



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERAN KAVITASI HIDRODINAMIK DAN KAVITASI
ULTRASONIK PADA PENYISIHAN FENOL DENGAN
PROSES OKSIDASI LANJUT BERBASIS OZON**

SKRIPSI

**SARAH IRENE NAINGGOLAN
0606076803**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERAN KAVITASI HIDRODINAMIK DAN KAVITASI
ULTRASONIK PADA PENYISIHAN FENOL DENGAN
PROSES OKSIDASI LANJUT BERBASIS OZON**

SKRIPSI

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

**SARAH IRENE NAINGGOLAN
0606076803**

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Sarah Irene Nainggolan

NPM : 0606076803

Tanda Tangan :

Tanggal : 7 Juli 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Sarah Irene Nainggolan
NPM : 0606076803
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Peran Kavitasasi Hidrodinamik dan Kavitasasi Ultrasonik pada Penyisihan Fenol dengan Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Ozon

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing 1 : Ir. Eva F. Karamah, M.T. ()

Pembimbing 2 : Prof.Dr. Setijo Bismo ()

Penguji 1 : Ir. Sutrasno Kartohardjono, MSc., PhD. ()

Penguji 2 : Ir. Yuliusman, MEng. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Juli 2010

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Kuasa, karena dengan berkat dan kasih-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik dan tepat waktu. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mendapat gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis sepenuhnya menyadari bahwa, tanpa adanya bantuan, bimbingan dan doa dari berbagai pihak, mulai dari penulis menjadi mahasiswa Universitas Indonesia hingga penyusunan skripsi, 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. dan Bapak Dr. Ir Setijo Bismo, DEA 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. Bapak Dr. Ir. Slamet M.T. selaku pembimbing akademis;
5. Kedua orang tua dan abang-abang tercinta yang selalu memberikan semangat, doa, dukungan moral, dan material sehingga skripsi ini dapat selesai;
6. Linda dan Monik, teman satu topik yang telah bersama-sama menjalani suka duka melakukan penelitian dan menyusun skripsi;
7. Eka, Farhan, Bondan, Jainal, Bagus, Kifer, Reza, Kevin, Fatur, Ikhsan, Mba Ani, Mba Novi dan rekan-rekan riset grup Teknologi Intensifikasi Proses lainnya yang telah banyak memberi semangat dan hiburan terutama pada saat melakukan penelitian;
8. Mang Ijal, Kang Jajat, Mas Heri, Mas Eko, Mas Opik dan Mbak Tiwi yang telah banyak membantu penelitian dari awal-hingga akhir;

Akhirnya penulis berharap agar skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 24 Juni 2010

Penulis

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

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

Nama : Sarah Irene Nainggolan
NPM : 0606076803
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

**Peran Kavitas Hidrodinamik dan Kavitas Ultrasonik pada Penyisihan
Fenol dengan Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Ozon**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 7 Juli 2010
Yang menyatakan

(Sarah Irene Nainggolan)

ABSTRAK

Nama : Sarah Irene Nainggolan
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Peran Kavitas Kavitas Hidrodinamik dan Kavitas Ultrasonik pada Penyisihan Fenol dengan Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Ozon

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. Namun rendahnya kelarutan ozon dalam air serta kurang reaktifnya ozon dengan fenol menjadi kendala utama. Kavitas (proses terbentuk, berkembang dan hancurnya gelembung mikro) dapat menjawab kendala tersebut. Dalam penelitian ini dilakukan uji kinerja penyisihan fenol melalui proses ozonasi dan kavitas (hidrodinamik dan/atau ultrasonik) dalam kondisi asam. Dari penelitian yang dilakukan ditemukan bahwa proses gabungan ozonasi/hidrodinamik/ultrasonik menghasilkan persentase penyisihan fenol yang paling besar.

Kata kunci:

fenol, ozonasi, kavitas, hidrodinamik, ultrasonik

ABSTRACT

Name : Sarah Irene Nainggolan
Study Program : Chemical Engineering
Title : Role of Hydrodynamic Cavitation and Ultrasound Cavitation in Phenol Degradation with Ozon Based Advanced Oxidation Process

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. But this process has main problems which are the small solubility of ozone in water and small reactivity of ozone and phenol. This research studied the performance of ozonation and cavitation (hydrodynamic and/or ultrasound) for phenol degradation. The result from this research showed that the combination processes of ozonation/hydrodynamic/ultrasound gave the biggest phenol degradation percentage.

Key words:

Phenol, ozonation, cavitation, hydrodynamic, ultrasound

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Tujuan Penelitian.....	4
1.4. Batasan Penelitian.....	4
1.5. Model Operasional Penelitian	4
2. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Proses Oksidasi Lanjut (POL).....	6
2.2. Ozon	6
2.2.1. Sifat Fisika Ozon.....	7
2.2.2. Sifat Kimia Ozon	8
2.2.3. Ozonasi dalam Air	9
2.2.3.1. Perpindahan Massa dan Kelarutan Ozon dalam Air.....	10
2.2.3.2. Reaksi Langsung oleh Ozon.....	12
2.2.3.3. Reaksi Tidak Langsung oleh Ozon.....	13
2.3. Kavitasi.....	14
2.3.1. Kavitasi Ultrasonik	14
2.3.1.1. Pembentukan Gelembung pada Kavitasi Ultrasonik.....	15
2.3.1.2. Faktor yang Mempengaruhi Kavitasi Ultrasonik	18
2.3.2. Kavitasi Hidrodinamik.....	21
2.4. Kavitasi dan Ozonasi.....	22

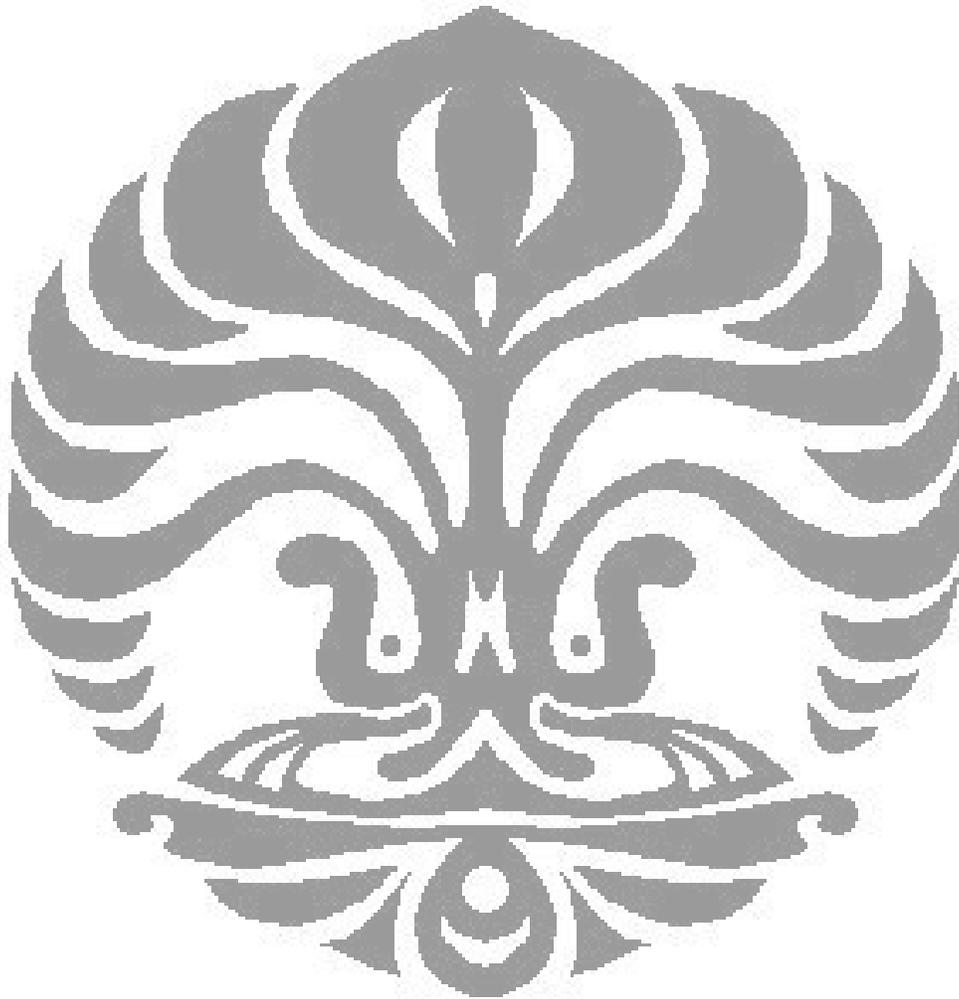
2.5. Senyawa Fenolik	24
2.5.1. Reaksi Fenol dengan Ozon	25
2.5.2. Reaksi Fenol dengan Ozon dan Radikal OH	26
2.5.3. Produk Antara Hasil Penyisihan Fenol dengan POL	28
3. METODE PENELITIAN	29
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	29
3.2. Deskripsi Skema Alat	30
3.2.1. Ozonator.....	30
3.2.2. Injektor	31
3.2.3. Sonikator UP-800 Ultrasonic Processor	31
3.2.4. Reaktor Kaca dan Pompa	31
3.3. Penelitian yang Dilakukan.....	34
3.4. Alat dan Bahan	34
3.5. Prosedur Penelitian.....	35
3.5.1. Penyisihan fenol dengan proses ozonasi.....	35
3.5.2. Penyisihan fenol dengan proses ozonasi/hidrodinamik	36
3.5.3. Penyisihan fenol dengan proses ozonasi/sonikasi.....	37
3.5.4. Penyisihan fenol dengan proses ozonasi/hidrodinamik/sonikasi	38
3.6. Prosedur Analisis Sampel.....	40
3.6.1. Penentuan Konsentrasi Fenol.....	40
3.6.1.1. Peralatan	40
3.6.1.2. Bahan	40
3.6.1.3. Prosedur.....	41
3.6.2. Penentuan Konsentrasi H ₂ O ₂	41
3.6.2.1. Peralatan	41
3.6.2.2. Bahan	42
3.6.2.3. Prosedur.....	42
3.6.3. Penentuan Konsentrasi Keluaran Ozon Fasa Gas	42
3.6.3.1. Peralatan	42
3.6.3.2. Bahan	43
3.6.2.3. Prosedur.....	43

3.6.4. Penentuan Konsentrasi Ion Karbonat.....	43
3.6.4.1. Peralatan	43
3.6.4.2. Bahan.....	43
3.6.4.3. Prosedur.....	44
3.7. Pengolahan Data Penelitian.....	44
3.7.1. Penyisihan Fenol (C/C ₀)	44
3.7.2. Penentuan Konsentrasi H ₂ O ₂	44
3.7.3. Konsentrasi Ozon Terlarut Terhadap Waktu	45
3.7.4. Konsentrasi Ozon dalam Fasa Gas Terhadap Waktu.....	45
3.7.5. pH Terhadap Waktu.....	45
3.7.6. Konsentrasi Oksigen Terlarut Terhadap Waktu.....	45
3.7.7. Peningkatan Suhu Terhadap Waktu.....	45
3.7.8. Penyisihan Ion Karbonat.....	46
4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	47
4.1. Persentase Penyisihan Fenol.....	47
4.2. Konsentrasi Ozon Terlarut (Ozon Residual).....	52
4.3. Konsentrasi Gas Keluaran Ozon.....	54
4.4. Konsentrasi Hidrogen Peroksida.....	55
4.5. pH Larutan.....	56
4.6. Konsentrasi Oksigen Terlarut.....	60
4.7. Peningkatan Suhu	62
4.8. Konsentrasi Ion Karbonat.....	62
4.9. Penyisihan Fenol dengan Proses Ozonasi/Hidrodinamik/Sonikasi selama 1 Jam.....	64
5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	65
5.1. Kesimpulan.....	65
5.2. Saran.....	65
DAFTAR PUSTAKA.....	67
LAMPIRAN A	
LAMPIRAN B	
LAMPIRAN C	

DAFTAR GAMBAR

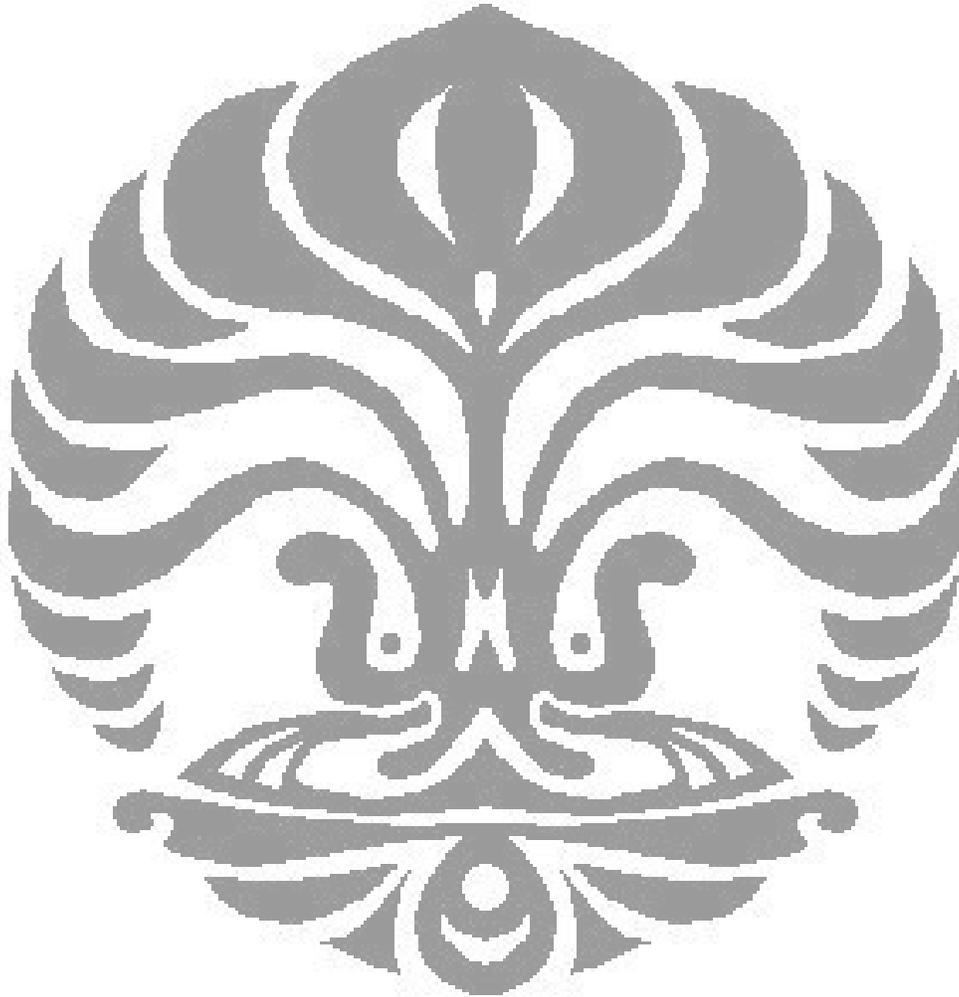
Gambar 2.1.	Struktur Molekular Ozon	9
Gambar 2.2.	Mekanisme pembentukan ozon melalui radiasi ultra violet.....	11
Gambar 2.3.	Reaksi Ozon Dalam Air	13
Gambar 2.4.	Pembentukan Gelembungan pada Kavitasi Ultrasonik.....	16
Gambar 2.5.	Daerah Terjadinya Reaksi Kimia Pada Kavitasi Ultrasonik.....	17
Gambar 2.6.	Injektor Venturi.....	22
Gambar 2.7.	Mekanisme Reaksi Fenol dengan Ozon.....	25
Gambar 2.8.	Mekanisme Reaksi Fenol dengan Ozon dan Radikal OH.....	26
Gambar 3.1.	Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 3.2.	Skema Penelitian Ozonasi.....	32
Gambar 3.3.	Skema Penelitian Ozonasi/Hidrodinamik	32
Gambar 3.4.	Skema Penelitian Ozonasi/Sonikasi.....	33
Gambar 3.5.	Skema Penelitian Ozonasi/Hidrodinamik/Sonikasi	33
Gambar 4.1.	C/C ₀ Fenol pada Masing-Masing Konfigurasi Penelitian.....	48
Gambar 4.2.	Persentase Penyisihan Fenol pada Masing-Masing Konfigurasi Penelitian.....	49
Gambar 4.3.	Perbandingan Persentase Penyisihan Fenol pada Penelitian Tanpa dan Dengan Karbonat.....	52
Gambar 4.4.	Konsentrasi Ozon Terlarut pada Masing-Masing Konfigurasi Penelitian.....	54
Gambar 4.5.	Konsentrasi Gas Keluaran Ozon pada Masing-Masing Konfigurasi	55
Gambar 4.6.	Konsentrasi Hidrogen Peroksida pada Masing-Masing Konfigurasi	56
Gambar 4.7.	Mekanisme Reaksi Fenol dengan Ozon.....	58
Gambar 4.8.	Mekanisme Reaksi Fenol dengan Ozon dan Radikal OH.....	59
Gambar 4.9.	pH pada Masing-Masing Konfigurasi.....	59
Gambar 4.10.	Konsentrasi Oksigen Terlarut pada Masing-Masing Konfigurasi	61
Gambar 4.11.	Peningkatan Suhu pada Masing-Masing Konfigurasi.....	62

Gambar 4.12. Konsentrasi Ion Karbonat pada Masing-Masing Konfigurasi 63
Gambar 4.13. C/Co pada Oz/Kav/Son Dengan dan Tanpa Karbonat..... 64



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Potensial Oksidasi-Reduksi di Dalam Air.....	6
Tabel 2.2. Kelarutan Ozon Dalam Air.....	12
Tabel 2.3. Konstanta Laju reaksi Fenol dan Produk Antara dengan Ozon	27
Tabel 2.4. Konstanta Laju reaksi Fenol dan Produk Antara dengan Radikal OH	27



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kegiatan industri, baik di negara maju maupun negara berkembang akan selalu dihadapkan dengan masalah pencemaran lingkungan yang salah satunya berupa pencemaran air. Senyawa fenolik merupakan salah satu kontaminan utama dan berbahaya dalam limbah cair dalam industri karena sifatnya yang beracun bahkan pada konsentrasi yang rendah. Bila mencemari perairan senyawa fenolik dapat membuat rasa dan bau tidak sedap, dan pada nilai konsentrasi tertentu dapat menyebabkan kematian organisme di perairan tersebut. Kantor Menteri Negara Lingkungan Hidup di dalam peraturan nomor KEP-51/MENLH/10/1995 tentang Baku Mutu Limbah Cair Bagi Kegiatan Industri menetapkan konsentrasi senyawa fenolik yang diperbolehkan dalam air limbah kegiatan industri sebelum dibuang ke lingkungan tidak boleh melebihi 0,5 mg/L untuk industri golongan I dan 1 mg/L untuk industri golongan II.

Fenol dapat dihasilkan sebagai limbah cair dari industri batubara, produksi gas, petrokimia, farmasi dan pengilangan minyak dengan rentang konsentrasi 50 – 2000 ppm (Priya, 2009). Berdasarkan data tersebut maka penelitian ini menggunakan konsentrasi awal fenol sebesar 100 ppm. Selain itu, konsentrasi awal fenol yang umum digunakan pada penelitian penyisihan fenol lain juga sebesar 100 ppm (Esplugas et al., 2002; Villasenor et al., 2002; Canton et al., 2003).

Salah satu metode yang umum digunakan untuk pengurangan polutan seperti fenol pada limbah cair adalah dengan oksidasi kimia dengan oksidator tunggal seperti klorin, ozon, radiasi UV, hidrogen peroksida dan lain-lain. Namun metode konvensional ini sulit diterapkan jika polutan hadir dalam konsentrasi rendah dan kurang reaktif terhadap oksidator. Untuk mengatasi permasalahan ini, telah dikembangkan salah satu proses yaitu dengan menciptakan sistem yang dapat menghasilkan radikal bebas yang sangat reaktif dan merupakan oksidator yang kuat, yaitu radikal hidroksil (OH). Proses ini pada umumnya disebut dengan Proses Oksidasi Lanjut (POL).

POL bisa secara luas didefinisikan sebagai metode oksidasi fasa larutan yang terutama didasari oleh pembentukan dan penggunaan 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 (www.remtavares.es). Transfer elektron pada proses oksidasi akan menyebabkan transformasi kimia dari oksidator maupun reduktor, dalam beberapa kasus menghasilkan senyawa kimia dengan jumlah elektron valensi yang ganjil. Senyawa ini, dikenal dengan sebutan radikal, cenderung bersifat tidak stabil sehingga menjadi sangat reaktif. Reaksi oksidasi yang menghasilkan radikal cenderung diikuti dengan reaksi oksidasi tambahan antara radikal oksidator dan reaktan lain hingga terbentuk produk yang secara termodinamika stabil (www.nwri-usa.org). Kemampuan dari oksidator untuk memulai reaksi kimia diukur dalam kemampuan oksidasinya.

Pada proses oksidasi lanjut, teknik berikut digunakan seperti: proses berbasis H_2O_2 (H_2O_2/UV , H_2O_2/O_3), fotolisis (UV/O_3 , $UV/H_2O_2/O_3$), *fenton*, fotokatalisis dan ozon (Esplugas, 2002). Proses berbasis H_2O_2 memanfaatkan reaksi berantai dengan H_2O_2 sebagai promotor reaksi pembentukan radikal OH, fotolisis atau UV menggunakan energi yang diberikan kepada senyawa kimia sebagai radiasi yang kemudian diserap oleh molekul reaktan sehingga reaktan terdekomposisi, *fenton reagent* memanfaatkan reaksi antara ion Fe^{2+} dengan H_2O_2 untuk membentuk radikal OH dan fotokatalisis memanfaatkan interaksi antara semikonduktor dan radiasi UV yang menghasilkan pasangan hole dan elektron di permukaan semikonduktor yang akan bereaksi dengan senyawa organik dan air (dapat secara langsung bereaksi dengan senyawa polutan atau bereaksi dengan air membentuk radikal OH). Dari penelitian yang dilakukan Esplugas diperoleh secara berurutan kinetika laju penurunan fenol dari yang paling besar ke paling kecil adalah Fenton, H_2O_2/UV , O_3 , $UV/H_2O_2/O_3$, UV/O_3 , H_2O_2/O_3 , fotokatalisis dan UV. Esplugas menyatakan walaupun skema yang menunjukkan penurunan fenol paling cepat adalah dengan *fenton reagent* namun berdasarkan estimasi biaya proses ozonasi memiliki biaya yang paling kecil dibanding proses yang lain sehingga ozonasi dianggap menjadi proses yang paling sesuai untuk penyisihan fenol.

Untuk penelitian ini dilakukan proses berbasis ozon karena selain alasan di atas ozon dapat bereaksi dengan dua cara di dalam air, yaitu oksidasi langsung dengan menggunakan ozon itu sendiri dan oksidasi tidak langsung dengan bantuan radikal hidroksil (radikal OH). Reaksi oksidasi langsung merupakan reaksi yang spesifik dan melibatkan serangan langsung dari O_3 dalam ikatan rangkap dan pada umumnya reaksi ini dimanfaatkan untuk penggunaan ozon sebagai disinfektan. Pada reaksi tidak langsung, spesi yang reaktif adalah radikal OH yang dibentuk dari ozon. Radikal OH merupakan oksidator yang non-diskriminatif (mampu mengoksidasi hampir semua senyawa).

Kekurangan dari ozon adalah kelarutannya yang rendah dalam air. Dengan rendahnya kelarutan ozon dalam air, maka laju reaksi oksidasi oleh ozon baik langsung maupun tidak langsung (pembentukan radikal OH) akan berkurang. Untuk mengimbangi kelarutan ozon yang rendah, cenderung dilakukan penggunaan dosis ozon yang berlebih. Hal ini menyebabkan borosnya penggunaan ozon yang menjadi salah satu faktor penyebab tingginya biaya proses ozonasi. Salah satu cara untuk meningkatkan kelarutan ozon dalam air adalah dengan menggunakan kavitasasi.

Kavitasasi merupakan fenomena terjadinya pembentukan, pertumbuhan dan hancurnya gelembung mikro dalam cairan. Gelembung mikro adalah gelembung dengan diameter kurang dari puluhan mikron, sedangkan gelembung konvensional memiliki diameter beberapa milimeter. Jika fenomena ini terjadi karena adanya gelombang suara dengan frekuensi tinggi maka disebut kavitasasi akustik (ultrasonik), dan jika terjadi akibat variasi tekanan pada cairan yang mengalir akibat perubahan geometri pada sistem yang mengalir, maka disebut sebagai kavitasasi hidrodinamik.

Selain dapat meningkatkan kelarutan ozon pada air terdapat efek lain kavitasasi pada proses ozonasi yang sama pentingnya. Pada air yang diberikan kavitasasi, panas yang dihasilkan dari ledakan gelembung mikro akan mendekomposisi air menjadi atom hidrogen dan radikal OH yang sangat reaktif. Maka proses kavitasasi itu sendiri akan dapat menghasilkan radikal OH. Jika pada ozonasi radikal OH yang terbentuk berasal dari dekomposisi ozon, maka pada proses kavitasasi radikal OH yang terbentuk berasal dari molekul air yang

terdekomposisi secara termal. Sehingga dapat dikatakan bahwa pembentukan radikal OH dari ozon dan kavitasi akan memiliki tiga sumber, yaitu:

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

Dalam penelitian ini akan dilakukan uji kinerja penyisihan fenol melalui proses ozonasi dan kavitasi (hidrodinamik dan/atau ultrasonik) dalam kondisi asam. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan analisis terhadap karakteristik penyisihan fenol pada beberapa konfigurasi penelitian, yaitu: ozonasi, ozonasi/hidrodinamik, ozonasi/ultrasonik dan ozonasi/hidrodinamik/ultrasonik. Pengaruh kavitasi dalam penelitian ini akan ditinjau dengan penambahan karbonat yang akan bereaksi dengan radikal OH (sehingga fenol yang tersisih adalah akibat reaksi langsung dengan ozon). Dengan demikian diharapkan penelitian ini mampu memberikan analisa tentang signifikansi kavitasi hidrodinamik dan/atau ultrasonik terhadap proses penyisihan fenol berbasis ozonasi.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana signifikansi kavitasi hidrodinamik dan/atau ultrasonik pada proses penyisihan fenol berbasis ozon.

1.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari dan melakukan analisis tentang signifikansi kavitasi hidrodinamik dan/atau ultrasonik pada proses penyisihan fenol berbasis ozon.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini, penulis membatasi masalah sebagai berikut:

1. Proses berlangsung secara semi-batch dengan aliran *liquid* disirkulasi secara kontinu.

2. Limbah fenol yang digunakan merupakan limbah fenol sintetik.
3. Transduser yang digunakan untuk kavitas ultrasonik adalah transduser tipe *horn/probe*.
4. Ozonator yang digunakan merupakan ozonator rancangan Prof. Dr. Setijo Bismo dengan produktivitas 22 gram/jam.
5. Gas yang diinjeksikan ke dalam ozonator adalah udara (oksigen 21%).
6. Air yang digunakan adalah aquades.
7. Untuk mengontakkan ozon ke dalam air digunakan injektor *Mazzei*.
8. Aliran fluida fasa gas dan cair pada reaktor kaca adalah searah (*co-current*) dari bawah ke atas.

1.5. Metode Operasional Penelitian

Penelitian diawali dengan rancang skema rangkaian peralatan skala laboratorium yang terdiri dari generator ozon sebagai alat pembangkit ozon, injektor sebagai pembangkit gelembung, sonikator, reaktor gelas serta pompa.

Pembangkitan ozon dilakukan dengan mengalirkan udara yang sebelumnya dilewatkan melalui *silica gel* untuk menghilangkan kandungan air menuju generator ozon. Proses ozonasi dilakukan dengan mendistribusikan gelembung mikro menuju reaktor gelembung dengan menggunakan injektor *Mazzei*. Untuk skema penelitian ozonasi/kavitas/sonikasi, di bagian atas reaktor kaca terdapat sonikator yang berfungsi untuk menghasilkan kavitas dari getaran ultrasonik, serta injektor *mazzei* yang berfungsi untuk menghasilkan kavitas secara hidrodinamik. Pada skema ozonasi saja injektor *mazzei* diganti dengan pipa dan sonikator dimatikan. Pada skema ozonasi/kavitas sonikator dimatikan dan pada skema ozonasi/sonikasi injektor *mazzei* diganti dengan pipa.

Nilai penyisihan fenol pada proses ozonasi akan dibandingkan dengan penyisihan fenol pada proses ozonasi/ultrasonik, ozonasi/hidrodinamik serta ozonasi/hidrodinamik/ultrasonik. Parameter lain yang akan dianalisa adalah kandungan H_2O_2 yang akan menentukan seberapa banyak radikal OH yang terbentuk akibat proses dekomposisi ozon serta konsentrasi ozon terlarut (kandungan ozon residual), konsentrasi gas keluaran ozon, pH, kenaikan suhu, konsentrasi oksigen terlarut dan konsentrasi ion karbonat.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Proses Oksidasi Lanjut (POL)

POL 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 (www.remtavares.es). Radikal OH adalah termasuk agen pengoksidasi yang paling reaktif (Tabel 2.1) di dalam air, dengan laju reaksi berkisar antara $10^{10} - 10^{13} \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Di lain pihak, waktu-paruh dari radikal OH hanya berkisar beberapa μs , sehingga konsentrasi dari radikal bebas OH tidak akan pernah mencapai di atas 10^{-12} M (Hoigné, 1975). Pada proses oksidasi lanjut, teknik berikut digunakan seperti: proses berbasis H_2O_2 ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{UV}$, Fenton, photo-Fenton dan proses Fenton lainnya), fotolisis, fotokatalisis dan proses berbasis ozon (O_3 , $\text{O}_3 + \text{UV}$, $\text{O}_3 + \text{katalis}$ dan $\text{O}_3 + \text{US}$) (Pera, 2003).

Tabel 2.1. Potensial Oksidasi-Reduksi di Dalam Air

Spesi Oksidator	E° , 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

(Dantas, 2007)

2.2 Ozon (O_3)

Ozon merupakan agen pengoksidasi yang sangat kuat yang dapat digunakan untuk membunuh bakteri, disinfektan, jamur, virus dan agen pengotor lainnya. 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 bagi organisme lain 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 pemaparan selama setidaknya 8 jam (Nebel, 1981).

Sama seperti disinfektan lain untuk pengolahan air, 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. Disinfeksi terjadi secara dominan melalui ozon, sementara 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 Sifat Fisika Ozon

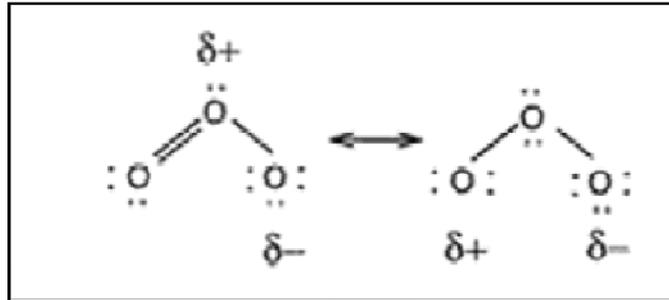
Ozon (O_3) adalah suatu molekul yang terdiri dari tiga buah atom oksigen dan merupakan bentuk alotropik dari oksigen (O_2). Senyawa ini merupakan gas yang tak berwarna pada suhu kamar yang dapat mengembun dan membentuk suatu cairan biru pada suhu $-112^{\circ}C$ dan membeku pada suhu $-251,4^{\circ}C$,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

2.2.2. 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)

2.2.3. Ozonasi dalam Air

Stabilitas dari ozon yang terlarut di dalam air dipengaruhi oleh konsentrasi ozon, pH, sinar ultraviolet dan kehadiran dari inhibitor. Karena ozon tidak stabil di dalam air, keefektifannya sebagai disinfektan bergantung pada laju dekomposisi ozon. Menimbang 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. Dari pihak lain, karena ketidakstabilannya, ozon tidak dapat digunakan sebagai disinfektan dalam air. 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).

2.2.3.1. Perpindahan Massa dan Kelarutan Ozon dalam Air

Pada sistem gas-cair, difusi, konveksi dan reaksi kimia dapat terjadi secara simultan dan perilaku sistem dapat diprediksi dengan menggunakan model yang mensimulasikan situasi tersebut. Model-model ini didasarkan pada teori yang menjelaskan fenomena absorpsi fisika gas. Pada umumnya, ketika fasa gas dan cair mengalami kontak, komponen dari salah satu fasa dapat berpindah ke fasa lain untuk mencapai kesetimbangan (Nebel, 1981). Dalam peristiwa absorpsi gas oleh cairan, dapat diasumsikan komposisi yang seragam dipertahankan oleh sebagian besar gas karena pergerakan secara turbulen. Gambar 2.2 menjelaskan bahwa pada dua lapisan film, *gas film* dan *liquid film*, terjadi difusi melalui lapisan laminar di antara ruang gas – antar fasa dan antar fasa – ruang cair. Ketika gas datang mendekati batas fasa liquid, gas tersebut akan terbawa oleh difusi Eddy ke dalam turbulensi liquid, dan tercampur dengan liquid. Laju difusi pada keadaan *steady-state* dari *bulk gas* ke *interface* sebanding dengan laju dari *interface* ke *bulk liquid*, yang dinyatakan dengan:

$$N_A = k'_G (P_{A_g} - P_{A_i}) = k'_L (C_{A_i} - C_{A_L}) \quad (2.1)$$

dimana:

k'_G = koefisien perpindahan massa gas untuk absorpsi fisika (mol/cm².sec.atm)

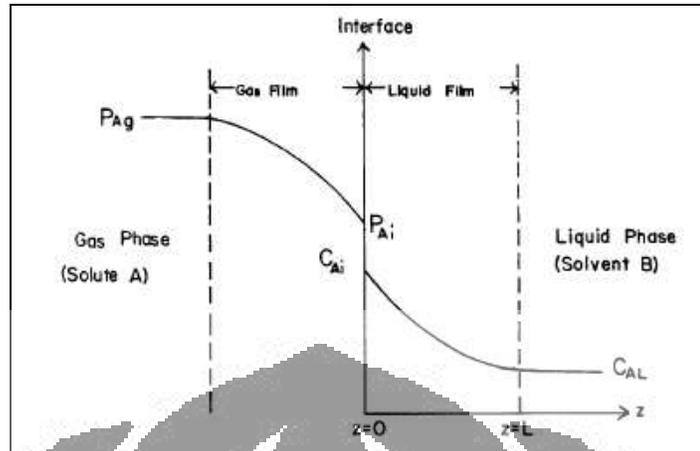
P_{A_g} = tekanan parsial dari A pada fase gas (atm)

P_{A_i} = tekanan parsial dari A pada *interface* (atm)

k'_L = koefisien perpindahan massa *liquid* untuk absorpsi fisika (mol/cm².sec.atm)

C_{A_i} = konsentrasi solute A pada *interface*

C_{A_L} = konsentrasi solute A pada fase liquid



Gambar 2.2. Perpindahan Massa Antara Fasa Gas dan Fasa Cair
(Beltran, 2004)

Perpindahan massa ozon-air berkaitan dengan besarnya kelarutan ozon dalam air. Perpindahan massa ozon-air sendiri secara umum dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti:

- a. Konsentrasi ozon dalam air
- b. Metode kontak yang digunakan
- c. Waktu kontak
- d. Kinetika dekomposisi ozon dalam air
- e. Tekanan dan temperatur operasi
- f. Jumlah dan ukuran gelembung ozon yang terbentuk

Ozon merupakan senyawa yang dapat larut dalam air. Kontak antara ozon dengan air ditandai dengan terbentuknya gelembung dalam air. Peristiwa telarutnya ozon dalam air didorong oleh adanya perbedaan konsentrasi antara ozon terlarut aktual dengan konsentrasi ozon jenuh pada temperatur dan suhu dilakukannya percobaan (Masschelein).

Beberapa nilai kelarutan ozon dalam air pada konsentrasi ozon dan temperatur tertentu dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Kelarutan Ozon Dalam Air

Konsentrasi Ozon	Kelarutan Ozon (mg/L)			
	5°C	10°C	15°C	20°C
1,5%	11,09	9,75	8,40	6,43
2%	14,79	13,00	11,19	8,57
3%	22,18	19,50	16,79	12,86

(Ozoneapplications, 2009)

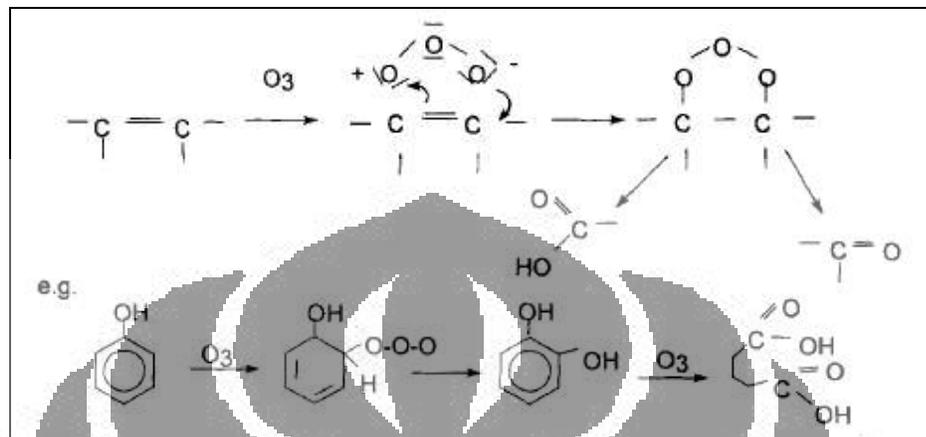
Kelarutan ini menjadi kelemahan utama dalam sistem ozon mengingat laju perpindahan massa dari gas ke air yang rendah. Efisiensi perpindahan massa ozon dari fase gas ke fase cair seperti telah dijelaskan sebelumnya bergantung pada karakteristik pencampuran kontak gas-cairan yang digunakan, kinetika dekomposisi ozon dalam air, dan jumlah serta ukuran gelembung yang dihasilkan. Keefektifan ozon sebagai disinfektan dan oksidan dapat ditingkatkan dengan menciptakan rasio luas permukaan terhadap volume yang lebih tinggi, yaitu dengan membangkitkan gelembung dalam ukuran yang lebih kecil (Shin, 1999).

2.2.3.2. Reaksi Langsung oleh 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 (pH < 4) ozonasi langsung lebih mendominasi. Dalam rentang pH 4-9 baik ozonasi langsung maupun tidak langsung terjadi bersamaan, serta pada kondisi basa (pH > 9) 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 2.3).



Gambar 2.3. 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 dan THMs 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 grup 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.

2.2.3.3. Reaksi Tidak Langsung oleh Ozon

Selama proses ozonasi berlangsung, jika ozon bereaksi secara langsung maka baik proses disinfeksi maupun 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 disinfeksi 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.

2.3 Kavitas

Kavitas merupakan fenomena terjadinya pembentukan, pertumbuhan dan hancurnya gelembung mikro dalam cairan. Jika fenomena ini terjadi karena adanya gelombang suara dengan frekuensi tinggi disebut kavitas akustik (ultrasonikasi), dan jika terjadi akibat variasi tekanan pada cairan yang mengalir akibat perubahan geometri pada sistem yang mengalir, maka disebut sebagai kavitas hidrodinamik. Pada air yang diberikan kavitas, panas yang dihasilkan dari ledakan gelembung mikro akan mendekomposisi air menjadi atom hidrogen dan radikal OH yang sangat reaktif. Selama terjadinya pendinginan, atom hidrogen dan radikal OH akan saling berikatan dan membentuk hidrogen peroksida H_2O_2 .

2.3.1 Kavitas Ultrasonik

Ultrasonik telah digunakan untuk berbagai macam tujuan dengan area yang beraneka ragam, mulai dari komunikasi dengan binatang (siulan untuk anjing), deteksi kerusakan bangunan beton, dan untuk proses pengobatan. Terlepas dari penggunaannya yang beragam dan perkembangannya yang pesat, studi ultrasonik termasuk ilmu yang baru. Aplikasi yang paling tua dimulai pada awal abad ke-20. Perkembangan berikutnya terjadi pada tahun 1930 hingga saat Perang Dunia ke-2 ketika penggunaan ultrasonik terutama berpusat pada emulsifikasi dan pembersihan permukaan. Sekitar tahun 1960 industri menggunakan ultrasonik dalam proses pembersihan dan pembentukan plastik.

Akhir-akhir ini terdapat riset grup dan industri-industri yang mengembangkan ultrasonik hingga dapat digunakan dalam teknologi makanan, pembentukan senyawa kimia, ekstraksi material, teknologi nano, pemisahan fasa, terapi dan pengolahan air bersih (Mason, 2003).

Ultrasonik didefinisikan sebagai berbagai jenis suara dari frekuensi yang tidak bisa dideteksi oleh manusia (di atas 16 kHz) (Ince, 2000). Terdapat tiga rentang frekuensi untuk penggunaan ultrasonik yang berbeda, yaitu: (i) frekuensi tinggi, atau ultrasonik diagnostik (2-10 MHz), (ii) frekuensi rendah atau tenaga konvensional ultrasonik (20-100 kHz), dan frekuensi medium atau ultrasonik "efek-sonokimia" (300-1000kHz). Pada rentang yang terakhir inilah di mana proses reaksi kimia terkatalis secara unik lewat suhu dan tekanan yang ekstrim yang dihasilkan dari pembentukan, pertumbuhan dan keruntuhan dari gelembung-gelembung mikro (Ince, 2000).

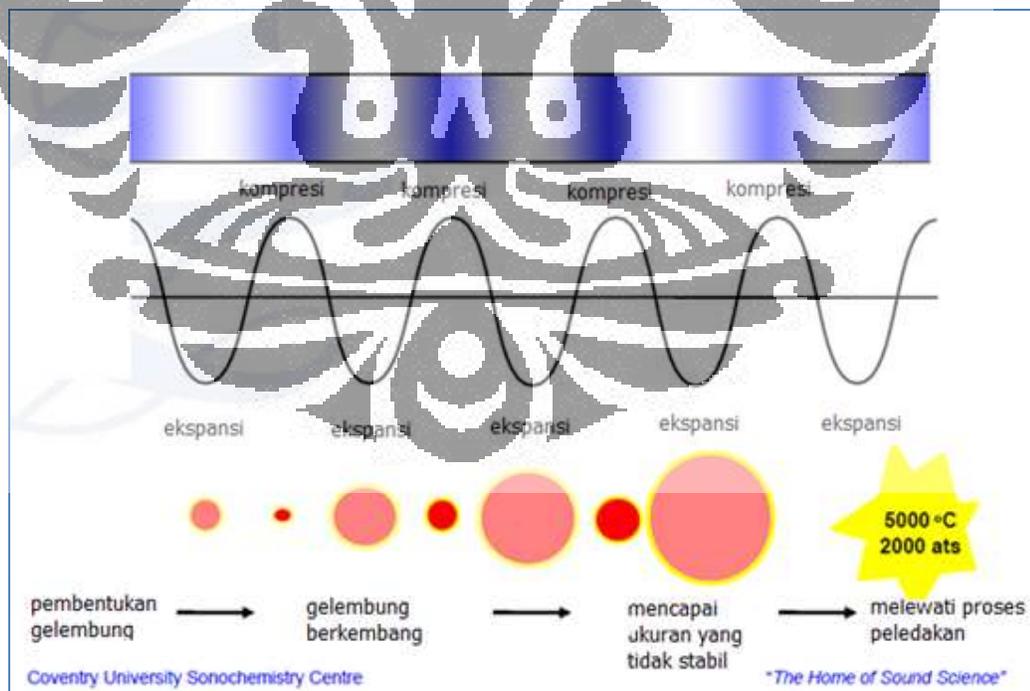
2.3.1.1. Pembentukan Gelembung pada Kavitas Ultrasonik

Kavitas ultrasonik terdiri dari tiga tahap utama, yaitu nukleasi atau pembentukan gelembung, pertumbuhan gelembung, dan pecahnya gelembung (*implosive collapse*). Tahap pertama dari proses kavitas ultrasonik ini adalah nukleasi atau pembentukan gelembung, yaitu tahapan dimana inti (*nuklei*) kavitas 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 dan meledak.

Tahap ketiga dari kavitas terjadi apabila intensitas dari gelombang ultrasonik melebihi batas ambang dari kavitas ultrasonik (20 kHz untuk liquid pada umumnya). Pada tahap ini, gelembung mikro akan terus tumbuh hingga mencapai saat dimana gelembung mikro tidak dapat lagi menyerap energi yang dihasilkan oleh gelombang suara secara efisien dan akhirnya akan pecah. Tahap

ini yang disebut sebagai *catastrophic collapse*. Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa beberapa saat sebelum terjadinya peledakan, gelembung mikro menghasilkan kilatan cahaya yang disebut *sonoluminescence*, yang memiliki panjang gelombang 310 nm.

Ketika air diiradiasikan dengan ultrasonik, gelombang ultrasonik akan melewati air dengan beberapa seri dari siklus kompresi dan ekspansi yang saling bergantian (Gambar 2.4). Ketika amplitudo akustik cukup besar untuk meregangkan molekul selama terjadinya siklus tekanan negatif (ekspansi) hingga sampai pada jarak yang lebih besar daripada jarak kritis molekular, terbentuklah gelembung-gelembung mikro yang kemudian hancur akibat adanya siklus kompresi, sehingga terjadi peningkatan suhu dan tekanan yang ekstrim namun untuk waktu yang sangat singkat. Telah diperkirakan bahwa suhu dan tekanan yang lebih besar dari 5000 °C dan 1000 atm bisa secara lokal diproduksi selama proses kehancuran gelembung-gelembung mikro tersebut (Pandit dan Moholkar, 1996). Gambar 2.4 menunjukkan bagaimana ultrasonik dapat memperbesar ukuran gelembung dari waktu ke waktu hingga gelembung tersebut runtuh.



Gambar 2.4. Pembentukan Gelembungan pada Kavitasasi Ultrasonik

(www.sonochemistry.htm)

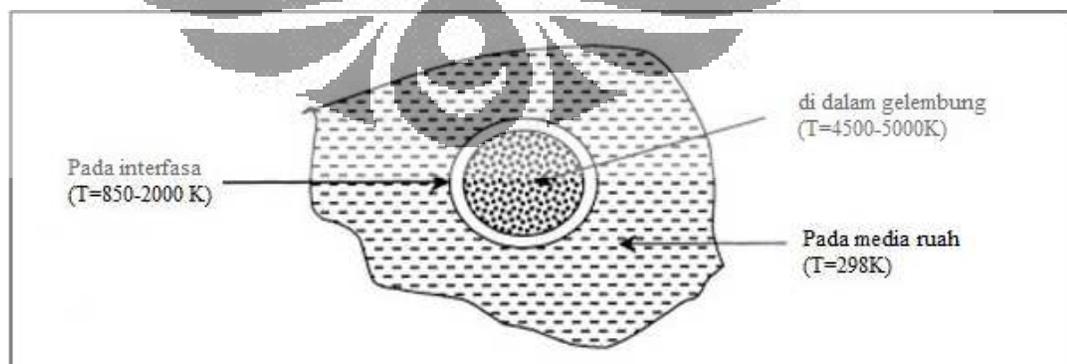
Selama hancurnya gelembung-gelembung mikro pada air, molekul gas dari air yang terjebak dalam gelembung yang tereksansi akan pecah hingga menghasilkan senyawa radikal yang sangat reaktif seperti radikal OH (Persamaan 2.24). Radikal OH yang terbentuk akibat dari kavitasi ultrasonik ini dapat bereaksi dalam fasa gas atau dikombinasikan pada daerah yang lebih dingin seperti interfasa gas-cairan dan/atau fasa ruah (*bulk*) larutan untuk menghasilkan hidrogen peroksida dan air (Persamaan 2.25 dan 2.26), seperti (Ince, 2000):



Jika air terjenuhkan oleh oksigen, peroksil dan lebih banyak radikal OH akan terbentuk di dalam fasa gas dan membentuk reaksi seperti (Ince, 2000):



Terdapat tiga daerah potensial untuk reaksi kimia pada air yang diradiasikan ultrasonik (Gambar 2.5), yaitu: (i) gelembung kavitasi, (ii) selubung interfasa antara gelembung gas dan cairan sekelilingnya, dan (iii) fasa ruah (*bulk*) larutan/cairan (Ince, 2000):



Gambar 2.5. Daerah Terjadinya Reaksi Kimia Pada Kavitasi Ultrasonik

(Ince, 2001)

Pada proses pengolahan air, polutan organik dapat dihancurkan pada kedua daerah pertama dengan efek dekomposisi pirolitik (dekomposisi karena panas) dan hidroksilasi, atau pada fasa ruah larutan melalui degradasi oksidatif oleh radikal OH dan hidrogen peroksida. Proses oksidasi pada fasa ruah larutan dibatasi oleh jumlah dari radikal OH yang tidak terkombinasi yang ada dalam larutan, yang merupakan waktu hidup dan durasi hancurnya gelembung-gelembung.

2.3.1.2. Faktor yang Mempengaruhi Kavitasasi Ultrasonik

Faktor utama yang mempengaruhi kavitasasi ultrasonik meliputi:

1. Intensitas dari ultrasonik (seperti frekuensi dan amplitudo radiasi)
2. Sifat fisika dari air (viskositas, tegangan permukaan, tekanan uap)
3. Suhu
4. Kehadiran gas terlarut.

Optimasi dari proses kavitasasi ultrasonik dapat dilakukan dengan mengatur frekuensi ultrasonik dan gas terjenuhkan selama proses sonikasi (Hua dan Hoffman, 1997). Hua dan Hoffman mempelajari bahwa pembentukan radikal OH pada frekuensi ultrasonik 20, 40 80 dan 500 kHz dengan kehadiran empat gas terjenuhkan yang berbeda (Kr, Ar, He dan O₂). Laju pembentukan radikal OH terbesar (0,391 uM/min) terjadi pada sonikasi dari larutan terjenuhkan Kr pada 500 kHz. Sonikasi dari larutan yang terjenuhkan He pada 20 kHz menghasilkan radikal OH yang paling kecil (0,031 uM/min).

Salah satu variabel yang mempengaruhi kinerja kavitasasi ultrasonik adalah frekuensi gelombang yang akan berpengaruh pada resonansi gelembung-gelembung mikro. Radius resonansi dari gelombang pada frekuensi rendah adalah sekitar 170µm (pada 20 kHz), dan gelembung tersebut dikatakan lebih stabil atau memiliki waktu hidup yang panjang atau sekitar 10 µs. Pada kavitasasi jenis ini, tahap kehancuran gelembung akan tertunda hingga setelah terjadi beberapa siklus kompresi dan ekspansi, di mana sejumlah zat terlarut (seperti pencemar) yang mudah menguap dan uap pelarut di dalam cairan dapat mengalir ke dalam gelembung gas. Pembentukan dan kehancuran gelembung mikro yang tertunda akan menyebabkan radikal saling berikatan pada daerah interfasa (seperti pada

reaksi 2-5 dan 8), sehingga mencegah perpindahan massa dari radikal OH dan senyawa radikal lain ke dalam larutan. Dengan demikian, kavitas ultrasonik dengan frekuensi rendah akan menimbulkan efek penghancuran untuk pencemar yang bersifat hidrofobia (tidak menyukai air dan volatil), yang dapat berdifusi secara mudah ke dalam gelembung-gelembung mikro untuk mengalami dekomposisi akibat panas (pirolisis) atau di dalam daerah interfasa di mana

Kebalikannya, radius resonansi dari gelembung oleh frekuensi ultrasonik sedang (300-1000 kHz) menghasilkan kavitas dengan waktu hidup yang sangat singkat (rata-rata 0.4 μm). Tekanan dan suhu pada kavitas seperti ini jauh lebih besar dibanding kavitas yang stabil (frekuensi rendah) dan memberikan energi yang lebih besar kepada cairan di sekitarnya selama proses kehancuran gelembung yang juga lebih cepat dan lebih hebat. Selain itu, kavitas yang memiliki waktu hidup dan hancur yang sangat singkat akan menyebabkan jumlah radikal yang saling berkombinasi pada daerah dalam gelembung dan daerah interfasa menjadi tidak penting untuk diperhitungkan. Sehingga, kavitas ultrasonik dengan frekuensi medium sangat efektif untuk POE yang bertujuan untuk menghancurkan pencemar non- mudah menguap di dalam air. Efek penghancuran dari kavitas ultrasonik dalam kondisi ini adalah karena besarnya kemungkinan radikal OH ditransfer ke daerah fasa ruah larutan. Sehingga cukup jelas, bahwa pemilihan jangkauan frekuensi yang tepat untuk kavitas ultrasonik merupakan parameter yang penting untuk mencapai dekontaminasi yang sesuai.

Terdapat beberapa mekanisme lain yang diajukan yang dapat menjelaskan mengapa pembentukan radikal OH lebih banyak terjadi pada frekuensi yang lebih besar. Pertama, karena waktu gelembung untuk hancur lebih singkat pada frekuensi yang tinggi, produksi radikal OH akan menjadi lebih besar (Petrier, 1992). Kemudian, dengan meningkatnya frekuensi, gelembung-gelembung tersebut mungkin tidak seluruhnya hancur, namun akan berosilasi dengan sangat cepat dan dengan demikian menghasilkan flux radikal OH yang lebih besar melalui permukaan gelembung (Hua dan Hoffman, 1997). Yang terakhir, sebagai penjelasan akan produksi radikal OH yang bergantung pada gas inert, Hart dan Henglein (1986) menganjurkan bahwa suhu yang lebih tinggi dapat dihasilkan pada gelembung untuk gas dengan berat molekular yang lebih besar. Pendapat

yang beraneka ragam ini menunjukkan bahwa masih banyak hal yang tidak diketahui yang berhubungan dengan mekanisme spesifik pembentukan radikal OH selama proses sonikasi.

Faktor lain yang mempengaruhi kinerja kavitasi ultrasonik adalah jenis gas yang dilarutkan ke dalam proses kavitasi. Pada air murni yang tidak mengandung senyawa terlarut di dalamnya, proses dimulainya kavitasi membutuhkan waktu yang cukup lama. Hal ini dikarenakan proses pembentukan inti (*nuklei*) dipengaruhi oleh ada tidaknya senyawa terlarut di dalam air. Pembentukan inti (*nuklei*) terjadi karena adanya gelembung yang terperangkap pada retakan gelembung mikro dari senyawa yang terlarut dalam air. Kehadiran senyawa terlarut dalam kavitasi ultrasonik merupakan hal yang penting. Senyawa terlarut ini dapat berupa gas atau padatan yang tersuspensi. Cara yang paling mudah untuk mendapatkan senyawa terlarut dalam air adalah dengan membuat larutan menjadi jenuh dengan menambahkan gas terlarut ke dalamnya (Mason, 2001).

Oleh karena itu, pemberian gas terlarut ke dalam larutan selama periode ultrasonikasi bertujuan untuk mempertahankan agar laju gas tetap konstan sehingga kondisi ekstrem yang dihasilkan ketika gelembung hancur dapat tetap dipertahankan. Pemilihan gas yang tepat sangatlah penting untuk kavitasi ini, karena temperatur akhir pada saat gelembung hancur berhubungan erat dengan parameter-parameter gas, yang disebut sebagai polytropic ratio (γ). Polytropic ratio merupakan perbandingan antara *specific heats* (C_p/C_v) dari gas ambien yang terperangkap dalam gelembung. Temperatur yang tinggi diperoleh pada saat nilai γ juga tinggi. Dengan semakin tingginya temperatur, maka radikal bebas hidroksil yang dihasilkan juga akan semakin banyak (Mason, 2001).

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

tinggi dan radikal bebas yang dihasilkan juga akan semakin banyak (Mason, 2001).

Dari penjelasan diatas dapat disimpulkan bahwa untuk dapat menghasilkan radikal bebas dalam jumlah yang banyak, maka dapat dilakukan dengan meningkatkan temperatur pada saat hancurnya gelembung mikro. Temperatur akan meningkat seiring dengan peningkatan rasio γ . Namun, radikal bebas yang dihasilkan akan menurun dengan kenaikan konduktivitas termal gas. Gas mulia (Xe, Kr, Ar, Ne, dan He) memiliki rasio γ yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan gas monoatomik dalam air.

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

2.3.2. Kavitasi Hidrodinamik

Oksidasi yang dihasilkan oleh kavitasi hidrodinamik mirip dengan kavitasi ultrasonik, dengan proses kimia yang menghancurkan kontaminan di dalam air baik secara pirolisis yang dihasilkan oleh temperatur yang tinggi di dalam gelembung, atau melalui dekomposisi uap air menjadi hidrogen dan radikal OH, yang kemudian diikuti dengan mekanisme kimia.

Peralatan komersial dari kavitasi hidrodinamik untuk tujuan penelitian belum banyak tersedia. Namun, kavitasi hidrodinamik memiliki tiga kelebihan dibanding dengan kavitasi ultrasonik, yaitu: peralatan yang digunakan lebih sederhana dan murah, volume reaksi efektif lebih besar dan peralatannya mudah ditingkatkan. Namun, jangka waktu untuk perubahan tekanan dalam kavitasi hidrodinamik lebih tinggi dibanding dalam ultrasonik. Dengan demikian, pertumbuhan dan ledakan gelembung yang terjadi lebih membutuhkan waktu

sehingga secara keseluruhan efek kavitasi hidrodinamik tidak seefektif pada kavitasi ultrasonik.

Kavitasi hidrodinamik mirip dengan ultrasonik dalam hal kedua metode menghasilkan kavitasi di dalam cairan yang dapat mengakibatkan terbentuknya oksidator (radikal OH) dan mendisinfeksi air. Perbedaan mereka adalah bagaimana kondisi kavitasi terbentuk. Pada ultrasonik, fluktuasi frekuensi yang tinggi dihasilkan di dalam cairan untuk menghasilkan gelombang tekanan. Pada kavitasi hidrodinamik, variasi tekanan pada cairan yang mengalir akibat perubahan geometri pada sistem yang mengalir, maka disebut sebagai kavitasi hidrodinamik.

Aplikasi kavitasi hidrodinamik untuk ozonasi adalah dengan menggunakan injektor Mazzei (Gambar 2.6). Cara kerja injektor adalah sebagai berikut : Ketika cairan operasi bertekanan masuk ke dalam injektor, aliran ini ditarik menuju arah ruang injeksi dan berubah menjadi aliran dengan kecepatan yang sangat tinggi. Peningkatan kecepatan yang melalui ruang injeksi akan menurunkan tekanan, yang demikian akan memungkinkan ozon dimasukkan ke dalam *suction port* dan ikut ke dalam aliran. Dan saat aliran dengan kecepatan tinggi ini menuju keluaran injektor, kecepatannya berkurang namun tekanannya akan meningkat kembali, namun tekanan keluaran ini masih lebih rendah dibandingkan tekanan masukan injektor.



Gambar 2.6. Injektor Venturi

(www.ozoneapplications.com)

2.4. Kavitasi dan Ozonasi

Penggabungan kavitasi ultrasonik dan ozon akan menghasilkan teknologi POL 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 (33) terjadi di daerah dalam gelembung mikro. Radikal OH yang terbentuk kemudian akan bermigrasi ke daerah antarmuka 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).

Sehingga dapat dikatakan bahwa pembentukan radikal OH dari ozon dan kavitasi akan memiliki tiga sumber, yaitu:

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

Proses ozonasi merupakan contoh absorpsi gas dengan reaksi kimia dimana laju reaksi total dapat dipengaruhi oleh kinetika reaksi dan transfer massa. Kondisi tersebut ditentukan dengan tahap laju reaksi pembatas dari laju transfer massa gas-cair yang rendah sampai kelarutan ozon yang rendah. Laju transfer massa tergantung pada karakteristik campuran kontraktor gas-cair yang digunakan, kinetika peluruhan ozon dalam air 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. Di banyak kasus ozonasi tidak dapat menguraikan senyawa organik menjadi karbondioksida (mineralisasi) secara sempurna, melainkan hanya mengoksidasi sebagian menghasilkan aldehida, asam organik dan keton (Li-Bing Chu, 2007).

Kekurangan dari ozon adalah kelarutannya yang rendah dalam air. Dengan rendahnya kelarutan ozon dalam air, maka laju reaksi oksidasi oleh ozon baik langsung maupun tidak langsung (pembentukan radikal OH) akan berkurang. Untuk mengimbangi kelarutan ozon yang rendah, cenderung dilakukan penggunaan dosis ozon yang berlebih. Hal ini menyebabkan borosnya penggunaan ozon yang menjadi salah satu faktor penyebab tingginya biaya proses ozonasi. Salah satu cara untuk meningkatkan kelarutan ozon dalam air adalah dengan menggunakan kavitasi. Disamping itu, telah dilakukan penelitian lain yang menunjukkan bahwa sinergi antara proses ozonasi dan kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) mampu mengurangi konsentrasi ozon yang digunakan hingga menjadi setengah atau sepertiga dari yang dibutuhkan untuk proses disinfeksi tanpa kavitasi (Jyoti dan Pandit, 2004). Maka dalam penelitian ini, penggabungan antara kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) yang memanfaatkan gelembung mikro dan proses ozonasi memungkinkan tercapainya proses yang lebih efektif dan ekonomis.

2.5 Senyawa Fenolik

Senyawa fenolik diklasifikasikan sebagai senyawa kimia yang terdiri dari gugus hidroksil (-OH) yang berikatan dengan gugus hidrokarbon aromatis. Kelas yang paling sederhana adalah fenol (C_6H_5OH). Senyawa fenolik merupakan salah satu polutan yang banyak ditemukan di limbah industri, seperti industri kimia, petrokimia, cat, tekstil, pestisida dan lain-lain.

Senyawa fenolik banyak yang bersifat beracun, tidak mudah didegradasikan serta sulit untuk dihilangkan dari lingkungan. Karena sumbernya yang bermacam-macam, senyawa fenolik dapat ditemukan di dalam air tanah, limbah air, tanah dan bahkan di tempat-tempat dengan tingkat polusi yang rendah.

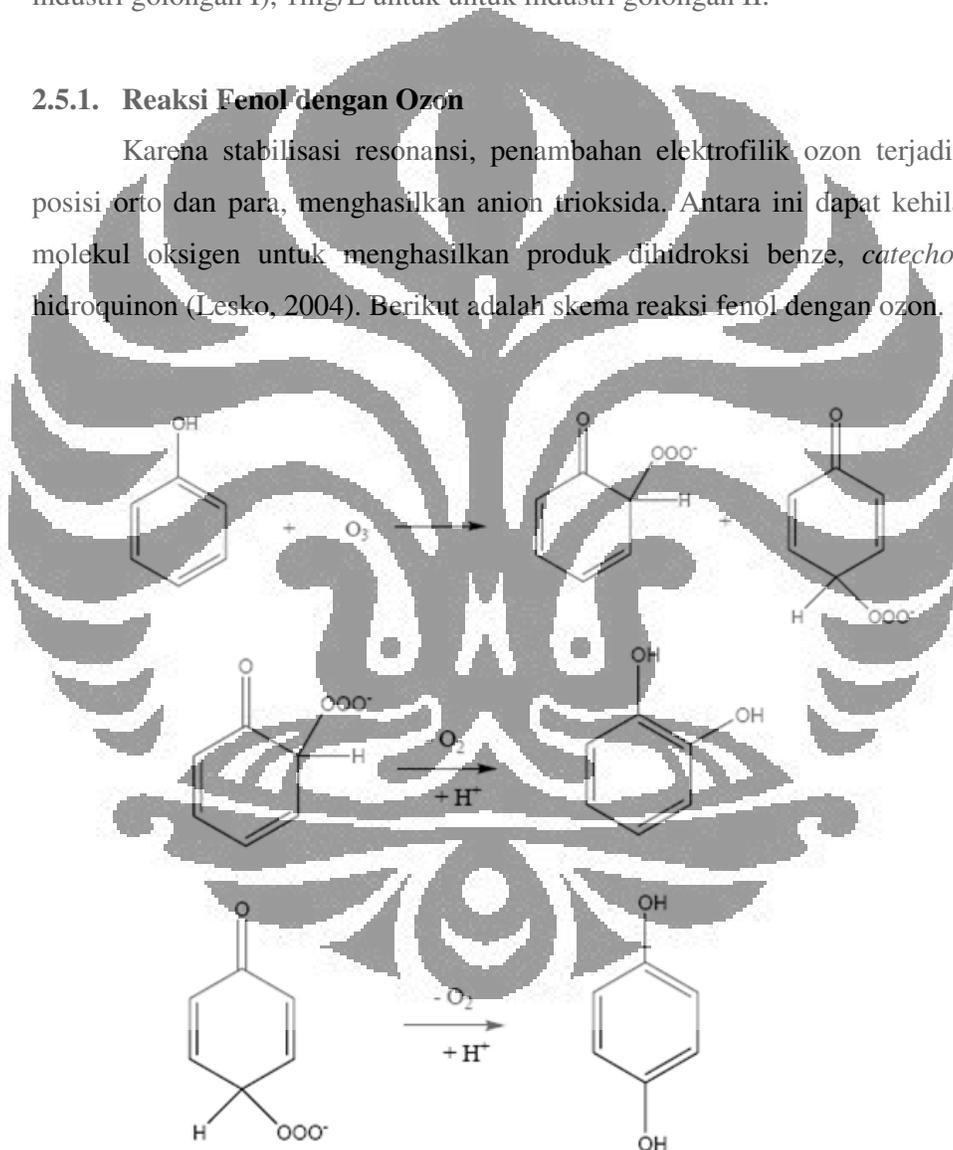
Senyawa fenolik, sebagai kontaminan organik pada air dapat menghasilkan resiko lingkungan yang sangat serius sehingga perlu dihilangkan sebelum dibuang ke lingkungan. Konsentrasi senyawa fenolik pada limbah cair dapat bervariasi hingga 1000 ppm. Namun, pada konsentrasi 1 ppm fenol dalam air dapat menghasilkan bau dan rasa yang tidak sedap (Buscaa, 2008). Konsumsi

air yang mengandung fenol dapat menyebabkan sakit yang berujung pada kerusakan pada kapiler hingga menuju kematian (Buscaa, 2008).

Menteri Negara Lingkungan Hidup melalui Surat Keputusan Nomor KEP-51/MENLH/10/1995 tentang Baku Mutu Limbah Cair Bagi Kegiatan Industri menetapkan konsentrasi senyawa fenolik yang diperbolehkan dalam air limbah kegiatan industri sebelum dibuang ke lingkungan tidak melebihi 0,5 mg/L (untuk industri golongan I), 1mg/L untuk untuk industri golongan II.

2.5.1. Reaksi Fenol dengan Ozon

Karena stabilisasi resonansi, penambahan elektrofilik ozon terjadi pada posisi orto dan para, menghasilkan anion trioksida. Antara ini dapat kehilangan molekul oksigen untuk menghasilkan produk dihidroksi benze, *catechol* dan hidroquinon (Lesko, 2004). Berikut adalah skema reaksi fenol dengan ozon.



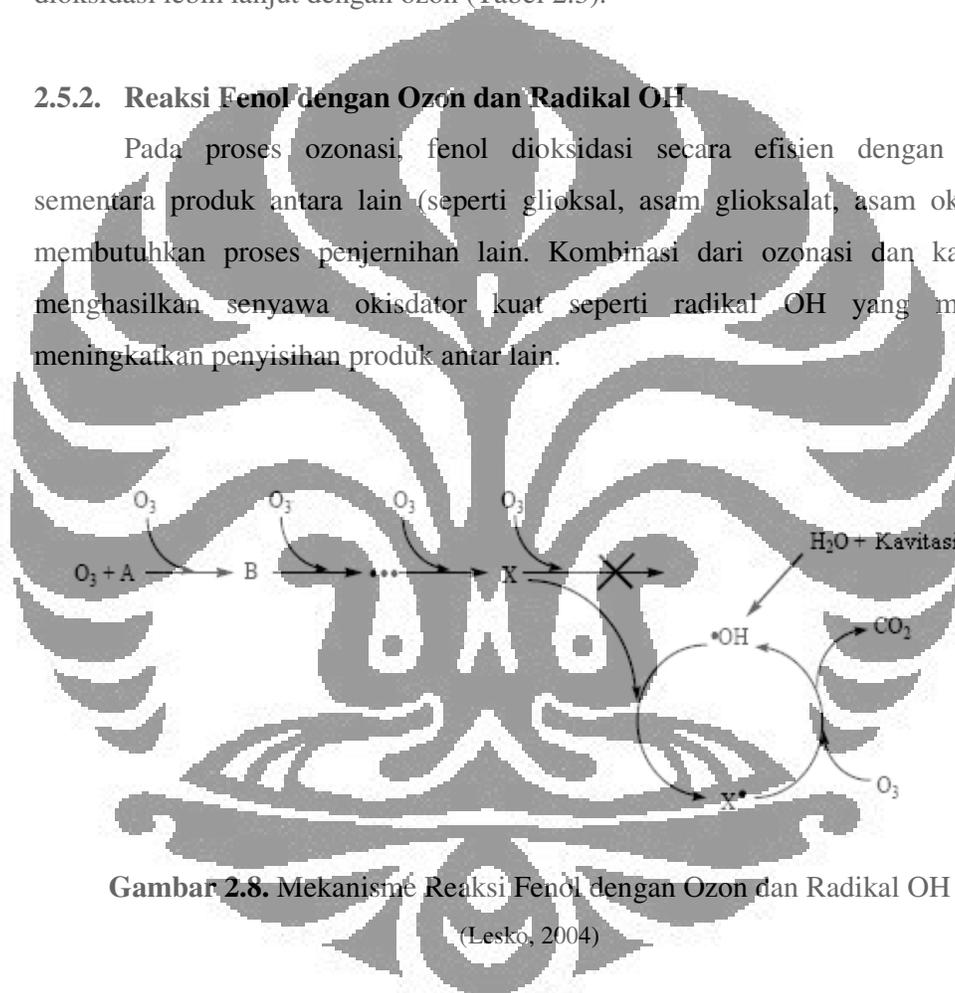
Gambar 2.7. Mekanisme Reaksi Fenol dengan Ozon

(Lesko, 2004)

Catechol dan hidroquinon mengalami reaksi pembukaan-cincin menghasilkan *muconic*, maleat dan asam karboksilat olefinat linear lain. Ozonasi yang dilanjutkan pada produk-produk antara ini dapat menyebabkan dekarboksilasi dan pembentukan glioksal, dan asam glioksilat yang akan mengoksidasi asam oksalat. Karena laju konstanta bimolekularnya yang minimal dengan ozon, asam oksalat merupakan hasil akhir yang stabil yang tidak dapat dioksidasi lebih lanjut dengan ozon (Tabel 2.3).

2.5.2. Reaksi Fenol dengan Ozon dan Radikal OH

Pada proses ozonasi, fenol dioksidasi secara efisien dengan ozon sementara produk antara lain (seperti glioksal, asam glioksalat, asam oksalat) membutuhkan proses penjernihan lain. Kombinasi dari ozonasi dan kavitasi menghasilkan senyawa oksidator kuat seperti radikal OH yang mampu meningkatkan penyisihan produk antar lain.



Gambar 2.8. Mekanisme Reaksi Fenol dengan Ozon dan Radikal OH
(Lesko, 2004)

Gambar 2.7 menjelaskan skema proses ozonasi dan kavitasi pada penyisihan fenol (reaksi antara fenol dengan ozon dan radikal OH). Oksidasi dari fenol (A) dan produk sampingan degradasinya (B, C, D, ...) terjadi secara sangat cepat di dalam larutan dengan proses ozonasi. Serangan dari molekul ozon akhirnya menghasilkan senyawa jenuh yang tidak dapat dioksidasi lebih lanjut oleh ozon (Tabel 2.3), tapi bisa dioksidasi dengan serangan radikal OH (Tabel

2.4) untuk menghasilkan radikal X. Radikal-radikal antara ini akhirnya dapat dengan mudah teroksidasi dengan ozon. Dari Tabel 2.3 dan Tabel 2.4 di bawah dapat dilihat konstanta laju reaksi antara fenol dan produk antara dengan ozon dan dengan radikal OH.

Tabel 2.3. Konstanta Laju reaksi Fenol dan Produk Antara dengan Ozon

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

(Lesko, 2004)

Tabel 2.4. Konstanta Laju reaksi Fenol dan Produk Antara dengan Radikal OH

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

(Lesko, 2004)

2.5.3. Produk Antara Hasil Penyisihan Fenol dengan POL

Seperti dapat dilihat pada Tabel 2.3 dan Tabel 2.4, berikut adalah produk antara penyisihan fenol dengan proses oksidasi lanjut berbasis ozon serta bahayanya (<http://msds.chem.ox.ac.uk>):

- *Catechol*

Catechol merupakan senyawa organik dengan rumus molekul $C_6H_4(OH)_2$. Senyawa ini bersifat korosif dan berbahaya jika terhirup, tertelan atau terkena kulit. Ambang batas untuk tertelan: 210 ppm dan terkena kulit: 800 ppm

- Hidroquinon

Hidroquinon merupakan senyawa organik dengan rumus molekul $C_6H_6O_2$. Senyawa ini bersifat karsinogenik dan dapat menyebabkan iritasi berat pada kulit serta sangat berbahaya jika terhirup dan tertelan. Ambang batas untuk tertelan: 320 ppm dan terkena kulit: 5970 ppm .

- Benzoquinon

Benzoquinon merupakan senyawa organik dengan rumus molekul $C_6H_4O_2$. Senyawa ini merupakan senyawa beracun dan sangat berbahaya jika tertelan, terhirup maupun terkena kulit. Ambang batas untuk tertelan: 100 ppm.

- Asam Maleat

Asam maleat merupakan senyawa dengan rumus molekul $HOC(=O)CH=CHCOOH$. Senyawa ini merupakan senyawa yang berbahaya jika tertelan dan bersifat korosif. Ambang batas untuk tertelan: 708 ppm.

- Asam Format

Asam format merupakan senyawa dengan rumus molekul CH_2O_2 . Senyawa ini bersifat korosif dan berbahaya jika tercium, tertelan dan terkena kulit. Ambang batas untuk tertelan: 1100 ppm dan terhirup: 15 ppm.

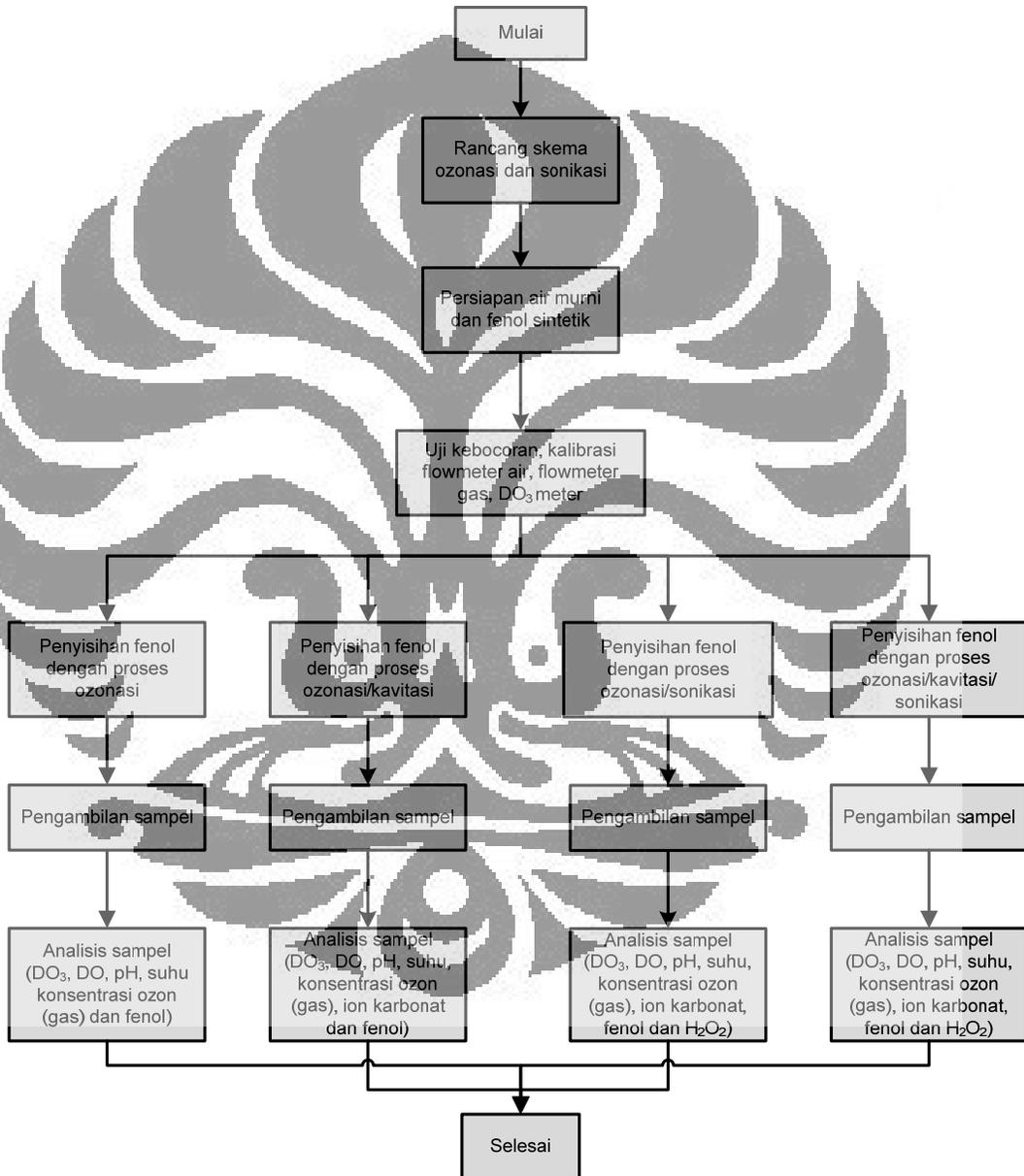
- Asam Oksalat

Asam oksalat merupakan senyawa dengan rumus molekul $C_2H_2O_4$. Senyawa ini berbahaya jika tertelan dan terkena kulit. Ambang batas untuk tertelan: 7500 ppm.

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

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



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

3.2 Deskripsi Skema Alat

Sistem peralatan ini terdiri dari empat peralatan utama: ozonator, injektor, reaktor kaca dan sonikator (dapat dilihat di Gambar 3.2-3.5).

3.2.1. Ozonator

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

Ozonator dirancang untuk bekerja pada tegangan listrik bolak-balik (AC) 9–16 kilovolt, tekanan atmosferik dan temperatur kerja 15–40°C dengan laju alir ozon sebesar 0,087 gram/jam. Tabung ozonator terbuat dari bahan PVC yang didalamnya terdapat elektroda dan dielektriknya terbuat dari bahan *stainless steel*. Elektroda ini dihubungkan dengan sumber listrik tegangan tinggi. Panas akibat medan induksi elektromagnetik tinggi didinginkan dengan menggunakan air pendingin yang mengalir secara kontinyu. Arus listrik yang masuk (input) akan dinaikkan tegangannya oleh transformer sehingga menghasilkan tegangan yang tinggi. Ozonator diletakkan pada jarak yang sangat dekat dengan peralatan.

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

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

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

3.2.2. Injektor

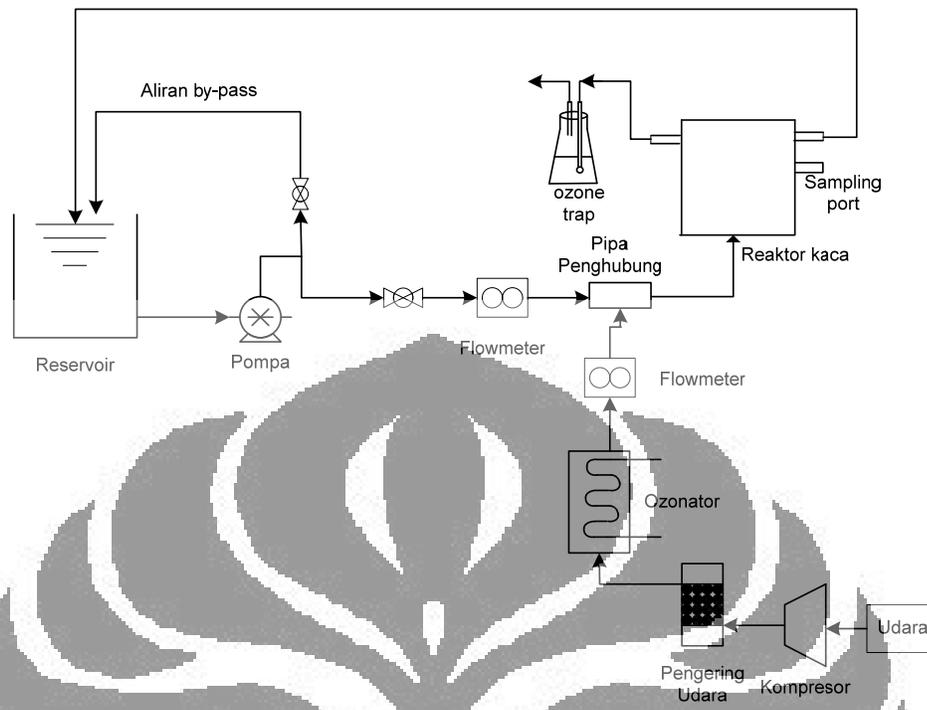
Injektor yang digunakan merupakan injektor tipe venturi Merk Mazzei. Injektor ini berfungsi untuk menginjeksikan ozon ke dalam air. Salah satu keuntungan penggunaan injektor mazzei adalah dari segi jenis gelembung yang dihasilkan, yaitu gelembung mikro, sehingga dapat menghasilkan perpindahan massa ozon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

3.2.3. Sonikator UP-800 Ultrasonic Processor

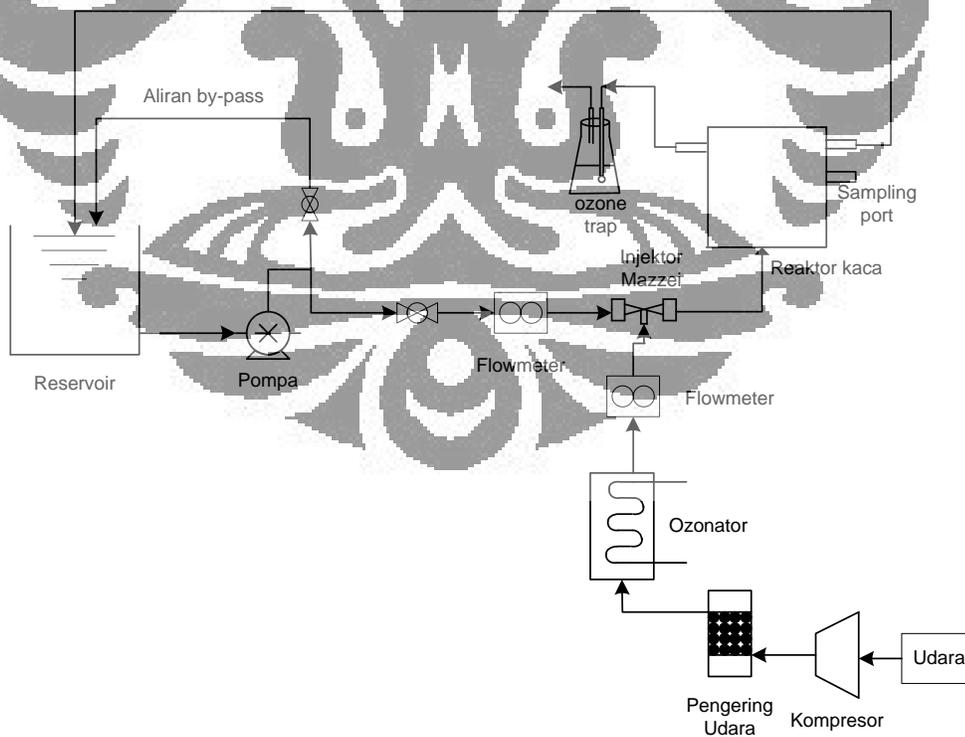
Rangkaian alat ultrasonik ini akan menghasilkan sinyal elektrik dengan frekuensi yang tinggi, yang akan diubah menjadi getaran mekanis. Getaran mekanis diperkuat oleh probe dan akan diteruskan ke sekitar larutan. Getaran ini nantinya akan membentuk gelembung mikro, yang akan berkembang dan akhirnya akan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

3.2.4. Reaktor Kaca dan Pompa

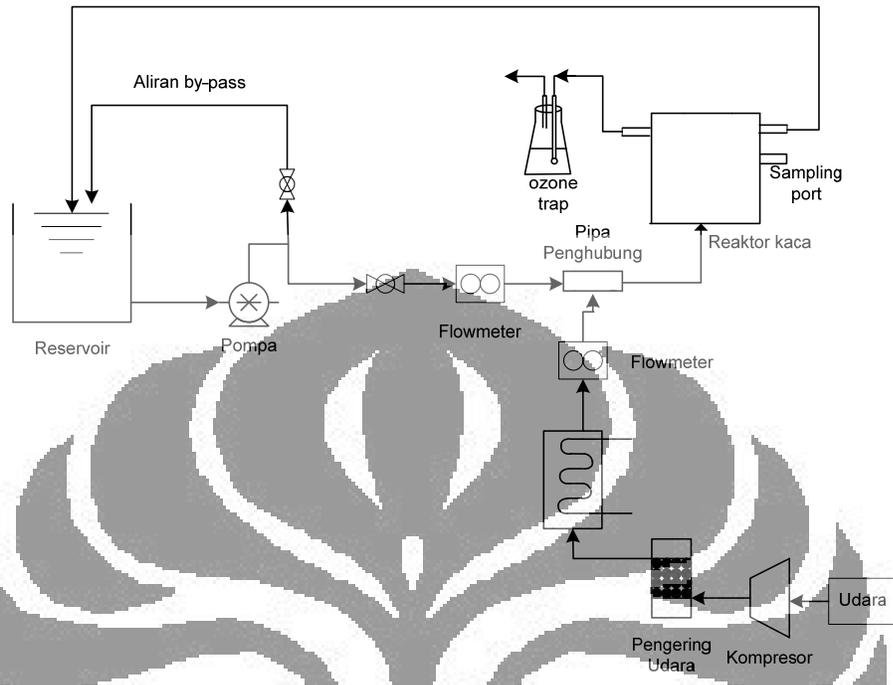
Reaktor kaca dirancang untuk mengamati perpindahan massa antara ozon dan air. Reaktor ini dibuat dari kaca untuk memudahkan pengamatan. Reaktor kaca memiliki volume total 2,75 liter dan volum efektif sebesar 2,5 liter. Reaktor ini dilengkapi dengan *sampling port* untuk pengambilan sampel. Pompa yang digunakan terbuat dari bahan *stainless steel* karena tahan terhadap ozon.



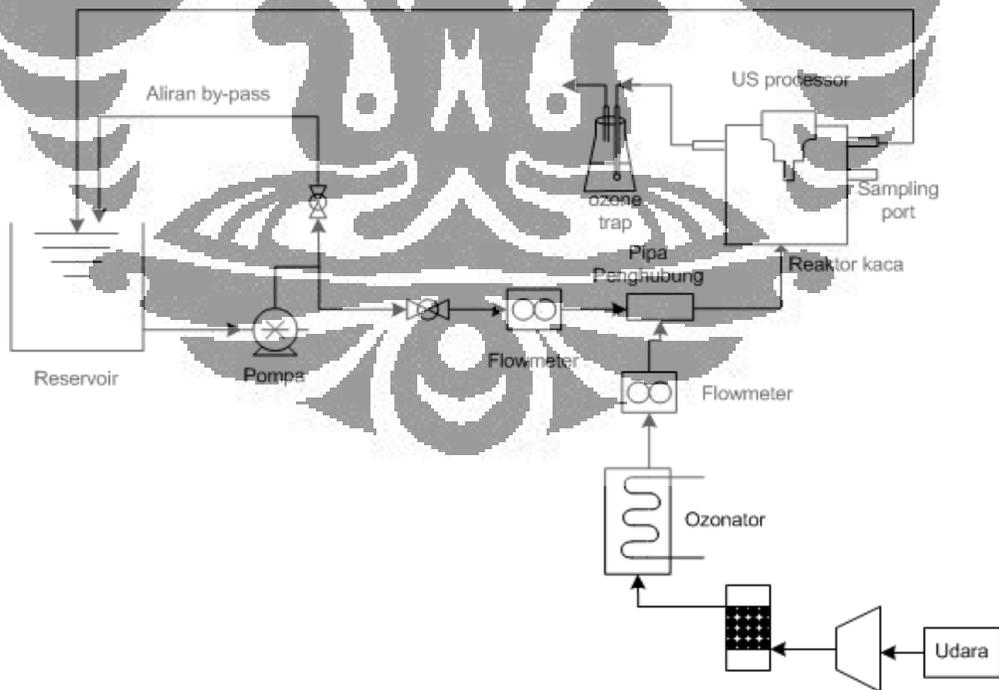
Gambar 3.2. Skema Penelitian Ozonasi



Gambar 3.3. Skema Penelitian Ozonasi/Hidrodinamik



Gambar 3.4. Skema Penelitian Ozonasi/Sonikasi



Gambar 3.5. Skema Penelitian Ozonasi/Hidrodinamik/Sonikasi

3.3. Penelitian yang Dilakukan

Cakupan dalam penelitian ini antara lain untuk menentukan signifikansi kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) pada proses ozonasi fenol dengan parameter lain yang dilihat adalah persen penyisihan karbonat serta kandungan H_2O_2 dengan memvariasikan konfigurasi proses yaitu ozonasi, ozonasi/hidrodinamik, ozonasi/sonikasi dan ozonasi/hidrodinamik/sonikasi. Untuk persen penyisihan fenol untuk semua konfigurasi penelitian (ozonasi, ozonasi/hidrodinamik, ozonasi/sonikasi, ozonasi/hidrodinamik/sonikasi). Untuk persen penyisihan karbonat hasilnya akan dibandingkan pada proses ozonasi/hidrodinamik, ozonasi/sonikasi dan ozonasi/hidrodinamik/sonikasi. Untuk kandungan H_2O_2 hasilnya akan dibandingkan pada proses ozonasi/ultrasonikasi dengan variasi frekuensi.

3.4. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Sistem peralatan pada Gambar 3.2 – Gambar 3.5
2. Stop watch
3. Labu erlenmeyer
4. DO_3 meter
5. DO meter
6. pH meter
7. Spektrofotometer UV-Vis, panjang gelombang 500 nm dan 628 nm.
8. *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 100 ppm.

3. HCl 6 M

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

4. CaCO₃ 16 µM

CaCO₃ yang digunakan adalah CaCO₃ sintetik dengan konsentrasi pada sistem sebesar 16 µM

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 7 liter
3. Menambahkan HCl 6 M ke dalam reservoir hingga pH sistem mencapai 13.
4. Menambahkan fenol dengan konsentrasi 10.000 ppm sebanyak 70 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 3 Lpm.
7. Menginjeksikan ozon ke dalam air dengan laju alir ozon sebesar 400 Lph.
8. Mengambil sampel air di sample port, yaitu:
 - 1) Setiap lima menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 2 mL untuk mengukur kadar fenol.
 - 2) Setiap lima menit sekali selama 30 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 sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 5) sebanyak 200 mL untuk mengukur kadar ozon terlarut (dengan DO₃ meter), air kemudian dikembalikan ke dalam sistem.

9. Mengambil larutan KI setiap lima menit sekali selama 30 menit yang telah terozonasi dan mengukur kadar ozon dengan metode iodometri, mengganti dengan larutan KI yang baru.

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

3.5.2. Penyisihan fenol dengan proses ozonasi/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 7 liter
3. Menambahkan HCl 6 M ke dalam reservoir hingga pH sistem mencapai 2-3.
4. Menambahkan fenol dengan konsentrasi 10000 ppm sebanyak 70 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 3 Lpm.
7. Menginjeksikan ozon ke dalam air dengan laju alir ozon sebesar 400 Lph.
8. Mengambil sampel air di sample port, yaitu:
 - 1) Setiap lima menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 2 mL untuk mengukur kadar fenol.
 - 2) Setiap lima menit sekali selama 30 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 sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 5) sebanyak 200 mL untuk mengukur kadar ozon terlarut (dengan DO₃ meter), air kemudian dikembalikan ke dalam sistem.

9. Mengambil larutan KI setiap lima menit sekali selama 30 menit yang telah terozonasi dan mengukur kadar ozon dengan metode iodometri, mengganti dengan larutan KI yang baru.

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

11. Melakukan kembali langkah 1-4 kemudian menambahkan larutan CaCO₃ 0,01 M sebanyak 10,2 mL ke dalam reservoir. Setelah itu melakukan kembali langkah 5-10 (dengan penambahan pada langkah 8 yaitu setiap lima menit sekali dalam 30 menit (dimulai dari menit ke 0) mengambil air di sample port sebanyak 20 mL untuk dianalisa kandungan karbonatnya).

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 7 liter.
3. Menambahkan HCl 6 M ke dalam reservoir hingga pH sistem mencapai 2-3.
4. Menambahkan fenol dengan konsentrasi 10000 ppm sebanyak 70 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 3 Lpm.
7. Menyalakan sonikator dengan intensitas 60%.

8. Menginjeksikan ozon ke dalam air dengan laju alir ozon sebesar 400 Lph.
9. Mengambil sampel air di sample port, yaitu:
 - 1) Setiap lima menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 2 mL untuk mengukur kadar fenol.
 - 2) Setiap lima menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 2 mL untuk mengukur kadar H_2O_2 .
 - 3) Setiap lima menit sekali selama 30 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.
 - 4) Setiap lima menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 5) sebanyak 200 mL untuk mengukur kadar ozon terlarut (dengan DO_3 meter), air kemudian dikembalikan ke dalam sistem.
10. Mengambil larutan KI setiap lima menit sekali selama 30 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.
12. Melakukan kembali langkah 1-4 kemudian menambahkan larutan $CaCO_3$ 0,01 M sebanyak 10,2 mL ke dalam reservoir. Setelah itu melakukan kembali langkah 5-10 (dengan perubahan pada langkah 8 yaitu menghilangkan tahap 8b dan menambahkan: setiap lima menit sekali dalam 30 menit (dimulai dari menit ke 0) mengambil air di sample port sebanyak 20 mL untuk dianalisa kandungan karbonatnya).

3.5.4. Penyisihan fenol dengan proses ozonasi/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 7 liter
3. Menambahkan HCl 6 M ke dalam reservoir hingga pH sistem mencapai 2-3.
4. Menambahkan fenol dengan konsentrasi 5000 ppm sebanyak 70 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 3 Lpm.
7. Menyalakan sonikator dengan intensitas 30%.
8. Menginjeksikan ozon ke dalam air dengan laju alir ozon sebesar 400 Lph.
9. Mengambil sampel air di sample port, yaitu:
 - 1) Setiap lima menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 2 mL untuk mengukur kadar fenol.
 - 2) Setiap lima menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 0) sebanyak 2 mL untuk mengukur kadar H₂O₂.
 - 3) Setiap lima menit sekali selama 30 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.
 - 4) Setiap lima menit sekali selama 30 menit (dimulai dari menit ke 5) sebanyak 200 mL untuk mengukur kadar ozon terlarut (dengan DO₃ meter), air kemudian dikembalikan ke dalam sistem.
10. Mengambil larutan KI setiap lima menit sekali selama 30 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.
12. Melakukan kembali langkah 1-4 kemudian menambahkan larutan CaCO₃ 0,01 M sebanyak 10,2 mL ke dalam reservoir. Setelah itu melakukan kembali langkah 5-10 (dengan perubahan pada langkah

8 yaitu menghilangkan tahap 8b dan menambahkan: setiap lima menit sekali dalam 30 menit (dimulai dari menit ke 0) mengambil air di sample port sebanyak 20 mL untuk dianalisa kandungan karbonatnya).

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 air dari bagian atas reaktor kaca. Sampel diambil dari *sampling port*. Sampel diambil dalam selang waktu lima menit untuk setiap konfigurasi sistem yang dilakukan.

Sampel dianalisa dengan metode aminoantipirin dengan menggunakan spektrofotometer. Fenol direaksikan dengan 4-aminoantipirin dengan kehadiran ikalium heksasianoferat ($K_3Fe(CN)_6$) pada suasana basa (pH diatur sekitar $7,9 \pm 0,1$ dengan menambahkan larutan penyangga fosfat). Reaksi ini akan menghasilkan antipirin yang berwarna. Absorbansi inilah yang diukur dengan menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 500 nm.

3.6.1.1. Peralatan

Peralatan yang digunakan:

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

3.6.1.2. Bahan

Bahan yang digunakan:

1. 4-aminoantipirin

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

3.6.1.3. Prosedur

1. Menambahkan sampel sebanyak 1 ml ke dalam tabung reaksi.
2. Menambahkan 9 ml aquades pada masing-masing sampel.
3. Menambahkan 0,26 ml NH_4OH 0.5 N ke dalam masing-masing sampel.
4. Menambahkan 0,24 ml buffer fosfat ke dalam masing-masing sampel.
5. Menambahkan 0,1 ml 4-aminoantipirin ke dalam masing-masing sampel.
6. Menambahkan 0,1 ml $K_3Fe(CN)_6$ ke dalam masing-masing sampel.
7. Mengaduk perlahan masing-masing sampel dan mendinginkannya selama 15 menit.
8. Mengukur absorbansi masing-masing sampel pada panjang gelombang 500 nm.

3.6.2. Penentuan Konsentrasi H_2O_2

Sampel yang diambil berupa air dari bagian atas reaktor kaca. Sampel diambil dari *sampling port*. Sampel diambil dalam selang waktu lima menit untuk setiap konfigurasi sistem yang dilakukan.

Sampel dianalisa dengan menggunakan spektrofotometer. Prinsip yang digunakan adalah mereaksikan H_2O_2 dengan KI dalam medium asam yang menghasilkan iodin yang akan melunturkan warna biru dari toluidin yang memiliki absorbansi maksimum pada 628 nm.

3.6.2.1. Peralatan

Peralatan yang digunakan:

1. Kuvet
2. Tabung reaksi 70 mL
3. Beaker glass 250 ml
4. Pipet

5. Pipet ukur 0,1 ml, 1 ml dan 5 ml.

3.6.2.2. Bahan

Bahan yang digunakan:

1. KI 2%
2. Indikator *toluidine blue* 0.01%
3. HCl 2 M
4. CH_3COONa 2M
5. Aquadest

3.6.2.3. Prosedur

1. Menambahkan sampel sebanyak 5 tetes ke dalam tabung reaksi.
2. Menambahkan 1 ml KI 2% ke dalam masing-masing sampel.
3. Menambahkan 1 ml HCl 2 M ke dalam masing-masing sampel.
4. Menambahkan 0,5 ml *toluidine blue* ke dalam masing-masing sampel.
5. Menambahkan 2 ml CH_3COONa 2M ke dalam masing-masing sampel.
6. Mengaduk perlahan masing-masing sampel.
7. Mengukur absorbansi masing-masing sampel pada panjang gelombang 628 nm.

3.6.3. Penentuan Konsentrasi Keluaran Ozon Fasa Gas

Sampel yang diambil berupa air dari bagian atas reaktor kaca. Sampel diambil dari *sampling port*. Sampel diambil dalam selang waktu lima menit untuk setiap konfigurasi sistem yang dilakukan. 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. $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
3. H_2SO_4 2 N
4. Indikator amylum

3.6.3.3. Prosedur

Prosedur analisis sampel dengan metode iodometri adalah sebagai berikut:

1. Menambahkan KI 0,12 N 25 ml ke dalam sampel
2. Menambahkan H_2SO_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 air dari bagian atas reaktor kaca. Sampel diambil dari *sampling port*. Sampel diambil dalam selang waktu lima 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_2SO_4 0,02 N
2. NaOH 0,1 M
3. PP
4. Metil Orange

3.6.4.3. Prosedur

Prosedur analisis sampel adalah sebagai berikut:

1. Menambahkan NaOH 0,1 M ke dalam sampel hingga pH mencapai 9-10
2. Menambahkan PP ke dalam sampel hingga warna menjadi merah-ungu
3. Menitrasi sampel dengan H_2SO_4 0,02 N hingga warna sampel menjadi bening
4. Mencatat volume H_2SO_4 0,02 N yang digunakan untuk menitrasi sampel
5. Menambahkan Metil Orange ke dalam larutan hingga menjadi warna kuning-oranye
6. Menitrasi larutan dengan H_2SO_4 0,02 N hingga warna sampel menjadi merah muda
7. Mencatat volume H_2SO_4 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. Penyisihan Fenol (C/C_0)

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

- Sumbu x: waktu
- Sumbu y: konsentrasi fenol terhadap konsentrasi awal fenol (C/C_0)

3.7.2. Konsentrasi H_2O_2 Terhadap Waktu

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

- Sumbu x: waktu
- Sumbu y: konsentrasi H_2O_2

3.7.3. Konsentrasi Ozon Terlarut Terhadap Waktu

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

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

3.7.4. 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

3.7.5. pH Terhadap Waktu

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

- Sumbu x: waktu
- Sumbu y: pH

3.7.6. Konsentrasi Oksigen Terlarut Terhadap Waktu

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

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

3.7.7. Peningkatan Suhu Terhadap Waktu

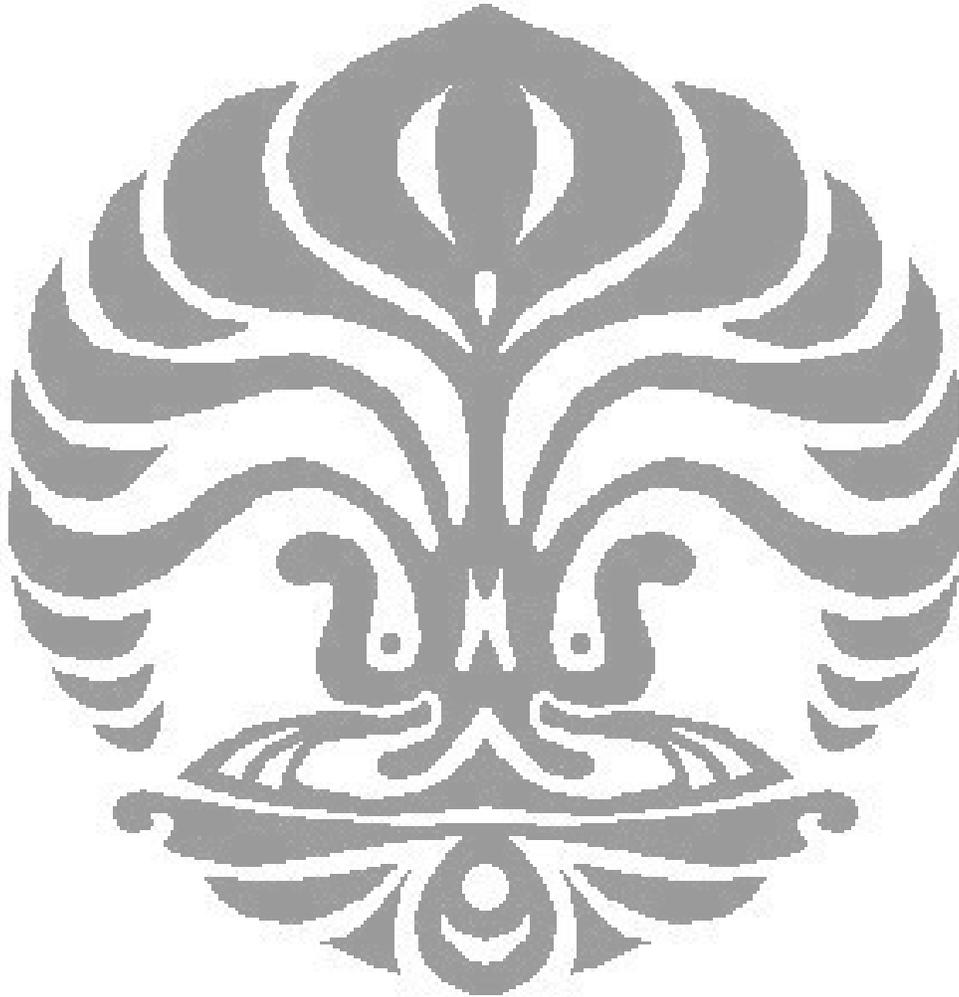
Dari data pada masing-masing konfigurasi penelitian akan dibuat grafik dengan:

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

3.7.8. Penyisihan Ion Karbonat

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

- Sumbu x: waktu
- Sumbu y: konsentrasi ion karbonat terhadap konsentrasi awal ion karbonat (C/C_0)



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tujuan penelitian ini adalah untuk mempelajari dan menganalisis signifikansi kavitas hidrodinamik dan/atau ultrasonik pada proses penyisihan fenol berbasis ozonasi pada kondisi asam. Beberapa parameter yang diamati dalam penelitian ini selain persentase penyisihan fenol adalah konsentrasi ozon terlarut, konsentrasi gas keluaran ozon, konsentrasi hidrogen peroksida, konsentrasi ion karbonat, kandungan oksigen terlarut, serta pH larutan. Parameter-parameter ini akan diukur pada masing-masing konfigurasi penelitian yaitu ozonasi, ozonasi/hidrodinamik, ozonasi/sonikasi serta ozonasi/hidrodinamik/sonikasi pada laju alir gas ozon sebesar 400 L/jam, laju alir air sebesar 3 L/menit serta konsentrasi awal fenol sebesar 100 ppm.

4.1. Persentase Penyisihan Fenol

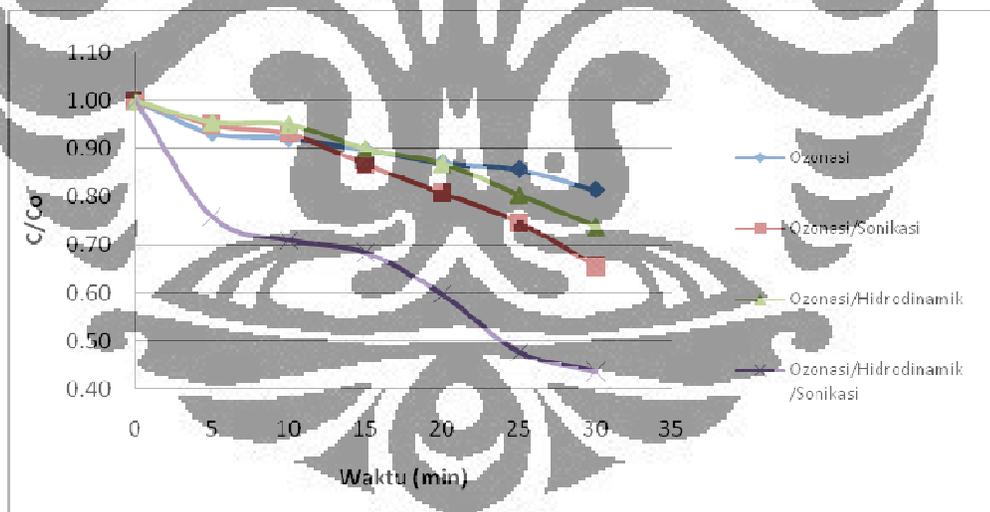
Persentase penyisihan fenol dilihat dari kandungan fenol setelah mengalami proses oksidasi selama 30 menit terhadap kandungan fenol awal. Nilai persentase penyisihan fenol ini akan dibandingkan pada masing-masing konfigurasi proses (ozonasi, ozonasi/hidrodinamik, ozonasi/sonikasi serta ozonasi/hidrodinamik/sonikasi). Penyisihan fenol pada proses ozonasi, kavitas hidrodinamika dan kavitas 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

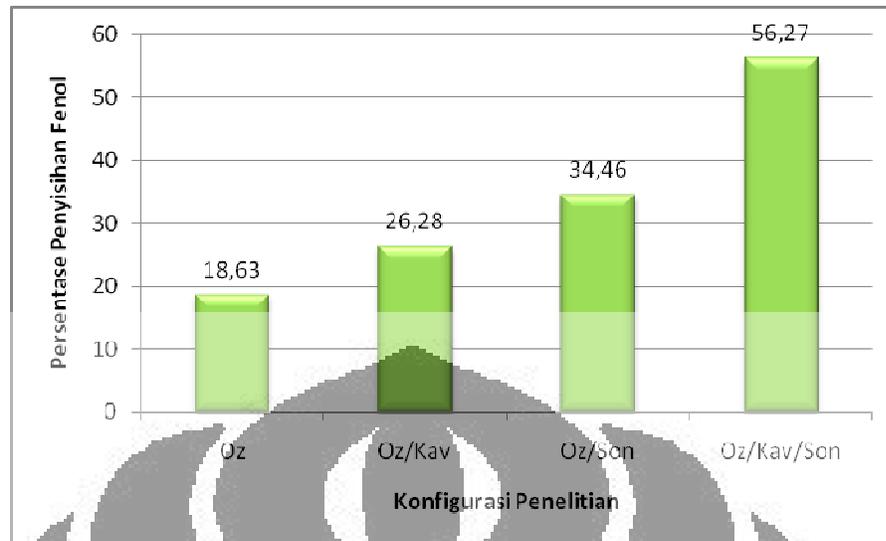
Reaksi pertama dan kedua lebih umum terjadi dibanding reaksi ketiga karena reaksi dekomposisi termal fenol umumnya terjadi pada konsentrasi fenol yang tinggi. Hal ini dapat dihubungkan dengan sifat alami fenol yaitu hidrofilik (mudah berikatan dengan air). Fenol merupakan senyawa yang mudah larut dalam air dengan tekanan uap yang rendah (Chowdhury, 2008). Sifat ini mencegah difusi molekul fenol ke dalam gelembung kavitas, 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 konsentrasi fenol pada masing-masing konfigurasi cenderung menurun seiring dengan lamanya proses. Penurunan yang paling drastis diperoleh pada penggabungan proses ozonasi/hidrodinamik/soikasi dan penurunan fenol yang paling kecil didapat pada proses ozonasi saja. Untuk lebih jelasnya, dapat dilihat dari Gambar 4.2, persentase penyisihan fenol paling rendah adalah sebesar 18,63%, sementara yang paling tinggi adalah sebesar 56,267%. Ketika ozonasi dilakukan pada kondisi asam (pH 2-3), dekomposisi ozon, yang diinisiasi oleh ion OH^- sangatlah rendah sehingga pembentukan radikal OH menjadi terbatas. Berdasarkan situasi ini maka reaksi utama antara ozon dan fenol adalah reaksi langsung. Pada reaksi langsung, ozon secara selektif akan menyerang ikatan ganda pada senyawa organik (fenol).



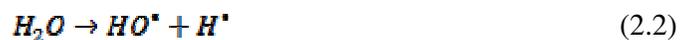
Gambar 4.1. C/C_0 Fenol pada Masing-Masing Konfigurasi Penelitian



Gambar 4.2. Persentase Penyisihan Fenol pada Masing-Masing Konfigurasi Penelitian

Konstanta laju reaksi fenol dengan ozon adalah $1,3 \times 10^3 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$, sementara konstanta laju reaksi fenol dengan radikal OH adalah $6,6 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa fenol lebih reaktif dengan radikal OH dibandingkan dengan ozon. Hal inilah yang menyebabkan proses ozonasi memiliki penyisihan fenol yang paling kecil. 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.

Proses kavitasi sendiri (tanpa ozon) akan menghasilkan gelembung-gelembung mikro pada air, sehingga molekul gas dari air yang terjebak dalam gelembung yang terexpansi akan pecah hingga menghasilkan senyawa radikal yang sangat reaktif seperti radikal OH sesuai dengan Persamaan 2.2 (N.H. Ince, 2000):



Radikal OH yang terbentuk akibat dari kavitasi ultrasonik ini dapat bereaksi dalam fasa gas atau dikombinasikan pada daerah yang lebih dingin seperti interfasa gas-cairan dan/atau fasa ruah (*bulk*) larutan untuk menghasilkan hidrogen peroksida dan air.

Penggabungan kavitasi ultrasonik dan 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 (2.33) terjadi di daerah dalam gelembung mikro. 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).

Sehingga dapat dikatakan bahwa pembentukan radikal OH dari ozon dan kavitasi akan memiliki tiga sumber, yaitu:

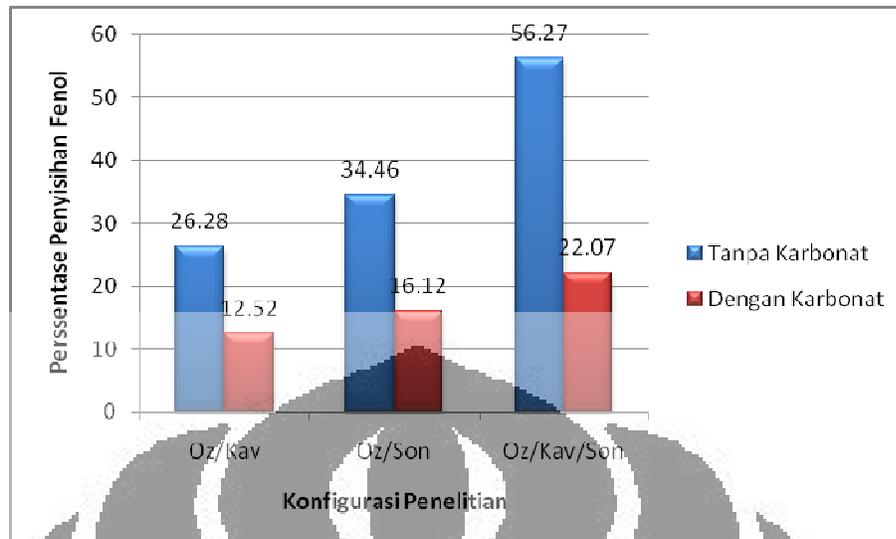
1. Dekomposisi normal dari ozon
2. Dekomposisi uap air dari dalam gelembung mikro oleh kavitasi
3. Dekomposisi termal ozon dari dalam gelembung mikro oleh kavitasi

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. 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.

Dari penjelasan di atas dapat disimpulkan bahwa persen penyisihan fenol dapat ditingkatkan dengan peningkatan jumlah radikal OH. Gambar 4.2 menunjukkan bahwa proses penggabungan ozonasi, kavitasi hidrodinamika dan kavitasi ultrasonik memiliki persentase penyisihan fenol yang paling besar (56,27%). 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.

Untuk memperjelas peranan radikal OH pada proses ozonasi dan kavitasi, maka dilakukan juga penelitian dengan menggunakan ion karbonat yang akan bereaksi dengan radikal OH. Ion karbonat berasal dari senyawa CaCO_3 dengan konsentrasi 16 μM . Konsentrasi yang relatif kecil ini dipilih agar ion karbonat hanya bereaksi dengan radikal OH saja, dan tidak terhadap ion atau radikal lain. Dengan bereaksinya ion karbonat dengan radikal OH, diharapkan fenol yang tersisih adalah karena bereaksi secara langsung dengan ozon.

Gambar 4.3 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 sebesar 50%-60% dari penyisihan fenol tanpa karbonat. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa pada percobaan tanpa karbonat, hampir 50%-60% selisih persentase penyisihan fenol adalah akibat reaksi dengan radikal OH sementara 40%-50% sisanya adalah akibat reaksi fenol dengan ozon. 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.



Gambar 4.3. Perbandingan Persentase Penyisihan Fenol pada Penelitian Tanpa dan Dengan Karbonat

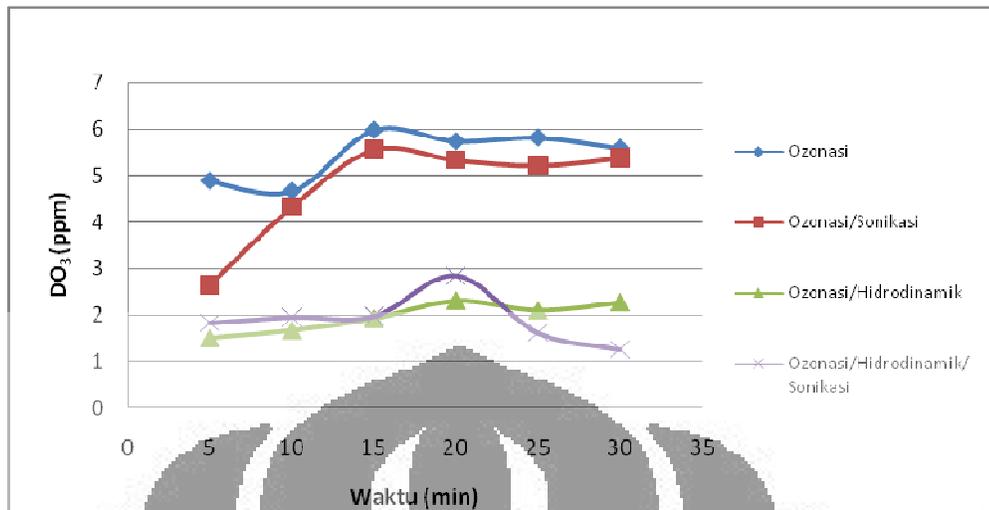
4.2. Konsentrasi Ozon Terlarut (Ozon Residual)

Konsentrasi ozon terlarut pada penelitian ini memiliki korelasi dengan penyisihan fenol. Pada dasarnya, proses berbasis ozonasi yang dilakukan pada pH rendah akan mengakibatkan ozon sulit terdekomposisi menjadi radikal OH (sehingga penyisihan fenol kurang efektif). Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, hal ini disebabkan karena ketidakhadiran ion OH⁻. Namun, dengan adanya penambahan kavitasi maka dekomposisi ozon di dalam air akan meningkat (sesuai dengan Persamaan 2.10), sehingga dapat dilihat pada Gambar 4.3 proses ozonasi memiliki kandungan ozon terlarut yang paling banyak jika dibandingkan dengan proses ozonasi dan kavitasi. Dengan adanya kavitasi, sebagian dari ozon yang terlarut dalam sistem akan terdekomposisi menjadi radikal OH. Penggabungan proses kavitasi hidrodinamika dan ultrasonik pada proses berbasis ozonasi akan memiliki efek kavitasi yang lebih besar dibandingkan dengan ozonasi dengan ultrasonik dan ozonasi dengan kavitasi. Fenomena ini juga dapat dilihat dari Gambar 4.4 bahwa proses ozonasi/hidrodinamik/sonikasi memiliki nilai ozon terlarut yang paling rendah.

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 4.4 dimana kandungan ozon residual pada proses ozonasi/sonikasi cukup tinggi (nilainya berdekatan dengan proses ozonasi). Hal ini tidak menunjukkan bahwa dekomposisi ozon pada proses ozonasi/sonikasi kurang baik, namun sesuai dengan efek fisika yang dihasilkan kavitasi, dapat dikatakan bahwa perpindahan massa gas-cair ozon sangat baik pada proses ini. Hal ini ditunjukkan pada persentase penyisihan fenol yang cukup besar (34,463%).

Dari Gambar 4.4, dapat dilihat bahwa kecenderungan ozon terlarut pada masing-masing proses adalah meningkat dahulu kemudian menurun. Fenomena naik turunnya kelarutan ozon yang sangat jelas terlihat pada proses ozonasi/hidrodinamik/sonikasi. Pada proses ini di menit ke-15 hingga 25 ozon terlarut mengalami penurunan dan 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-15 dan 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. Namun hal ini tidak berlangsung lama, setelah menit ke-20 konsentrasi ozon di dalam sistem akan menurun karena dengan semakin tingginya suhu sistem maka dekomposisi ozon menjadi radikal OH akan semakin besar sehingga kandungan ozon pun menjadi semakin sedikit. Radikal OH ini selain bereaksi dengan fenol juga akan bereaksi dengan senyawa antara dari reaksi ozon dan fenol.

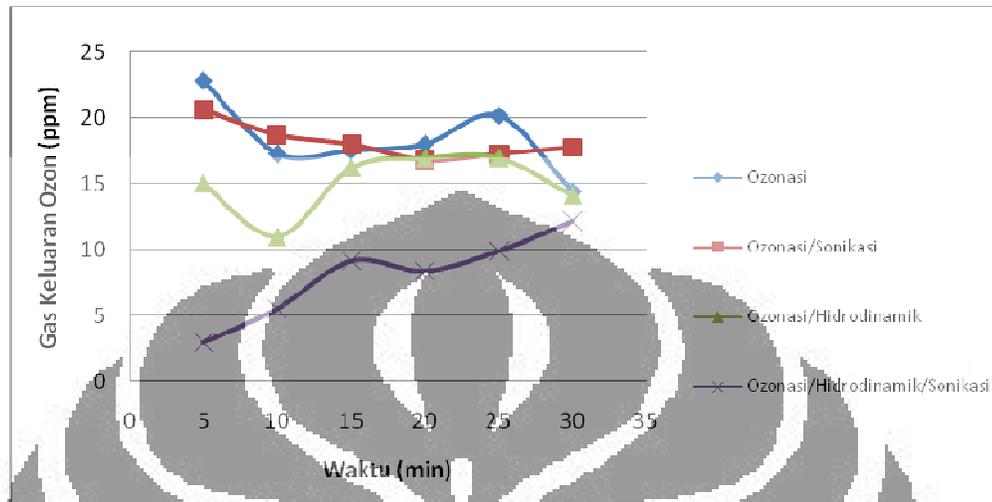


Gambar 4.4. Konsentrasi Ozon Terlarut pada Masing-Masing Konfigurasi Penelitian

4.3. Konsentrasi Gas Keluaran Ozon

Pada dasarnya, baik kandungan ozon residual maupun konsentrasi gas keluaran ozon menunjukkan seberapa efisien proses berbasis ozonasi, karena kandungan ozon residual menunjukkan seberapa banyak ozon yang tidak bereaksi dengan fenol, sementara gas keluaran ozon menunjukkan seberapa banyak ozon yang tidak terlarut di dalam sistem. Dapat dikatakan semakin sedikit kandungan ozon residual dan kandungan gas keluaran ozon maka proses berbasis ozonasi menjadi semakin efisien. Dapat dilihat pada Gambar 4.5 bahwa gas keluaran ozon paling sedikit nilainya pada proses gabungan ozonasi/hidrodinamik/sonikasi dan paling besar pada proses ozonasi. Hal ini menunjukkan bahwa proses gabungan ozonasi/hidrodinamik/sonikasi memiliki efisiensi paling tinggi dibanding proses lainnya karena dengan laju alir dan produktivitas ozon yang sama, konsentrasi gas keluaran ozon yang paling kecil diperoleh pada proses gabungan ini. Hal ini terjadi karena kavitas selain meningkatkan dekomposisi ozon menjadi radikal OH dan bereaksi dengan fenol juga dapat meningkatkan kelarutan ozon di dalam air. Walau demikian, konsentrasi keluaran gas ozon tidak bisa langsung dihubungkan dengan konsentrasi ozon di dalam larutan (seperti jika konsentrasi ozon terlarut kecil maka konsentrasi gas keluaran ozon harus besar) di dalam sistem karena

ozon yang terlarut di dalam sistem juga mengalami dekomposisi menjadi radikal OH dan bereaksi dengan fenol.



Gambar 4.5. Konsentrasi Gas Keluaran Ozon pada Masing-Masing Konfigurasi

4.4. Konsentrasi Hidrogen Peroksida

Konsentrasi hidrogen peroksida merupakan faktor penting yang mempengaruhi keberhasilan dari proses degradasi polutan. Hidrogen peroksida merupakan hasil dari reaksi penggabungan radikal OH (Sivasankar, 2009):



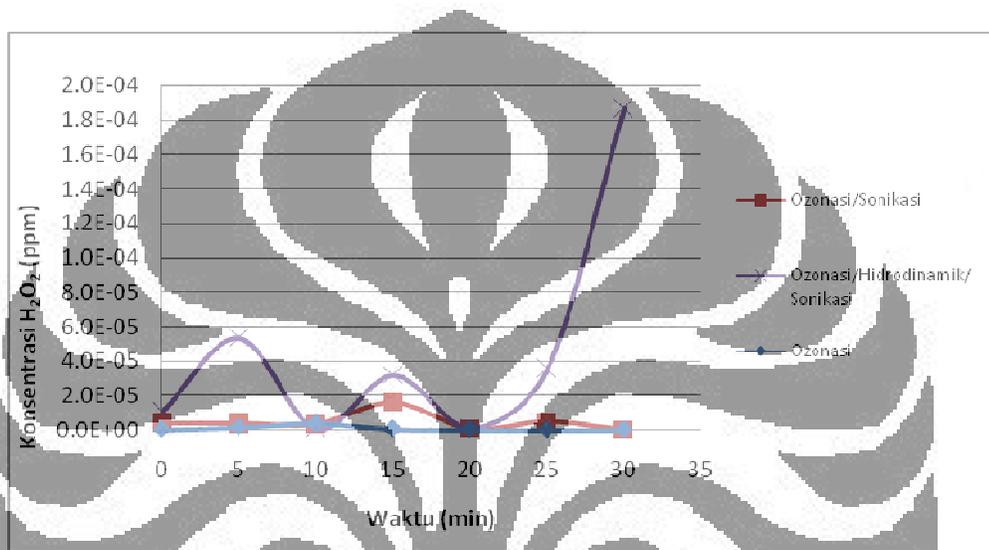
Dari hasil penelitian sebelumnya ditemukan bahwa persentase degradasi polutan umumnya meningkat dengan meningkatnya konsentrasi hidrogen peroksida (Kidak, 2007). Namun demikian, berdasarkan kinetika dekomposisi ozon, hidrogen peroksida juga berfungsi sebagai *scavenger* yang akan bereaksi dengan radikal OH dan menghasilkan radikal lain (Beltran, 2004).



Dapat dikatakan bahwa pada dasarnya kestabilan hidrogen peroksida masih sulit diperkirakan, dan hal ini dapat dilihat dari Gambar 4.6 yang menunjukkan konsentrasi hidrogen peroksida yang cenderung naik turun.

Selain pada proses yang menggunakan kavitas ultrasonik, konsentrasi hidrogen peroksida juga terdeteksi pada proses ozonasi walaupun konsentrasinya masih jauh lebih kecil dibanding proses yang menggunakan kavitas ultrasonik.

Dari Gambar 4.6 juga dapat dilihat bahwa walaupun cenderung tidak stabil namun konsentrasi hidrogen peroksida paling tinggi terdapat pada proses gabungan ozonasi/hidrodinamik/sonikasi. Hal ini menunjukkan bahwa radikal OH paling banyak terbentuk pada proses penggabungan ini. Secara keseluruhan nilai hidrogen peroksida ini hanya menunjukkan bahwa memang terbentuk radikal OH pada proses berbasis ozonasi dan dengan penambahan proses kavitasi.



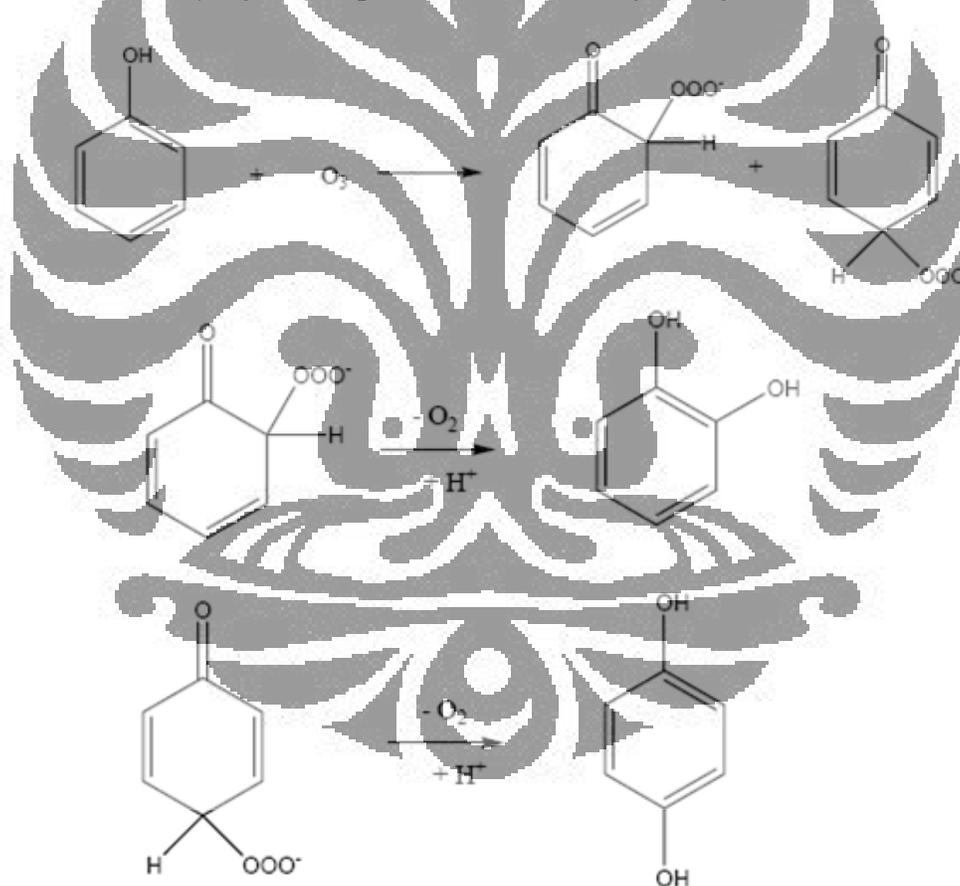
Gambar 4.6. Konsentrasi Hidrogen Peroksida pada Masing-Masing Konfigurasi

4.5. pH Larutan

Gambar 4.10 menunjukkan profil pH pada masing-masing konfigurasi. Kecenderungan pH pada masing-masing proses adalah menurun terhadap waktu. Pada dasarnya, proses dekomposisi fenol dengan ozon akan menghasilkan produk antara yang bersifat asam, seperti asam karboksilat, asam oksalat, asam glikolat dan lain-lain. Produk antara inilah yang membuat nilai pH pada masing-masing konfigurasi menjadi turun (Gambar 4.10). Walau pada Gambar 4.10 kecenderungan pH pada masing-masing konfigurasi adalah menurun, pada proses ozonasi penurunan pH yang terjadi cukup signifikan. Fenomena ini dapat dijelaskan dari skema degradasi fenol. Berikut adalah skema degradasi fenol oleh ozon dan gabungan ozon dan radikal OH (dengan perincian pada Bab 2)

- Skema degradasi fenol oleh ozon

Mekanisme reaksi fenol dengan ozon dapat dilihat pada Gambar 4.7. Degradasi fenol dengan ozon menghasilkan produk antara berupa dihidroksi benzen, *catechol* dan hidroquinon. *Catechol* dan hidroquinon akan mengalami reaksi pemutusan-cincin untuk menghasilkan *muconic*, *maleat* dan asam karboksilat olefinat linear lain. Ozonasi yang dilanjutkan pada produk-produk antara ini dapat menyebabkan dekarboksilasi dan pembentukan glioksal, dan asam glioksilat yang akan mengoksidasi asam oksalat. Karena laju konstanta bimolekularnya yang minimal dengan ozon yaitu $0,04 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ (Lesko, 2004), asam oksalat merupakan hasil akhir yang stabil yang tidak dapat dioksidasi lebih lanjut dengan ozon.

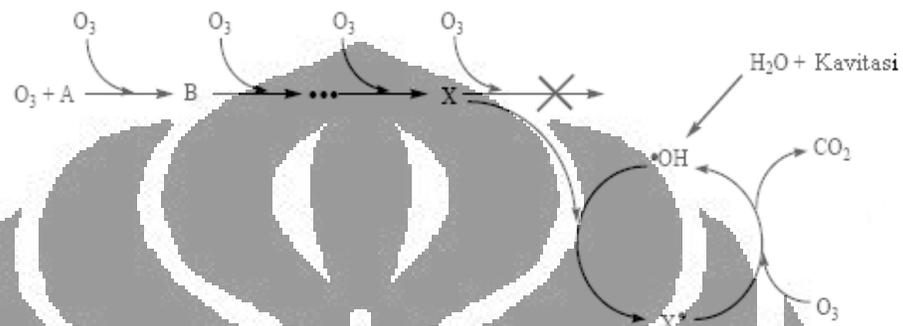


Gambar 4.7. Mekanisme Reaksi Fenol dengan Ozon

(Sumber: Lesko, 2004)

- Skema degradasi fenol oleh ozon dan radikal OH

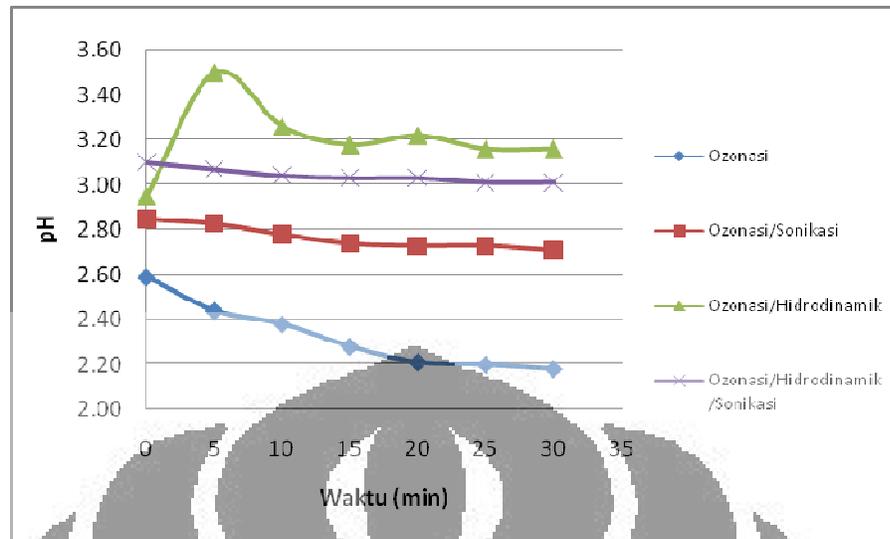
Dari Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa oksidasi fenol dengan gabungan ozon dan radikal OH tidak menghasilkan senyawa-senyawa antara, namun menghasilkan CO_2 .



Gambar 4.8. Mekanisme Reaksi Fenol dengan Ozon dan Radikal OH

(Sumber: Lesko, 2004)

Dari skema reaksi fenol dengan ozon di atas dan dari Tabel 2.3 dan Tabel 2.4, dapat dilihat bahwa produk antara berupa asam oksalat dan asam gliksalat tidak bereaksi lagi dengan ozon dan menjadi senyawa yang stabil sehingga menyebabkan penurunan pH yang lebih tajam. Pada proses lain juga dapat dilihat adanya kecenderungan penurunan pH yang cukup tajam pada menit-menit awal, namun pada menit-menit akhir penurunan ini semakin tidak signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa produk antara pada proses penyisihan fenol tersebut semakin menurun seiring dengan lamanya proses.



Gambar 4.9 pH pada Masing-Masing Konfigurasi

4.6 Konsentrasi Oksigen Terlarut

Dapat dilihat pada Grafik 4.10, nilai oksigen yang terlarut pada masing-masing konfigurasi proses cenderung menurun. Berikut adalah beberapa analisis mengapa konsentrasi oksigen terlarut di sistem menurun:

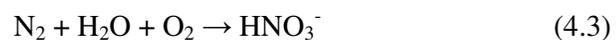
- Terjadi dekomposisi termal oksigen

Perlu dilihat juga pada Gambar 4.11 terjadi kenaikan suhu yang cukup signifikan selama proses. Kenaikan suhu inilah yang menyebabkan oksigen terdekomposisi secara termal. Oksigen terlarut pada proses ozonasi mengalami penurunan yang tidak terlalu besar jika dibandingkan dengan proses ozonasi dengan kavitas (baik hidrodinamik dan/atau ultrasonik). Hal ini disebabkan karena adanya kenaikan suhu pada proses kavitas yang lebih besar (akibat pecahnya gelembung mikro) sehingga lebih banyak molekul oksigen mengalami dekomposisi termal.

- Bereaksi dengan N_2 bebas pada udara

Reservoir yang digunakan pada sistem adalah reservoir terbuka, sehingga memungkinkan terjadinya kontak cairan dengan udara (Lesko, 2004).

Reaksi antara oksigen dengan N_2 bebas adalah sebagai berikut:



- Reaksi dengan radikal OH

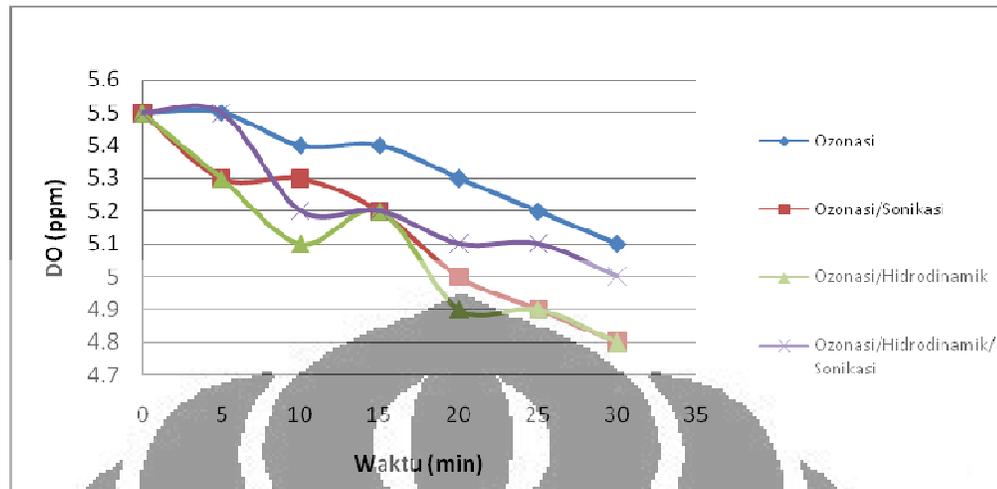
Seperti yang telah diketahui sebelumnya, radikal OH adalah pengoksidasi yang sangat kuat yang akan bereaksi dengan senyawa apapun secara nonselektif. Dalam hal ini, radikal OH juga akan bereaksi dengan oksigen terlarut (Sivasankar, 2009).



Secara teori, dengan jumlah radikal OH yang dihasilkan lebih banyak pada proses penggabungan ozonasi/hidrodinamik/sonikasi, seharusnya konsentrasi oksigen terlarut pada proses ini memiliki nilai terkeci dibanding proses yang lain. Namun dari Gambar 4.10 terlihat konsentrasi oksigen terlarut pada proses penggabungan ozonasi/hidrodinamik/sonikasi lebih besar dibanding pada ozonasi/sonikasi dan ozonasi/hidrodinamik. Penjelasan akan hal ini berhubungan dengan persentase dilihat bahwa persentase penyisihan fenol paling besar (56,27%) didapat pada proses penyisihan fenol. Dari Gambar 4.2 dapat penggabungan ozonasi/hidrodinamik/sonikasi, baru setelah itu proses ozonasi/sonikasi (34,46%) dan proses ozonasi/hidrodinamik (26,67%). Hal ini menunjukkan bahwa walau radikal OH yang terbentuk secara teori paling banyak terdapat pada proses ozonasi/hidrodinamik/sonikasi, namun selain bereaksi dengan oksigen terlarut, radikal OH juga bereaksi dengan senyawa lain seperti fenol dan senyawa samping dari reaksi fenol dengan ozon.

- Adanya efek *degassing*

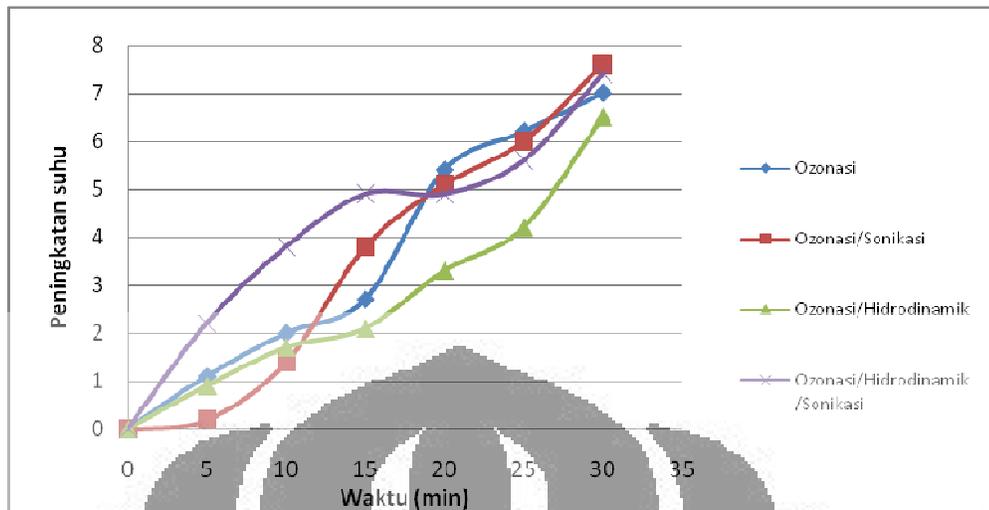
Degassing merupakan fenomena berkurangnya kandungan senyawa terlarut (dalam kasus ini adalah oksigen) pada proses kavitasi karena senyawa tersebut menjadi inti dari gelembung mikro. Untuk membentuk gelembung mikro diperlukan inti yang berasal dari larutan. Pada umumnya gelembung mikro yang terbentuk memiliki inti dari ozon maupun molekul air. Namun tidak menutup kemungkinan bahwa oksigen terlarut juga dapat menjadi gelembung mikro. Hal ini didukung dari Gambar 4.10 dimana pada proses ozonasi dengan kavitasi nilai oksigen terlarutnya lebih rendah dibanding proses ozonasi saja (tidak ada gelembung mikro dari kavitasi).



Gambar 4.10. Konsentrasi Oksigen Terlarut pada Masing-Masing Konfigurasi

4.7. Peningkatan Suhu

Pada Gambar 4.11 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). Penambahan es pada aliran pendingin sudah dilakukan, namun kenaikan suhu ini tetap terjadi. Dan nilai kenaikan suhu yang berbeda pada masing-masing konfigurasi ini tidak dapat dianalisis karena penambahan es pada masing-masing percobaan tidak sama.



Gambar 4.11. Peningkatan Suhu pada Masing-Masing Konfigurasi

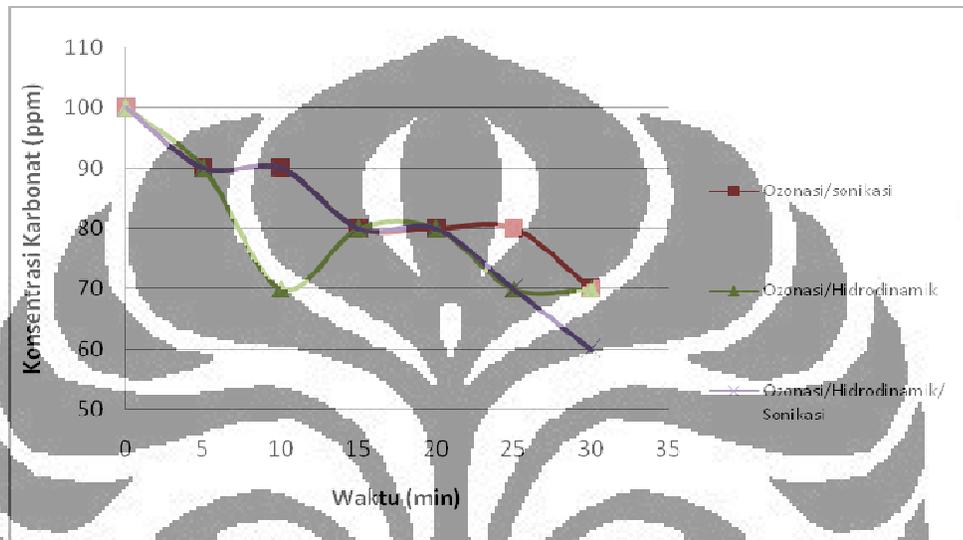
4.8. Konsentrasi Ion Karbonat

Penelitian dengan menggunakan ion karbonat dilakukan untuk memperjelas peranan radikal OH pada proses ozonasi dan kavitasi. Ion karbonat berasal dari senyawa CaCO_3 dengan konsentrasi $16 \mu\text{M}$. Konsentrasi yang relatif kecil ini dipilih agar ion karbonat hanya bereaksi dengan radikal OH saja, dan tidak terhadap ion atau radikal lain. Ion karbonat dipilih sebagai pemangsa radikal OH karena memiliki konstanta laju reaksi dengan radikal OH yang besar, yaitu $4,2 \times 10^8 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ (Beltran, 2004) sementara konstanta laju reaksi ozon dengan senyawa lain pada umumnya adalah $1 - 10^3 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ (Gottschalk, 2000). Dengan bereaksinya ion karbonat dengan radikal OH (Persamaan 4.5), diharapkan fenol yang tersisih adalah karena bereaksi secara langsung dengan ozon.



Ion karbonat akan bereaksi dengan radikal OH sehingga penurunan konsentrasi ion karbonat menunjukkan konsentrasi radikal OH pada sistem. Dari Gambar 4.12 dapat dilihat profil konsentrasi karbonat pada konfigurasi proses ozonasi dengan tambahan kavitasi. Terjadi penurunan nilai konsentrasi ion karbonat pada masing-masing konfigurasi. Hal ini menunjukkan adanya radikal OH yang bereaksi dengan ion karbonat. Konsentrasi ion karbonat yang terdeteksi memang tidak terlalu berbeda antara masing-masing konfigurasi. Hal ini disebabkan keterbatasan pada saat menganalisa ion karbonat yaitu pada saat titrasi

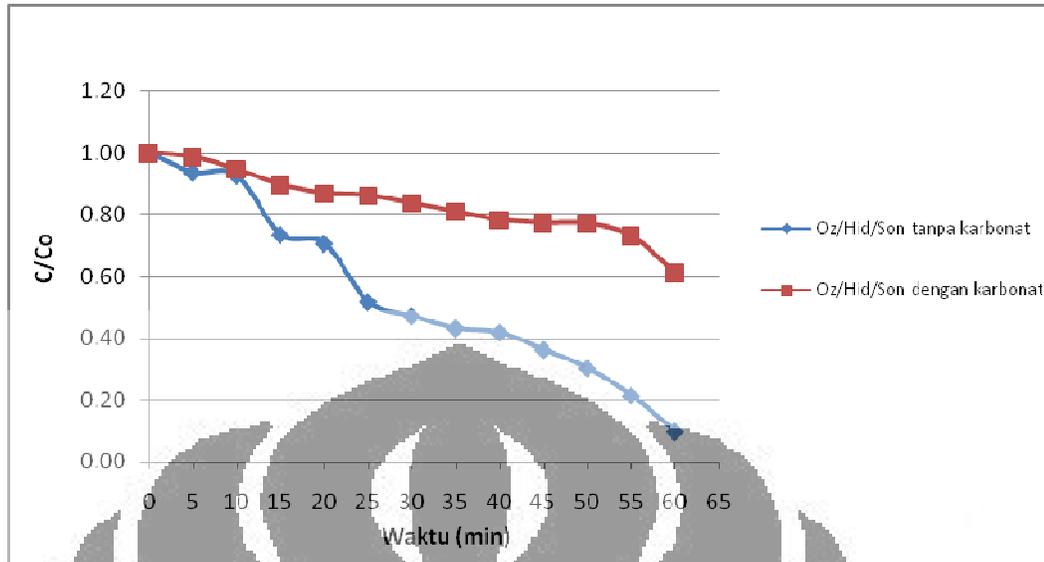
(kurang konsisten dalam menentukan warna serta kurang sensitif terhadap perubahan konsentrasi). Namun, dari hasil yang diperoleh masih dapat dilihat bahwa proses gabungan ozonasi/hidrodinamik/sonikasi memiliki nilai ion karbonat akhir yang paling kecil. Fenomena ini menunjukkan bahwa pada proses gabungan itu nilai radikal OH lebih banyak dibanding proses lainnya.



Gambar 4.12. Konsentrasi Ion Karbonat pada Masing-Masing Konfigurasi

4.9. Penyisihan Fenol dengan Proses Ozonasi/Hidrodinamik/Sonikasi selama 1 Jam

Untuk mengetahui seberapa lama waktu yang dibutuhkan untuk menghasilkan penyisihan fenol yang cukup besar ($\geq 90\%$), maka dilakukan percobaan penyisihan fenol dengan penggabungan ozonasi/hidrodinamik/sonikasi selama satu jam. Dapat dilihat dari Gambar 4.13 bahwa fenol pada menit ke-60 fenol sudah dapat tersisihkan sebesar 90,28% menggunakan karbonat dan sebesar 39,12% jika tanpa menggunakan karbonat.



Gambar 4.13. C/C_o pada Oz/Kav/Son Dengan dan Tanpa Karbonat

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan, kesimpulan yang bisa diambil adalah:

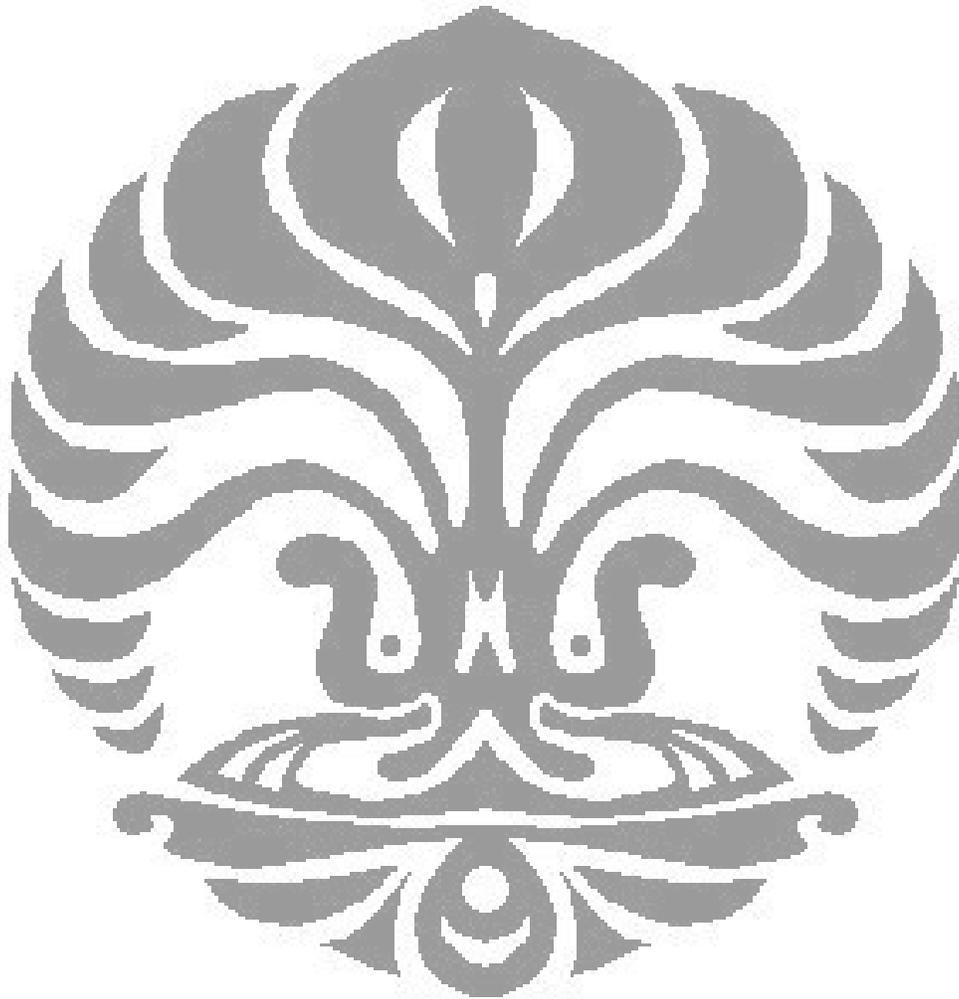
1. Penambahan kavitasi (hidrodinamik dan/atau ultrasonik) dapat mempengaruhi persentase penyisihan fenol.
2. Dengan persentase penyisihan fenol sebesar 56,27%, proses ozonasi/kavitasi/sonikasi merupakan proses yang paling baik untuk penyisihan fenol dibanding dengan proses ozonasi/sonikasi (46,46%), ozonasi/kavitasi (26,28%) dan ozonasi (18,63%).
3. Kavitasi memberi dua efek terhadap proses oksidasi lanjut berbasis ozon, yaitu: efek kimia dalam bentuk peningkatan radikal OH (dilihat dari konsentrasi H_2O_2) 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 50%-60% dibandingkan tanpa karbonat. Hasil ini menunjukkan bahwa pada percobaan tanpa karbonat, hampir 50%-60% selisih persentase penyisihan fenol adalah akibat reaksi dengan radikal OH dan sementara 40%-50% sisanya adalah akibat reaksi fenol dengan ozon.

5.2. Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan analisa lebih lanjut mengenai kandungan TOC (*Total Organic Carbon*) sebagai salah satu parameter penting dalam menentukan apakah Proses Oksidasi Lanjut berbasis ozon juga mampu mendegradasi senyawa-senyawa antara yang dihasilkan dari proses degradasi fenol (mineralisasi).
2. Sebaiknya menggunakan senyawa lain selain ion karbonat untuk bereaksi dengan radikal OH karena sulitnya mendapat angka yang akurat dalam analisis kandungan ion karbonat.

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.



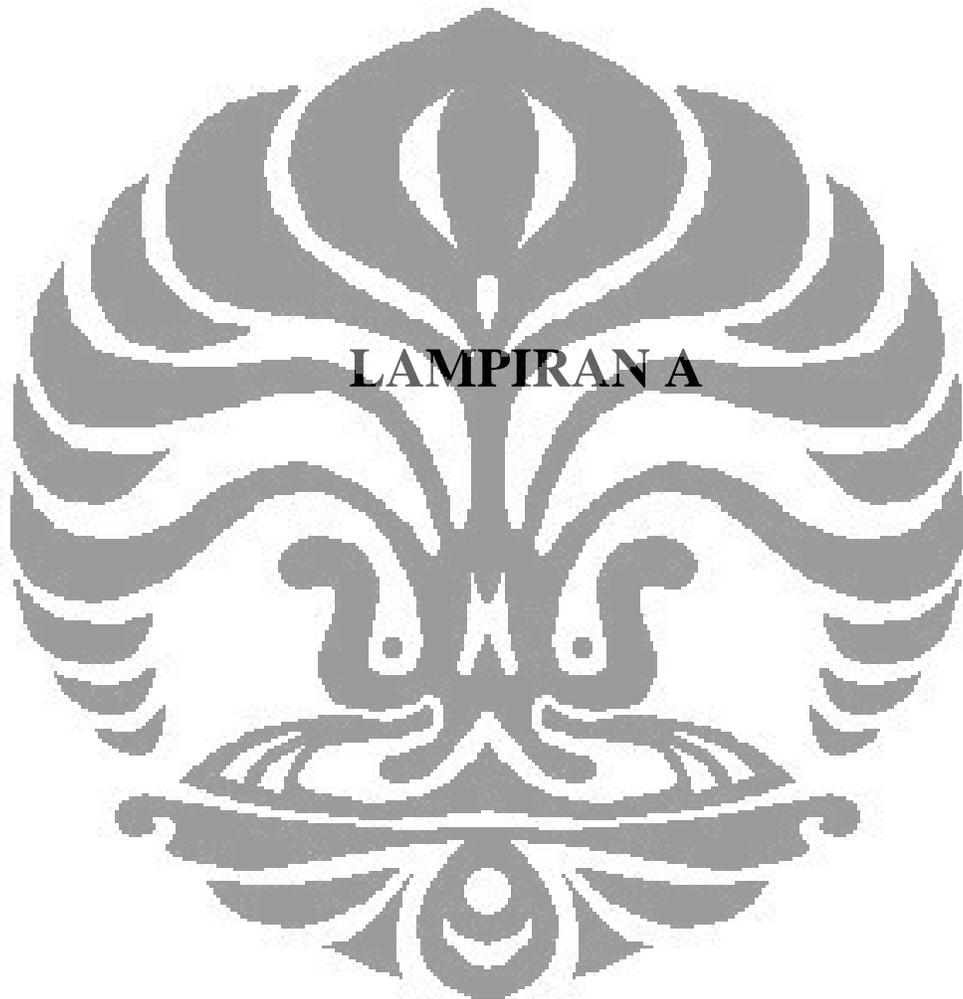
DAFTAR PUSTAKA

- Adewuyi, Yusuf G. Sonochemistry: environmental science and engineering application. *Industrial Engineering Chemistry*. 2001;4681-4715.
- Ananto, Wimbaji. Sonochemistry: Introduction and its application in chemical engineering. Available at: URL: http://www.scribd.com/document_downloads/13592461?extension=ppt&secret_password=. Accessed 1 May 2009.
- Anonim. Ozone Properties. Available at: URL: http://www.ozoneapplications.com/info/ozone_properties.htm. Accessed 29 Juni 2009.
- Anonim. Sonochemistry. Available at: URL: www.sonochemistry.info/Research.htm. Accessed 1 May 2009.
- Anonim. Safety data for catechol. Available at: URL: <http://msds.chem.ox.ac.uk/CA/catechol.html>. Accessed 4 July 2009.
- Anonim. Safety data for catechol. Available at: URL: <http://msds.chem.ox.ac.uk/CA/catechol.html>. Accessed 4 July 2009.
- Anonim. Safety data for hidroquinone. Available at: URL: <http://msds.chem.ox.ac.uk/HY/hydroquinone.html>. Accessed 4 July 2009.
- Anonim. Safety data for benzoquinone. Available at: URL: <http://msds.chem.ox.ac.uk/BE/1,4-benzoquinone.html>. Accessed 4 July 2009.
- Anonim. Safety data for maleic acid. Available at: URL: http://msds.chem.ox.ac.uk/MA/maleic_acid.html. Accessed 4 July 2009.
- Anonim. Safety data for formic acid. Available at: URL: http://msds.chem.ox.ac.uk/FO/formic_acid.html. Accessed 4 July 2009.
- Anonim. Safety data for oxalic acid. Available at: URL: http://msds.chem.ox.ac.uk/OX/oxalic_acid.html. Accessed 4 July 2009.
- 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.
- Destailats, Hugo., et al. Sonochemical degradation of Pollutants. M. A. Tarr, Marcel Dekker Inc., New York, NY, 2003.
- Dionissios Mantzavinos. Advanced oxidation processes for treatment of industrial effluents: Fundamental & Case Studies. Available at: URL: www.remtayares.es/ResumenesWorkshop.pdf. Accesed 1 May 2009.
- Eagleton, Jim. Ozone in Drinking Water Treatment. Available at: URL: www.hiproozone.com/documents/What%20is%20ozone.pdf. Accesed: 1 March 2009
- 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/H₂O₂ 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.
- Kommineni, Sunil, et al. Advanced Oxidation Processes. Available at: URL: www.nwri-usa.org/pdfs/TTChapter3AOPs.pdf. Accesed 15 March 2009*
- 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
- Nasseri, 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.

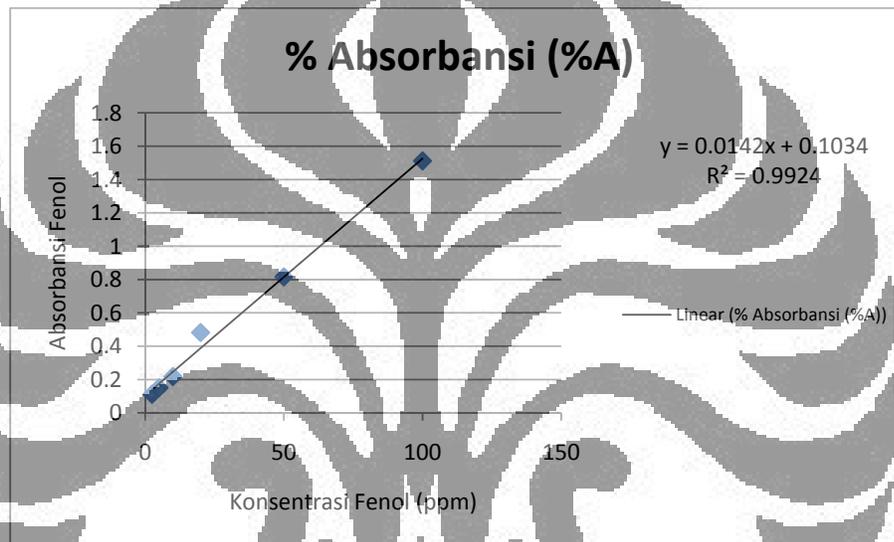
- Pandit, A. B. and Moholkar V. S., *Harness Cavitation to Improve Processing*. Chemical Engineering Progress; 1996.
- Pera-Titus, Marc, Garcia-Molina, Verónica, Baños, Miguel A., Giménez, Jaime, Esplugas, Santiago, Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: a general review, *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.
- Villaseñor, J., Reyes, P. and Pecchi, G. Catalytic and photocatalytic ozonation of phenol on MnO₂ supported catalysts. *Catalysis Today*. 2002; 121-131.
- Won Tae Shin, et.al. Ozonation using microbubbles formed by electric fields. *Separation Purification Technology*. 1999;271-282.
- Young, F.R. *Sonoluminescence*. CRC Press: London; 2005.



Tabel A.1. Kalibrasi Fenol dengan Spektrofotometer

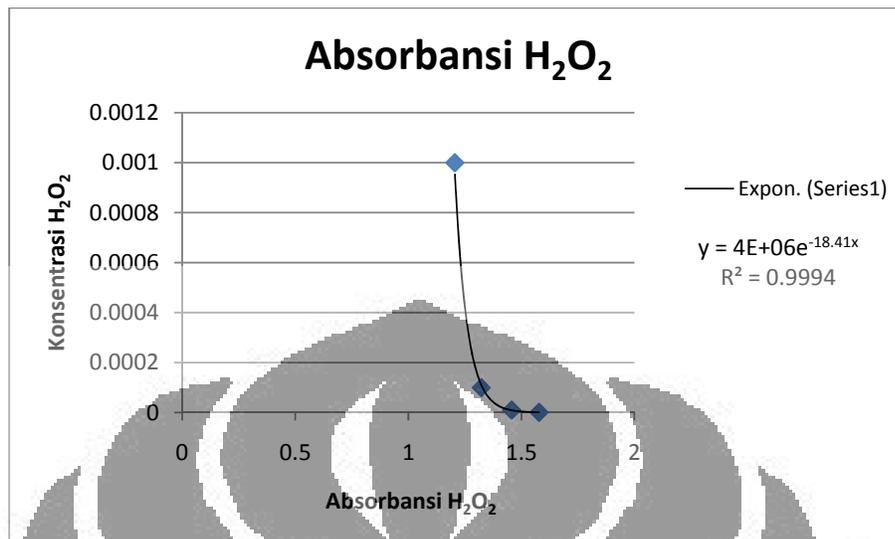
Konsentrasi Fenol (Cp (ppm))	Absorbansi Fenol
2.5	0.111
5	0.15
10	0.218
20	0.482
50	0.816
100	1.512

Gambar A.1. Kalibrasi Fenol dengan Spektrofotometri

Tabel A.2. Kalibrasi H₂O₂ dengan Spektrofotometer

Konsentrasi H ₂ O ₂ (M)	Absorbansi H ₂ O ₂
0.000001	1.578
0.00001	1.457
0.0001	1.323
0.001	1.206

Gambar 4.2. Kalibrasi H₂O₂ dengan Spektrofotometer





LAMPIRAN B

B.1. Tabel Variasi Skema Tanpa Karbonat

B.1.1. Ozonasi

 $Q_L = 3 \text{ L/men}$
 $C_p = 100 \text{ ppm}$
 $Q_G = 400 \text{ L/jam}$

t(min)	KI ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) (mL)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	C/Co	H_2O_2 (%A)	H_2O_2 (M)	Gas Off (ppm)	ΔT
0	-		5.5	2.59	28.8	1.499	98.282	1.00	1.613	5.07624E-07		0
5	9.5	4.89	5.5	2.44	29.9	1.404	91.592	0.93	1.548	1.67973E-06	22.80	1.1
10	7.2	4.67	5.4	2.38	30.8	1.389	90.535	0.92	1.502	3.91766E-06	17.28	2.0
15	7.3	5.99	5.4	2.28	31.5	1.356	88.211	0.90	1.589	7.89643E-07	17.52	2.7
20	7.5	5.75	5.3	2.21	34.2	1.318	85.535	0.87	1.632	3.57792E-07	18.00	5.4
25	8.4	5.83	5.2	2.20	35.0	1.299	84.197	0.86	1.664	1.98508E-07	20.16	6.2
30	6	5.6	5.1	2.18	35.8	1.239	79.972	0.81	1.651	2.52184E-07	14.40	7.0

B.1.2. Ozonasi/Hidrodinamik

 $Q_L = 3 \text{ L/men}$
 $C_p = 100 \text{ ppm}$
 $Q_G = 400 \text{ L/jam}$

t(min)	KI ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) (mL)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	C/Co	Gas Off (ppm)	ΔT
0	-		5.6	2.95	29.6	1.58	103.986	1.00		0
5	50.0	1.50	5.4	3.50	30.5	1.514	99.338	0.96	15.00	0.9
10	36.5	1.67	5.2	3.26	31.3	1.506	98.775	0.95	10.95	1.7
15	54.0	1.92	5.3	3.18	31.7	1.432	93.563	0.90	16.20	2.1
20	56.5	2.31	5	3.22	32.9	1.386	90.324	0.87	16.95	3.3
25	56.5	2.10	5	3.16	33.8	1.29	83.563	0.80	16.95	4.2
30	47.0	2.27	4.9	3.16	36.1	1.192	76.662	0.74	14.10	6.5

B.1.3. Ozonasi/Ultrasonik

$Q_L = 3$ L/men $C_p = 100$ ppm $Q_G = 400$ L/jam Intensitas 60%

t(min)	KI ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) (mL)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	C/Co	H_2O_2 (%A)	H_2O_2 (M)	Gas Off (ppm)	ΔT
0			5.5	2.85	29.8	1.473	96.451	1.00	1.499	4.14012E-06		0
5	8.6	2.64	5.3	2.83	30.0	1.404	91.592	0.95	1.501	3.99046E-06	20.64	0.2
10	7.8	4.33	5.3	2.78	31.2	1.378	89.761	0.93	1.505	3.70716E-06	18.72	1.4
15	7.5	5.56	5.2	2.74	33.6	1.291	83.634	0.87	1.425	1.61685E-05	18.00	3.8
20	7.0	5.34	5.0	2.73	34.9	1.209	77.859	0.81	1.586	8.34482E-07	16.80	5.1
25	7.2	5.22	4.9	2.73	35.8	1.126	72.014	0.75	1.487	5.16366E-06	17.28	6.0
30	7.4	5.38	4.8	2.71	37.4	1.001	63.211	0.66	1.691	1.20755E-07	17.76	7.6

B.1.4. Ozonasi/Hidrodinamik/Ultrasonik

$Q_L = 3$ L/men $C_p = 100$ ppm $Q_G = 400$ L/jam Intensitas 60%

t(min)	KI ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) (mL)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	T ($^{\circ}\text{C}$)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	C/Co	H_2O_2 (%A)	H_2O_2 (M)	Gas Off (ppm)	ΔT
0			5.6	3.10	29.2	1.463	95.746	1.00	1.448	1.05871E-05		0
5	27.2	1.83	5.6	3.07	31.4	1.135	72.648	0.76	1.360	5.35018E-05	8.16	2.2
10	31.5	1.95	5.3	3.04	33.0	1.069	68.000	0.71	1.589	7.89643E-07	9.45	3.8
15	33.0	1.97	5.3	3.03	34.1	1.034	65.535	0.68	1.388	3.1952E-05	9.90	4.9
20	29.0	2.84	5.2	3.03	34.1	0.916	57.225	0.60	1.561	1.32221E-06	8.70	4.9
25	32.0	1.62	5.2	3.01	34.8	0.753	45.746	0.48	1.382	3.56838E-05	9.60	5.6
30	43.2	1.26	5.1	3.01	36.6	0.698	41.873	0.44	1.292	0.000187091	12.96	7.4

B.2. Tabel Variasi Skema Dengan Karbonat

B.2.1. Ozonasi /Hidrodinamik

$Q_L = 3$ L/men $C_p = 100$ ppm $Q_G = 400$ L/jam

t(min)	KI ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) (mL)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	T ($^\circ\text{C}$)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	C/Co	Gas Off (ppm)	ΔT	Karbonat		Karbonat (ppm)
											PP	MO	
0			5.6	2.91	28.9	1.461	95.606	0.99		0	115	165	100
5	6.3	1.39	5.5	2.88	29.1	1.413	92.225	0.95	15.12	0.2	105	150	90
10	5.3	1.52	5.4	2.90	29.5	1.423	92.930	0.96	12.72	0.6	35	70	70
15	6.1	2.00	5.2	2.81	31.3	1.378	89.761	0.93	14.64	2.4	40	85	80
20	6.6	2.12	5.1	2.73	31.9	1.362	88.634	0.91	15.84	3.0	45	85	80
25	7.0	2.21	5	2.70	33.2	1.315	85.324	0.88	16.80	4.3	35	95	70
30	5.5	1.67	4.9	2.66	34.6	1.291	83.634	0.86	13.20	5.7	40	75	70

B.2.2. Ozonasi /Ultrasonik

$Q_L = 3$ L/men $C_p = 100$ ppm $Q_G = 400$ L/jam Intensitas 60%

t(min)	KI ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) (mL)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	T ($^\circ\text{C}$)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	C/Co	Gas Off (ppm)	ΔT	Karbonat		Karbonat (ppm)
											PP	MO	
0			5.5	2.71	29.6	1.481	97.014	1.00		0	105	155	100
5	8.8	2.31	5.4	2.66	30.0	1.464	95.817	0.99	21.12	0.4	95	140	90
10	8.2	3.65	5.3	2.63	32.4	1.431	93.493	0.96	19.68	2.8	50	95	90
15	8	4.77	5.2	2.52	33.7	1.398	91.169	0.94	19.20	4.1	45	85	80
20	7.2	5.01	5.1	2.5	34.2	1.376	89.620	0.92	17.28	4.6	45	85	80
25	7.3	4.86	5.1	2.49	35.8	1.352	87.930	0.91	17.52	6.2	40	80	80
30	7.1	4.24	4.9	2.45	38.1	1.259	81.380	0.84	17.04	8.5	45	80	70

B.2.2. Ozonasi/Hidrodinamik/Ultrasonik

$Q_L = 3 \text{ L/men}$

$C_p = 100 \text{ ppm}$

$Q_G = 400 \text{ L/jam}$

Intensitas 60%

t(min)	KI ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) (mL)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	T ($^\circ\text{C}$)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	C/Co	Gas Off (ppm)	ΔT	Karbonat		Karbonat (ppm)
											PP	MO	
0			5.5	2.67	29.7	1.508	98.915	1.02		0	100	150	100
5	4.4	2.01	5.5	2.65	29.8	1.483	97.155	1.00	10.56	0.1	110	155	90
10	4.6	2.22	5.4	2.63	31.2	1.404	91.592	0.94	11.04	1.5	55	100	90
15	4.7	2.23	5.3	2.61	32.8	1.355	88.141	0.91	11.28	3.1	45	85	80
20	4.2	3.45	5.2	2.61	34.6	1.298	84.127	0.87	10.08	4.9	40	90	80
25	4.3	2.09	5.1	2.57	35.0	1.223	78.845	0.81	10.32	5.3	35	70	70
30	5.0	1.96	5	2.54	36.9	1.198	77.085	0.79	12.00	7.2	30	85	60

B.3. Tabel Variasi Skema Dengan Karbonat

B.3.1. Ozonasi/Hidrodinamik/Ultrasonik

$Q_L = 3 \text{ L/men}$

$C_p = 100 \text{ ppm}$

$Q_G = 400 \text{ L/jam}$

Intensitas 60%

t(min)	KI ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) (mL)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	T ($^\circ\text{C}$)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	C/Co	H_2O_2 (%A)	H_2O_2 (M)	Gas Off (ppm)	ΔT
0			5.6	3.15	30.5	1.488	97.507	1.256	1.00	0.00036298		0
5	1.5	0.65	5.6	3.11	31.0	1.401	91.380	1.343	0.94	7.3163E-05	3.60	0.5
10	1.0	1.00	5.4	3.08	31.6	1.387	90.394	1.512	0.93	3.2589E-06	2.40	1.1
15	3.0	1.03	5.3	3.07	32.3	1.121	71.662	1.411	0.73	2.0922E-05	7.20	1.8
20	3.5	1.17	5.3	3.05	33.8	1.082	68.915	1.379	0.71	3.771E-05	8.40	3.3
25	3.5	1.02	5.1	3.05	34.2	0.82	50.465	1.269	0.52	0.00028572	8.40	3.7
30	3.7	0.75	5.1	3.04	34.8	0.756	45.958	1.305	0.47	0.00014727	8.88	4.3
35	2.6	1.62	5.1	3.03	35.5	0.701	42.085	1.309	0.43	0.00013681	6.24	5.0
40	2.8	1.78	5	3.03	35.9	0.682	40.746	1.433	0.42	1.3954E-05	6.72	5.4
45	3.8	2.45	5	3.01	36.2	0.605	35.324	1.374	0.36	4.1346E-05	9.12	5.7
50	3.9	2.99	4.9	3	36.7	0.523	29.549	1.312	0.30	0.00012946	9.36	6.2
55	2.5	1.72	4.8	2.98	38.9	0.399	20.817	1.389	0.21	3.1369E-05	6.00	8.4
60	2.7	1.98	4.8	2.97	40.3	0.238	9.479	1.406	0.10	2.2939E-05	6.48	9.8

B.2.2. Ozonasi/Hidrodinamik/Ultrasonik

$Q_L = 3 \text{ L/men}$

$C_p = 100 \text{ ppm}$

$Q_G = 400 \text{ L/jam}$

Intensitas 60%

t(min)	KI ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) (mL)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	T ($^\circ\text{C}$)	Fenol (%A)	Fenol (ppm)	C/Co	Gas Off (ppm)	ΔT	Karbonat		Karbonat (ppm)
											PP	MO	
0			5.6	2.98	28.9	1.512	99.197	1.00		0	125	175	100
5	6.1	0.98	5.5	2.96	29.8	1.493	97.859	0.99	14.64	0.9	115	160	90
10	4.9	1.23	5.4	2.95	30.5	1.436	93.845	0.95	11.76	1.6	90	135	90
15	5.0	0.77	5.4	2.93	31.0	1.367	88.986	0.90	12.00	2.1	45	85	80
20	5.2	1.35	5.3	2.90	34.6	1.328	86.239	0.87	12.48	5.7	50	90	80
25	4.9	1.65	5.2	2.88	35.0	1.317	85.465	0.86	11.76	6.1	60	100	80
30	4.6	1.70	5.1	2.85	36.1	1.282	83.000	0.84	11.04	7.2	50	85	70
	3	2.49	4.9	2.85	36.8	1.244	80.324	0.81	7.20	7.9	35	70	70
	2.6	2.9	4.8	2.83	38.1	1.206	77.648	0.78	6.24	9.2	35	65	60
	4.1	1.32	4.8	2.81	38.5	1.193	76.732	0.77	9.84	9.6	30	60	60
	4.1	1.66	4.7	2.8	38.8	1.189	76.451	0.77	9.84	9.9	25	50	50
	3.8	1.88	4.7	2.79	39.4	1.132	72.437	0.73	9.12	10.5	45	65	40
	3.5	2.09	4.5	2.77	40.2	0.961	60.394	0.61	8.40	11.3	35	50	30



LAMPIRAN C



Gambar C.1. Skema Penelitian Ozonasi/Hidrodinamik/Sonikasi



Gambar C.2. Skema Penelitian Ozonasi



Gambar C.3. US Processor dan Reaktor Kaca



Gambar F.3. Reservoir dan Trafo Pembangkit Ozon