	4,9	3,05	35,1	1,135	72,648	1,418	26,10	0,748	1,83924E-05
30	77,5	1,87	4,9	3,05	35,5	1,120	71,592	1,516	23,25	0,737	3,02756E-06
						Total Penyisihan	26,259				

Tabel B.2. Data pada penyisihan fenol dengan variasi laju alir gas ( $Q_G = 400 \text{ L/h}$ )

t(min)	KI (mL)	DO <sub>3</sub> (ppm)	DO (ppm)	pH	T (°C)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%A)	KI (mg/L)	C/C <sub>0</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (M)
0	-	-	5,6	3,10	29,2	1,463	95,746	1,448	-	1	1,05870E-05
5	10,0	1,83	5,6	3,07	31,4	1,135	72,648	1,360	3,00	0,759	5,35011E-05
10	18,5	1,95	5,3	3,04	33,0	1,069	68,000	1,589	5,55	0,710	7,89642E-07
15	30,5	1,97	5,3	3,03	34,1	1,034	65,535	1,388	9,15	0,684	3,19520E-05
20	28,0	2,84	5,2	3,03	34,1	0,916	57,225	1,561	8,40	0,598	1,32221E-06
25	33,0	1,62	5,2	3,01	34,8	0,753	45,746	1,382	9,90	0,478	3,56837E-05
30	40,5	1,26	5,1	3,01	36,6	0,698	41,873	1,292	12,15	0,437	1,87091E-04
						Total Penyisihan	56,267				



**Tabel B.3.** Data pada penyisihan fenol dengan variasi laju alir gas ( $O_G = 600 \text{ L/h}$ )

t(min)	KI (mL)	DO <sub>3</sub> (ppm)	DO (ppm)	pH	T (°C)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%A)	KI (mg/L)	C/C <sub>0</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (M)
0	-	-	5,6	3,09	30,0	1,451	94,901	1,440	-	1	1,2267E-05
5	103	1,16	5,5	3,08	31,3	1,268	82,014	1,457	30,90	0,864	8,97054E-06
10	113,5	1,36	5,3	3,04	33,3	1,236	79,761	1,507	34,05	0,840	3,57314E-06
15	90	1,67	5,3	3,02	36,5	1,202	77,366	1,451	27,00	0,815	1,00182E-05
20	100	1,22	5,2	3,01	37,0	1,180	75,817	1,671	30,00	0,799	1,74506E-07
25	99,5	1,31	5,0	3,01	37,9	1,178	75,676	1,512	29,85	0,797	3,25892E-06
30	106	1,05	5,0	2,98	39,5	1,172	75,254	1,352	31,80	0,793	6,19914E-05
						Total Penyisihan	20,703				

**B.2. Variasi Intensitas Ultrasonik (Intensitas tinggi (60%) dan Intensitas rendah (30%))****B.2.1. Pada  $Q_G = 400 \text{ L/h}$ ;  $Q_L = 3 \text{ Lpm}$ ;  $C_{p0} = 100 \text{ ppm}$ ; dan Jenis Asam = HCl****Tabel B.4.** Data pada penyisihan fenol dengan variasi intensitas ultrasonik (Intensitas tinggi = 60%)

t(min)	KI (mL)	DO <sub>3</sub> (ppm)	DO (ppm)	pH	T (°C)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%A)	KI (mg/L)	C/C <sub>0</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (M)
0	-	-	5,6	3,10	29,2	1,463	95,746	1,448	-	1,000	1,05870E-05
5	10,0	1,83	5,6	3,07	31,4	1,135	72,648	1,360	3,00	0,759	5,35011E-05
10	18,5	1,95	5,3	3,04	33,0	1,069	68,000	1,539	5,55	0,710	7,89642E-07
15	30,5	1,97	5,3	3,03	34,1	1,034	65,535	1,388	9,15	0,684	3,19520E-05
20	28,0	2,84	5,2	3,03	34,1	0,916	57,225	1,561	8,40	0,598	1,32221E-06
25	33,0	1,62	5,2	3,01	34,8	0,753	45,746	1,382	9,90	0,478	3,56837E-05
30	40,5	1,26	5,1	3,01	36,6	0,698	41,873	1,292	12,15	0,437	1,87091E-04
						Total Penyisihan	56,267				

**Tabel B.5.** Data pada penyisihan fenol dengan variasi intensitas ultrasonik (Intensitas rendah = 30%)

t(min)	KI (mL)	DO <sub>3</sub> (ppm)	DO (ppm)	pH	T (°C)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%A)	C/C <sub>0</sub>	KI (mg/L)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (M)
0	-	-	5,6	3,15	29,0	1,5028	98,549	1,467	1	-	7,4621E-06
5	27,2	1,24	5,6	3,11	31,8	1,4339	93,697	1,324	0,951	8,16	1,0380E-04
10	31,5	1,35	5,4	3,08	32,2	1,3390	87,014	1,548	0,883	9,45	1,6797E-06
15	33,0	1,41	5,3	3,07	32,5	1,3338	86,648	1,564	0,879	9,90	1,2511E-06
20	29,0	1,73	5,3	3,05	32,5	1,3169	85,458	1,221	0,867	8,70	6,9139E-04
25	32,0	1,58	5,1	3,05	35,6	1,2831	83,077	1,453	0,843	9,60	9,6560E-06
30	43,2	1,02	5,1	3,04	36,0	1,1484	73,592	1,371	0,747	12,96	4,3693E-05
						Total Penyisihan	23,325				

**B.3. Variasi Konsentrasi Awal Fenol (Cp<sub>0</sub> = 7, 50, dan 100 ppm)****B.3.1. Pada Q<sub>G</sub> = 400 L/h; Q<sub>L</sub> = 3 Lpm; Intensitas Ultrasonik = 60% (Intensitas Tinggi); dan Jenis Asam = HCl****Tabel B.6.** Data pada penyisihan fenol dengan variasi konsentrasi awal fenol (Cp<sub>0</sub> = 7 ppm)

t(min)	KI (mL)	DO <sub>3</sub> (ppm)	DO (ppm)	pH	T (°C)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%A)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (M)	C/C <sub>0</sub>	KI (mg/L)
0	-	-	5,5	3,12	29,7	0,209	7,437	1,401	2,51512E-05	1	-
5	42,0	1,73	5,5	3,07	30,2	0,154	3,563	1,404	2,37998E-05	0,479	12,60
10	39,0	2,04	5,5	3,05	30,8	0,142	2,718	1,418	1,83924E-05	0,366	11,70
15	36,0	2,58	5,4	3,04	31,5	0,135	2,225	1,357	5,65398E-05	0,299	10,80
20	31,0	3,13	5,3	3,01	32,2	0,112	0,606	1,420	1,77275E-05	0,081	9,30
25	34,5	2,69	5,2	3,01	32,9	0,11	0,465	1,278	0,000242096	0,063	10,35
30	39,0	2,17	5,0	3,01	33,4	0,108	0,324	1,433	1,39543E-05	0,044	11,70
						Total Penyisihan	95,644				

**Tabel B.7.** Data pada penyisihan fenol dengan variasi konsentrasi awal fenol ( $C_{p0} = 50$  ppm)

t(min)	KI (mL)	DO <sub>3</sub> (ppm)	DO (ppm)	pH	T (°C)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%A)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (M)	C/C <sub>0</sub>	KI (mg/L)
0	-	-	5,6	3,24	29,8	0,711	42,789	1,532	2,2551E-06	1	-
5	48,5	1,31	5,5	3,21	30,5	0,553	31,662	1,287	0,00020513	0,740	14,55
10	54,7	1,52	5,4	3,20	30,8	0,545	31,099	1,487	5,16366E-06	0,727	16,41
15	58,1	1,87	5,3	3,19	31,2	0,493	27,437	1,346	6,92315E-05	0,641	17,43
20	53,2	1,63	5,2	3,16	31,8	0,485	26,873	1,488	5,06947E-06	0,628	15,96
25	55,9	1,16	5,2	3,13	32,5	0,477	26,310	1,472	6,80594E-06	0,615	16,77
30	60,4	1,08	5,0	3,09	35,9	0,466	25,535	1,434	1,36997E-05	0,597	18,12
						Total Penyisihan	40,323				

**Tabel B.8.** Data pada penyisihan fenol dengan variasi konsentrasi awal fenol ( $C_{p0} = 100$  ppm)

t(min)	KI (mL)	DO <sub>3</sub> (ppm)	DO (ppm)	pH	T (°C)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%A)	KI (mg/L)	C/C <sub>0</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (M)
0	-	-	5,6	3,10	29,2	1,463	95,746	1,448	-	1,000	1,05870E-05
5	10,0	1,83	5,6	3,07	31,4	1,135	72,648	1,360	3,00	0,759	5,35011E-05
10	18,5	1,95	5,3	3,04	33,0	1,069	68,000	1,589	5,55	0,710	7,89642E-07
15	30,5	1,97	5,3	3,03	34,1	1,034	65,535	1,388	9,15	0,684	3,19520E-05
20	28,0	2,84	5,2	3,03	34,1	0,916	57,225	1,561	8,40	0,598	1,32221E-06
25	33,0	1,62	5,2	3,01	34,8	0,753	45,746	1,382	9,90	0,478	3,56837E-05
30	40,5	1,26	5,1	3,01	36,6	0,698	41,873	1,292	12,15	0,437	1,87091E-04
						Total Penyisihan	56,267				

#### B.4. Variasi Jenis Asam yang Digunakan (Asam Sitrat dan Asam Klorida)

B.4.1. Pada  $Q_G = 400 \text{ L/h}$ ;  $Q_L = 3 \text{ Lpm}$ ; Intensitas Ultrasonik = 60% (Intensitas Tinggi); dan Jenis Asam = Asam Sitrat

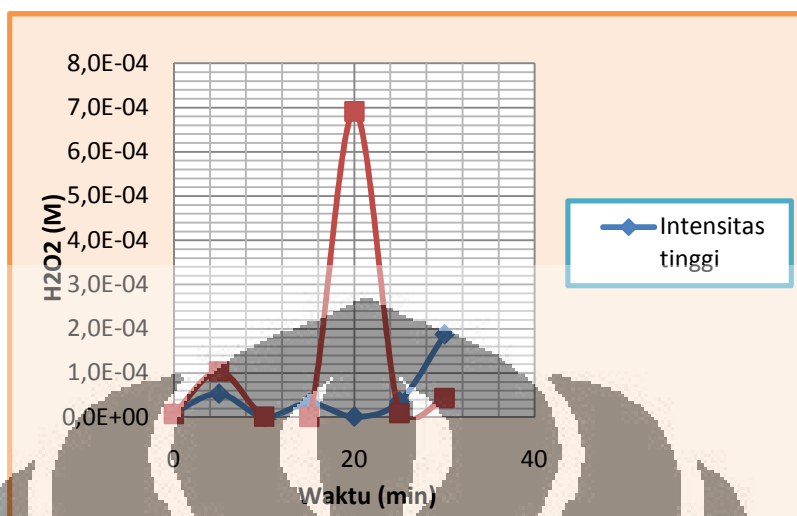
Tabel B.9. Data pada penyisihan fenol dengan variasi jenis asam yang digunakan (Asam sitrat)

t(min)	KI (mL)	DO <sub>3</sub> (ppm)	DO (ppm)	pH	T (°C)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%A)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (M)	KI (mg/L)	C/C <sub>0</sub>
0	-	-	5,5	3,20	28,0	1,390	90,606	1,452	9,83547E-06	-	1,000
5	9,6	1,36	5,5	3,16	30,0	1,148	73,563	1,443	1,16079E-05	23,04	0,812
10	15,0	1,78	5,4	3,15	30,2	1,126	72,014	1,379	3,77100E-05	36,00	0,795
15	13,0	1,80	5,1	3,14	31,8	1,123	71,803	1,526	2,51848E-06	31,20	0,792
20	11,5	2,17	5,1	3,11	32,3	1,113	71,099	1,589	7,89643E-07	27,60	0,785
25	12,0	1,96	5,0	3,10	33,5	1,068	67,930	1,402	2,46924E-05	28,80	0,750
30	25,0	2,05	4,9	3,08	35,8	1,034	65,535	1,312	0,000129463	60,00	0,723
						Total Penyisihan	27,67				

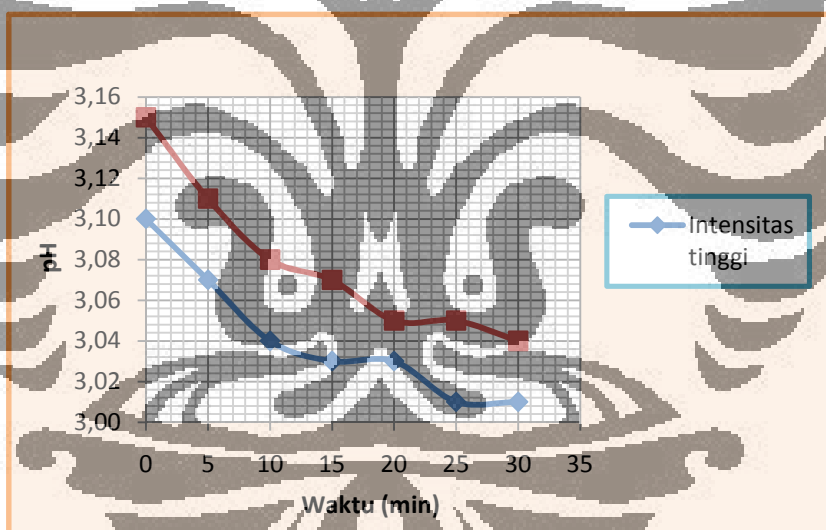
Tabel B.10. Data pada penyisihan fenol dengan variasi jenis asam yang digunakan (Asam klorida)

t(min)	KI (mL)	DO <sub>3</sub> (ppm)	DO (ppm)	pH	T (°C)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%A)	KI (mg/L)	C/C <sub>0</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (M)
0	-	-	5,6	3,10	29,2	1,463	95,746	1,443	-	1,000	1,05870E-05
5	10,0	1,83	5,6	3,07	31,4	1,135	72,648	1,360	3,00	0,759	5,35011E-05
10	18,5	1,95	5,3	3,04	33,0	1,069	68,000	1,589	5,55	0,710	7,89642E-07
15	30,5	1,97	5,3	3,03	34,1	1,034	65,535	1,388	9,15	0,684	3,19520E-05
20	28,0	2,84	5,2	3,03	34,1	0,916	57,225	1,561	8,40	0,598	1,32221E-06
25	33,0	1,62	5,2	3,01	34,8	0,753	45,746	1,382	9,90	0,478	3,56837E-05
30	40,5	1,26	5,1	3,01	36,6	0,698	41,873	1,292	12,15	0,437	1,87091E-04
						Total Penyisihan	56,267				

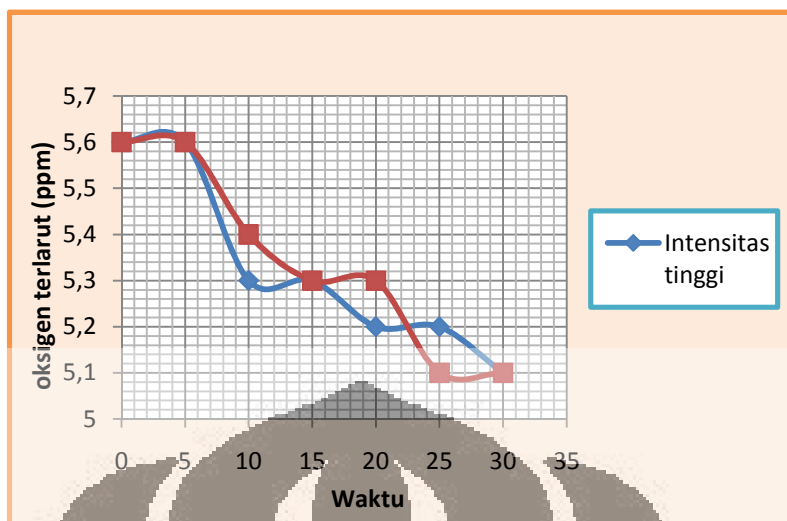
### B.5. (Penyisihan Fenol Berbasis Ozonasi/Kavitasi/Ultrasonik dengan) Memvariasikan Intensitas Ultrasonik



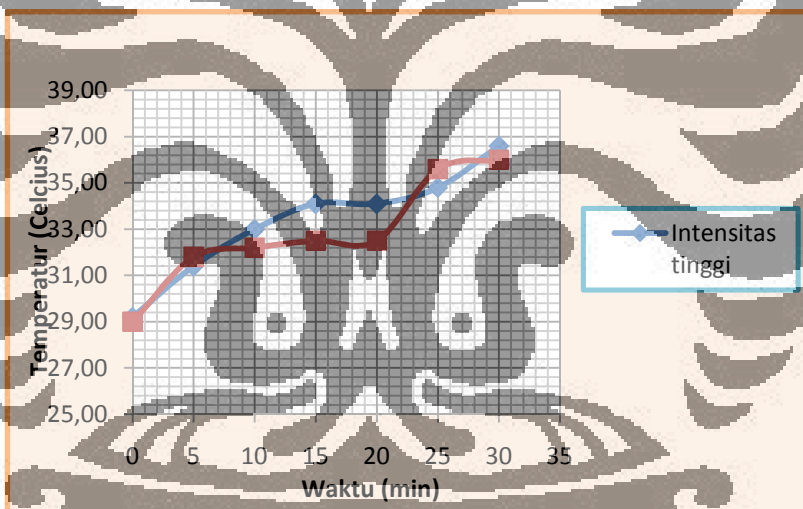
Gambar B.1. Kurva konsentrasi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> terhadap waktu



Gambar B.2. Kurva pH terhadap waktu

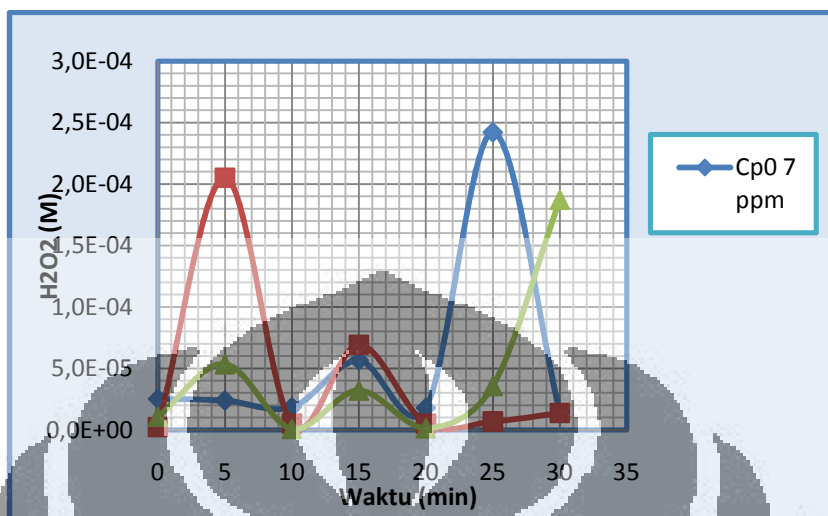


Gambar B.3. Kurva oksigen terlarut (*dissolve oxygen*) terhadap waktu

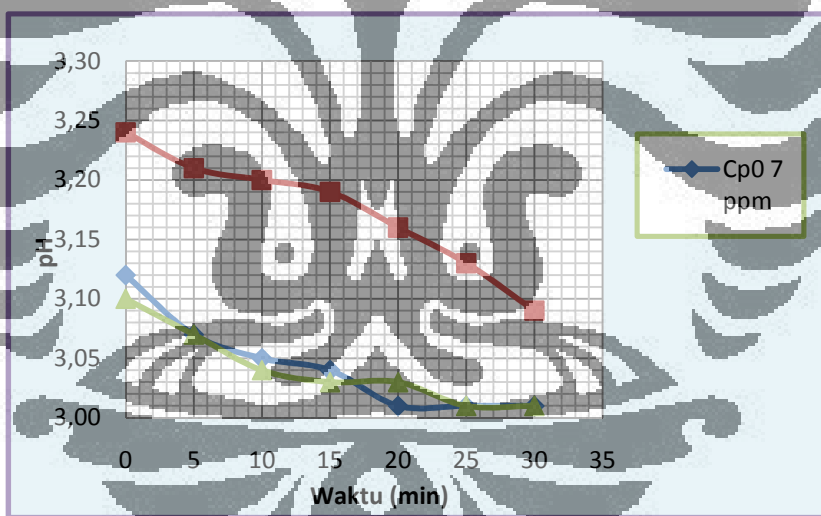


Gambar B.4. Kurva temperatur terhadap waktu

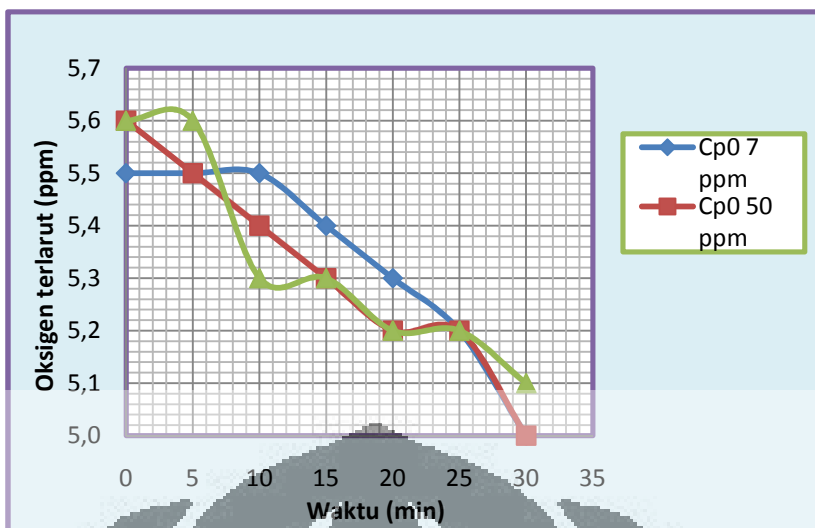
**B.6. (Penyisihan Fenol Berbasis Ozonasi/Kavitasi/Ultrasonik dengan) Memvariasikan Konsentrasi Awal Fenol ( $C_{p0}$ )**



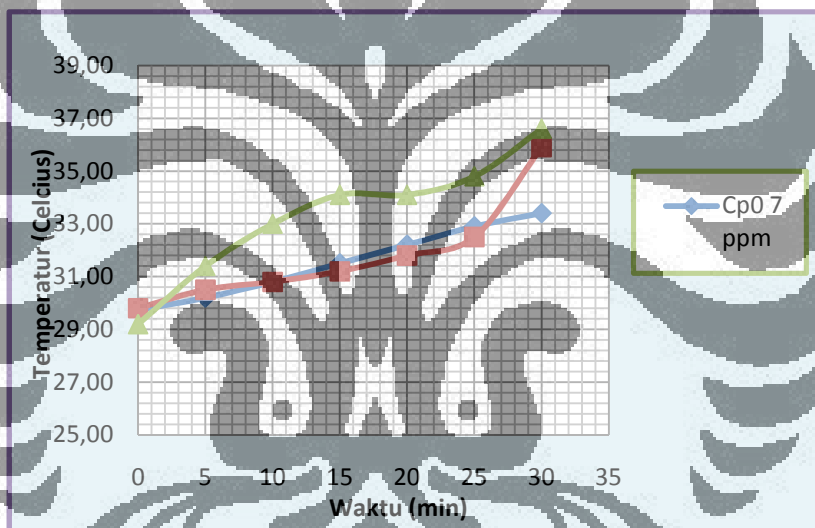
**Gambar B.5.** Kurva konsentrasi  $H_2O_2$  terhadap waktu



**Gambar B.6.** Kurva pH terhadap waktu



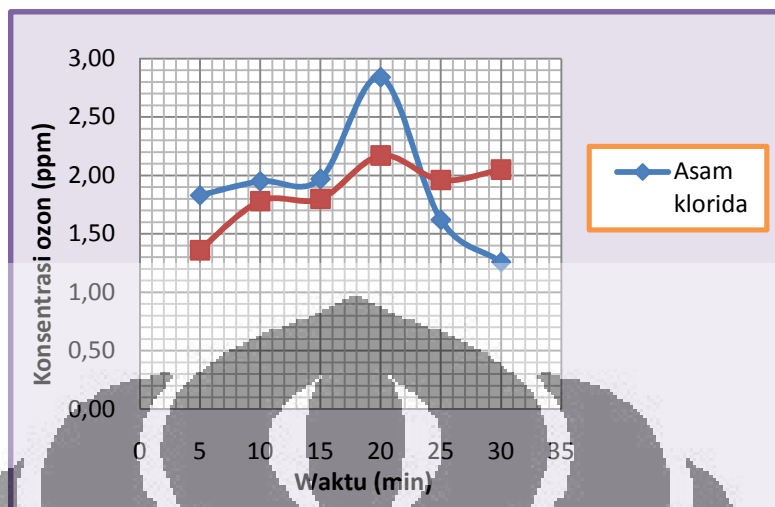
Gambar B.7. Kurva oksigen terlarut terhadap waktu



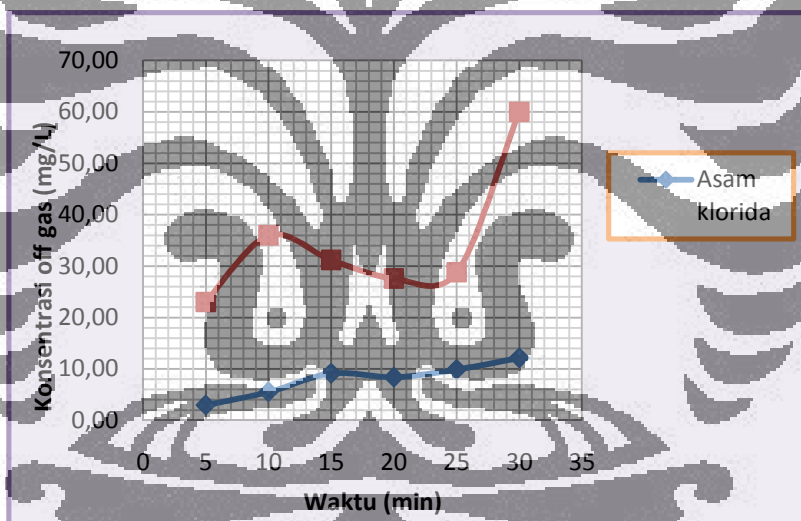
Gambar B.8. Kurva temperatur terhadap waktu



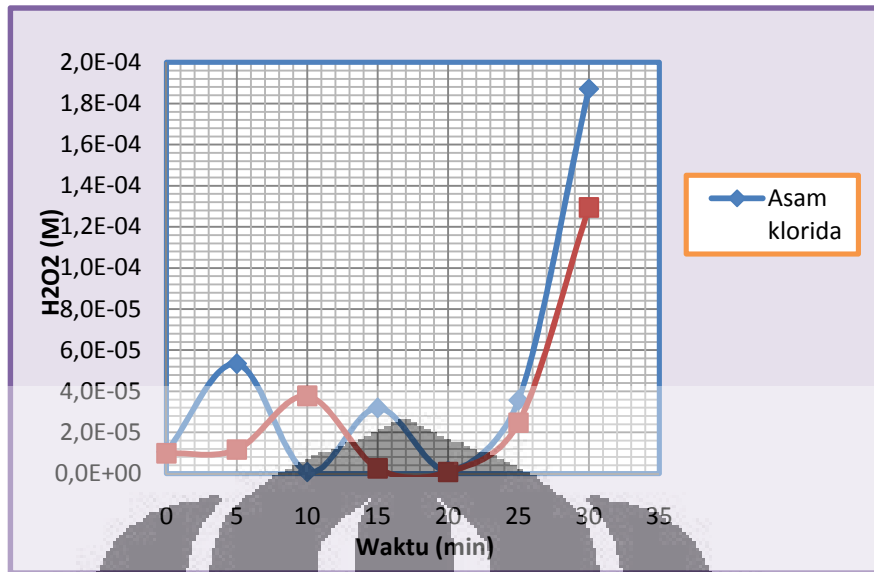
### B.7. (Penyisihan Fenol Berbasis Ozonasi/Kavitasi/Ultrasonik dengan) Memvariasikan Jenis Asam



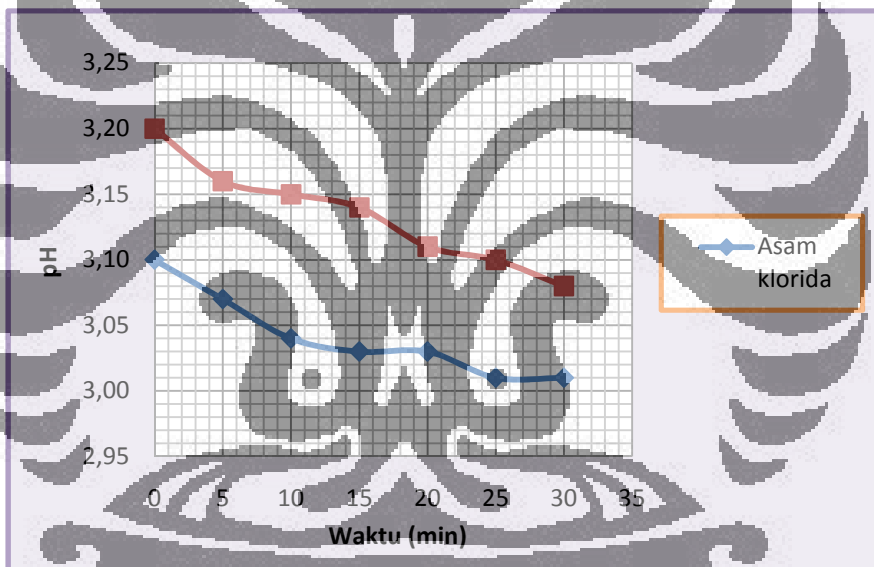
Gambar B.9. Kurva konsentrasi ozon terlarut terhadap waktu



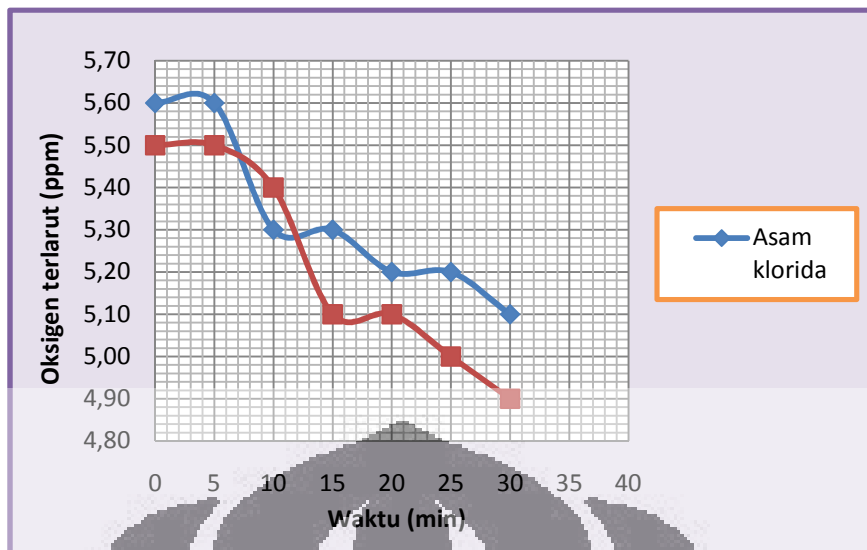
Gambar B.10. Kurva konsentrasi off gas terhadap waktu



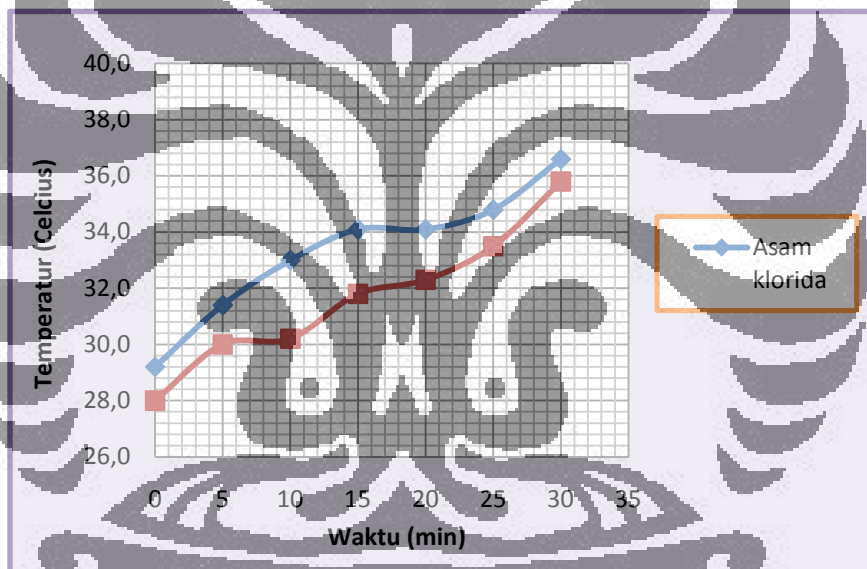
Gambar B.12. Kurva konsentrasi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> terhadap waktu



Gambar B.13. Kurva pH terhadap waktu



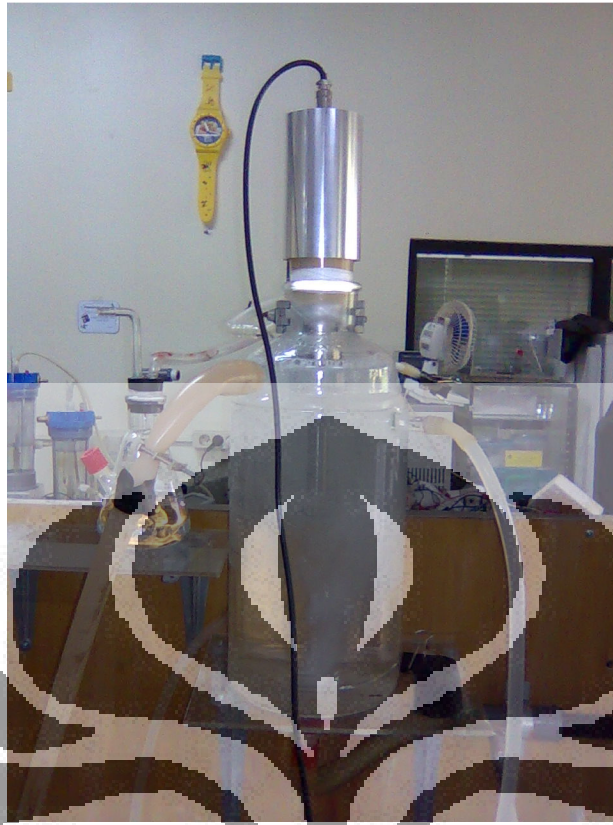
Gambar B.15. Kurva oksigen terlarut (*dissolve oxygen*) terhadap waktu



Gambar B.16. Kurva temperatur terhadap waktu



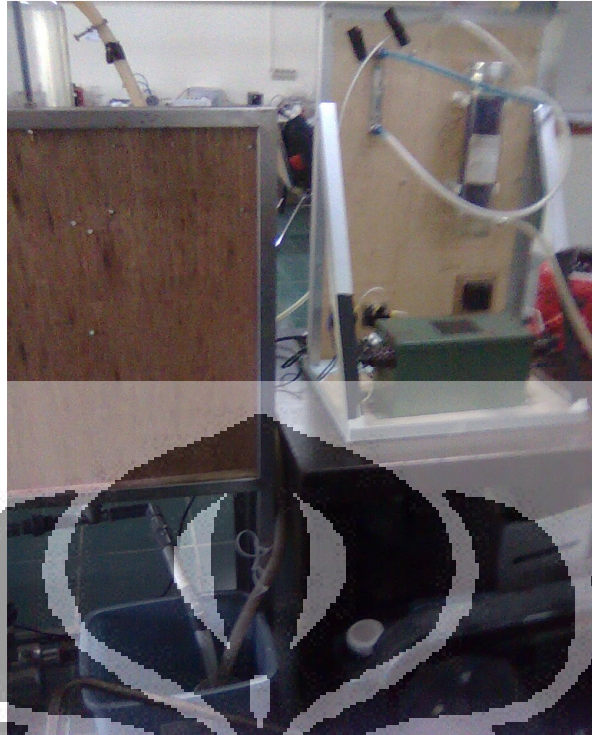
**LAMPIRAN C**  
**FOTO KEGIATAN**



Gambar C.1. Reaktor kaca dan ultrasonic processor



Gambar C.2. Skema alat penelitian dengan proses ozonasi/kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik)



**Gambar C.3.** Reservoir dan trafo pembangkit ozon