



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**IDENTIFIKASI PERAN RADIKAL HIROKSIL PADA  
PENYISIHAN FENOL DENGAN PROSES OKSIDASI LANJUT  
OZONASI DAN KAVITASI**

**SKRIPSI**

**FRIADI CHAHYA SETIANA  
0806367891**

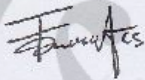
**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JUNI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Friadi Cahya Setiana

NPM : 0806367891

Tanda Tangan : 

Tanggal : 21 Juni 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Friadi Cahya Setiana  
NPM : 0806367891  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Identifikasi Peran Radikal Hidroksil Pada Penyisihan Fenol dengan Proses Oksidasi Lanjut Ozonasi dan Kavitasi

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 : Ir. Eva F. Karamah, MT

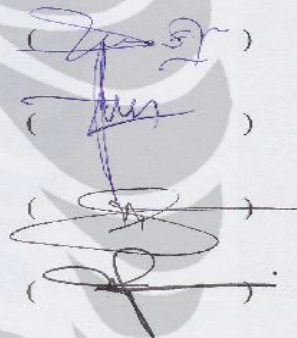
Penguji : Prof.Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA

Penguji : Dr. Ir. Nelson Saksono, MT

Penguji : Dr.Ing.Misri Gozan, M.Tech

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 21 Juni 2011



## 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 **“Identifikasi Peran Radikal Hidroksil Pada Penyisihan Fenol dengan Proses Oksidasi**

**Lanjut Ozonasi dan Kavitasi”** 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. 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, dan adik-adik yang selalu memberikan semangat, doa, dukungan moral, dan material sehingga skripsi ini dapat selesai;
5. Rekan-rekan riset grup Teknologi Intensifikasi Proses dan teman-teman ekstensi 2008 yang telah banyak memberi semangat dan hiburan terutama pada saat melakukan penelitian;
6. Mang Ijal, Kang Jajat, Mas Heri, Mas Eko, Mas Taufik ,Tiwi, danVicha 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, 13 Juni 2011

Penulis



## ABSTRAK

Nama : Friadi Cahya Setiana  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul : Identifikasi Peran Radikal Hidroksil pada Penyisihan Fenol dengan Proses Oksidasi Lanjut Ozonasi dan Kavitasasi

Proses Oksidasi Lanjut (*Advanced Oxidation Processes/AOPs*) yang berbasis ozon merupakan proses yang sudah banyak digunakan dalam pengolahan air. Proses ini memanfaatkan sifat ozon sebagai oksidator kuat. Ozon mudah terdekomposisi dalam air menjadi radikal OH yang merupakan oksidator sangat kuat dalam air. Senyawa fenolik merupakan salah satu kontaminan utama dan berbahaya dalam limbah cair karena sifatnya yang beracun bahkan pada konsentrasi yang rendah. Untuk mengatasi masalah ini beberapa proses yang dapat mengurangi kandungan fenol telah dilakukan. Salah satunya adalah proses ozonasi dan kavitasasi. Pada penelitian ini dilakukan penyelidikan mengenai signifikansi peran radikal hidroksil pada penyisihan fenol dengan proses oksidasi lanjut ozonasi dan kavitasasi. Dari penelitian yang dilakukan ditemukan bahwa proses dengan ozon menghasilkan persentase penyisihan fenol yang paling besar.

### **Kata kunci:**

radikal hidroksil, ozonasi, kavitasasi, fenol.

## ABSTRACT

Name : Friadi Cahya Setiana  
Study Program : Chemical Engineering  
Title : Identification Role of Hydroxyl Radical in Degradation of Phenol with Advanced Oxidation Process Ozonation and Cavitation

Ozone based Advanced Oxidation Processes has widely used in water treatment process. This process uses ozone characteristic as a strong oxidator. Ozone is easily decomposed into hydroxyl radical, which is a very strong oxidator. Phenolic compound is one of the main and dangerous contaminants in waste water because of its hazardous properties even at low concentration. To solve this problem some processes that could reduce phenol concentration had been done. One of these processes is ozonation and cavitation. This research studied the significance role of hydroxyl radical in degradation of phenol with advanced process ozonation and cavitation. The result from this research showed that the processes with ozone gave the biggest phenol degradation percentage.

### **Key words:**

hydroxyl radical, ozonation, cavitation, phenol.

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
ABSTRAK .....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL.....	xi
<b>1. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah .....	4
1.5. Model Operasional Penelitian .....	4
<b>2. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
2.1. Fenol .....	6
2.2. Proses Oksidasi Lanjut( <i>Advanced Oxidation Process</i> ) .....	6
2.2.1. Ozon .....	7
2.2.1.1. Sifat Fisika Ozon .....	8
2.2.1.2. Sifat Kimia Ozon .....	9
2.2.1.3. Ozonasi dalam Air .....	10
2.2.1.4. Reaksi Langsung Ozon.....	10
2.2.1.5. Reaksi tidak Langsung Ozon.....	12
2.2.2. Kavitasi .....	12
2.2.2.1. Kavitasi Ultrasonik.....	13
2.2.2.2. Kavitasi Hidrodinamik .....	17
2.2.3. Ozonasi dan Kavitasi.....	18
<b>3. METODE PENELITIAN .....</b>	<b>22</b>
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	22

3.2. Deskripsi Alat Penelitian .....	24
3.2.1. Ozonator .....	24
3.2.2. Injektor .....	25
3.2.3. Sonikator UP-800 Ultrasonic Processor.....	25
3.2.4. Reaktor Kaca dan Pompa .....	25
3.3. Rancangan Penelitian .....	30
3.4. Alat dan Bahan Penelitian .....	30
3.4.1. Alat Penelitian .....	30
3.4.2. Bahan Penelitian.....	30
3.5. Prosedur Penelitian .....	31
3.5.1. Penyisihan Fenol dengan Proses Ozonasi .....	31
3.5.2. Penyisihan Fenol dengan Proses Ozonasi/Kavitasi Hidrodinamik .....	32
3.5.3. Penyisihan Fenol dengan Proses Ozonasi/Sonikasi .....	33
3.5.4. Penyisihan Fenol dengan Proses Ozonasi/Kavitasi Hidrodinamik /Ultrasonik).....	34
3.5.5. Penyisihan Fenol dengan Proses Kavitasi.....	35
3.5.6. Penyisihan Fenol dengan Proses Sonikasi .....	36
3.5.7. Penyisihan Fenol dengan Proses Kavitasi/Sonikasi.....	37
3.6. Prosedur Analisis Sampel .....	38
3.6.1. Penentuan Konsentrasi Fenol .....	38
3.6.1.1. Alat .....	38
3.6.1.2. Bahan .....	38
3.6.1.3. Prosedur .....	38
3.6.2. Penentuan Konsentrasi Ozon Terlarut .....	39
3.6.2.1. Alat .....	39
3.6.2.2. Bahan .....	39
3.6.2.3. Prosedur .....	39
3.6.3. Penentuan Konsentrasi Ozon Fasa Gas.....	39
3.6.3.1. Alat .....	40
3.6.3.2. Bahan .....	40
3.6.3.3. Prosedur .....	40



3.6.4. Penentuan Konsentrasi Ion Karbonat.....	40
3.6.4.1. Alat .....	41
3.6.4.2. Bahan .....	41
3.6.4.3. Prosedur .....	41
3.7. Pengolahan Data Penelitian .....	41
3.7.1. Persentase Penyisihan Fenol ( $C/C_0$ ).....	42
3.7.2. Konsentrasi Ozon Terlarut Terhadap Waktu .....	42
3.7.3. Konsentrasi Ozon Fasa Gas Terhadap Waktu.....	42
3.7.4. pH Terhadap Waktu .....	42
3.7.5. Konsentrasi Oksigen Terlarut Terhadap Waktu.....	42
3.7.6. Temperatur Terhadap Waktu .....	43
<b>4. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>44</b>
4.1. Persentase Penyisihan Fenol tanpa <i>Radical Scavenger</i> .....	45
4.2. Persentase Penyisihan Fenol dengan <i>Radical Scavenger</i> .....	49
4.3. Persentase Penyisihan Fenol tanpa <i>Ozon</i> .....	52
4.4. Parameter – Parameter Lainnya.....	54
4.4.1. pH.....	54
4.4.2. Konsentrasi Ozon Terlarut ( <i>Dissolved Ozone</i> ) .....	55
4.4.3. Peningkatan Suhu.....	57
<b>5. KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>59</b>
5.1. Kesimpulan.....	59
5.2. Saran .....	59
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>61</b>
<b>LAMPIRAN A</b>	
<b>LAMPIRAN B</b>	

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1.</b>	Struktur Molekular Ozon .....	9
<b>Gambar 2.2.</b>	Reaksi Ozon Dalam Air .....	11
<b>Gambar 2.3.</b>	Pembentukan Gelembungan pada Kavitasi Ultrasonik.....	16
<b>Gambar 2.4.</b>	Daerah Terjadinya Reaksi Kimia Pada Kavitasi Ultrasonik.....	17
<b>Gambar 2.5.</b>	Inisiasi, promosi dan inhibisi dari dekomposisi ozon dalam larutan pada kondisi iradiasi ultrasonik.....	21
<b>Gambar 3.1.</b>	Diagram Alir Penelitian dengan ozon .....	22
<b>Gambar 3.2.</b>	Diagram Alir Penelitian tanpa ozon.....	23
<b>Gambar 3.3.</b>	Skema Penelitian Ozonasi.....	26
<b>Gambar 3.4.</b>	Skema Penelitian Ozonasi/Kavitasi Hidrodianmik.....	26
<b>Gambar 3.5.</b>	Skema Penelitian Ozonasi/Sonikasi.....	27
<b>Gambar 3.6.</b>	Skema Penelitian Ozonasi/Kavitasi Hidrodinamik/Sonikasi .....	27
<b>Gambar 3.7.</b>	Skema Penelitian Kavitasi .....	28
<b>Gambar 3.8.</b>	Skema Penelitian Sonikasi .....	29
<b>Gambar 3.9.</b>	Skema Penelitian Kavitasi/Sonikasi.....	29
<b>Gambar 4.1.</b>	Persentase Penyisihan Fenol tanpa <i>Radical Scavenger</i> .....	46
<b>Gambar 4.2.</b>	Mekanisme reaksi fenol pada proses ozonasi/Kavitasi (Hidrodinamik dan ultrasonik) .....	47
<b>Gambar 4.3.</b>	Persentase Penyisihan Fenol dengan <i>Radical Scavenger</i> .....	50
<b>Gambar 4.4.</b>	Persentase Penyisihan Fenol tanpa dan penambahan <i>Radical Scavenger</i> .....	51
<b>Gambar 4.5.</b>	Persentase Penyisihan Fenol tanpa ozon.....	53
<b>Gambar 4.6.</b>	Hubungan pH dengan waktu pada dengan dan tanpa ozon.....	55
<b>Gambar 4.7.</b>	Hubungan antara ozon terlarut dengan variasi konfigurasi terhadap waktu .....	55
<b>Gambar 4.8.</b>	Hubungan Antara peningkatan suhu dengan variasi konfigurasi Terhadap Waktu.....	58

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b> Kelarutan fenol dalam air .....	6
<b>Tabel 2.2.</b> Potensial Oksidasi-Reduksi di dalam Air.....	7





# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Dengan ditingkatkannya sektor industri diharapkan taraf hidup masyarakat akan dapat ditingkatkan. Akan tetapi, munculnya industri perlu dipikirkan juga efek sampingnya yang berupa limbah. Secara umum, masih banyak limbah di berbagai negara (terutama negara-negara berkembang) yang dibuang ke lingkungan tanpa proses pengolahan yang memadai diantaranya limbah fenol (Achmad Rukaesih., 2004) Beberapa industri yang menghasilkan limbah fenol pada proses produksinya, antara lain adalah industri peleburan logam, industri plastik dan polimer, industri farmasi, industri cat, industri pengolahan kayu (kayu lapis), pestisida organik, dan industri pulp dan kertas.

Fenol adalah senyawa yang sangat beracun, sulit didegradasi serta menyebabkan rasa dan bau pada air dengan konsentrasi 0,002 mg/L (Linsebigler Amy L., *et all.*, 1995). Dalam konsentrasi tertentu fenol dapat menghambat aktivitas mikroorganisme dan memberi efek buruk bagi kesehatan dan kualitas hidup manusia, terutama berupa kerusakan hati dan ginjal, gangguan tekanan darah, pelemahan detak jantung, hingga yang paling parah adalah kematian (Nasru.A.A., 2006).

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.

Kekurangan dari penggunaan ozon adalah sifat ozon yang sukar larut dalam air (Von Gunten, 2003a). 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 ( $\cdot\text{OH}$ ) sebagai oksidator utama untuk menghancurkan senyawa pencemar, dan dapat diterapkan secara terpisah atau dikombinasikan antara metode yang satu dan lainnya. 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 (kavitasi ultrasonik atau sonikasi), 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 (gelembung mikro). Selain itu, kavitasi juga dapat mempercepat laju dekomposisi ozon menjadi radikal hidroksil ( $\cdot\text{OH}$ ).

Selain dapat meningkatkan kelarutan ozon pada air terdapat efek lain kavitasi pada proses ozonasi yang sama pentingnya. Pada air yang diberikan kavitasi, panas yang dihasilkan dari ledakan gelembung mikro akan mendekomposisi air menjadi atom hidrogen dan radikal OH yang sangat reaktif. Maka proses kavitasi itu sendiri akan dapat menghasilkan radikal OH. Untuk proses ozonasi/kavitasi pembentukan radikal OH dari kavitasi akan memiliki tiga sumber, yaitu:

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

Dalam penelitian ini dilakukan penyelidikan mengenai signifikansi peran radikal hidroksil pada penyisihan fenol dengan proses oksidasi lanjut ozonasi/kavitasi. Penelitian dilakukan pada pH rendah (4) untuk meminimalisir dekomposisi ozon alamiah yang dipicu oleh ion hidroksil ( $\text{OH}^-$ ). Dengan demikian dapat diasumsikan bahwa radikal hidroksil yang terbentuk terjadi karena kavitasi berasal dari ketiga sumber seperti yang telah disebutkan sebelumnya.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana peran radikal hidroksil terhadap penyisihan fenol dengan proses oksidasi lanjut ozonasi dan kavitasi

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari dan melakukan analisis tentang peran radikal hidroksil terhadap penyisihan fenol dengan proses oksidasi lanjut berbasis ozonasi dan kavitasi.

#### 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 fenol sintetik.
- (3) Ozonator yang digunakan merupakan ozonator rancangan Prof. Dr. Setijo Bismo.
- (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.
- (9) Laju alir liquid sebesar 2 LPM.
- (10) Konsentrasi awal fenol sebesar 10 ppm.

#### 1.5. Metode Operasional Penelitian

Proses penyisihan fenol dilakukan melalui 4 konfigurasi yang berbeda yaitu: ozonasi, ozonasi/kavitasi hidrodinamik (kavitasi), ozonasi/kavitasi ultrasonik (sonikasi), ozonasi/kavitasi/sonikasi. Untuk mengidentifikasi besarnya fenol yang disisihkan oleh radikal hidroksil, proses penyisihan fenol pada ke-4 konfigurasi diatas dilakukan menggunakan *radical scavenger*. Jumlah fenol yang disisihkan oleh radikal hidroksil adalah selisih antara jumlah fenol yang disisihkan pada proses tanpa *radical scavenger* dan proses dengan *radical scavenger*. Nilai penyisihan fenol pada proses ozonasi akan dibandingkan dengan penyisihan fenol pada proses ozonasi/kavitasi, ozonasi/sonikasi serta ozonasi/kavitasi/sonikasi. Peran radikal hidroksil yang terbentuk karena dekomposisi termal oksigen diidentifikasi melalui proses penyisihan fenol tanpa ozon dilakukan melalui 3 konfigurasi yaitu: sonikasi, kavitasi, kavitasi/sonikasi. Parameter lain yang akan



dianalisa adalah konsentrasi ozon terlarut, konsentrasi gas keluaran ozon, pH, kenaikan suhu, dan konsentrasi oksigen terlarut.



## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Fenol

Fenol adalah senyawa yang memiliki sebuah gugus hidroksil yang terikat langsung pada cincin benzene. Kelarutan fenol dalam air dapat dilihat pada tabel 2.1.

**Tabel 2.1.** Kelarutan fenol dalam air

Nama	Titik leleh(°C)	Titik didih(°C)	kelarutan dalam air (g/100ml)
fenol	43	182	9,3
2-Metilfenol	30	191	2,5
3-Metilfenol	11	201	2,6
4-Metilfenol	35,5	201	2,3
2-Klorofenol	8	176	2,8
3-Klorofenol	33	214	2,6
4-Klorofenol	43	220	2,7
2-Nitrofenol	45	217	0,2
3-Nitrofenol	96		1,4
4-Nitrofenol	114		1,7
2,4-Dinitrofenol	113		0,6
2,4,6-Trinitrofenol	122		1,4

(Sumber: Encyclopedia of Chemical Technology, 2008)

*Fenol menimbulkan bahaya bagi kesehatan manusia, diantaranya yaitu: keracunan kronis menimbulkan gejala gastero intestinal, sulit menelan, dan hipersalivasi, kerusakan ginjal dan hati, serta dapat menimbulkan kematian).*

#### 2.2. Proses Oksidasi Lanjut (*Advanced Oxidation Proses*)

Proses Oksidasi Lanjut bisa secara luas didefinisikan sebagai metode oksidasi fasa larutan yang terutama didasari oleh pembentukan dan penggunaan radikal hidroksil (radikal OH) sebagai hasil sampingan di dalam proses yang dapat mengakibatkan kehancuran dari senyawa target (pencemar), dan bisa digunakan secara terpisah atau dalam berbagai kombinasi (Remtavares, 2009). Radikal OH adalah termasuk agen pengoksidasi yang paling reaktif (Tabel 2.2) di dalam air, dengan laju reaksi berkisar antara  $10^{10}$  -  $10^{13}$   $M^{-1} s^{-1}$ . Di lain pihak, waktu-paruh dari radikal OH hanya berkisar beberapa  $\mu s$ , sehingga konsentrasi dari radikal bebas OH tidak akan pernah mencapai di atas  $10^{-12}$  M (Hoigné, 1975).

Tabel 2.2 Potensial Oksidasi-Reduksi di Dalam Air (Dantas, 2007)

Spesi Oksidator	$E^{\circ}$ , Volts
Flourine	3,0
Radikal OH	2,8
Oksigen	2,1
$H_2O_2$	1,8
Potassium Permanganat	1,7
Asam Hipoklorit	1,5
Chlorine dioksida	1,5
Klorin	1,4
Oksigen	1,2

### 2.2.1. Ozon

Ozon merupakan agen pengoksidasi yang sangat kuat. Penggunaan ozon untuk mengolah air buangan maupun air permukaan yang mengandung polutan berbahaya dengan pengembangan generator ozon berskala besar selama beberapa puluh tahun terakhir ini semakin meningkat. Jika dibandingkan dengan agen pengoksidasi lain, ozon bekerja lebih efisien karena merupakan oksidator yang sangat kuat dan tidak berbahaya karena tidak menambahkan senyawa lain ke dalam air selain oksigen murni.

Ozon terbentuk secara alami di lapisan atas atmosfer (sekitar 25 km di atas permukaan laut). Ozon mengelilingi bumi dan melindungi permukaan bumi dari radiasi ultraviolet-B dan ultraviolet-C. Pembentukan spontan ozon dikarenakan kombinasi dari oksigen bimolar dan atomik, yaitu sebuah reaksi yang mulai

berkembang di sekitar 70 km di atas permukaan laut hingga 20 km dari permukaan bumi. Pada atmosfer yang dekat dengan bumi, ozon merupakan senyawa beracun dengan ambang batas sebesar 0,1 ppm untuk paparan selama setidaknya 8 jam (Nebel, 1981).

ozon juga tidak stabil di dalam air dan mengalami reaksi dengan beberapa komponen matriks air. Bagaimanapun juga, karakteristik unik dari ozon adalah dekomposisinya menjadi radikal OH yang merupakan oksidator terkuat di air. Dengan demikian, pertimbangan untuk proses ozonasi selalu meliputi dua spesi yaitu ozon dan radikal OH. Namun, untuk aplikasi yang berbeda, kedua spesi tersebut memiliki kegunaan yang berbeda. Proses oksidasi bisa terjadi melalui kedua oksidator yaitu ozon dan radikal OH dengan radikal OH memiliki peran yang sangat penting ketika terdapat senyawa pencemar yang memiliki resistansi terhadap ozon (Beltran, 2004).

#### **2.2.1.1 Sifat Fisika Ozon**

Ozon ( $O_3$ ) adalah suatu molekul yang terdiri dari tiga buah atom oksigen dan merupakan bentuk alotropik dari oksigen ( $O_2$ ). Senyawa ini merupakan gas yang tak berwarna pada suhu kamar yang dapat mengembun dan membentuk suatu cairan biru pada suhu  $-112^{\circ}C$  dan membeku pada suhu  $-251,4^{\circ}C$ , serta merupakan senyawa yang tidak stabil dan sangat reaktif (Gambar 2.1). Pada suhu di atas  $0^{\circ}C$  ozon akan mulai mengalami dekomposisi.

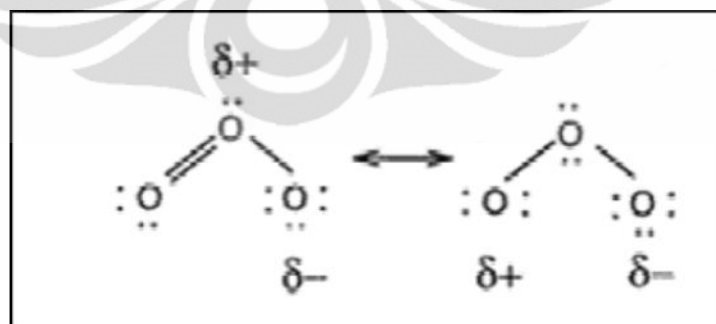
Ozon merupakan gas yang berbau pedas (*pungent*), tajam. Bau ini biasanya terdeteksi oleh hidung manusia pada konsentrasi antara 0,01 dan 0,04 ppm (Suslow, 2004). Walaupun keberadaannya pada bagian atas dan bawah dari stratosfer melindungi bumi dari radiasi berlebihan dari ultraviolet, namun pada lapisan troposfer ozon merupakan polutan dan sangat berbahaya bagi makhluk hidup. Karena toksisitasnya, *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) telah menetapkan batas paparan maksimum untuk manusia terhadap ozon, yaitu sebanyak 0,06 ppm dalam periode delapan jam, lima hari seminggu dan untuk dosis maksimum 0,3 ppm dalam 15 menit. Efek racun dari ozon terutama dikarenakan reaktivitasnya yang tinggi. Ozon terutama menyerang paru-paru, yaitu dapat menyebabkan edema atau pembengkakan paru-paru bahkan

sampai inflamasi saluran pernapasan. Dengan paparan yang lebih lama lagi, ozon dapat melewati alveolus dan dapat mempengaruhi sel-sel darah dan serum protein, bahkan dapat memberikan efek pada mata dan sistem syaraf.

Namun sifat toksisitas dari ozon ini dapat dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi untuk proses-proses seperti penghilangan warna (*decoloration*), penghilangan bau (*deodorization*), dan penguraian senyawa organik (*degradation*) dikarenakan kemampuan oksidasinya yang tinggi. Karena itu, ozon saat ini banyak digunakan dalam proses pemurnian air. Karena itu, ozon saat ini banyak digunakan dalam proses pemurnian air.

### 2.2.1.2 Sifat Kimia Ozon

Ozon berbentuk gas pada suhu dan tekanan normal. Secara kimiawi ozon merupakan senyawa yang tidak stabil, sangat reaktif, dan mudah sekali terdekomposisi menjadi oksigen setelah terbentuk pada ozonator. Oleh karena itu ozon harus dibuat dalam ozonator yang jaraknya dekat dengan instalasi pengolahan air (*on-site*) (Rice and Browning, 1981). Seperti halnya oksigen, kelarutan ozon dalam air juga dipengaruhi oleh temperatur dan tekanan parsial ozon dalam fasa gas, disamping adanya kemungkinan pengaruh pH cairan. Struktur molekular ozon dapat dilihat pada Gambar 2.1 yang memperlihatkan dua bentuk resonansi ozon yang ekstrim.



**Gambar 2.1.** Struktur Molekular Ozon

(Dantas, 2007)

### 2.2.1.3 Ozonasi dalam Air

Stabilitas dari ozon yang terlarut di dalam air dipengaruhi oleh konsentrasi ozon, pH, sinar ultraviolet dan kehadiran dari inhibitor . Karena ozon sifatnya sebagai oksidator, ozon dapat bereaksi baik secara langsung melalui molekul ozon itu sendiri atau secara tidak langsung dengan melibatkan berbagai antara reaktif yang dihasilkan dari dekomposisinya. Kedua cara ini saling bersaing untuk mengoksidasi senyawa pencemar dalam air. Oksidasi langsung dengan ozon relatif lebih lambat dibanding dengan radikal OH namun konsentrasinya lebih tinggi. Di lain pihak, reaksi oksidasi oleh radikal OH sangat cepat, namun konsentrasi radikal OH relatif lebih kecil.

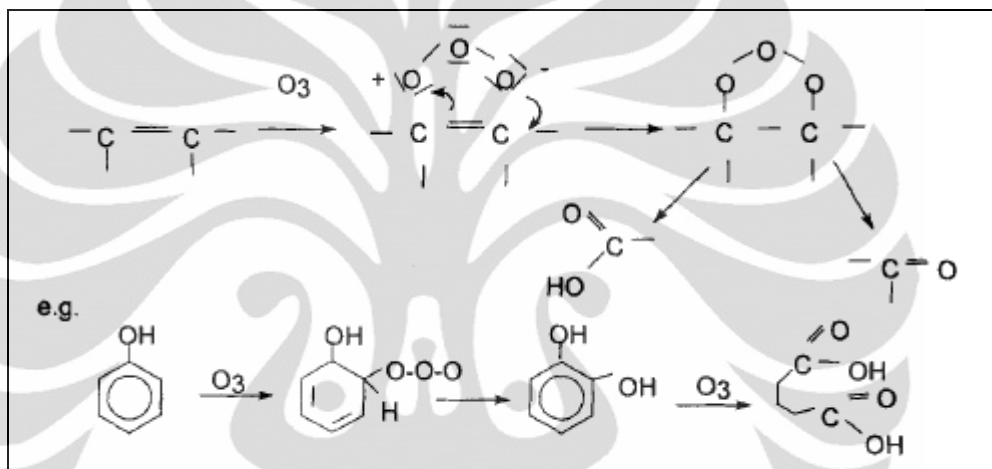
Ketidakstabilan dan dekomposisi ozon dalam air dapat menjadi keuntungan dan kerugian. Dari satu pihak, ketika ozon terdekomposisi, radikal bebas, terutama radikal OH dihasilkan dan dapat mengoksidasi pengotor dengan tidak selektif. Karena itu, studi kinetik dari dekomposisi ozon dalam air merupakan langkah penting untuk mengetahui apakah ozon dapat atau tidak menghilangkan senyawa pencemar dalam air lewat reaksi langsung atau tidak langsung (Mason, 2001)

### 2.2.1.4. Reaksi Langsung Ozon

Dekomposisi dari ozon dipercepat oleh kehadiran OH sehingga pH dari air merupakan salah satu variabel yang sangat penting dalam menentukan laju dekomposisi. Dua mekanisme oksidasi oleh ozon akan menghasilkan produk yang berbeda dan diatur oleh model kinetika yang juga berbeda. Pada kondisi pH rendah, ozon cenderung bereaksi dengan senyawa yang memiliki gugus fungsi tertentu melalui reaksi selektif, seperti elektrofilik, nukleofilik atau reaksi adisi dipolar. Namun pada kondisi basa, ozon cenderung mengalami dekomposisi menghasilkan radikal OH. Pada umumnya, dalam kondisi asam ( $\text{pH} < 4$ ) ozonasi langsung lebih mendominasi. Dalam rentang pH 4-9 baik ozonasi langsung maupun tidak langsung terjadi bersamaan, serta pada kondisi basa ( $\text{pH} > 9$ ) ozonasi tidak langsung lebih banyak terjadi.

Reaksi oksidasi langsung oleh ozon dalam air merupakan reaksi yang selektif dengan konstanta laju reaksi yang kecil, umumnya berkisar antara  $k_D = 1 - 10^3 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$  (Gottschalk, 2000).

Molekul ozon akan bereaksi dengan menggunakan ikatan tak jenuh karena strukturnya yang dipolar dan kemudian akan memicu terjadinya pemecahan ikatan, yang biasa disebut sebagai mekanisme Criegee (Gambar 2.2).



**Gambar 2.2.** Reaksi Ozon Dalam Air  
(Gottschalk, 2000)

Ozon bereaksi lambat dengan sebagian besar tipe kontaminan air seperti pencemar yang menyebabkan air menjadi berbau atau berasa tidak enak seperti geosmin, trihalometan dan senyawa aromatik yang tidak teraktifkan seperti benzena yang terklorinasi. Ozon akan bereaksi dengan cepat dengan beberapa senyawa aromatik seperti senyawa yang membawa elektron seperti gugus hidroksil dalam fenol (Gottschalk, 2000). Pada umumnya bentuk senyawa organik yang terionisasi atau terdissosiasi akan bereaksi dengan ozon dibandingkan dengan senyawa organik yang normal.

Ozonasi langsung merupakan reaksi yang penting jika reaksi pembentukan radikal jarang terjadi. Penyebab jarang terjadi reaksi pembentukan radikal dapat disebabkan karena air yang tercemari mungkin tidak mengandung senyawa

yang dapat menginisiasi reaksi berantai atau mengandung banyak senyawa yang dapat menghentikan (terminasi) reaksi berantai dengan sangat cepat.

#### **2.2.1.5. Reaksi Tidak Langsung Ozon**

Selama proses ozonasi berlangsung, jika ozon bereaksi secara langsung maka proses oksidasi akan diperoleh secara simultan. Namun, jika terdapat senyawa pencemar yang resistan terhadap ozon maka untuk dapat mereduksi senyawa tersebut ozon harus dikonversi menjadi radikal OH. Ketika proses ozonasi berlangsung dengan menggunakan radikal OH, maka kekuatan oksidasi dari ozon akan berkurang (Gunten, 2003). Maka, perlu dilakukan evaluasi terhadap keseluruhan proses agar dapat mengoptimalkan sistem. Agar proses ozonasi dapat dikendalikan dengan baik, pemahaman akan keanekaragaman reaksi yang mempengaruhi mekanisme ozonasi merupakan salah satu kunci penting agar operasi berjalan dengan sesuai. Di dalam air, anion OH akan mendorong terjadinya dekomposisi ozon yang diikuti oleh reaksi berantai hingga terbentuk radikal OH.

#### **2.2.2 Kavitasi**

Kavitasi merupakan fenomena terjadinya pembentukan, pertumbuhan dan hancurnya gelembung mikro dalam cairan. Kondisi kavitasi yang ekstrem dapat dimanfaatkan untuk menghancurkan molekul-molekul polutan dan senyawa organik. Jika fenomena ini terjadi karena adanya gelombang suara dengan frekuensi tinggi 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.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, kavitasi 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 Chuet.*al.*, 2008).



### 2.2.2.1 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 direspon oleh telinga manusia (didas 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 mekanik yang tidak dapat diabsorb oleh molekul.

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 kavitasi.

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.

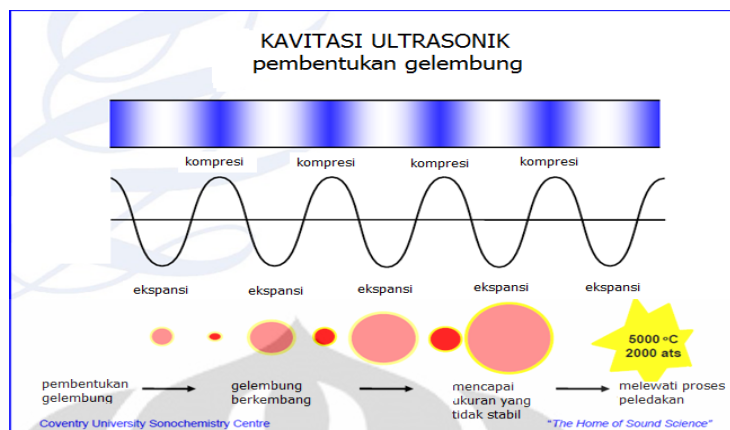
Pada tahap kedua, gelembung-gelembung mikro akan tumbuh dan membesar akibat adanya intensitas gelombang ultrasonik yang tinggi. Dengan ultrasonikasi pada intensitas tinggi, gelembung mikro akan tumbuh dengan sangat cepat. Sedangkan pada intensitas rendah, laju pertumbuhan dari gelembung lebih lambat. 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 kavitasasi, 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 2.3. 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 2.3. menunjukkan bagaimana gelombang ultrasonik dapat memperbesar ukuran gelembung dari waktu ke waktu hingga akhirnya gelembung tersebut hancur.



**Gambar 2.3.** 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) :

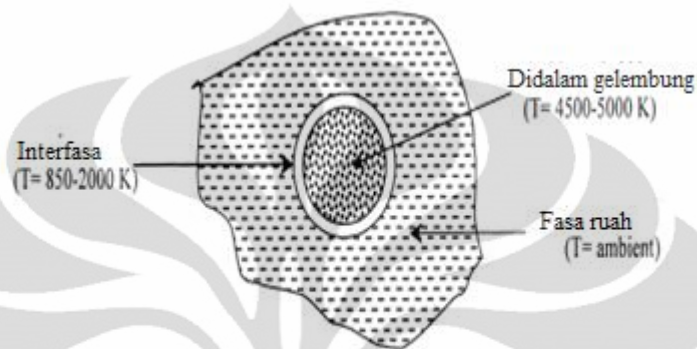


Jika air telah jenuh oleh oksigen dan peroksil, maka akan lebih banyak radikal hidroksil terbentuk di dalam fasa gas karena adanya dekomposisi molekul oksigen, dan radikal hidroksil yang telah terbentuk terlebih dahulu pada bagian interfasa gas-cair dan fasa ruah larutan akan mengalami rekombinasi satu 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 2.4, 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 2.4.**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 hidrosilasi. 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.

#### 2.2.2.2 Kavitasi Hidrodinamik

Proses oksidasi yang terjadi pada kavitasi hidrodinamik serupa dengan kavitasi ultrasonik. Hanya saja kavitasi hidrodinamik ini terjadi karena adanya perubahan bentuk geometri dari aliran, sementara itu kavitasi ultrasonik terjadi karena adanya frekuensi ultrasonik yang diberikan pada aliran. Proses penghancuran polutan dalam kavitasi hidrodinamik mirip seperti kavitasi

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.

Kavitasi hidrodinamik ini memiliki tiga kelebihan utama bila dibandingkan dengan kavitasi ultrasonik, yaitu :

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

Namun, kavitasi hidrodinamik juga memiliki kekurangan bila dibandingkan dengan kavitasi 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.

### **2.2.3 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.

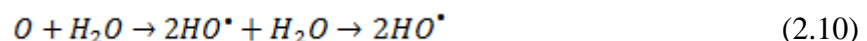
Disamping itu, telah dilakukan penelitian lain yang menunjukkan bahwa sinergi antara proses ozonasi dan kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) mampu mengurangi konsentrasi ozon yang digunakan hingga menjadi setengah atau sepertiga dari yang dibutuhkan untuk proses disinfeksi tanpa kavitasi (Jyoti dan 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.

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.

Selama kavitasi akustik (sonikasi), air terdekomposisi secara pirolitik menghasilkan radikal OH dan hidroperoksil sebagai berikut (Wun-Kang dan Hoffmann, 1998; Wun-Kang, et.al., 1999; Destailats, et.al., 2000a; Chand, et.al., 2009)



Pada fasa ruah liquid, ozon dapat terdekomposisi oleh ion hidroksida OH<sup>-</sup> atau konjugasi basa dari H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (HO<sub>2</sub><sup>-</sup>) menghasilkan HO<sub>2</sub><sup>•</sup> dan <sup>•</sup>OH sebagai berikut:



Karena hydrogen peroksida terbentuk selama sonolisis air, sepasang reaksi ozon dan hydrogen peroksida juga berkontribusi terhadap reaktivitas total dengan senyawa-senyawa organik:







Sederetan reaksi elementer di atas merupakan reaksi rantai radikal bebas yang menyebabkan degradasi ozon dan pembentukan radikal OH dan hidroperoksil sebagai intermediate radikal. Langkah terminasi rantai adalah sebagai berikut:

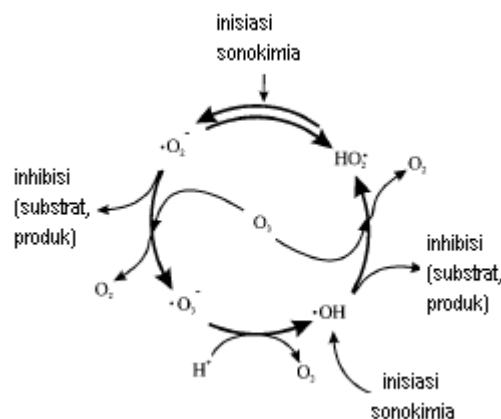


Pembentukan hydrogen peroksida terjadi karena reaksi terminasi ini dan reaksi dari dua radikal hidroperoksil.

Ozon dapat bereaksi dalam fasa ruah liquid baik secara langsung dengan substrat target maupun melalui reaksi tak langsung dengan produk-produk radikal dekomposisinya. Namun, pada proses ozonasi/sonikasi, ozon sebagian besar terdekomposisi dalam fasa gas dari gelembung kavitasi oleh proses termal yang menghasilkan oksigen dan atom oksigen:



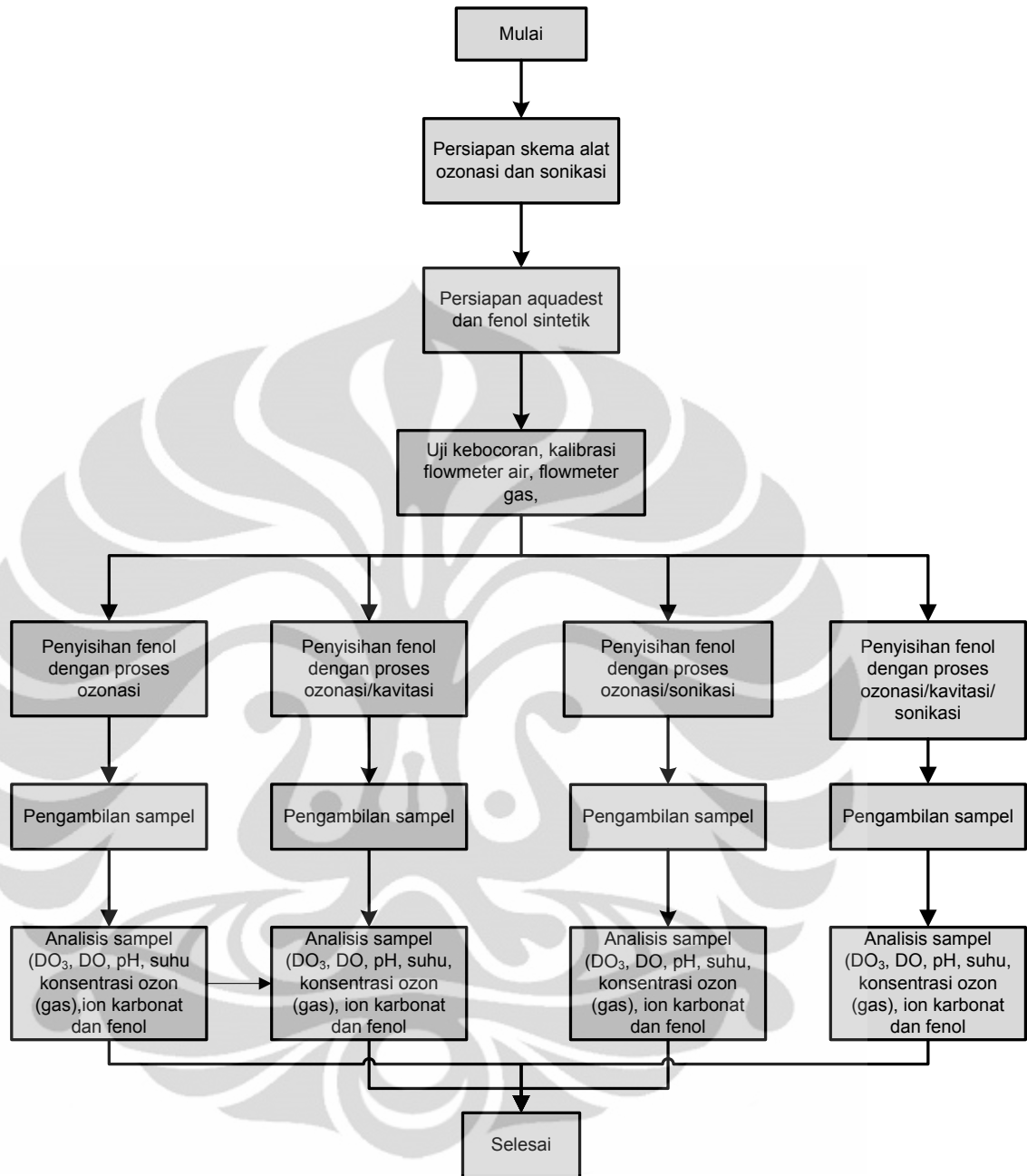
Reaksi di atas merupakan mekanisme utama untuk meningkatkan penyisihan polutan kimia. Reaksi-reaksi kimia ozon pada kondisi iradiasi ultrasonik dijelaskan pada Gambar 2.5.



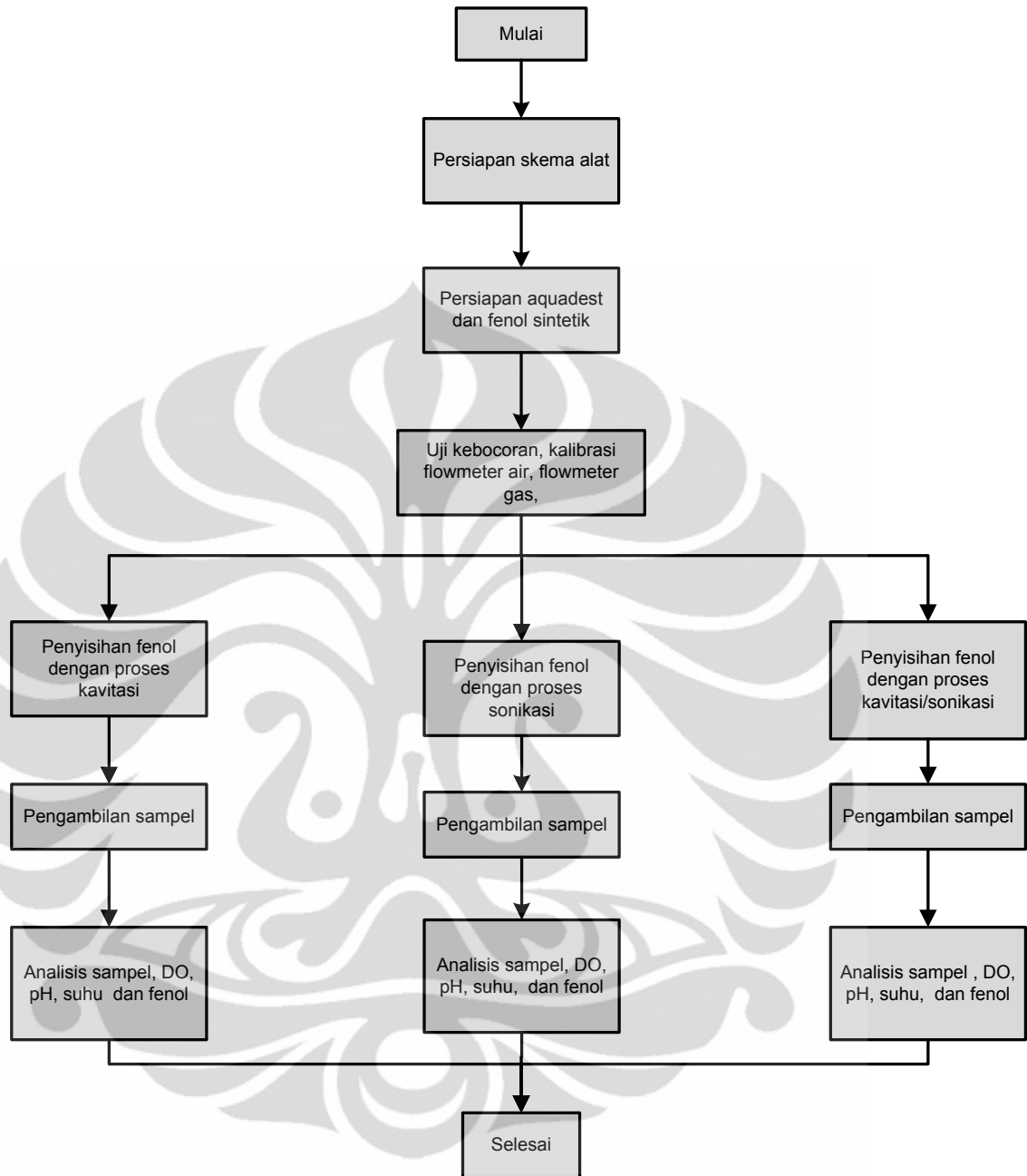
Gambar 2.5. Inisiasi, promosi dan inhibisi (terminasi) dari dekomposisi ozon dalam larutan pada kondisi iradiasi ultrasonik. (Destailats, et.al., 2000a)



Urutan proses kerja yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2



**Gambar 3.1.**Diagram Alir Penelitian dengan ozon



**Gambar 3.2.**Diagram Alir Penelitian tanpa ozon

Proses penyisihan fenol dilakukan melalui 4 konfigurasi yang berbeda yaitu: ozonasi, ozonasi/kavitasi, ozonasi/sonikasi, ozonasi/kavitasi/sonikasi.

Untuk mengidentifikasi besarnya fenol yang disisihkan oleh radikal hidroksil, proses penyisihan fenol pada ke-4 konfigurasi diatas dilakukan menggunakan *radical scavenger*. Jumlah fenol yang disisihkan oleh radikal hidroksil adalah selisih antara jumlah fenol yang disisihkan pada proses tanpa *radical scavenger* dan proses dengan *radical scavenger*. Nilai penyisihan fenol pada proses ozonasi akan dibandingkan dengan penyisihan fenol pada proses ozonasi/kavitasi, ozonasi/sonikasi serta ozonasi/kavitasi/sonikasi. Peran radikal hidroksil yang terbentuk karena dekomposisi termal oksigen diidentifikasi melalui proses penyisihan fenol tanpa ozon dilakukan melalui 3 konfigurasi yaitu: sonikasi, kavitasi, kavitasi/sonikasi. Parameter lain yang akan dianalisa adalah konsentrasi ozon terlarut, konsentrasi gas keluaran ozon, pH, kenaikan suhu, dan konsentrasi oksigen terlarut.

### **3.2 Deskripsi Skema Alat**

Sistem peralatan ini terdiri dari empat peralatan utama: ozonator, injektor, reaktor kaca dan sonikator (dapat dilihat di Gambar 3.3-3.9).

#### **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.

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**

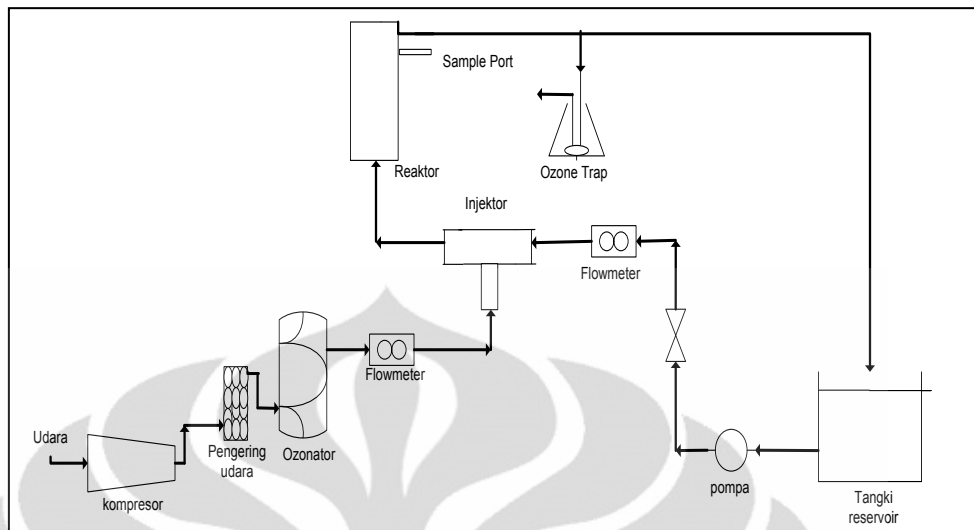
Injektor yang digunakan merupakan injektor tipe venturi Merk Mazzei. Injektor ini berfungsi untuk menginjeksikan ozon ke dalam air. Salah satu keuntungan penggunaan injektor mazzei adalah jenis gelembung yang dihasilkan, yaitu gelembung mikro, sehingga dapat menghasilkan perpindahan massa ozon ke air yang lebih tinggi dibandingkan jika menggunakan *diffuser* biasa.

### **3.2.3. Sonikator UP-800 Ultrasonic Processor**

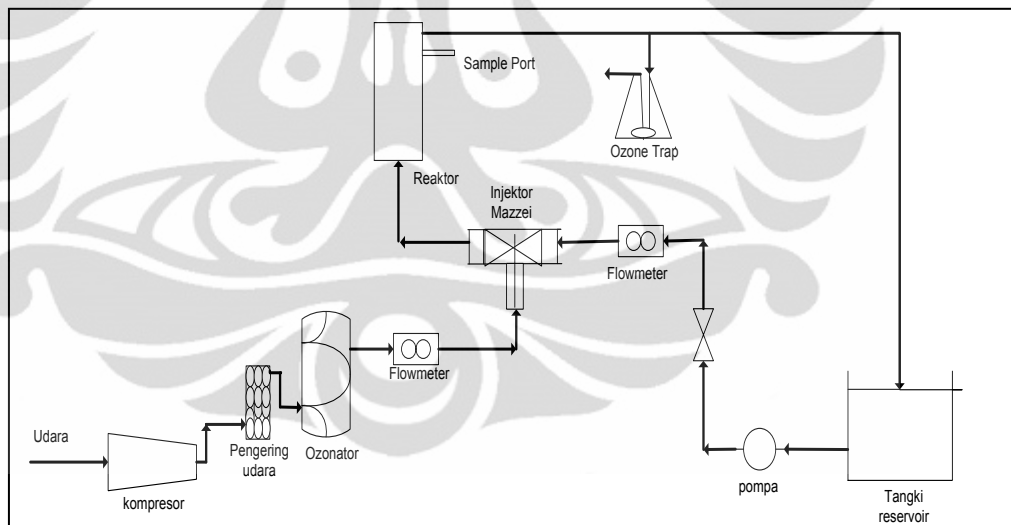
Rangkaian alat ultrasonik ini akan menghasilkan sinyal elektrik dengan frekuensi yang tinggi, yang akan diubah menjadi getaran mekanis. Getaran mekanis akan diteruskan ke sekitar larutan. Getaran ini nantinya akan membentuk gelembung mikro, yang akan berkembang dan akhirnya akan pecah dan menghasilkan radikal hidroksil..

### **3.2.4. Reaktor Kaca dan Pompa**

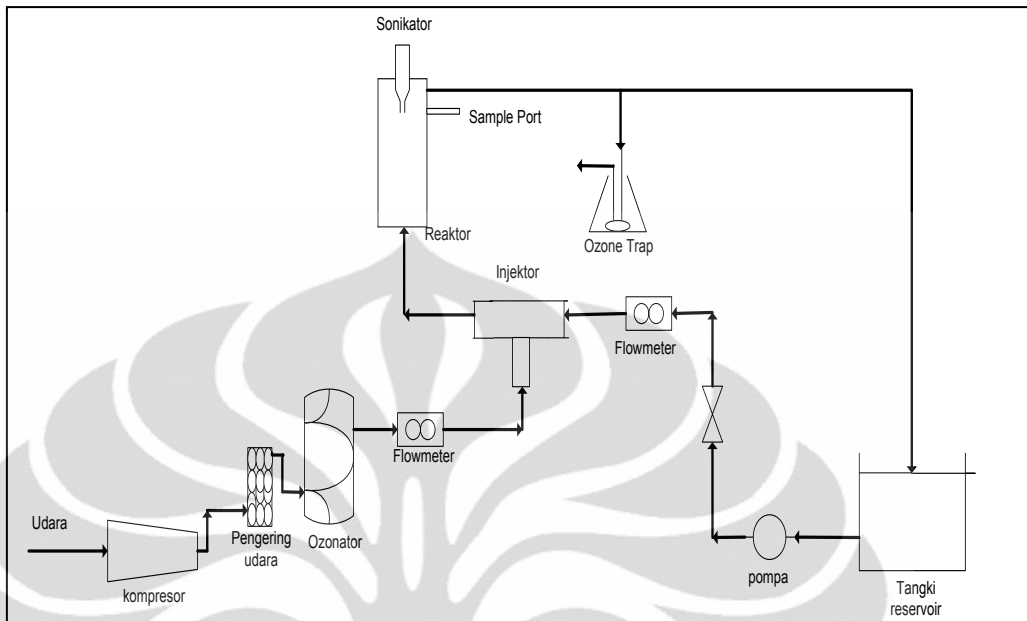
Reaktor kaca dirancang untuk mengamati fenomena fisik yang terjadi. Reaktor ini dibuat dari kaca untuk memudahkan pengamatan. Reaktor ini dilengkapi dengan *sampling port* untuk pengambilan sampel. Pompa yang digunakan terbuat dari bahan *stainless steel* karena tahan terhadap ozon.



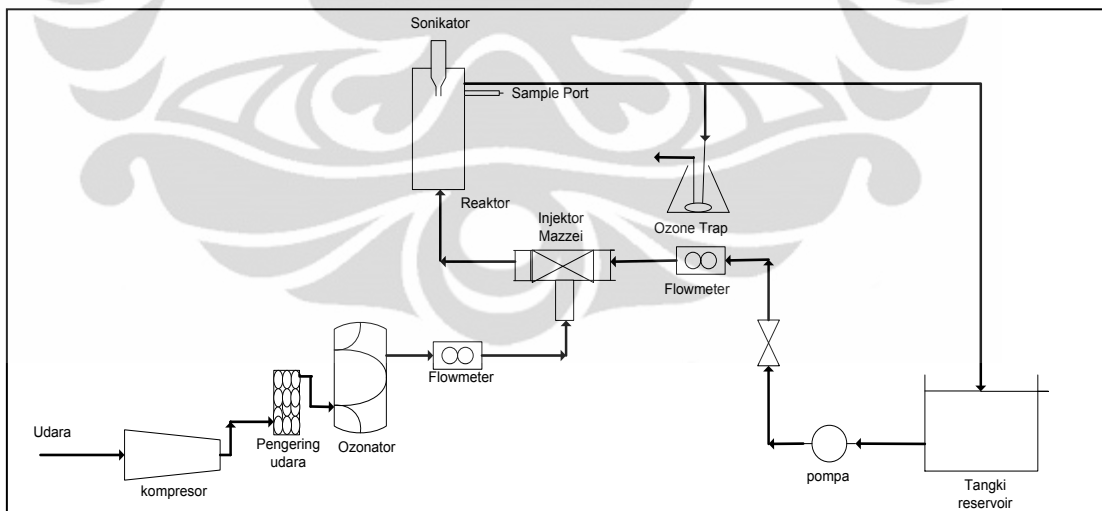
**Gambar 3.3.**Skema Penelitian Ozonasi



**Gambar 3.4.**Skema Penelitian Ozonasi/ Kavitasi Hidrodinamik

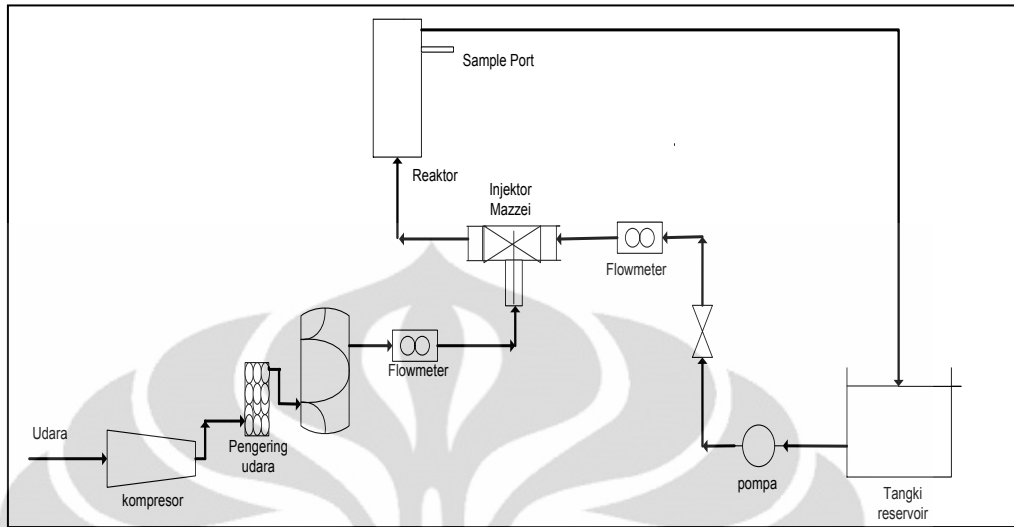


**Gambar 3.5.**Skema Penelitian Ozonasi/Sonikasi

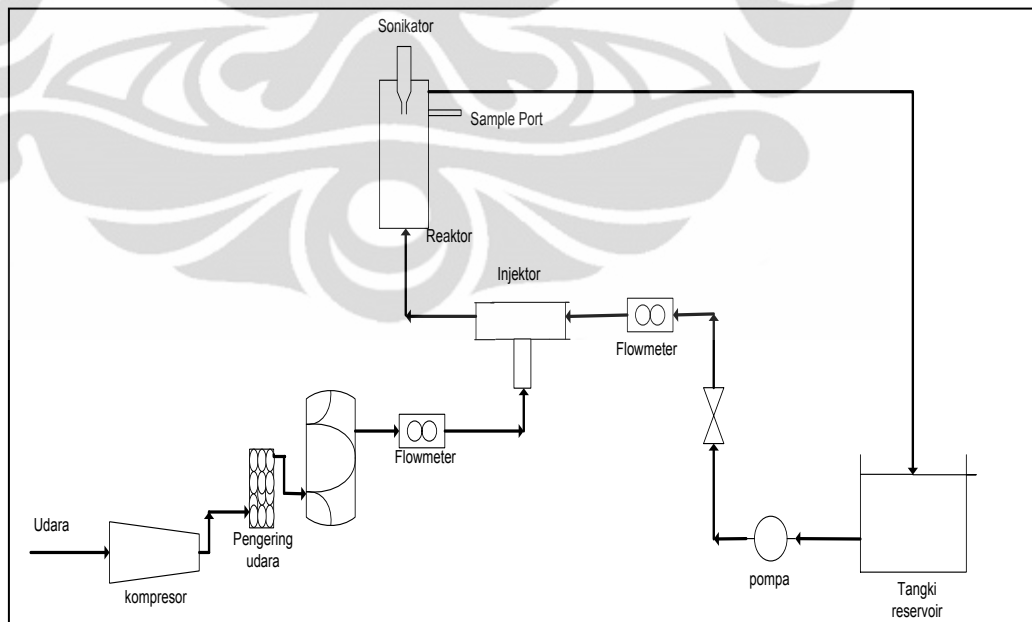


**Gambar 3.6.**Skema Penelitian Ozonasi/Kavitasi Hidrodinamik/Sonikasi

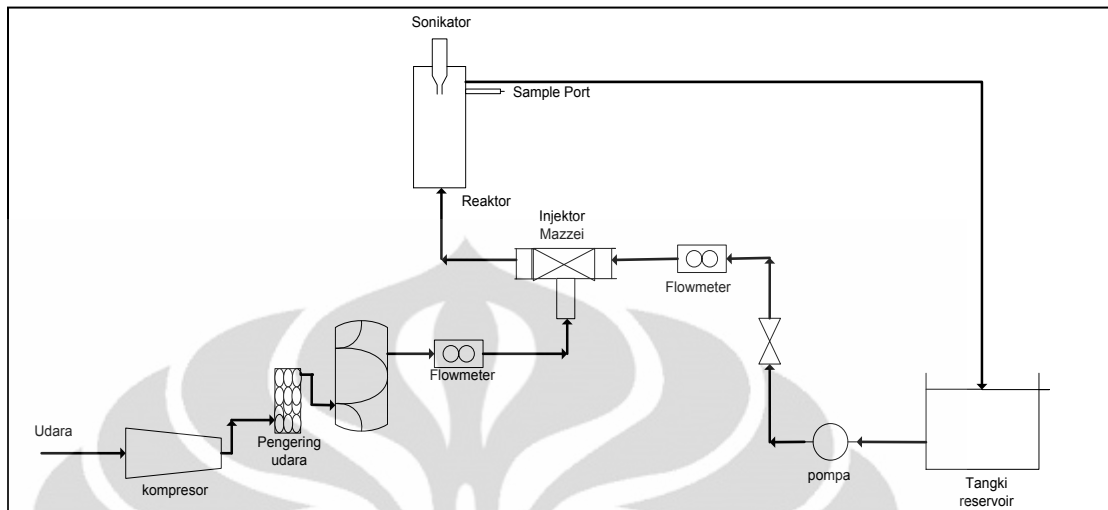




**Gambar 3.7.** Skema penelitian kavitasi



**Gambar 3.8.** Skema penelitian sonikasi



**Gambar 3.9.** Skema penelitian kavitas/sonikasi

### 3.3. Penelitian yang Dilakukan

Cakupan dalam penelitian ini antara lain untuk mengidentifikasi peran radikal hidroksil pada proses penyisihan fenol dengan memvariasikan konfigurasi proses yaitu ozonasi, ozonasi/kavitasi, ozonasi/sonikasi dan ozonasi/kavitasi/sonikasi, yang dievaluasi dengan persentase penyisihan fenol untuk semua konfigurasi penelitian (ozonasi, ozonasi/kavitasi hidrodinamik, ozonasi/sonikasi, ozonasi/kavitasi hidrodinamik/sonikasi) dengan dan tanpa penambahan *radical scavenger* (ion karbonat). Peran radikal hidroksil yang terbentuk karena dekomposisi termal oksigen diidentifikasi melalui proses penyisihan fenol tanpa ozon dilakukan melalui 3 konfigurasi yaitu: sonikasi, kavitasi, kavitasi/sonikasi

### 3.4. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Sistem peralatan pada Gambar 3.3– Gambar 3.9
2. Stop watch

3. Labu erlenmeyer
4. DO meter
5. pH meter
6. Spektrofotometer
7. *Bubbler (ozone trap)*

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Aquades

Air yang digunakan adalah aquades. Dengan menggunakan aquades diharapkan proses perpindahan massa ozon ke air tidak mendapatkan banyak gangguan dari keberadaan mineral-mineral pengganggu. Aquades yang digunakan memiliki pH 6, TDS nol, dan konduktivitas nol (mS).

2. Fenol

Fenol yang digunakan adalah fenol sintetik dengan konsentrasi pada sistem sebesar 10 ppm.

3. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 6 M

HCl 6M berfungsi untuk menjaga pH air pada kisaran 2-3.

4. CaCO<sub>3</sub> 20 ppm

CaCO<sub>3</sub> yang digunakan adalah CaCO<sub>3</sub> sintetik dengan konsentrasi pada sistem sebesar 20 ppm sebagai *radical scavenger*

### 3.5. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan dibagi berdasarkan jenis penelitian yang dilakukan.

#### 3.5.1. Penyisihan fenol dengan proses ozonasi.

Berikut adalah prosedur penelitian penyisihan fenol dengan proses ozonasi

1. Menyusun skema peralatan sesuai dengan Gambar 3.2
2. Mengisi reservoir dengan aquades sebanyak 5 liter
4. Menambahkan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 6 M
3. ke dalam reservoir hingga pH sistem mencapai 4.

4. Menambahkan fenol dengan konsentrasi 10.000 ppm sebanyak 5 mL ke dalam reservoir.
5. Menyalakan pompa.
6. Mengatur valve menuju sistem, dan valve *by-pass* agar aliran air tersirkulasi dengan baik sesuai laju alir air yaitu sebesar 2 L/m.
7. Menginjeksikan ozon ke dalam air dengan laju alir ozon sebesar 200 L/j.
8. Mengambil sampel air di sample port, yaitu:
  - 1) Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 10 mL untuk mengukur kadar fenol.
  - 2) Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 100 mL untuk mengukur pH, suhu dan oksigen terlarut (dengan DO meter), air kemudian dikembalikan ke dalam sistem.
9. Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 5) sebanyak 10 mL untuk mengukur kadar ozon terlarut.
10. Mengambil larutan dalam *bubbler (ozone trap)* dan menggantinya dengan yang baru setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit yang telah terozonasi dan mengukur kadar ozon dengan metode iodometri, mengganti dengan larutan KI yang baru.
11. Mematikan pompa dan mencatat level ketinggian akhir air dalam kolom

### 3.5.2. Penyisihan fenol dengan proses ozonasi/kavitasi hidrodinamik

Berikut adalah prosedur penelitian penyisihan fenol dengan proses ozonasi/hidrodinamik

1. Menyusun skema peralatan sesuai dengan Gambar 3.3
2. Mengisi reservoir dengan aquades sebanyak 5 liter
3. Menambahkan  $H_2SO_4$  6 M ke dalam reservoir hingga pH sistem mencapai 4.
4. Menambahkan fenol dengan konsentrasi 10.000 ppm sebanyak 5 mL ke dalam reservoir.
5. Menyalakan pompa.
6. Mengatur valve menuju sistem, dan valve *by-pass* agar aliran air tersirkulasi dengan baik sesuai laju alir air yaitu sebesar 2 L/m.
7. Menginjeksikan ozon ke dalam air dengan laju alir ozon sebesar 200 L/j.
8. Mengambil sampel air di sample port, yaitu:
  - 3) Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 10 mL untuk mengukur kadar fenol.
  - 4) Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 100 mL untuk mengukur pH, suhu dan oksigen terlarut (dengan DO meter), air kemudian dikembalikan ke dalam sistem.
9. Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 5) sebanyak 10 mL untuk mengukur kadar ozon terlarut.
10. Mengambil larutan dalam *bubbler (ozone trap)* dan menggantinya dengan yang baru setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit yang telah terozonasi dan mengukur kadar ozon dengan metode iodometri, mengganti dengan larutan KI yang baru.
11. Mematikan pompa dan mencatat level ketinggian akhir air dalam kolom

### 3.5.3. Penyisihan fenol dengan proses ozonasi/sonikasi

Berikut adalah prosedur percobaan penyisihan fenol dengan proses ozonasi/sonikasi.

1. Menyusun skema peralatan sesuai dengan Gambar 3.4
2. Mengisi reservoir dengan aquades sebanyak 5 liter
3. Menambahkan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  6 M ke dalam reservoir hingga pH sistem mencapai 4.
4. Menambahkan fenol dengan konsentrasi 10000 ppm sebanyak 5 mL ke dalam reservoir.
5. Menyalakan pompa.
6. Mengatur valve menuju sistem, dan valve *by-pass* agar aliran air tersirkulasi dengan baik sesuai laju alir air yaitu sebesar 2 Lpm.
7. Menyalakan sonikator dengan intensitas 100%.
8. Menginjeksikan ozon ke dalam air dengan laju alir ozon sebesar 200 L/j.
9. Mengambil sampel air di sample port, yaitu:
  - 1) Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 10 mL untuk mengukur kadar fenol.
  - 2) Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 100 mL untuk mengukur pH, suhu dan oksigen terlarut (dengan DO meter), air kemudian dikembalikan ke dalam sistem.
10. Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 5) sebanyak 10 mL untuk mengukur kadar ozon terlarut,
11. Mengambil larutan dalam *bubbler (ozone trap)* dan menggantinya dengan yang baru setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima menit sampai 60 menit yang telah terozonasi dan mengukur

kadar ozon dengan metode iodometri, mengganti dengan larutan KI yang baru.

12. Mematikan pompa dan mencatat level ketinggian akhir air dalam kolom.

#### **3.5.4. Penyisihan fenol dengan proses ozonasi/kavitasi hidrodinamik/sonikasi**

Berikut adalah prosedur percobaan penyisihan fenol dengan proses ozonasi/hidrodinamik/sonikasi

1. Menyusun skema peralatan sesuai dengan Gambar 3.5
2. Mengisi reservoir dengan aquades sebanyak 5 liter
3. Menambahkan  $H_2SO_4$  6 M ke dalam reservoir hingga pH sistem mencapai 4.
4. Menambahkan fenol dengan konsentrasi 10000 ppm sebanyak 4 mL ke dalam reservoir.
5. Menyalakan pompa.
6. Mengatur valve menuju sistem, dan valve *by-pass* agar aliran air tersirkulasi dengan baik sesuai laju alir air yaitu sebesar 2 L/m.
7. Menyalakan sonikator dengan intensitas 100% (*full high*).
8. Menginjeksikan ozon ke dalam air dengan laju alir ozon sebesar 200 L/j.
9. Mengambil sampel air di sample port, yaitu:
  - 1) Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 10 mL untuk mengukur kadar fenol.
  - 2) Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 100 mL untuk mengukur pH, suhu dan oksigen terlarut (dengan DO meter), air kemudian dikembalikan ke dalam sistem.
  - 3) Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 5) sebanyak 10 mL untuk mengukur kadar ozon terlarut.

10. Mengambil larutan dalam *bubbler (ozone trap)* dan menggantinya dengan yang baru setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit yang telah terozonasi dan mengukur kadar ozon dengan metode iodometri, mengganti dengan larutan KI yang baru.
11. Mematikan pompa dan mencatat level ketinggian akhir air dalam kolom.

### 3.5.5. Penyisihan fenol dengan proses kavitasi

Berikut adalah prosedur percobaan penyisihan fenol dengan proses kavitasi

1. Menyusun skema peralatan sesuai dengan Gambar 3.6
2. Mengisi reservoir dengan aquades sebanyak 5 liter
3. Menambahkan  $H_2SO_4$  6 M ke dalam reservoir hingga pH sistem mencapai 4.
4. Menambahkan fenol dengan konsentrasi 10000 ppm sebanyak 4 mL ke dalam reservoir.
5. Menyalakan pompa.
6. Mengatur valve menuju sistem, dan valve *by-pass* agar aliran air tersirkulasi dengan baik sesuai laju alir air yaitu sebesar 2 L/m.
7. Menginjeksikan udara dalam air dengan laju alir sebesar 200 L/j.
8. Mengambil sampel air di sample port, yaitu:
  - 1) Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 10 mL untuk mengukur kadar fenol.
  - 2) Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 100 mL untuk mengukur pH, suhu dan oksigen terlarut (dengan DO meter), air kemudian dikembalikan ke dalam sistem.
9. Mematikan pompa dan mencatat level ketinggian akhir air dalam kolom.



### 3.5.6. Penyisihan fenol dengan proses sonikasi

Berikut adalah prosedur percobaan penyisihan fenol dengan proses kavitasi

1. Menyusun skema peralatan sesuai dengan Gambar 3.7
2. Mengisi reservoir dengan aquades sebanyak 5 liter
3. Menambahkan  $H_2SO_4$  6 M ke dalam reservoir hingga pH sistem mencapai 4.
4. Menambahkan fenol dengan konsentrasi 10000 ppm sebanyak 4 mL ke dalam reservoir.
5. Menyalakan pompa.
6. Mengatur valve menuju sistem, dan valve *by-pass* agar aliran air tersirkulasi dengan baik sesuai laju alir air yaitu sebesar 2 L/m.
7. Menyalakan sonikator dengan intensitas 100% (*full high*).
8. Menginjeksikan dalam air dengan laju alir udara sebesar 200 L/j.
9. Mengambil sampel air di sample port, yaitu:
  - 1) Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 10 mL untuk mengukur kadar fenol.
  - 2) Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 100 mL untuk mengukur pH, suhu dan oksigen terlarut (dengan DO meter), air kemudian dikembalikan ke dalam sistem.
10. Mematikan pompa dan mencatat level ketinggian akhir air dalam kolom.

### 3.5.7. Penyisihan fenol dengan proses kavitasi/sonikasi

Berikut adalah prosedur percobaan penyisihan fenol dengan proses kavitasi

1. Menyusun skema peralatan sesuai dengan Gambar 3.8
2. Mengisi reservoir dengan aquades sebanyak 5 liter
3. Menambahkan  $H_2SO_4$  6 M ke dalam reservoir hingga pH sistem mencapai 4.

4. Menambahkan fenol dengan konsentrasi 10000 ppm sebanyak 4 mL ke dalam reservoir.
5. Menyalakan pompa.
6. Mengatur valve menuju sistem, dan valve *by-pass* agar aliran air tersirkulasi dengan baik sesuai laju alir air yaitu sebesar 2 L/m.
7. Menyalakan sonikator dengan intensitas 100% (*full high*).
8. Menginjeksikan dalam air dengan laju alir udara sebesar 200 L/j.
9. Mengambil sampel air di sample port, yaitu:
  - 1) Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 10 mL untuk mengukur kadar fenol.
  - 2) Setiap lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 100 mL untuk mengukur pH, suhu dan oksigen terlarut (dengan DO meter), air kemudian dikembalikan ke dalam sistem.
10. Mematikan pompa dan mencatat level ketinggian akhir air dalam kolo

### **3.6. Prosedur Analisis Sampel**

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai prosedur yang dilakukan dalam menganalisis sampel pada penelitian penyisihan fenol pada konfigurasi tertentu.

#### **3.6.1. Penentuan Konsentrasi Fenol**

Sampel yang diambil berupa larutan dari bagian atas reaktor kaca. Sampel diambil dari *sampling port*. Sampel diambil dalam selang waktu lima menit selama 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit untuk setiap konfigurasi sistem yang dilakukan. Sampel dianalisa dengan menggunakan spektrofotometer SQ-118 dari Merck dengan basis metode aminoantipirin.

##### **3.6.1.1. Peralatan**

Peralatan yang digunakan:

1. Kuvet

2. Tabung reaksi
3. Pipet 10 mL.
4. Kaca arloji

#### **3.6.1.2. Bahan**

Bahan yang digunakan:

1. Reagent Ph-1
2. Reagent Ph-2
3. Reagent Ph-3
4. Aquadest

#### **3.6.1.3. Prosedur**

1. Menambahkan sampel sebanyak 10 ml ke dalam tabung reaksi.
2. Menambahkan 1 mL reagent Ph-1 pada masing-masing sampel.
3. Menambahkan 1 level microspoon Ph-2 pada masing-masing sampel
4. Menambahkan 1 level microspoon Ph-3 pada masing-masing sampel.
5. Mengukur masing-masing sampel dengan waktu reaksi 10 menit.

#### **3.6.2. Penentuan Konsentrasi Ozon Terlarut**

Sampel yang diambil berupa larutan dari bagian atas reaktor kaca. Sampel diambil dari *sampling port*. Sampel diambil dalam selang waktu lima menit selama 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit untuk setiap konfigurasi sistem yang dilakukan. Sampel dianalisa dengan menggunakan spektrofotometer SQ -118 dari Merck dengan metode S-DPD.

#### **3.6.2.1. Peralatan**

Peralatan yang digunakan:

1. Kuvet
2. Tabung reaksi
3. Pipet 10 mL.
4. Kaca arloji

### 3.6.2.2. Bahan

Bahan yang digunakan:

1. Reagent O<sub>3</sub>-1
2. Reagent O<sub>3</sub>-2
3. Aquadest

### 3.6.2.3. Prosedur

1. Menambahkan sampel sebanyak 10 ml ke dalam tabung reaksi.
2. Menambahkan 2 tetes reagent O<sub>3</sub>-1 pada masing-masing sampel.
3. Menambahkan 1 level microspoon O<sub>3</sub>-2 pada masing-masing sampel
4. Mengukur masing-masing sampel dengan waktu reaksi 3 menit.

### 3.6.3. Penentuan Konsentrasi Keluaran Ozon Fasa Gas

Sampel yang diambil berupa larutan KI yang telah teroksidasi oleh ozon di dalam *bubbler (ozone trap)*. Sampel dianalisa dengan metode iodometri.

#### 3.6.3.1. Peralatan

Peralatan yang digunakan:

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

### 3.6.3.2. Bahan

Bahan yang digunakan:

1. Kalium iodida (KI) 0,12 N
2.  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  0,005 M
3.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  2 N
4. Indikator amylum

### 3.6.3.3. Prosedur

Proseduranalisis sampel dengan metode iodometri adalah sebagai berikut:

1. Mengambil sampel sebanyak 25 mL ke dalam labu erlenmeyer
2. Menambahkan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  2 N 4 mL ke dalam sampel
3. Menambahkan indikator amylum hingga warna sampel menjadi biru
4. Menitrasi sampel dengan  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  hingga warna menjadi bening
5. Mencatat volume  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  yang digunakan untuk menitrasi sampel

### 3.6.4. Penentuan Konsentrasi Ion Karbonat

Sampel yang diambil berupa larutan dari bagian atas reaktor kaca. Sampel diambil dari *sampling port*. Sampel diambil dalam selang waktu lima menit sampai 20 menit dilanjutkan lima belas menit sampai 60 menit untuk setiap konfigurasi sistem yang dilakukan.

#### 3.6.4.1. Peralatan

Peralatan yang digunakan:

1. Buret 50 mL
2. Statip
3. Labu erlenmeyer 500 mL, 1000 mL
4. Gelas ukur 50 mL
5. Pipet

### 3.6.4.2. Bahan

Bahan yang digunakan:

1. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,02 N
2. NaOH 0,1 M
3. PP (*Phenol Ptialin*)
4. Metil Orange

### 3.6.4.3. Prosedur

Proseduranalisis sampel adalah sebagai berikut:

1. Menambahkan PP ke dalam sampel hingga warna menjadi merah-ungu
2. Menitrasi sampel dengan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,02 N hingga warna sampel menjadi bening
3. Mencatat volume H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,02 N yang digunakan untuk menitrasi sampel
4. Menambahkan Metil Orange ke dalam larutan hingga menjadi warna kuning-oranye
5. Menitrasi larutan dengan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,02 N hingga warna sampel menjadi merah muda
6. Mencatat volume H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,02 N yang digunakan untuk menitrasi sampel

## 3.7. Pengolahan Data Penelitian

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai prosedur pengolahan data yang dilakukan pada penelitian penyisihan fenol pada masing-masing konfigurasi.

### 3.7.1. Persentase Penyisihan Fenol

$$\% \text{ Penyisihan Fenol} = \frac{C_0 - C_t}{C_t} \times 100\%$$

Dari data pada masing-masing konfigurasi penelitian akan dibuat grafik dengan:

- Sumbu x: waktu
- Sumbu y: persentase penyisihan fenol

### **3.7.2. Konsentrasi Ozon Terlarut Terhadap Waktu**

Dari data pada masing-masing konfigurasi penelitian akan dibuat grafik dengan:

- Sumbu x: waktu
- Sumbu y: konsentrasi ozon terlarut

### **3.7.3. Konsentrasi Ozon dalam Fasa Gas Terhadap Waktu**

Dari data pada masing-masing konfigurasi penelitian akan dibuat grafik dengan:

- Sumbu x: waktu
- Sumbu y: konsentrasi ozon dalam fasa gas

### **3.7.4. pH Terhadap Waktu**

Dari data pada masing-masing konfigurasi penelitian akan dibuat grafik dengan:

- Sumbu x: waktu
- Sumbu y: pH

### **3.7.5. Konsentrasi Oksigen Terlarut Terhadap Waktu**

Dari data pada masing-masing konfigurasi penelitian akan dibuat grafik dengan:

- Sumbu x: waktu
- Sumbu y: konsentrasi oksigen terlarut

### **3.7.6. Peningkatan Suhu Terhadap Waktu**

Dari data pada masing-masing konfigurasi penelitian akan dibuat grafik dengan:

- Sumbu x: waktu
- Sumbu y: selisih suhu pada menit  $t$  dengan suhu awal

## **BAB 4**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada penelitian ini akan diteliti signifikansi peran radikal hidroksil pada penyisihan fenol dengan proses oksidasi lanjut ozonasi dan kavitasi (hidrodinamika dan ultrasonik). Proses penyisihan fenol dilakukan melalui 4 konfigurasi yang berbeda yaitu ozonasi, ozonasi/kavitasi, ozonasi/sonikasi, dan ozonasi/kavitasi/sonikasi. Proses pada semua konfigurasi dilakukan pada kondisi asam ( $\text{pH}=4$ ) untuk mencegah dekomposisi alamiah ozon menjadi  $\text{OH}^\bullet$ . Pada kondisi seperti ini, fenol dapat bereaksi dengan ozon dan radikal hidroksil yang terbentuk karena kavitasi. Seperti telah disebutkan sebelumnya, pada proses ini OH dapat berasal dari dekomposisi termal oksigen didalam gelembung mikro, dekomposisi termal uap air dari gelembung mikro oleh kavitasi dan dekomposisi termal ozon dari dalam gelembung mikro oleh kavitasi. Untuk mengidentifikasi besarnya fenol yang disisihkan oleh radikal hidroksil, proses penyisihan fenol pada ke-4 konfigurasi diatas dilakukan dengan menggunakan *radical scavenger*. *Radical scavengers* merupakan zat yang bereaksi dengan radikal OH dan memperlambat reaksi rantai. Hal tersebut diakibatkan karena produk hasil reaksi radikal *scavenger* dengan radikal OH tidak akan bereaksi lagi dengan ozon.

Jumlah fenol yang disisihkan oleh radikal hidroksil adalah selisih antar jumlah fenol yang disisihkan pada proses tanpa *radical scavenger* dan proses dengan *radical scavenger*. Peran radikal hidroksil yang terbentuk karena termal oksigen dan uap air diidentifikasi melalui proses penyisihan fenol tanpa ozon dengan 3 konfigurasi yaitu kavitasi, ultrasonik (sonikasi), sonikasi/kavitasi.

Beberapa parameter yang diamati dalam penelitian ini selain persentase penyisihan fenol adalah konsentrasi ozon terlarut, konsentrasi gas keluaran ozon, kandungan oksigen terlarut, serta pH larutan dan peningkatan suhu larutan.



Parameter-parameter ini akan diukur pada masing-masing konfigurasi dengan laju alir gas ozon sebesar 200 L/jam, laju alir air sebesar 2 L/menit pada konsentrasi fenol sebesar 10 ppm.

#### 4.1. Persentase Penyisihan Fenol tanpa *Radical Scavenger*

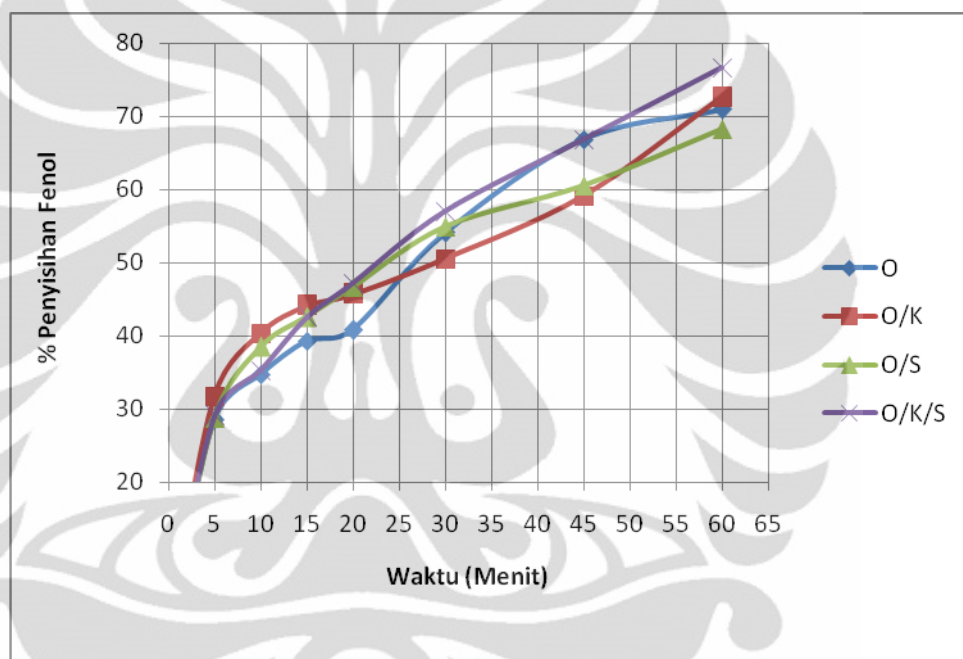
Persentase penyisihan fenol dilihat dari kandungan fenol setelah mengalami proses oksidasi selama 60 menit terhadap kandungan fenol awal. Nilai persentase penyisihan fenol ini akan dibandingkan pada masing-masing konfigurasi proses (ozonasi, ozonasi/kavitasi, ozonasi/sonikasi serta ozonasi/kavitasi/sonikasi). Penyisihan fenol pada proses ozonasi, kavitasi hidrodinamika dan kavitasi ultrasonik dapat terjadi karena:

1. Reaksi langsung dengan ozon secara selektif dengan  $k_{O_3} = 1,3 \times 10^3 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$  (Lesko, 2004)
2. Reaksi secara non-selektif dengan radikal OH dengan  $k_{OH} = 6,6 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$  (Lesko, 2004)
3. Dekomposisi termal fenol (pirolisis) yang terjadi pada daerah antarfasa

Reaksi pertama dan kedua lebih umum terjadi dibanding reaksi ketiga karena reaksi dekomposisi termal fenol umumnya terjadi pada konsentrasi fenol yang tinggi. Hal ini dapat dihubungkan dengan sifat alami fenol yaitu hidrofilik (mudah berikatan dengan air). Fenol merupakan senyawa yang mudah larut dalam air dengan tekanan uap yang rendah (Chowdhury, 2008). Sifat ini mencegah difusi molekul fenol ke dalam gelembung kavitasi, sehingga fenol akan cenderung berada pada fasa ruah cairan. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Lesko membuktikan bahwa reaksi sonokimia pada fenol pada umumnya terjadi di fasa ruah cairan (dengan ozon maupun radikal OH) yang dibuktikan dengan kurangnya produk pirolisis seperti asetilena dan metana.

Gambar 4.1 memperlihatkan bahwa persentase penyisihan fenol pada masing-masing konfigurasi tanpa *radical scavenger* cenderung naik seiring dengan lamanya proses. Penyisihan fenol yang paling besar diperoleh pada penggabungan proses ozonasi/kavitasi/sonikasi (O/K/S). Ketika ozonasi dilakukan pada kondisi asam (pH 4), dekomposisi ozon menjadi radikal OH yang diinisiasi

oleh ion  $\text{OH}^-$  sangat rendah. Jika ozonasi digabung dengan kavitasi, radikal hidroksil dapat terbentuk karena dekomposisi termal oksigen didalam gelembung mikro, dekomposisi termal uap air dari gelembung mikro oleh kavitasi dan dekomposisi termal ozon dari dalam gelembung mikro oleh kavitasi. Penggabungan ozonasi dengan kavitasi hidrodinamik dan sonikasi mengakibatkan waktu tinggal ozon bertambah (Rumia Monica, 2010) sehingga radikal hidroksil yang terbentuk semakin banyak. Radikal OH lebih reaktif pada konfigurasi ozonasi/kavitasi/sonikasi sehingga memiliki penyisihan fenol tertinggi.

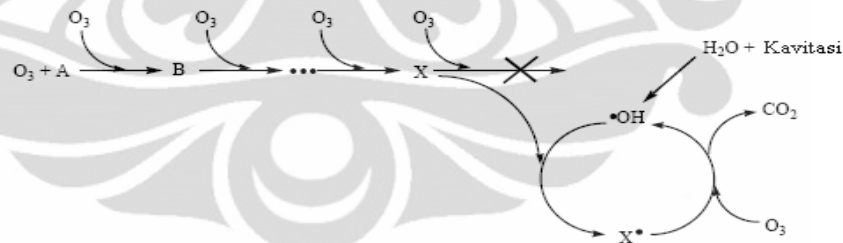


**Gambar 4.1.** Persentase Penyisihan Fenol pada Masing-Masing Konfigurasi Penelitian tanpa *radical scavenger*

Gambar 4.1 memperlihatkan persentase penyisihan fenol pada konfigurasi ozonasi/kavitasi lebih besar daripada ozonasi dan penyisihan fenol paling kecil pada ozonasi/sonikasi. Dengan efek kavitasi yang diberikan pada ozon, maka terjadi perpindahan massa ozon ke dalam air yang lebih besar. Perpindahan massa yang semakin besar adalah karena efek mekanis seperti proses pencampuran yang lebih besar dan pembentukan gelembung-gelembung ozon ketika dilewati transduser atau injektor (Mason, 2001).

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 ( $\cdot\text{OH}$ ) yang dihasilkan yang akan meningkatkan proses penyisihan fenol. Laju transfer massa tergantung pada karakteristik campuran kontraktor gas-cair yang digunakan, dan jumlah dan ukuran gelembung mikro yang dihasilkan. Dengan efek kavitasi yang diberikan pada ozon, maka terjadi perpindahan massa ozon ke dalam air yang lebih besar. Perpindahan massa yang semakin besar adalah karena efek mekanis seperti proses pencampuran yang lebih besar dan pemecahan gelembung-gelembung ozon ketika dilewati transduser atau injektor (Mason, 2001). Efektifitas ozonasi dapat ditingkatkan dengan memperluas area permukaan ozon melalui ukuran gelembung yang lebih kecil.

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



**Gambar 4.2.** 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 ( $\text{A}$ ) dan produk samping fenol akan terjadi secara cepat di dalam larutan melalui reaksi langsung oleh ozon. Serangan langsung dari molekul ozon menghasilkan senyawa jenuh ( $\text{X}$ ) yang tidak dapat dioksidasi lebih lanjut oleh ozon, hal ini dikarenakan produk

antara (X) teroksidasi yang bersifat sangat hidrofilik sehingga dengan mudah membentuk ikatan hidrogen dengan molekul air, 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<sup>•</sup>) dengan ozon akan membentuk radikal hidroksil yang akan meningkatkan proses penyisihan fenol dengan penggabungan ozonasi/kavitasi.

Proses kavitasi akan menghasilkan gelembung-gelembung mikro pada air, sehingga molekul gas dari air yang terjebak dalam gelembung yang tereksansi akan pecah hingga menghasilkan senyawa radikal yang sangat reaktif seperti radikal OH sesuai dengan Persamaan 4.1 (N.H. Ince, 2000):



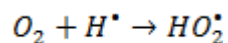
Penggabungan kavitasi ultrasonik dan campuran udara/ozon akan menghasilkan proses oksidasi lanjut yang berbeda. Ozon akan terdekomposisi di dalam gelembung mikro sesuai dengan persamaan:



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



Reaksi (4.3) terjadi di daerah dalam gelembung mikro. Disamping itu radikal OH juga dapat terjadi karena dekomposisi termal oksigen menurut reaksi sebagai berikut :



(4.5)

Radikal OH yang terbentuk kemudian akan bermigrasi ke daerah antarfasa dari gelembung mikro dan nantinya juga akan ditransfer menuju fasa ruah larutan. Kombinasi ozon dengan kavitasi merupakan sistem oksidasi yang efektif melihat bahwa radikal OH yang dihasilkan berjumlah dua molekul per satu molekul ozon yang digunakan (Mason, 2001).

Radikal OH adalah senyawa yang sangat reaktif . Pada kondisi dimana konsentrasi OH tinggi, reaksi yang dapat terjadi diantaranya reaksi ozon dengan radikal OH dengan laju reaksi  $3 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ , reaksi radikal OH dengan fenol dengan laju reaksi  $6,6 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$  dan reaksi rekombinasi OH dengan laju reaksi  $5,5 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ . Dari laju reaksi rekombinasi OH dan reaksi radikal OH dengan fenol diperoleh laju yang hampir setara , hal itu berarti keduanya mempunyai penyisihan fenol yang hampir setara. Efek lain yang signifikan dari sonikasi adalah degassing. *Degassing* merupakan fenomena berkurangnya kandungan senyawa terlarut (dalam kasus ini adalah ozon) pada proses kavitasi akibat pecahnya gelembung mikro. Oleh karena itu ozon yang terlarut dapat lepas pada proses ozonasi/sonikasi yang berakibat mempunyai nilai penyisihan fenol yang paling kecil.

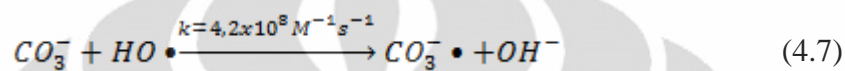
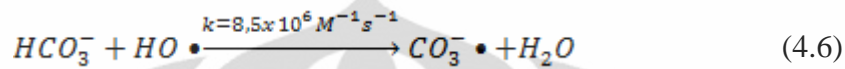
Peningkatan jumlah radikal OH dari proses penggabungan ozon dengan kavitasi (hidrodinamika dan/atau ultrasonik) merupakan efek kimia dari kavitasi. Namun kavitasi juga memberi efek fisika pada proses ozonasi yaitu peningkatan laju transfer massa gas-cair ozon.

Dari penjelasan di atas dapat disimpulkan bahwa persentase penyisihan fenol dapat ditingkatkan dengan peningkatan jumlah radikal OH. Proses penggabungan ozonasi, kavitasi hidrodinamika dan kavitasi ultrasonik memiliki persentase penyisihan fenol yang paling besar. Hal ini terjadi karena sumber kavitasi untuk membentuk radikal OH tidak hanya berasal dari perbedaan tekanan (hidrodinamik) atau perubahan gelombang suara (ultrasonik) namun merupakan penggabungan keduanya, selain itu kavitasi hidrodinamik dapat mereduksi efek *degassing* yang timbul akibat dari sonikasi dan meningkatkan waktu tinggal ozon. *Degassing* merupakan fenomena berkurangnya kandungan senyawa terlarut (dalam kasus ini adalah ozon) pada proses kavitasi akibat pecahnya gelembung mikro.

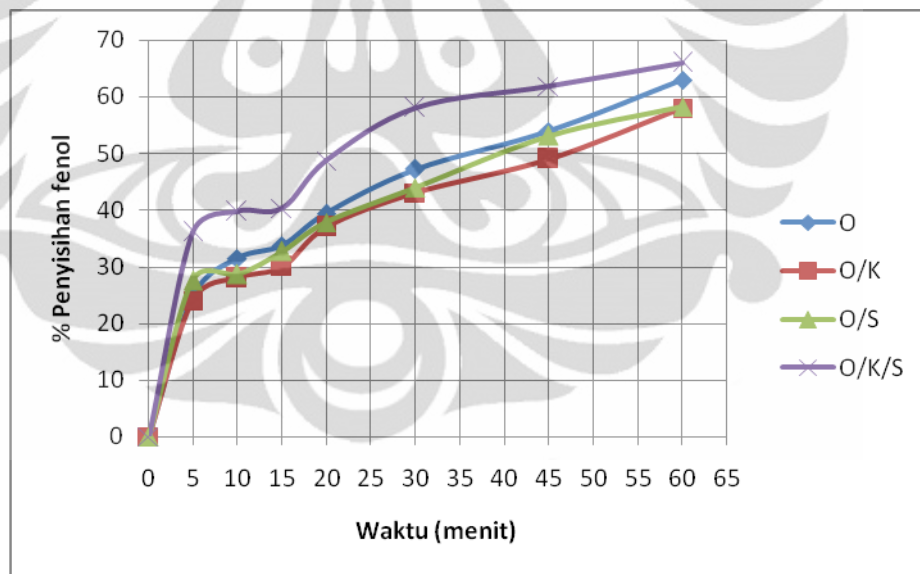
#### **4.2. Persentase Penyisihan Fenol dengan *Radical Scavenger***

Untuk memperjelas peranan radikal OH pada proses ozonasi dan kavitasi, maka dilakukan juga penelitian dengan menggunakan ion karbonat sebagai *radical scavenger* yang akan bereaksi dengan radikal OH. Ion karbonat berasal dari senyawa  $\text{CaCO}_3$  dengan konsentrasi 20 ppm. Konsentrasi yang lebih besar

dari konsentrasi fenol ini dipilih agar ion karbonat bereaksi dengan seluruh radikal OH yang terbentuk, dan tidak bereaksi dengan ozon atau fenol. Dengan bereaksinya ion karbonat dengan radikal OH, diharapkan fenol yang tersisih adalah karena bereaksi secara langsung dengan ozon. Reaksi ion karbonat dengan radikal OH dapat terjadi menurut reaksi berikut :



Gambar 4.3 memperlihatkan bahwa persentase penyisihan fenol pada masing-masing konfigurasi dengan penambahan *radical scavenger* cenderung naik seiring dengan lamanya proses. Penyisihan fenol yang paling besar diperoleh pada penggabungan proses ozonasi/kavitasi /sonikasi (O/K/S).



**Gambar 4.3.** Persentase Penyisihan Fenol pada Masing-Masing Konfigurasi dengan *radical scavenger*

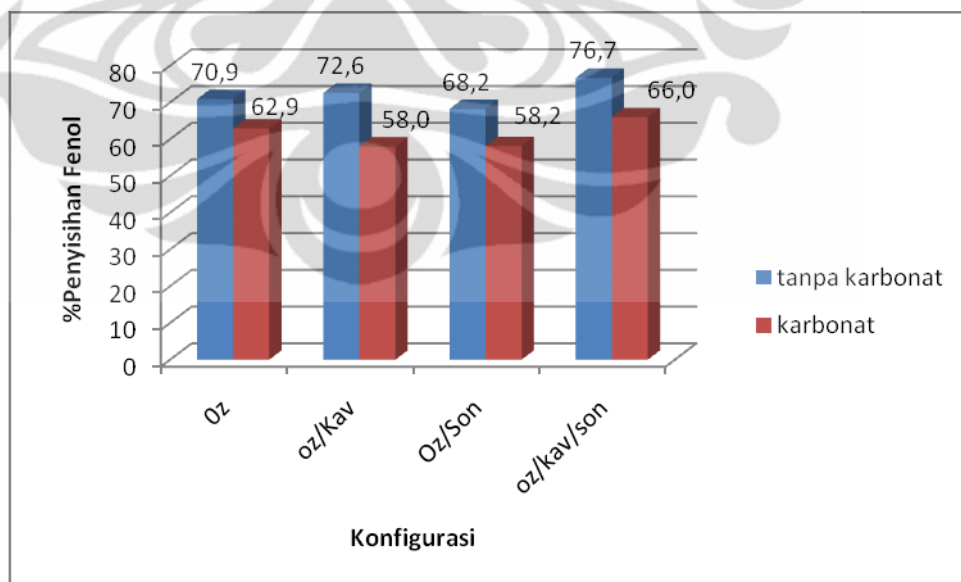
Pada gambar 4.3 memperlihatkan bahwa persentase penyisihan paling besar terjadi pada konfigurasi ozonasi/kavitasi/sonikasi. Hal ini terjadi karena kelarutan ozon pada konfigurasi ozonasi/kavitasi/sonikasi lebih tinggi dibandingkan dengan konfigurasi lainnya. Penambahan proses kavitasi



(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) yang memungkinkan fenol terdegradasi melalui reaksi pirolisis. Pada konfigurasi ozonasi saja diperoleh penyisihan fenol lebih besar dibandingkan dengan konfigurasi ozonasi/kavitasi maupun ozonasi/sonikasi hal ini terjadi karena reaksi fenol dengan ozon yang lebih banyak. Pada ozonasi/kavitasi dan ozonasi/sonikasi sebagian ozon terdekomposisi menjadi radikal OH, yang kemudian bereaksi dengan ion karbonat.

*Radical scavengers* merupakan zat yang bereaksi dengan radikal OH tapi tidak bereaksi dengan ozon dan memperlambat reaksi rantai. Hal tersebut diakibatkan produk hasil reaksi *radical scavenger* dengan radikal OH tidak akan bereaksi lagi dengan ozon. Penambahan *radical scavenger* dapat meningkatkan waktu paruh ozon. Reaksi yang terjadi pada penelitian ini merupakan reaksi radikal OH dengan *scavenger*  $\text{CO}_3^{2-}$ .

Pengaruh penambahan *radical scavenger* pada larutan dapat dilihat pada Gambar 4.4 :



**Gambar 4.4.** Persentase penyisihan fenol tanpa dan penambahan *radical scavenger*

Gambar 4.4 menunjukkan perbandingan persentase penyisihan fenol pada percobaan tanpa dan dengan karbonat. Dapat dilihat bahwa persentase penyisihan fenol dengan karbonat lebih kecil dibandingkan tanpa karbonat dengan persentase penyisihan fenol dengan karbonat memiliki nilai sekitar 8-15% dari penyisihan fenol tanpa karbonat. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa pada percobaan tanpa karbonat, hampir 8-15 % selisih persentase penyisihan fenol adalah akibat reaksi dengan radikal OH. Dengan demikian dapat terlihat besar peranan kavitasi dalam proses penyisihan fenol berbasis ozonasi, dimana proses yang menghasilkan persentase penyisihan fenol yang paling maksimum adalah proses gabungan ozonasi, kavitasi hidrodinamika dan ultrasonik.

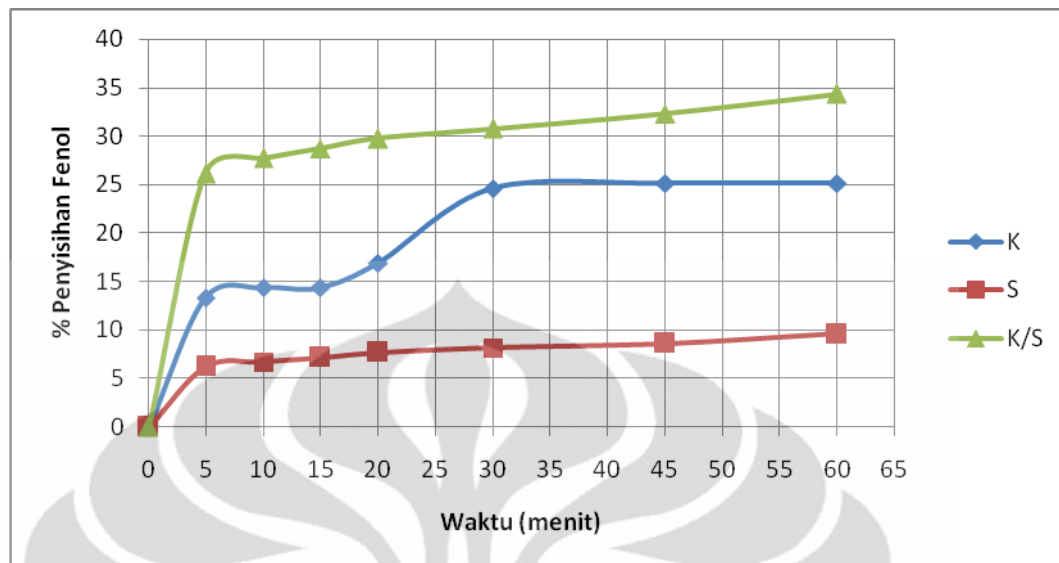
Pada gambar 4.4 diperoleh selisih yang paling besar pada konfigurasi ozonasi/kavitasi memiliki nilai 14,5%. Hal ini terjadi karena radikal hidroksil yang terbentuk semakin meningkat sehingga meningkatkan penyisihan fenol. Pada proses ozonasi yang telah dikombinasikan dengan kavitasi, walaupun kondisi larutan adalah asam, terjadi pembentukan radikal OH sehingga proses penyisihan fenol pun semakin baik jika dibandingkan dengan proses ozonasi saja.

#### **4.3. Persentase Penyisihan Fenol tanpa Ozon**

Persentase penyisihan fenol dilihat dari kandungan fenol setelah mengalami proses tanpa ozon selama 60 menit terhadap kandungan fenol awal. Nilai persentase penyisihan fenol ini akan dibandingkan pada masing-masing konfigurasi proses (kavitasi, sonikasi, sonikasi/kavitasi). Proses penyisihan fenol tanpa ozon bertujuan untuk mengidentifikasi peran radikal hidroksil yang terbentuk karena dekomposisi termal oksigen dan uap air. Pada air yang diberikan kavitasi, panas yang dihasilkan dari ledakan gelembung mikro akan mendekomposisi air menjadi atom hidrogen dan radikal OH yang sangat reaktif. Pada proses ini, fenol terkonversi karena bereaksi dengan radikal OH dan karena radiasi pirolisi (terdegradasi secara termal).

Gambar 4.5 memperlihatkan bahwa persentase penyisihan fenol pada masing-masing konfigurasi tanpa ozon cenderung naik seiring dengan lamanya proses. Penurunan yang paling drastis diperoleh pada penggabungan proses kavitasi/sonikasi (K/S).





**Gambar 4.5** Persentase Penyisihan Fenol pada Masing-Masing Konfigurasi Penelitian tanpa ozon

Gambar 4.5 diperoleh penyisihan fenol paling tinggi pada konfigurasi kavitasi/sonikasi, hal ini terjadi karena Penambahan proses kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) akan membentuk gelembung mikro yang akan memperbesar luas permukaan kontak sehingga meningkatkan perpindahan massa ozon ke dalam larutan. 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. 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).

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. Oleh karena itu proses

kavitasi/sonikasi lebih efektif dibandingkan dengan proses kavitasi atau sonikasi saja.

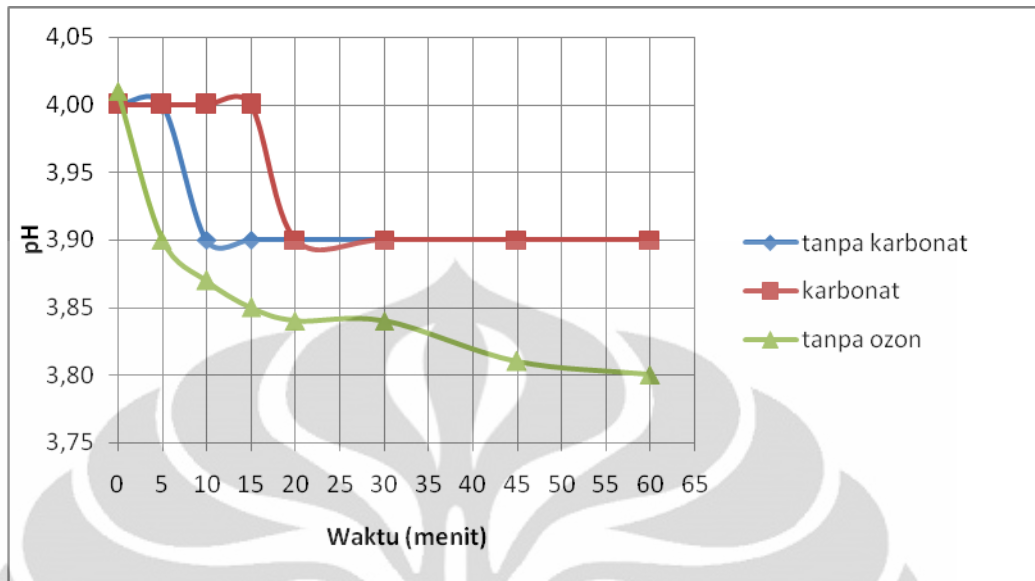
Konfigurasi kavitasi/sonikasi memiliki penyisihan fenol yang paling besar daripada kavitasi atau sonikasi hal ini karena gabungan kavitasi dan sonikasi akan meningkatkan kelarutan oksigen sehingga memperbanyak radikal OH akan tetapi menurunkan efek degassing. Sedangkan jika konfigurasi kavitasi hanya menaikkan kelarutan oksigen dan konfigurasi sonikasi menaikkan kelarutan oksigen dan pembentukan OH tetapi menaikkan efek degassing.

#### **4.4. Parameter- parameter lainnya**

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

##### **4.4.1. pH**

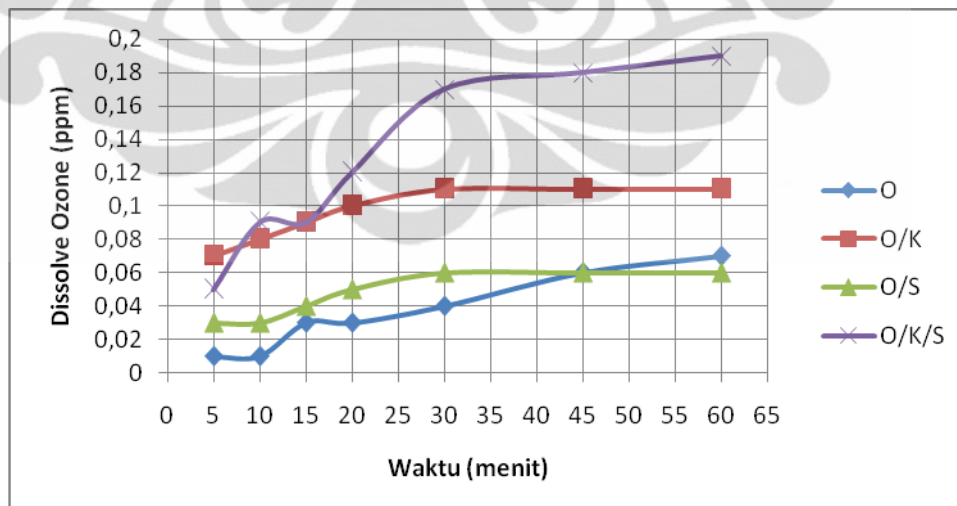
Pada penelitian ini pH awal larutan diatur dengan menambahkan larutan  $H_2SO_4$  6 M sehingga diperoleh kondisi asam pada sistem (pH berkisar 4). Pengukuran pH untuk penelitian ini dilakukan dengan menggunakan pH meter. Berdasarkan Gambar 4.6 dibawah ini terlihat bahwa untuk masing-masing variasi proses 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. 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 4.6 ini dapat dilihat bahwa penurunan pH pada menit-menit awal tidak terlalu signifikan. 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 bahkan cenderung stabil. Hal ini menunjukkan bahwa produk antara pada proses penyisihan fenol tersebut semakin menurun seiring dengan lamanya proses karena teroksidasi oleh radikal hidroksil.



**Gambar 4.6.** hubungan pH dengan waktu pada dengan dan tanpa ozon

#### 4.4.2. Konsentrasi Ozon Terlarut (*Dissolved Ozone*)

Ozon terlarut menyatakan banyaknya ozon yang tidak atau belum bereaksi dengan senyawa pencemar yang ada di dalam larutan. Pada penelitian ini profil konsentrasi ozon terlarut pada berbagai metode dapat dilihat pada Gambar 4.7 :



**Gambar 4.7.** Hubungan antara ozon terlarut dengan variasi konfigurasi terhadap waktu

Penggunaan instrumen kavitas akan meningkatkan ozon terlarut, hal ini disebabkan penggunaan kavitas akan menghasilkan gelembung mikro. Dapat dilihat pada gambar diatas, konsentrasi ozon terlarut pada proses gabungan

ozonasi dengan kavitasi ultrasonik dan hidrodinamik dapat mencapai 0,19 ppm. Penggunaan kavitasi ultrasonik akan mengakibatkan terbentuknya gelembung yang tidak seragam karena proses ekspansi dan kompresi gelembung terjadi lebih ekstrim karena amplitudo dari kavitasi ultrasonik cukup tinggi. Efek dari fenomena ini adalah peningkatan suhu yang menyebabkan meningkatnya dekomposisi ozon dan terjadinya *micro streaming*, yaitu pencampuran mikro untuk mempertipis lapisan batas fasa cair-gas yang terjadi akibat gelembung yang berosilasi. Hal inilah yang memungkinkan kelarutan gas dalam air lebih besar. Sehingga dapat dilihat pada Gambar 4.7 konsentrasi ozon terlarut paling tinggi terjadi pada proses ozonasi dengan peran kavitasi, khususnya pada proses gabungan dengan kavitasi hidrodinamik dan ultrasonik.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, penambahan kavitasi selain memberi efek kimia (memperbanyak dekomposisi ozon menjadi radikal OH) juga memberi efek fisika (memperbesar laju perpindahan massa gas-cair) pada proses berbasis ozon. Fenomena ini dapat dilihat dari Gambar 4.7 dimana kandungan ozon residual pada proses ozonasi/sonikasi nilainya berdekatan dengan proses ozonasi). Hal ini karena adanya efek *degassing* yang timbul akibat proses sonikasi itu sendiri, selain itu dekomposisi ozon akibat dari paparan ultrasonik juga memicu berkurangnya konsentrasi ozon terlarut. Hal ini didapatkan bahwa arah atau posisi gelembung awal yang masuk kedalam reaktor juga berpengaruh pada pembentukan gelembung mikro.

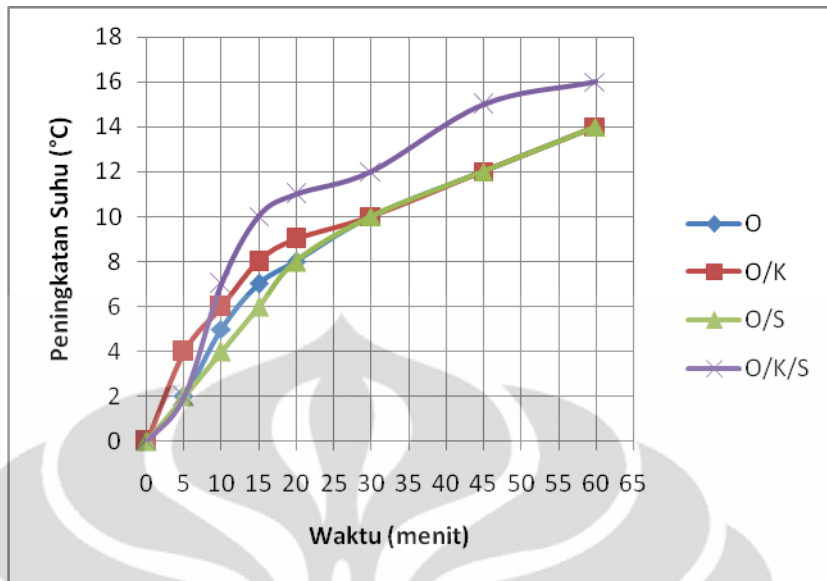
Dari Gambar 4.7, dapat dilihat bahwa kecenderungan ozon terlarut pada masing-masing proses adalah meningkat. Fenomena naik kelarutan ozon yang sangat jelas terlihat pada proses ozonasi/hidrodinamik/sonikasi. Pada proses ini di menit ke-20 hingga 45 ozon terlarut mengalami peningkatan yang cukup drastis. Untuk kurva ini dapat dijelaskan bahwa pada menit-menit awal ozon yang terlarut terdekomposisi menjadi radikal OH akibat adanya gabungan kavitasi hidrodinamik dan ultrasonik. Fenol pada menit-menit awal ini akan terdekomposisi oleh ozon dan radikal OH. Kemudian pada menit ke- 20 terjadi peningkatan kelarutan ozon yang cukup besar. Peningkatan ini dapat terjadi karena dua hal, yaitu karena konsentrasi fenol sudah cukup berkurang dari sistem, dan dengan laju alir gas ozon yang tetap maka kelarutan ozon di dalam

sistem pun meningkat (persentase fenol sudah semakin menurun sehingga semakin sedikit ozon terlarut yang bereaksi dengan fenol). Selain itu, karena semakin tingginya suhu, pembentukan radikal OH pun akan semakin meningkat sehingga semakin banyak fenol yang bereaksi dengan radikal OH dan konsentrasi ozon di dalam air akan mengalami peningkatan.

#### **4.4.3 Peningkatan Suhu**

Pada Gambar 4.8 dapat dilihat profil perubahan suhu pada masing-masing konfigurasi. Untuk masing-masing konfigurasi profil peningkatan suhu memiliki kecenderungan meningkat. Hal ini dapat disebabkan oleh energi mekanik yang dihasilkan pompa yang diubah menjadi energi panas (untuk masing-masing konfigurasi), dan juga karena pecahnya gelembung mikro pada proses ozonasi dengan kavitasi (hidrodinamika dan/atau ultrasonik).

Peningkatan intensitas sonikator akan meningkatkan suhu sistem. Hal ini disebabkan karena intensitas maksimum yang digunakan akan meningkatkan energi yang di salurkan ke air, sehingga kerja sonikator akan semakin tinggi dan suhu meningkat. Selain itu, semakin besar intensitas sonikator, fenomena hot-spot yang dihasilkan sonikator akan semakin besar. Fenomena hot spot terjadi karena semakin banyak gelembung yang pecah sehingga meningkatkan laju pemanasan. Semakin tinggi intensitas, semakin besar pula kerja sonikator dalam menyalurkan energy, semakin banyak gelembung yang berekspansi dan kompresi. Hal ini menyebabkan peningkatan suhu yang lebih besar.



**Gambar 4.8.** Hubungan antara peningkatan suhu dengan variasi konfigurasi terhadap waktu

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

Dari penelitian yang dilakukan, kesimpulan yang bisa diambil adalah:

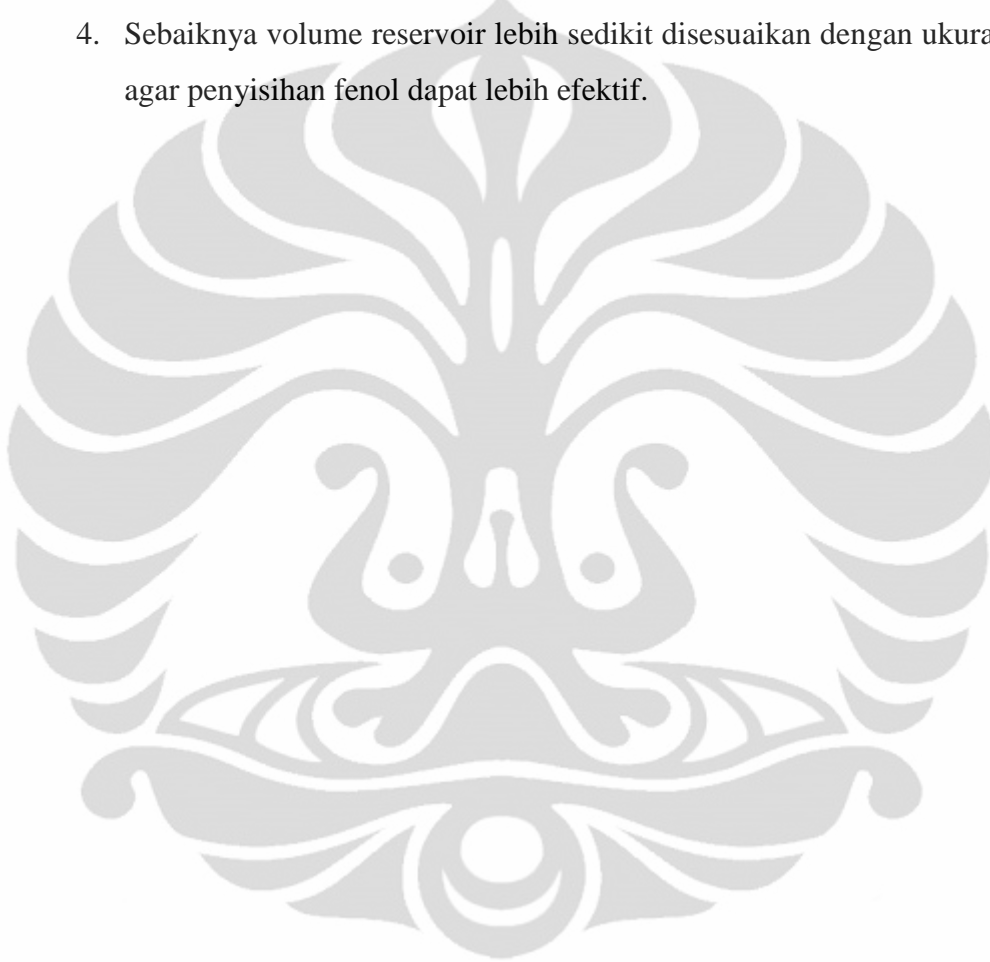
1. Dengan penambahan proses kavitasi hidrodinamik/ultrasonik akan meningkatkan efektifitas proses karena akan meningkatkan pembentukan radikal hidroksil yang akan bereaksi dengan fenol.
2. Dengan persentase penyisihan fenol sebesar 76,68%, proses ozonasi/kavitasi/sonikasi merupakan proses yang paling baik untuk penyisihan fenol dibanding dengan proses kavitasi/sonikasi sebesar 34,36%
3. Kavitasi memberi dua efek terhadap proses oksidasi lanjut berbasis ozon, yaitu: efek kimia dalam bentuk peningkatan radikal OH dan efek fisika dalam bentuk peningkatan kelarutan ozon dalam sistem (dilihat dari kandungan ozon residual dan konsentrasi gas keluaran ozon).
4. Persentase penyisihan fenol dengan karbonat lebih kecil sebesar 8%-14% dibandingkan tanpa karbonat. Hasil ini menunjukkan bahwa pada percobaan tanpa karbonat, hampir 8%-14% selisih persentase penyisihan fenol adalah akibat reaksi dengan radikal OH .

#### **5.2. Saran**

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian dengan variasi laju alir dan variasi konsentrasi fenol untuk mengetahui keefektifan peran radikal OH dalam penyisihan fenol pada proses oksidasi lanjut ozonasi/kavitasi.

2. Sebaiknya pengujian ozon terlarut dalam air dilakukan dengan segera agar diperoleh hasil yang lebih baik.
3. Perlu dilakukan analisis produk akhir dari penyisihan fenol dengan ozonasi, kavitasi hidrodinamika dan kavitasi ultrasonik. Hal ini perlu dilakukan agar dapat diketahui apakah proses penyisihan fenol masih menghasilkan senyawa antara yang berbahaya atau tidak.
4. Sebaiknya volume reservoir lebih sedikit disesuaikan dengan ukuran reaktor agar penyisihan fenol dapat lebih efektif.





## DAFTAR PUSTAKA

- Achmad Rukaesih, 2004, *Kimia Lingkungan*, Andi:Yogyakarta
- Adewuyi, Yusuf G. Sonochemistry: environmental science and engineering application. *Industrial Engineering Chemistry*. 2001;4681-4715.
- Beltran, Fernando J. *Ozone Reaction Kinetics for Water and Wastewater Treatments*. Florida: Lewis Publishers; 2004.
- Buscaa, Guido., et al. Technologies for the removal of phenol from fluid streams: A short review of recent developments. *Journal of Hazardous Materials*. 2008;265-288.
- Canton, C., Esplugas, S. and Casado, J. Mineralization of phenol in aqueous solution by ozonation using iron or copper salts and light. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2003;139-149
- Chowdhury, Pankaj and T. Viararaghavan. Sonochemical degradation of chlorinated organik compounds, phenolic compounds and organik dyes – A review. *Science of The Total Environment*. 2009;2474-2492.
- Dantas, Renato Falcao. *Ozonation of Emergent Contaminants*. Universitas de Barcelona: 2007.
- Destaillets, Hugo., et al. *Sonochemical degradation of Pollutants*. M. A. Tarr, Marcel Dekker Inc., New York, NY, 2003.
- Esplugas, S., Giménez, J., Contreras, S., Pascual, E. and Rodríguez, M. Comparison of different advanced oxidation processes for phenol degradation. *Water Research*. 2002; 1034-1042.
- Gordon, G., W.J. Cooper, R.G. Rice, and G.E. Pacey. *Disinfectant Residual Measurement Methods*, second edition. AWWARF and AWWA, Denver: CO; 1992.
- Gottschalk, C., et al. *Ozonation of Water and Wastewater System*. Winhem: Wiley-VCH; 2000.
- Gunten, Urs. Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. *Water research*. 2003;37;1443-1467

- Hoigné, J. and Bader, H. Ozonation of Water: Role of Hydroxyl Radicals as Oxidizing Intermediates. *Science*, Vol. 190; 1975.
- Hua, I., Hoffman. *Environ. Sci. Technol.*, 1996;30;864.
- Huang, Ching-Rong and Hung-Yee Shu. The reaction kinetics, decomposition pathways and intermediate formations of phenol in ozonation, UV/O, and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes. *Journal of Hazardous Materials*. 1994;47-64.
- Ince NH, et al., Ultrasound as a catalyzer of aqueous reaction systems: the state of the art and environmental application. *Environmental* 2001;29;167-176.
- Jyoti, K.K., Pandit AB,. Hybrid cavitation methods for water disinfection: simultaneous use of chemicals with cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2003;10;255–264.
- Jyoti ,K.K., Pandit, A.B., Ozone and cavitation for water disinfection, *J. Biochem Eng*; 2003.
- Kidak, R. and N.H. Ince. Catalysis of advanced oxidation reactions by ultrasound: a case study with phenol. Bogazici University, Institute of Environmental Sciences. 2007.
- Klasson KT, et al. Ozone Treatment of Soluble Organics in Produced Water. Oak Ridge National Laboratory for US Department of Energy; 2002.
- Langlais, B., D.A. Reckhow, and D.R. Brink (editors).. *Ozone in Drinking Water Treatment: Application and Engineering*. AWWARF and Lewis Publishers; Boca Raton: FL. 1991.
- Lesko, Timothy Michael. Chemical Effects of Acoustic Cavitation. Institute of Technology Pasadena, California. 2004.
- Li-Bing Chu, et.al. Enhanced ozonation of simulated dyestuff wastewater by microbubbles. *Chemosphere*. 2007;68;1854-1860.
- Lovato, Maria Eugenia, Carlos A. Martin, Alberto E. Cassano. A reaction kinetic model for ozone decomposition in aqueous media valid for neutral and acidic pH. *Chemical Engineering Journal*. 2009;146;486-497.
- Mason, Timothy et al. *Advances in Sonochemistry*. USA: Jan Press Inc;2001
- Nasser, S., et al. Determination of the ultrasonic effectiveness in advanced wastewater treatment. *Sci. Eng.* 109-116.

- Nebel, C. Encyclopedia of Chemical Technology. New York: John Wiley & Sons; 1981, 683-713.
- Pandit, A. B. and Moholkar V. S., *Harness Cavitation to Improve Processing*. Chemical Engineering Progress; 1996.
- Pera-Titus, Marc, Garcia-Molina, Verónica, Baños, Miguel A., Giménez, Jaime, Esplugas, Santiago, Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: a general review, *Applied Catal*; 2003.
- Priya, S. S., et al. Solar photocatalytic treatment of phenol wastewater. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2009.
- Rice, R. G., Browning M. E. Ozone treatment of industrial wastewater. Noyes Data Corporation; 1981.
- Sartor, M., Gatjal, H., and Mavrovb, V. Demonstration of a new hybrid process for the decentralised drinking and service water production from surface water in Thailand; *Desalination*; 2007.
- Sivasankar, Thirugnanasambandam and Vijayanand S. Moholkar. Mechanistic approach to intensification of sonochemical degradation of phenol. *Chemical Engineering Journal*. 2009;57-69.



### A.1. Tabel Variasi Skema Tanpa Karbonat

#### A.1.1. Ozonasi

$Q_L = 2$  LPM

$C_p = 10$  ppm

$Q_G = 200$  L/jam

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	$C/C_0$	%penyisihan	CO3,g	selisih suhu
0		5,7	4		25	9,80	1,00	0,00		0
5	0,05	5,7	4	0,6	27	7,00	0,71	28,57	5,76	2
10	0,06	5,7	3,97	1,95	30	6,40	0,65	34,69	18,72	5
15	0,06	5,5	3,97	2,57	32	5,95	0,61	39,29	24,672	7
20	0,07	5,5	3,97	3,9	33	5,80	0,59	40,82	37,44	8
30	0,08	5,5	3,97	8,5	35	4,50	0,46	54,08	81,6	10
45	0,09	5,5	3,97	10,8	37	3,25	0,33	66,84	103,68	12
60	0,16	5,5	3,97	11,6	39	2,85	0,29	70,92	111,36	14

### A.1.2. Ozonasi/Kavitasi

$Q_L = 2 \text{ LPM}$

$C_p = 10 \text{ ppm}$

$Q_G = 200 \text{ L/jam}$

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	$C/C_0$	%penyisihan	CO3,g	selisih suhu
0		5,7	4		25	9,30	1,00	0,00		0
5	0,06	5,7	4	3,2	29	6,35	0,68	31,72	30,72	4
10	0,07	5,7	4	5,15	31	5,55	0,60	40,32	49,44	6
15	0,08	5,5	4	5,5	33	5,20	0,56	44,09	52,8	8
20	0,09	5,5	4	6,3	34	5,05	0,54	45,70	60,48	9
30	0,1	5,5	3,93	11,2	35	4,60	0,49	50,54	107,52	10
45	0,11	5,5	3,87	12,1	37	3,80	0,41	59,14	116,16	12
60	0,13	5,5	3,86	27,4	39	2,55	0,27	72,58	263,04	14

### A.1.3. Ozonasi//Kavitasi

$Q_L = 2 \text{ LPM}$

$C_p = 10 \text{ ppm}$

$Q_G = 200 \text{ L/jam}$

Intensitas 100%

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	$C/C_0$	%penyisihan	CO3,g	selisih suhu
0		5,7	4,00		25	9,75	1,00	0,00		0
5	0,04	5,6	4	2,7	27	6,95	0,71	28,72	25,92	2
10	0,05	5,6	3,93	3,3	29	6	0,62	38,46	31,68	4
15	0,05	5,5	3,93	3,5	31	5,6	0,57	42,56	33,6	6
20	0,06	5,5	3,93	3,7	33	5,2	0,53	46,67	35,52	8
30	0,08	5,5	3,92	5,2	35	4,4	0,45	54,87	49,92	10
45	0,09	5,5	3,91	6,2	37	3,85	0,39	60,51	59,52	12
60	0,1	5,5	3,9	6,57	39	3,10	0,32	68,21	63,072	14

#### A.1.4. Ozonasi/Kavitasi/Sonikasi

$Q_L = 2$  LPM

$C_p = 10$  ppm

$Q_G = 200$  L/jam

Intensitas 100%

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	$C/C_0$	%penyisihan	CO3,g	selisih suhu
0		5,7	4,00		25	9,65	1,00	0,00		0
5	0,05	5,6	4	0,65	27	6,85	0,71	29,02	6,24	2
10	0,05	5,6	3,9	2,55	32	6,25	0,65	35,23	24,48	7
15	0,06	5,5	3,9	2,67	35	5,55	0,58	42,49	25,632	10
20	0,08	5,5	3,9	2,77	36	5,10	0,53	47,15	26,592	11
30	0,09	5,4	3,9	8,9	37	4,15	0,43	56,99	85,44	12
45	0,1	5,4	3,9	12,1	40	3,20	0,33	66,84	116,16	15
60	0,11	5,4	3,9	12,2	41	2,25	0,23	76,68	117,12	16

## A.2. Tabel Variasi Skema Dengan Karbonat

### A.2.1. Ozonasi

$Q_L = 2$  LPM

$C_p = 10$  ppm

$Q_G = 200$  L/jam

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran KI	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	$C/C_0$	%penyisihan	CO <sub>3</sub> ,g	selisih suhu	vol.titran karbonat
0		5,7	4		25	8,90	1,00	0,00		0	1,95
5	0,01	5,7	4	0,3	27	6,70	0,75	24,72	2,88	2	1,35
10	0,01	5,7	4	1,25	32	6,10	0,69	31,46	12	7	1,00
15	0,03	5,7	4	1,3	32	5,90	0,66	33,71	12,48	7	0,90
20	0,03	5,6	3,9	2,75	33	5,40	0,61	39,33	26,4	8	0,67
30	0,04	5,6	3,9	4,85	35	4,70	0,53	47,19	46,56	10	0,40
45	0,06	5,6	3,9	5,8	37	4,10	0,46	53,93	55,68	12	0,35
60	0,07	5,6	3,9	13,2	39	3,30	0,37	62,92	126,72	14	0,3



### A.2.2. Ozonasi /Kavitasi

$Q_L = 2$  LPM

$C_p = 10$  ppm

$Q_G = 200$  L/jam

Intensitas 100%

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran KI	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	$C/C_0$	%penyisihan	CO3,g	selisih suhu	vol.titran carbonat
0		5,8	4		25	10,00	1,00	0,00		0	1,50
5	0,07	5,6	4	0,3	31,5	7,60	0,76	24,00	2,88	7	1,30
10	0,08	5,5	4	1,7	32,5	7,20	0,72	28,00	16,32	8	0,80
15	0,09	5,4	4	2,3	34	7,00	0,70	30,00	22,08	9	0,60
20	0,1	5,3	3,9	2,6	35,5	6,30	0,63	37,00	24,96	11	0,50
30	0,11	5,1	3,9	5,7	37	5,70	0,57	43,00	54,72	12	0,40
45	0,11	4,9	3,9	6,4	39	5,10	0,51	49,00	61,44	14	0,30
60	0,11	4,8	3,9	9,5	40,5	4,20	0,42	58,00	91,2	16	0,2

### A.2.3. Ozonasi/Sonikasi

$Q_L = 2$  LPM

$C_p = 100$  ppm

$Q_G = 200$  L/jam

Intensitas 100%

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran KI	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	$C/C_0$	%penyisihan	CO3,g	selisih suhu	vol.titran carbonat
0		5,7	4,00		25,8	9,8	1,00	0,00		0	1,30
5	0,03	5,6	4	0,8	27,1	7,1	0,72	27,55	7,68	1,3	0,90
10	0,03	5,5	4	2,3	28,2	7	0,71	28,57	22,08	2,4	0,80
15	0,04	5,3	4	2,6	30,5	6,6	0,67	32,65	24,96	4,7	0,70
20	0,05	5,2	3,9	2,8	32	6,1	0,62	37,76	26,88	6,2	0,60
30	0,06	5	3,9	7,6	34	5,5	0,56	43,88	72,96	8,2	0,40
45	0,06	4,9	3,9	10,6	36	4,6	0,47	53,06	101,76	10,2	0,30
60	0,06	4,7	3,9	12,8	37,4	4,10	0,42	58,16	122,88	11,6	0,3

#### A.2.4. Ozonasi/Kavitasi/Sonikasi

$Q_L = 2$  LPM

$C_p = 100$  ppm

$Q_G = 200$  L/jam

Intensitas 100%

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran KI	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	$C/C_0$	%penyisihan	CO <sub>3</sub> ,g	selisih suhu	vol.titran carbonat
0		5,7	4,00		25	9,55	1,00	0,00		0	1,30
5	0,05	5,7	4	0,2	27	6,10	0,64	36,13	1,92	2	1,20
10	0,09	5,7	4	0,45	31	5,75	0,60	39,79	4,32	6	1,15
15	0,09	5,6	4	0,7	32	5,70	0,60	40,31	6,72	7	1,10
20	0,12	5,6	3,9	1,7	34	4,90	0,51	48,69	16,32	9	1,00
30	0,17	5,5	3,9	3,4	36	4,00	0,42	58,12	32,64	11	0,94
45	0,18	5,5	3,9	6,8	37	3,65	0,38	61,78	65,28	12	0,75
60	0,19	5,5	3,9	8,6	39	3,25	0,34	65,97	82,56	14	0,62

### A.3. Tabel Variasi Skema tanpa Ozon

#### A.3.1. Kavitasi

$Q_L = 2$  LPM

$C_p = 10$  ppm

$Q_G = 200$  L/jam

t (menit)	DO (ppm)	pH	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	$C/C_0$	%penyisihan
0	5,8	4,00	25	9,75	1,00	0,00
5	5,7	4	30	8,45	0,87	13,33
10	5,5	4	31	8,35	0,86	14,36
15	5,3	4	32	8,35	0,86	14,36
20	5,3	4	33	8,10	0,83	16,92
30	5,1	3,93	36	7,35	0,75	24,62
45	5	3,87	37	7,30	0,75	25,13
60	4,80	3,86	39	7,30	0,75	25,13

### A.3.2. Sonikasi

$Q_L = 2\text{LPM}$

$C_p = 10\text{ ppm}$

$Q_G = 200\text{ L/jam}$

t (menit)	DO (ppm)	pH	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	$C/C_0$	%penyisihan
0	5,7	4,00	25	10,45	1,00	0,00
5	5,6	4	30	9,8	0,94	6,22
10	5,4	3,93	31	9,75	0,93	6,70
15	5,3	3,93	34	9,7	0,93	7,18
20	5,2	3,93	36	9,65	0,92	7,66
30	4,8	3,92	37	9,6	0,92	8,13
45	4,7	3,91	39	9,55	0,91	8,61
60	4,6	3,9	41	9,45	0,90	9,57

### A.3.3. Kavitasi/Sonikasi

$Q_L = 2\text{LPM}$

$C_p = 10\text{ ppm}$

$Q_G = 200\text{ L/jam}$

t (menit)	DO (ppm)	pH	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	$C/C_0$	%penyisihan
0	5,8	4,01	25	9,75	1,00	0,00
5	5,7	3,9	27	7,20	0,74	26,15
10	5,5	3,87	32	7,05	0,72	27,69
15	5,4	3,85	35	6,95	0,71	28,72
20	5,3	3,84	36	6,85	0,70	29,74
30	5	3,84	37	6,75	0,69	30,77
45	4,9	3,81	40	6,60	0,68	32,31
60	4,8	3,8	41	6,40	0,66	34,36

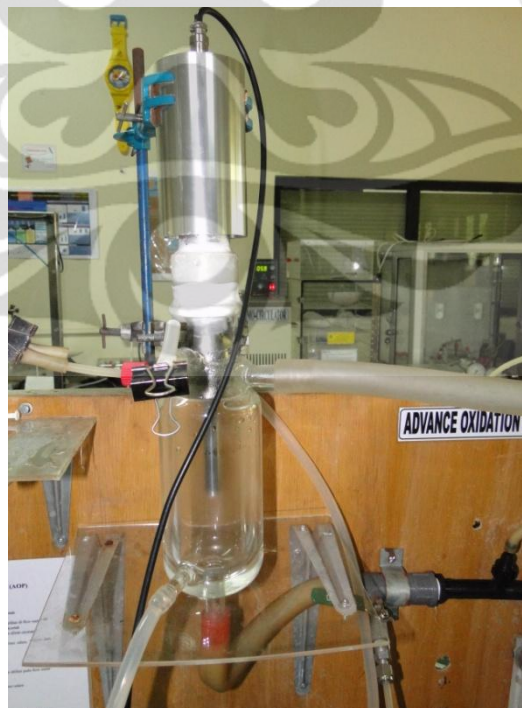




**LAMPIRAN B**



**Gambar B.1.** Skema alat Penelitian



**Gambar B.2.** Reaktor Kaca dan Ultrasonik Processor





**Gambar B.3. Ozonator**



**Gambar B.4. Sirkulasi Pendingin**