



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**APLIKASI STATISTIK UNTUK ANALISIS PROSES  
OKSIDASI LANJUT BERBASIS OZON DALAM PENYISIHAN  
LIMBAH FENOL UNTUK MENENTUKAN VARIASI  
KOMBINASI PARAMETER OPTIMUM PROSES**

**SKRIPSI**

**ANNALISIA RUDATIN  
0706269634**

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



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**APLIKASI STATISTIK UNTUK ANALISIS PROSES  
OKSIDASI LANJUT BERBASIS OZON DALAM PENYISIHAN  
LIMBAH FENOL UNTUK MENENTUKAN VARIASI  
KOMBINASI PARAMETER OPTIMUM PROSES**

**SKRIPSI**

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

**ANNALISIA RUDATIN  
0706269634**

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

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Annalisia Rudatin**

**NPM : 0706269634**

**Tanda Tangan :**

**Tanggal : 7 Januari 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Annalisia Rudatin

NPM : 0706269634

Program Studi : Teknik Kimia

Judul Skripsi : Aplikasi Statistik untuk Analisis Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Ozon dalam Penyisihan Limbah Fenol untuk Menentukan Variasi Kombinasi Parameter Optimum Proses

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

### DEWAN PENGUJI

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

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

Penguji II : Ir. Yuliusman, M.Eng. ( )

Penguji III : Ir. Rita Arbianti, M.Si ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Januari 2011

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya. Berkat rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Aplikasi Statistik untuk Analisis Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Ozon dalam Penyisihan Limbah Fenol untuk Menentukan Variasi Kombinasi Parameter Optimum Proses”** untuk memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

- (1) Ir. Eva Fathul Karamah, M.T., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Ir. Yuliusman, M.Eng, selaku dosen pembimbing akademik yang telah menyediakan waktu dan membantu permasalahan akademik perkuliahan selama ini, serta selaku kordinator skripsi Teknik Kimia FTUI;
- (3) Ibu Isti Surjandari, Ph.D, dan Bapak Kamarza, Ph.D yang telah bersedia menularkan sedikit ilmu statistik kepada saya.
- (4) Para dosen Departemen Teknik Kimia FTUI yang telah memberikan ilmu dan wawasannya;
- (5) Ayahanda Bambang Trismoko, dan keluarga yang selalu memberi motivasi, dukungan, doa, dan semangat untuk selalu berusaha;
- (6) Rekan-rekan satu bimbingan: Sonny Citra Permadi, dan Ardhian Solichin yang sudah membantu dalam penelitian dan saling bertukar wawasan;
- (7) Maria Linawati, dan Arna Mardiana yang selalu menghibur disaat-saat sulit dan selalu bisa saya andalkan untuk ‘bersandar’, dalam arti kata sebenarnya dan perluasannya.

- (8) Friska Amallia, Rahma Muthia, Zayyanatun Zulfa, Suci Ayunda, Isdiana Karina, Alifiana PS, dan sahabat-sahabat yang tidak dapat disebutkan satu demi satu, yang selalu punya cara untuk menyemangati saya di berbagai kondisi.
- (9) Teman-teman angkatan 2007 yang sangat hebat. Saya tidak akan bisa melalui ini semua tanpa kalian.
- (10) Semua teman-teman yang tidak dapat disebutkan satu demi satu, yang selalu memberikan informasi dan bantuan semangat;
- (11) Mba Tiwi, Mas Taufik, Mang Ijal, Kang Jajat yang selalu punya celotehan dan cerita lucu untuk disimak.
- (12) Semua pihak yang telah membantu penyusunan makalah skripsi ini secara langsung maupun tidak langsung;

Penulis menyadari bahwa dalam skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi para pembaca dan bagi dunia pendidikan dan ilmu pengetahuan.

Depok, 7 Januari 2011

Penulis

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

---

---

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

Nama : Annalisia Rudatin  
NPM : 0706269634  
Program Studi : Teknik Kimia  
Departemen : Teknik Kimia  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

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

**Aplikasi Statistik untuk Analisis Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Ozon dalam Penyisihan Limbah Fenol untuk Menentukan Variasi Kombinasi Parameter Optimum Proses**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 7 Januari 2011

Yang menyatakan

( Annalisia Rudatin )

## ABSTRAK

Nama : Annalisia Rudatin  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul : Aplikasi Statistik untuk Analisis Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Ozon dalam Penyisihan Limbah Fenol untuk Menentukan Variasi Kombinasi Parameter Optimum Proses

Ozonasi merupakan teknik oksidasi kimiawi yang menggunakan ozon sebagai oksidator kuat untuk mendegradasi fenol. Namun ozon memiliki kelarutan yang rendah. Berbagai riset menunjukkan bahwa kavitas (hidrodinamika maupun ultrasonik) dapat meningkatkan kelarutan ozon, dan meningkatkan laju penyisihan fenol. Pada penelitian ini dilakukan analisis signifikansi parameter intensitas dan konsentrasi awal fenol yang berpengaruh terhadap persentase penyisihan fenol dengan menggunakan metode ANOVA.

Dari penelitian yang dilakukan, parameter yang paling signifikan adalah intensitas ultrasonik. Kombinasi parameter yang paling baik untuk proses gabungan ozonasi-kavitas hidrodinamika dan ultrasonik adalah pada konsentrasi awal fenol 10 ppm, laju alir gas 200 L/jam, dan intensitas ultrasonik 60%.

### **Kata Kunci:**

**Fenol, Ozonasi, Kavitas hidrodinamika, Ultrasonik, Signifikansi, ANOVA.**

## ABSTRACT

Name : Annalisia Rudatin  
Study Programe : Chemical Engineering  
Title : Statistic Application for Analysis of Ozone Based Advance Oxidation Process on Phenol Degradation to Find The Optimum Combination Variation of Process's Parameter

Ozonation is one of chemical oxidation method that uses ozone as strong oxidizer for degradating phenol. But, ozone has low solubility in water. Many research show that cavitation (either hydrodynamic or ultrasonik) gives better solubility of ozone, and increase the rate of degradation. In this study, signification analysis of ultrasonik intensity and initial concentration of phenol that affect the percentage of degraded phenol was conducted by using ANOVA.

The result shows that the ultrasonik intensity is more significant. The optimum combination variation parameter for ozonation-cavitation (ultrasonik and hydrodynamic) are on initial concentration of phenol 10 ppm, gas flow rate 200 L/jam, dan ultrasonik intensity 60%.

### **Keywords:**

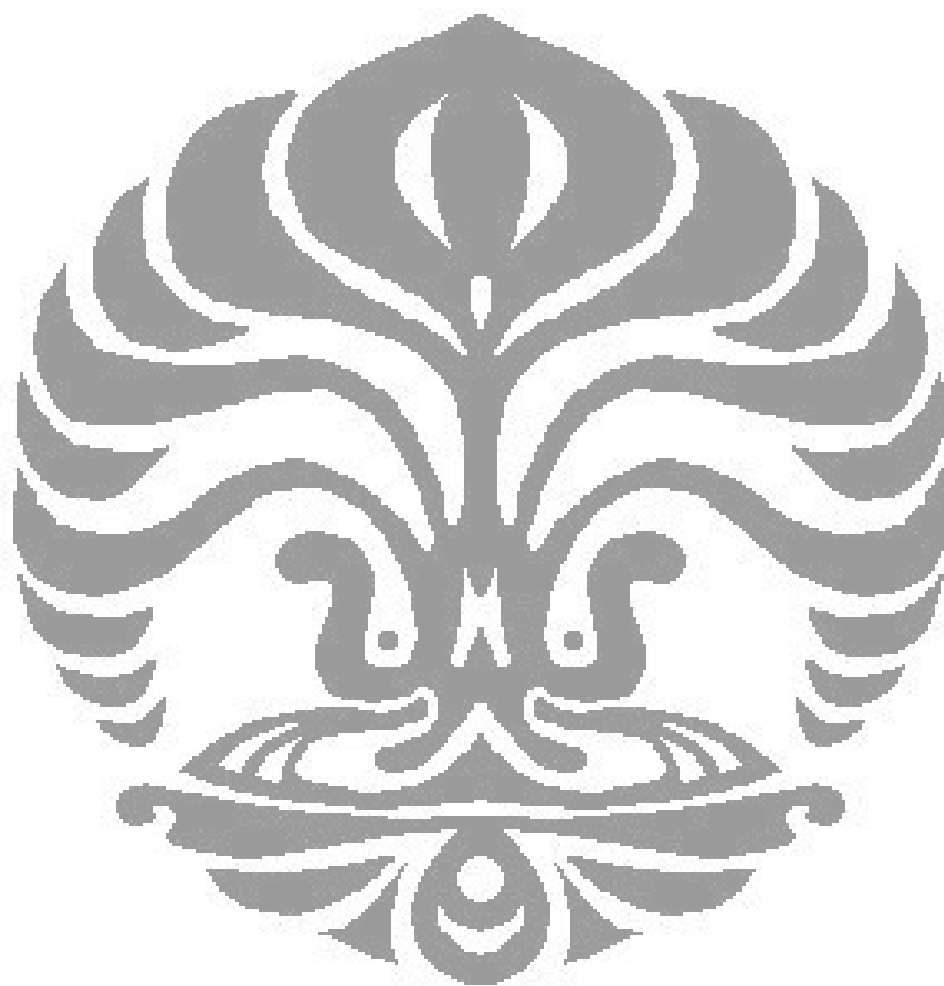
**Phenol, Ozonation, Hydrodynamic cavitation, Ultrasonic, Signification, ANOVA.**



## DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR .....	iv
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Tujuan Penelitian .....	3
1.4. Batasan Masalah .....	4
1.5. Metodologi Penelitian .....	4
1.6. Sistematika Penulisan .....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1. Ozonasi .....	5
2.2. Parameter yang Mempengaruhi Ozonasi .....	7
2.2.1. Laju alir gas ( $Q_G$ ) dan laju alir limbah cair ( $Q_L$ ) .....	7
2.2.2. Konsentrasi ozon dalam gas ( $c_G$ ) .....	8
2.2.3. Konsentrasi polutan dalam limbah cair ( $c(M)$ ) .....	9
2.2.4. pH lingkungan .....	9
2.3. Kavitasi .....	11
2.3.1. Kavitasi hidrodinamika .....	12
2.3.2. Kavitasi ultrasonik .....	13
2.4. Penggabungan Proses Ozonasi dengan Kavitasi .....	18
2.5. Proses Penyisihan Fenol dengan Ozonasi dan Kavitasi .....	19
2.6. Statistik .....	22
2.6.1. Jenis-jenis statistik .....	23
2.6.2. Desain eksperimen .....	23
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>30</b>
3.1. Rancangan Penelitian .....	30
3.2. Prosedur Penelitian .....	30
3.3. Alat dan Bahan .....	35
3.4. Pengolahan Data dengan SPSS .....	37
3.4.1. Aplikasi statistik deskriptif .....	37
3.4.2. Uji signifikansi ANOVA .....	40
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>42</b>
4.1. Proses Ozonasi/Kavitasi Hidrodinamik (O/K).....	42
4.2. Proses Ozonasi/Kavitasi Ultrasonik (O/S).....	45
4.3. Proses Ozonasi/Kavitasi Hidrodinamik dan Ultrasonik (O/K/S).....	48
4.3.1. Variasi konsentrasi awal ( $C_p0$ ) .....	48
4.3.2. Variasi intensitas ultrasonik .....	56
4.3.3. Variasi laju alir .....	58
4.4. Uji Signifikansi .....	61
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>66</b>
5.1. Kesimpulan .....	66

5.2. Saran .....	67
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>68</b>
<b>LAMPIRAN</b>	



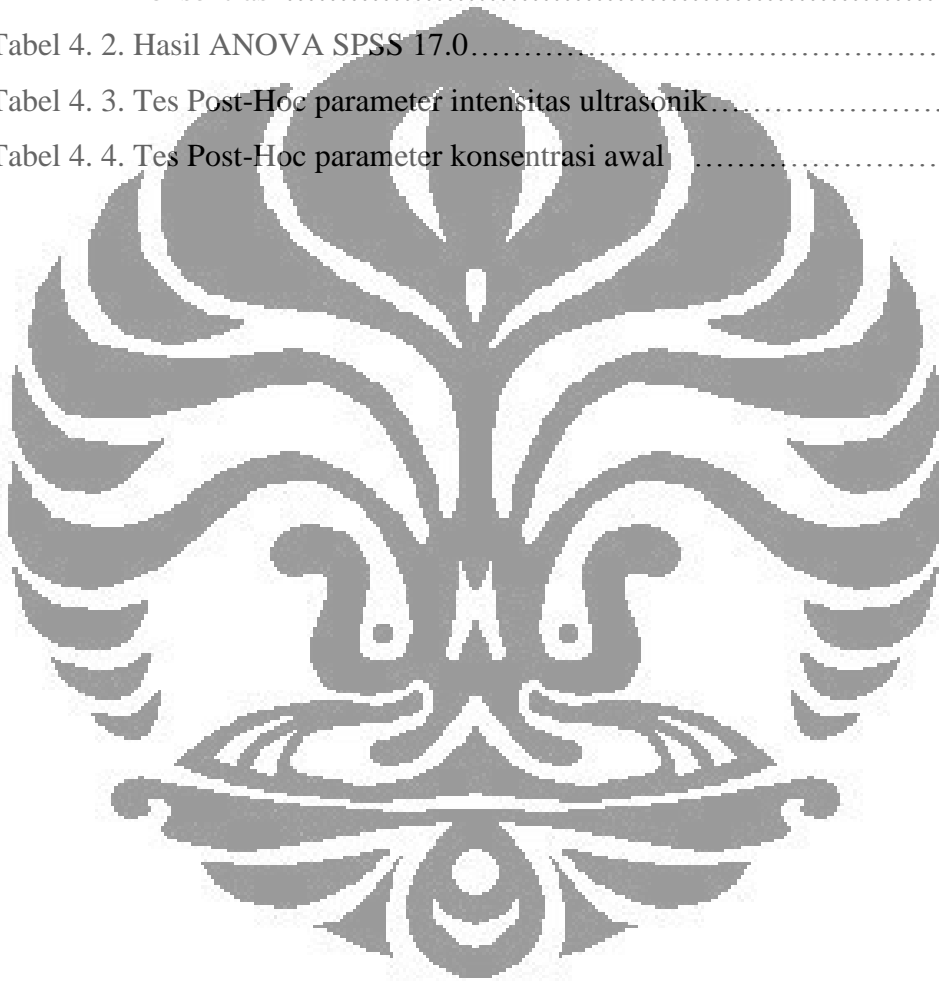
## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. Mekanisme reaksi langsung dan tak langsung .....	7
Gambar 2.2. Karakteristik ketergantungan konsentrasi ozon dalam gas dengan laju alir gas pada sebuah <i>Electric Discharge Ozon Generators</i> (EDOGs) .....	8
Gambar 2. 3. Gradien konsentrasi pada pertemuan fasa gas dan cair.....	9
Gambar 2. 4. Profil pengaruh pH dan konsentrasi ozon pada tiap bagian kontak ozon-air.....	10
Gambar 2. 5. Injektor Mazzei.....	12
Gambar 2. 6. Efek frekuensi ultrasonik pada pembentukan nitrit dan nitrat .....	17
Gambar 2. 7. Zona reaksi pada gelembung kavitasi .....	18
Gambar 2. 8. Mekanisme reaksi oksidasi fenol oleh ozon.....	20
Gambar 2. 9. Mekanisme reaksi fenol pada proses ozonasi-kavitasi (hidrodinamika dan ultrasonik).....	21
Gambar 3. 1. Diagram alir penelitian.....	31
Gambar 3. 2. Langkah-langkah desain eksperimen .....	32
Gambar 3. 3. Skema alat pada sistem ozonasi-kavitasi hidrodinamika (O/K) .....	36
Gambar 3. 4. Skema alat pada sistem ozonasi-kavitasi ultrasonik (O/S).....	36
Gambar 3.5. Skema alat pada sistem ozonasi-kavitasi hidrodinamika dan ultrasonik (O/K/S).....	37
Gambar 3.6. Membuat variabel pada SPSS 17.0 .....	37
Gambar 3.7. Memasukkan data pada SPSS 17.0.....	38
Gambar 3.8. Fasilitas Error Bar sebagai pengolah data.....	38
Gambar 3.9. Kotak dialog Error Bar.....	39
Gambar 3.10. Kotak dialog pendefinisian grafik.....	39
Gambar 3.11. Dataset uji signifikansi.....	40
Gambar 3.12. Uji signifikansi dengan ANOVA .....	41
Gambar 3.13. Kotak dialog Univariate ANOVA.....	41
Gambar 4.1. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/K dengan variasi konsentrasi dengan deviasi standar.....	43
Gambar 4.2. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/K dengan variasi konsentrasi .....	44
Gambar 4.3. Persentase penyisihan fenol pada skema O/K dengan variasi konsentrasi .....	44

Gambar 4.4. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/S dengan variasi konsentrasi dengan deviasi standar.....	46
Gambar 4.5. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/S dengan variasi konsentrasi .....	47
Gambar 4.6. Persentase penyisihan fenol pada skema O/S dengan variasi konsentrasi .....	47
Gambar 4.7. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/K/S pada variasi konsentrasi dengan deviasi standar .....	49
Gambar 4.8. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/K/S pada variasi konsentrasi .....	50
Gambar 4.9. Persentase penyisihan fenol pada skema O/K/S dengan variasi konsentrasi .....	50
Gambar 4.10. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada konsentrasi awal 100 ppm dengan variasi skema .....	51
Gambar 4.11. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada konsentrasi awal 50 ppm dengan variasi skema .....	52
Gambar 4.12. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada konsentrasi awal 10 ppm dengan variasi skema .....	52
Gambar 4.13. Persentase penyisihan fenol pada variasi skema dengan variasi konsentrasi .....	53
Gambar 4.14. Proses yang terjadi saat gelembung ozon diberikan efek kavitasi ...	54
Gambar 4.15. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/K/S pada variasi intensitas dengan deviasi standar .....	56
Gambar 4.16. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/K/S pada variasi intensitas .....	57
Gambar 4.17. Persentase penyisihan fenol pada skema O/K/S dengan variasi intensitas .....	57
Gambar 4.18. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/K/S pada variasi laju alir dengan deviasi standar .....	59
Gambar 4.19. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/K/S pada variasi laju alir .....	60
Gambar 4.20. Persentase penyisihan fenol pada skema O/K/S dengan variasi laju alir .....	60

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Mekanisme dekomposisi ozon dalam air murni pada kondisi basa....	11
Tabel 2. 2. Konstanta laju reaksi fenol dan turunannya dengan ozon.....	21
Tabel 2. 3. Konstanta laju reaksi fenol dan turunannya dengan radikal OH.....	22
Tabel 2. 4. Tabulasi observasi desain faktorial $3^2$ .....	24
Tabel 4.1.Persentase penyisihan fenol pada variasi skema dengan variasi konsentrasi .....	53
Tabel 4. 2. Hasil ANOVA SPSS 17.0.....	62
Tabel 4. 3. Tes Post-Hoc parameter intensitas ultrasonik.....	64
Tabel 4. 4. Tes Post-Hoc parameter konsentrasi awal .....	64



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Kemajuan peradaban tidak serta merta meningkatkan kualitas dari seluruh aspek kehidupan. Perkembangan yang ada cenderung menuntun manusia-nya untuk berpikiran serba praktis dalam mencapai tujuannya, bahkan tanpa menghiraukan dampaknya bagi ekosistem disekitar mereka. Kelalaian ini akan menimbulkan pencemaran bagi lingkungan. Salah satu masalah pencemaran yang sangat diperhatikan adalah pencemaran air. Air bersih merupakan salah satu komponen yang paling penting dan dibutuhkan oleh manusia. Data-data Dinas Pekerjaan Umum (2009) mencatat bahwa lebih dari 70% populasi masyarakat Indonesia mengkonsumsi air yang terkontaminasi zat-zat berbahaya.

Salah satu zat pencemar berbahaya tersebut adalah limbah fenol yang banyak dihasilkan oleh industri-industri plastik, kertas, farmasi, dan cat yang banyak terdapat di Indonesia. Fenol merupakan senyawa yang sangat beracun, sulit didegradasi, dan menyebabkan bau dan rasa pada air meskipun dalam konsentrasi yang sangat kecil (0,002 mg/L).

Proses pengolahan limbah fenol yang menjanjikan adalah teknologi oksidasi lanjutan (*Advanced Oxidation Processes/AOPs*). AOPs 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 atau pencemar (Ince dan Tezcanli-Guyer, 2004). Teknik-teknik yang telah digunakan proses oksidasi lanjut diantaranya proses berbasis H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, fotolisis, fotokatalisis, dan yang berkembang sejauh ini adalah proses berbasis ozon. Teknik-teknik tersebut dapat digunakan secara terpisah atau dapat dikombinasikan satu sama lain. Seperti yang telah diaplikasikan oleh Slamet (2007) yang menggabungkan fotokatalisis dengan adsorben untuk mengolah polutan organik.

Proses oksidasi lanjut berbasis ozon sangat potensial karena ozon dapat bereaksi dengan dua cara di dalam air, yaitu oksidasi langsung dengan

menggunakan ozon itu sendiri dan oksidasi tidak langsung dengan bantuan radikal OH dan sifatnya sebagai desinfektan (Dodd, Kohler, & Gutten, 2009).

Namun, proses pengolahan limbah cair dengan menggunakan ozon masih memiliki beberapa kekurangan, salah satunya kelarutannya yang rendah dalam air yang cenderung mendorong pemakaian dosis ozon secara berlebihan. Hal ini menyebabkan borosnya penggunaan ozon yang menjadi salah satu faktor penyebab tingginya biaya proses ozonasi. Rendahnya kelarutan ozon dalam air mengakibatkan laju reaksi oksidasi oleh ozon baik langsung maupun tidak langsung (dengan pembentukan radikal OH) akan berkurang.

Untuk itu dibutuhkan suatu proses gabungan yang dapat meningkatkan keefektifan ozon sebagai pendegradasi senyawa fenol. Proses gabungan yang kini tengah berkembang adalah proses gabungan ozonasi-kavitasi. Kavitasi merupakan salah satu cara untuk meningkatkan kelarutan ozon dalam air (Hoffmann, M. R., Hochemer, R. A., Hua, I, 1996). Kavitasi akan meningkatkan laju perpindahan massa ozon dengan memperbesar luas permukaan kontak melalui penggunaan gelembung dengan diameter yang lebih kecil atau gelembung mikro. Kavitasi merupakan fenomena terjadinya pembentukan, pertumbuhan dan hancurnya gelembung mikro dalam cairan. Jika fenomena ini terjadi karena adanya gelombang suara dengan frekuensi tinggi maka disebut kavitasi akustik oleh gelombang ultrasonik, dan jika terjadi akibat variasi tekanan pada cairan yang mengalir akibat perubahan geometri pada sistem yang mengalir, maka disebut sebagai kavitasi hidrodinamika. Dalam penelitian ini akan digunakan proses gabungan, diantaranya proses gabungan ozonasi-kavitasi ultrasonik, ozonasi-kavitasi hidrodinamika, dan ozonasi-kavitasi hidrodinamika dan ultrasonik.

Terdapat banyak parameter-parameter yang mempengaruhi proses gabungan tersebut, seperti konsentrasi ozon, laju alir gas, intensitas ultrasonik, dan lain-lain (Zhao, Ma, & Zhai, 2010). Untuk membuktikan (validasi) pengaruh parameter-parameter tersebut dalam proses gabungan diperlukan evaluasi pengaruh parameter yang cepat, dan murah, untuk merancang penelitian yang efisien, dibutuhkan suatu metode statistik. Metode statistik, selain digunakan untuk validasi, juga dapat digunakan untuk mengontrol proses, dan menjaganya pada kondisi optimum dengan permodelan matematis (Lazic, 2004).

Salah satu metode statistik yang dapat digunakan untuk mengevaluasi parameter-parameter yang berpengaruh dalam proses adalah metode statistik ANOVA (*Analysis of Variance*). ANOVA merupakan metode analisis yang telah terbukti dapat menyeleksi faktor-faktor berdasarkan signifikan dan responnya terhadap sistem atau proses kimia (Lazic, 2004) secara serentak. Prinsipnya adalah mempergunakan faktorial ANOVA yang digunakan ketika peneliti ingin mempelajari efek dari dua atau lebih perlakuan variabel.

Pada penelitian ini, ANOVA digunakan untuk menguji signifikansi parameter yang berpengaruh pada proses gabungan ozonasi dan kavitasi. Pengerjaan perhitungan ANOVA diakomodasi dengan perangkat lunak (*software*) statistik SPSS. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan analisis terhadap parameter yang paling berperan dalam proses gabungan ozonasi-kavitasi ultrasonik, ozonasi-kavitasi hidrodinamika, dan ozonasi-kavitasi hidrodinamika dan ultrasonik, dan dapat diterapkan ke penelitian selanjutnya untuk mengoptimalkan proses pengolahan limbah cair, khususnya limbah fenol.

## 1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana menguji signifikansi parameter yang berpengaruh terhadap kinerja proses (konsentrasi polutan dalam limbah cair, dan intensitas ultrasonik) dengan metode ANOVA?
2. Seberapa signifikan pengaruh parameter-parameter tersebut terhadap kinerja proses?

## 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis parameter yang berpengaruh terhadap kinerja proses (konsentrasi polutan awal dalam limbah cair, dan intensitas ultrasonik) dengan metode ANOVA.
2. Menentukan parameter yang dapat mempengaruhi proses secara signifikan.



3. Menentukan variasi terhadap kombinasi parameter yang dapat mengoptimalkan proses.

#### 1.4. Batasan Masalah

Pada penelitian ini, penulis membatasi masalah sebagai berikut:

1. Analisis dilakukan menggunakan metode statistik ANOVA
2. Perhitungan ANOVA dibantu dengan menggunakan software statistik SPSS 17, dengan Confidence Level 95%, dan tanpa *blocking* pada  $3^k$  faktorial.
3. Kinerja proses dievaluasi dengan parameter persentase penyisihan fenol.
4. Data yang digunakan merupakan data sekunder yang merupakan hasil penelitian Sonny Citra Permadi (2010) yang dilakukan di Laboratorium Intensifikasi Proses DTK FTUI.

#### 1.5. Metodologi Penelitian

Penelitian diawali dengan menentukan parameter-parameter yang akan dianalisis menggunakan ANOVA yakni laju alir gas, konsentrasi polutan dalam limbah cair, dan intensitas ultrasonik. Jumlah data minimum yang harus dianalisis didapatkan dari jumlah parameter dan variabel yang digunakan. Parameter lain yang dianggap tetap adalah laju alir limbah, konsentrasi ozon dalam gas, dengan kondisi asam.

Data-data yang digunakan seluruhnya bersumber dari penelitian terdahulu oleh tim peneliti pengolahan limbah cair fenolik di Laboratorium Intensifikasi Proses DTK FTUI. Data-data yang digunakan merupakan hasil penelitian penyisihan fenol dengan proses gabungan ozonasi-kavitasi ultrasonik, ozonasi-kavitasi hidrodinamika, dan ozonasi-kavitasi hidrodinamika dan ultrasonik. Penentuan signifikansi parameter dilakukan dengan teknik komputasi dibantu oleh piranti lunak (*software*) SPSS 17.0.

## 1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

### BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang permasalahan, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

### BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi literatur-literatur yang mengandung teori dasar yang berhubungan dengan proses ozonasi, kavitasi, dan metode statistik yang akan digunakan.

### BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini berisi diagram alir penelitian, prosedur penelitian, variabel penelitian, dan alat serta bahan untuk mencapai tujuan penelitian yang diinginkan.

### BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi hasil penelitian, yakni hasil aplikasi metode statistik dengan SPSS 17.0, interpretasi dan analisis dari hasil yang didapatkan.

### BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dari analisis yang dilakukan sesuai tujuan penelitian yang diinginkan, dan saran-saran untuk penelitian selanjutnya.

## BAB II

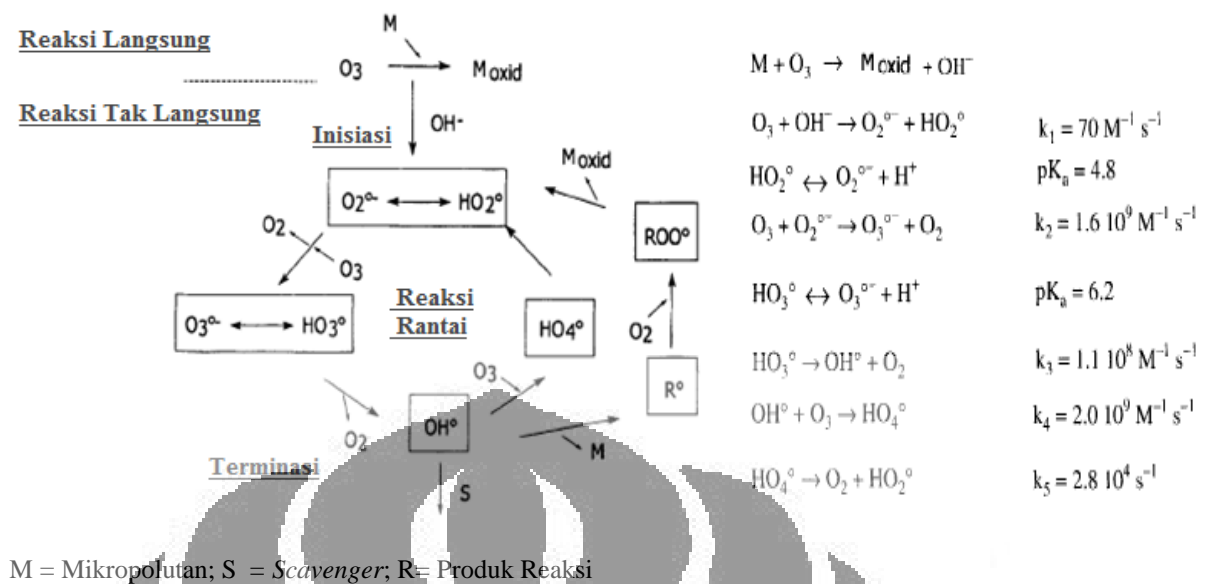
### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Ozonasi

Ozonasi merupakan salah satu jenis AOPs (*Advanced Oxidation Process*) yang banyak berkembang sebagai pengolah limbah cair dengan mengkontakkannya dengan ozon dikarenakan kelebihanannya yang dapat bereaksi dengan dua cara untuk menguraikan zat polutan, dan sifatnya sebagai desinfektan yang juga dapat mensterilkan limbah cair dari pencemar biologis seperti bakteri. Kedua cara reaksi ozon tersebut ialah dengan reaksi langsung dan tak langsung.

Reaksi langsung ozon merupakan reaksi ozon yang sebenarnya, yaitu reaksi molekul ozon dengan molekul kimia lain. Reaksi tidak langsung merupakan reaksi oleh radikal OH, yang dibentuk dari dekomposisi ozon atau hasil reaksi langsung ozon dengan senyawa yang ada di air. Dapat disimpulkan bahwa reaksi langsung ozon merupakan tahap inisiasi yang menuju ke reaksi tidak langsung. Ozon mempunyai nilai potensial redoks yang tinggi, yang menyebabkan molekul ozon mempunyai kapasitas tinggi untuk bereaksi dengan banyak senyawa. Pada sebagian besar reaksi, tidak ada transfer elektron yang jelas, yang ada adalah transfer molekul ozon ke senyawa lain.

Sedangkan reaksi tidak langsung berkaitan dengan radikal bebas yang dihasilkan dari dekomposisi ozon di air. Radikal bebas secara alami terbentuk pada tahap reaksi inisiasi atau propagasi dari *Advanced Oxidation Processes* yang melibatkan ozon dan molekul lainnya, seperti hidrogen peroksida atau radiasi UV. Radikal hidroksil (OH) yang terbentuk dari proses AOPs merupakan merupakan oksidator kuat dan dapat bereaksi dengan hampir seluruh senyawa. Reaksi antara radikal OH tersebut dengan senyawa lain yang ada dalam air (dapat disebut polutan) merupakan reaksi tidak langsung ozon. Berikut ini adalah contoh mekanisme reaksi langsung dan tak langsung ozon:



**Gambar 2. 1.** Mekanisme reaksi langsung dan tak langsung  
(Sumber: Staehelin and Hoigne, 1983)

## 2.2. Parameter yang Mempengaruhi Ozonasi

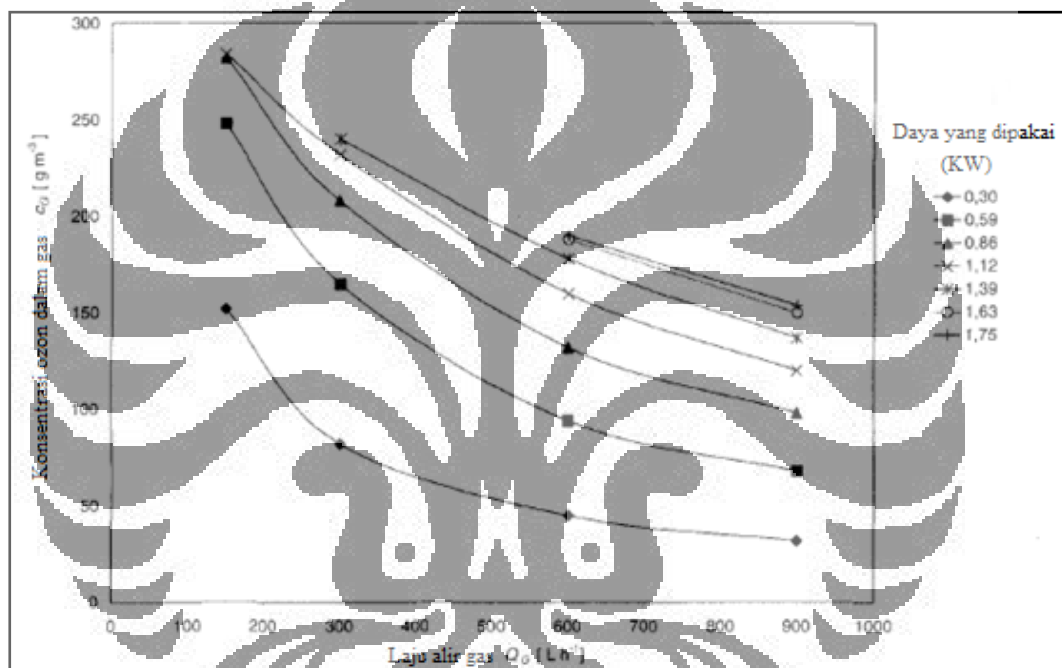
Terdapat beberapa parameter yang berpengaruh terhadap kinerja ozonasi, diantaranya laju alir gas, laju alir limbah cair, volume reaktor, konsentrasi ozon dalam gas, konsentrasi ozon dalam limbah cair, konsentrasi polutan dalam limbah cair, konsentrasi *promoter*, konsentrasi *radical scavenger*, tegang permukaan air, kuat ion air, dan pH air. Berikut ini adalah penjelasan tentang parameter-parameter yang akan dianalisis signifikansi pengaruhnya dalam penelitian ini:

### 2.2.1. Laju alir gas ( $Q_G$ ) dan laju alir limbah cair ( $Q_L$ )

Laju alir gas ( $Q_G$ ) dan laju alir limbah cair ( $Q_L$ ) merupakan parameter operasi yang penting untuk mengetahui neraca massa selama reaksi berlangsung. Neraca massa reaksi tersebut berguna untuk mengevaluasi hasil eksperimen, atau kinerja proses secara keseluruhan (Gottschalk, Libra, & Saupe, 2000). Lebih jauh, laju alir limbah cair ( $Q_L$ ) terkait dengan konsentrasi polutan didalamnya akan mempengaruhi konsentrasi ozon optimum yang diperlukan untuk menyisihkannya. Pengaruh laju alir gas ( $Q_G$ ) terhadap laju reaksi akan dijelaskan lebih lanjut pada sub-subbab 2.2.2.

### 2.2.2. Konsentrasi ozon dalam gas ( $c_G$ )

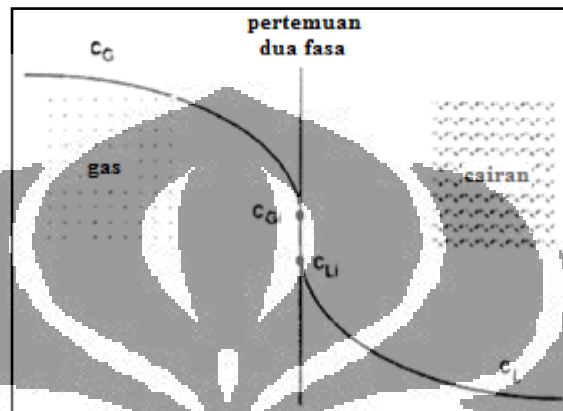
Konsentrasi ozon dalam gas sangat dipengaruhi tipe gas yang digunakan sebagai masukan (*feed*) ozon generator, yakni berupa udara atau gas oksigen. Semakin tinggi kandungan oksigen didalamnya, konsentrasi ozon yang dapat dicapai juga makin besar. Laju alir massa ozon yang dihasilkan generator (misalnya EDOGs) sangat dipengaruhi oleh laju alir gas ( $Q_G$ ) dan daya atau voltase yang dipakai. Konsentrasi ozon dalam gas ( $c_G$ ) berkurang seiring dengan bertambahnya laju alir gas ( $Q_G$ ) seperti yang terlihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2. 2. Karakteristik ketergantungan konsentrasi ozon dalam gas dengan laju alir gas pada sebuah *Electric Discharge Ozon Generators* (EDOGs)  
(Sumber: ASTeX Sorbios, 1996)

Konsentrasi ozon dalam gas ( $c_G$ ) mempengaruhi jumlah ozon yang dapat bereaksi dalam penyisihan polutan. Konsentrasi ozon dalam gas ( $c_G$ ) dan laju alir gas ( $Q_G$ ) dalam volume reaktor tertentu dikenal sebagai dosis ozon yang berpengaruh terhadap laju reaksi. Penambahan dosis ozon akan meningkatkan laju reaksi penyisihan polutan (Gottschalk, Libra, & Saupe, 2000).

Konsentrasi ozon dalam gas ( $c_G$ ) tentunya juga mempengaruhi konsentrasi gas dalam cairan ( $c_L$ ), menurut teori dua lapisan saat ozon dikontakkan ke air (Treybal, 1968). Teori dua lapisan menyebutkan bahwa saat suatu zat melalui dua fasa, akan terdapat *resistant* pada pertemuan dua fasa. Hal ini menimbulkan gradien konsentrasi, seperti yang terlihat pada ilustrasi berikut:



**Gambar 2.3.** Gradien konsentrasi pada pertemuan fasa gas dan cair

(Sumber: Treybal, 1968)

Gradien konsentrasi yang ditimbulkan efek tersebut dapat mempengaruhi konsentrasi ozon yang bereaksi dengan senyawa target di dalam cairan.

### 2.2.3. Konsentrasi polutan dalam limbah cair ( $c(M)$ )

Konsentrasi senyawa target (polutan) yang akan disisihkan mempengaruhi jumlah karbon organik yang terlarut (Dissolve Organic Carbon/ DOC) dalam cairan. Konsentrasi polutan dalam limbah cair ( $c(M)$ ) juga berpengaruh pada neraca massa, yang berguna untuk mengevaluasi kinerja proses. Konsentrasi polutan ( $c(M)$ ) akan berpengaruh terhadap konsentrasi ozon optimum yang diperlukan untuk menyisihkannya.

### 2.2.4. pH lingkungan

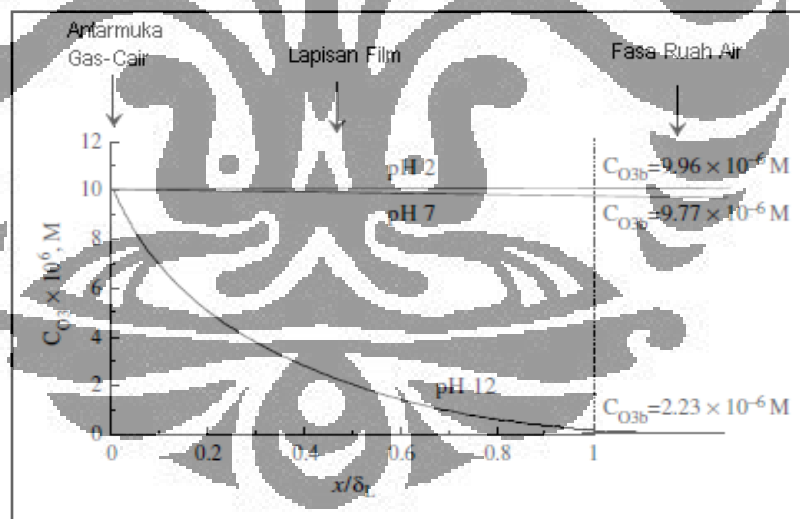
Nilai pH sangat mempengaruhi reaksi rantai ozon, terutama pada tahap inisiasi (lihat gambar 2.1). Nilai pH juga memiliki peran penting pada kesetimbangan kondisi asam. Oksidasi mikropolutan pada air sintetis (baik air

terdeionisasi atau tanpa buffer) kenaikan nilai pH akan meningkatkan laju reaksi. Laju reaksi akan berbanding secara proporsional dengan konsentrasi  $\text{OH}^-$ .

Nilai pH juga sangat mempengaruhi laju dekomposisi ozon. Ozon merupakan senyawa yang tidak stabil. Setelah pembentukannya, ozon akan dengan mudah terdekomposisi kembali membentuk oksigen. Di dalam air, ozon menjadi tidak stabil dan secara cepat terdekomposisi melalui serangkaian mekanisme reaksi. Ozon akan lebih mudah terdekomposisi pada pH yang lebih tinggi (basa).

- Pada  $\text{pH} < 12$ , reaksi dekomposisi ozon berlangsung lambat dan terjadi pada fasa ruah (bulk)
- Pada  $\text{pH} > 12$ , reaksi berlangsung sedang atau cepat, berkompetisi dengan reaksi langsung ozon atau bahkan menjadi satu-satunya reaksi yang mengkonsumsi ozon. Jika bereaksi langsung dengan ozon, reaksi dekomposisi berjalan lambat.

Berikut ini merupakan profil pengaruh pH dan konsentrasi ozon pada tiap bagian kontak ozon dengan air :



**Gambar 2. 4.** Profil pengaruh pH dan konsentrasi ozon pada tiap bagian kontak ozon-air

(Sumber: Staehelin, Hoigné, dan Bühler, 1984)

Mekanisme dekomposisi ozon dalam air murni pada kondisi basa menurut Tomiyasu, Fukutomi, dan Gordon (1988) dapat terlihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 2. 1. Mekanisme dekomposisi ozon dalam air murni pada kondisi basa

Reaksi	konstanta laju
Reaksi Inisiasi	
$O_3 + OH^- \xrightarrow{k_1} HO_2^- + O_2 \cdot$	$40 M^{-1}sec^{-1}$
$O_3 + HO_2^- \xrightarrow{k_2} HO_2 \cdot + O_3^- \cdot$	$2.2 \times 10^6 M^{-1}sec^{-1}$
Reaksi Propagasi	
$HO_2 \cdot \xrightarrow{k_3} O_2^- \cdot + H^+$	$7.9 \times 10^5 sec^{-1} \text{ }^{25}$
$O_2^- \cdot + H^+ \xrightarrow{k_4} HO_2 \cdot$	$5 \times 10^{10} M^{-1}sec^{-1} \text{ }^{25}$
$O_3 + O_2^- \cdot \xrightarrow{k_5} O_3^- \cdot + O_2$	$1.6 \times 10^9 M^{-1}sec^{-1}$
$O_3^- \cdot + H_2O \xrightarrow{k_{12}} HO \cdot + O_2 + OH^-$	$20-30 M^{-1}sec^{-1}$
$O_3^- \cdot + HO \cdot \xrightarrow{k_{11}} HO_2 \cdot + O_2^- \cdot$	$6 \times 10^9 M^{-1}sec^{-1}$
$O_3 + HO \cdot \xrightarrow{k_6} HO_2 \cdot + O_2$	$3 \times 10^9 M^{-1}sec^{-1}$
$HO_2^- + H^+ \xrightarrow{k_{13}} H_2O_2$	$5 \times 10^{10} M^{-1}sec^{-1} \text{ }^{25}$
$H_2O_2 \xrightarrow{k_{14}} HO_2 \cdot + H^+$	$0.25 sec^{-1} \text{ }^{25}$
Reaksi Terminasi	
$O_3 + HO \cdot \xrightarrow{k_{17}} O_3^- \cdot + OH^+$	$2.5 \times 10^9 M^{-1}sec^{-1}$
$HO \cdot + CO_3^{2-} \xrightarrow{k_{18}} OH^- + CO_3 \cdot^- \cdot$	$4.2 \times 10^8 M^{-1}sec^{-1}$
$CO_3 \cdot^- \cdot + O_3 \xrightarrow{k_{19}} (O_2 + CO_2 + O_2^- \cdot) \cdot$	tidak ada data

### 2.3. Kavitasasi

Kavitasasi merupakan teknik pembangkitan gelembung ukuran kecil atau gelembung mikro, yaitu gelembung dengan diameter kurang dari puluhan mikron, sedang gelembung konvensional memiliki diameter beberapa milimeter. Kavitasasi merupakan fenomena terjadinya pembentukan, pertumbuhan dan hancurnya gelembung mikro dalam cairan. Jika fenomena ini terjadi karena adanya gelombang suara dengan frekuensi tinggi maka disebut kavitasasi akustik (ultrasonikasi), dan jika terjadi akibat variasi tekanan pada cairan yang mengalir akibat perubahan geometri pada sistem yang mengalir, maka disebut sebagai kavitasasi hidrodinamika.



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

### 2.3.1. Kavitasi hidrodinamika

Kavitasi hidrodinamika terjadi karena perbedaan tekanan pada cairan yang mengalir akibat perubahan geometri pada sistem. Pembangkitan kavitasi hidrodinamika dapat diakomodasi dengan menggunakan injektor Mazzei. Perbedaan tekanan antara masukan dan keluaran injektor jenis ini akan menciptakan kondisi vakum pada badan injektor yang akan menginisiasi penghisapan pada *suction port*. Keuntungan dari injektor jenis ini adalah diperolehnya laju perpindahan massa ozon yang tinggi (hingga 90%), efisiensi cenderung tetap, konstruksinya yang sederhana dan tidak membutuhkan aliran listrik. Berikut ini adalah gambar injektor Mazzei:



Gambar 2. 5. Injektor Mazzei

(Sumber: [www.ozoneapplications.com](http://www.ozoneapplications.com))

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.

Dalam aplikasinya, kavitasi hidrodinamika dapat 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. Jangka waktu untuk perubahan tekanan dalam kavitasi hidrodinamika lebih tinggi dibanding dalam ultrasonik. Dengan demikian, pertumbuhan dan ledakan gelembung yang terjadi lebih membutuhkan waktu.

### 2.3.2. Kavitasi ultrasonik

Ultrasonikasi merupakan salah satu metode AOPs yang memanfaatkan radiasi gelombang ultrasonik. Gelombang ultrasonik terjadi pada frekuensi di atas 16 kHz, di atas frekuensi normal yang dapat didengar oleh manusia, dan biasanya berada pada kisaran 20 kHz – 500 MHz. Tingkatan frekuensi berbanding terbalik terhadap tenaga yang dihasilkan (*power output*). Intensitas yang lemah, dan frekuensi yang tinggi (dalam MHz) tidak mengubah keadaan medium saat diradiasikan, sebaliknya pada intensitas yang tinggi dan frekuensi yang rendah, gelombang ini mengubah keadaan medium, dan menimbulkan getaran dan pembentukan, pembesaran, serta hancurnya gelembung yang dikenal sebagai peristiwa kavitasi yang dapat meningkatkan keefektifan reaksi. Di dalam gelembung kavitasi yang ditimbulkan, tekanan dan temperatur naik secara dramatis hingga gelembung tersebut pecah. Sehingga kavitasi menjadi “mikro-reaktor” yang dapat meningkatkan keefektifan reaksi yang selanjutnya akan dijelaskan pada bagian 2.5.

Kavitasi ultrasonik telah terbukti dapat mendegradasi berbagai jenis polutan. Reaksi yang terjadi dan tempat berlangsungnya reaksi berbeda untuk tiap jenis polutan, sebagai berikut:

- Polutan volatil : didegradasi melalui reaksi pirolisis pada fasa uap dalam gelembung kavitasi
- Polutan hidrofobik: terakumulasi dan bereaksi pada lapisan batas gelembung yang bersifat hidrofobik. Konsentrasi radikal OH dan

peroksida pada lapisan batas jauh lebih tinggi dibandingkan pada fasa ruah cairan

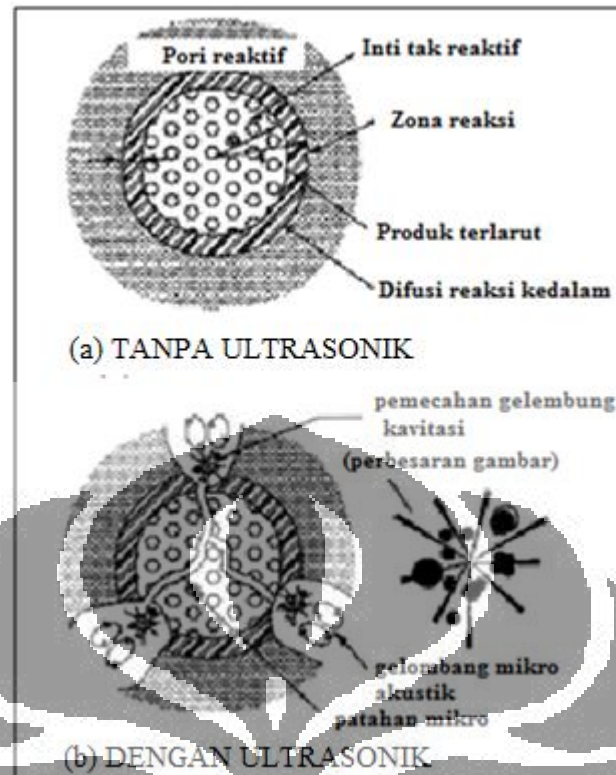
- Polutan hidrofilik: bereaksi pada fasa ruah cairan, terdegradasi oleh reaksi dengan radikal bebas atau peroksida yang dihasilkan oleh sonolisis air
- Partikel makromolekul: terdegradasi oleh efek hidromekanis karena pecahnya gelembung.

Selain dampak positif seperti yang telah disebutkan diatas, kavitasasi ultrasonik juga memiliki produk samping. Kavitasasi yang dihasilkan tidak hanya mengakomodasi reaksi degradasi polutan, tapi juga dapat mengakomodasi reaksi tak-spesifik lain, misalnya reaksi pembentukan senyawa lain seperti nitrit, nitrat, dan hidrogen peroksida (Tiehm, 2001).

Hidrogen peroksida terbentuk saat larutan di kavitasasi ultrasonik. Pembentukan hidrogen peroksida merupakan hasil dari reaksi rekombinasi radikal yang dihasilkan sonolisis air. Hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) biasanya terbentuk dari gabungan dua radikal OH. Hidrogen peroksida tidak hanya terbentuk pada saat sonolisis air, tetapi juga pada limbah cair saat mendegradasi polutan.

Pembentukan nitrit dan nitrat karena kavitasasi ultrasonik berlangsung pada rentang frekuensi 41 kHz - 1MHz. Nitrit dan nitrat terbentuk karena keberadaan molekul  $O_2$  dan  $N_2$  yang bereaksi karena kavitasasi ultrasonik, dan tidak dipengaruhi oleh radikal OH. Pembentukan nitrit dan nitrat akan merugikan reaksi penyisihan polutan secara keseluruhan. Hasil air bersih yang telah dihasilkan akan mengandung nitrit yang bersifat toksik untuk organisme air. Selain itu, nitrit dan nitrat dapat digunakan oleh bakteri untuk melangsungkan nitrifikasi.

Selain untuk mendegradasi polutan organik, kavitasasi ultrasonik juga terbukti dapat mendegradasi logam seperti yang terlihat pada ilustrasi berikut ini:



**Gambar 2.5.** Ilustrasi penyisihan logam dari partikel mineral  
(Sumber: Swamy & Narayana, 2001)

Terdapat beberapa parameter yang berpengaruh terhadap kinerja kavitasi ultrasonik, diantaranya frekuensi, intensitas, durasi kavitasi ultrasonik, desain reaktor, dan media kavitasi ultrasonik. Berikut ini adalah penjelasan tentang parameter-parameter yang akan dianalisis signifikansi pengaruhnya dalam penelitian ini:

#### 2.3.2.1. Intensitas dan frekuensi ultrasonik

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

Intensitas ultrasonik juga akan mempengaruhi jenis kavitasasi yang terjadi. Pada intensitas rendah gelembung yang dihasilkan lebih stabil dan memiliki waktu hidup yang lebih panjang, yaitu sekitar 10  $\mu$ s. Kavitasasi jenis ini disebut sebagai *stable cavitation*. Pada kavitasasi ini tahap kehancuran gelembung tertunda hingga melewati beberapa siklus ekspansi dan kompresi.

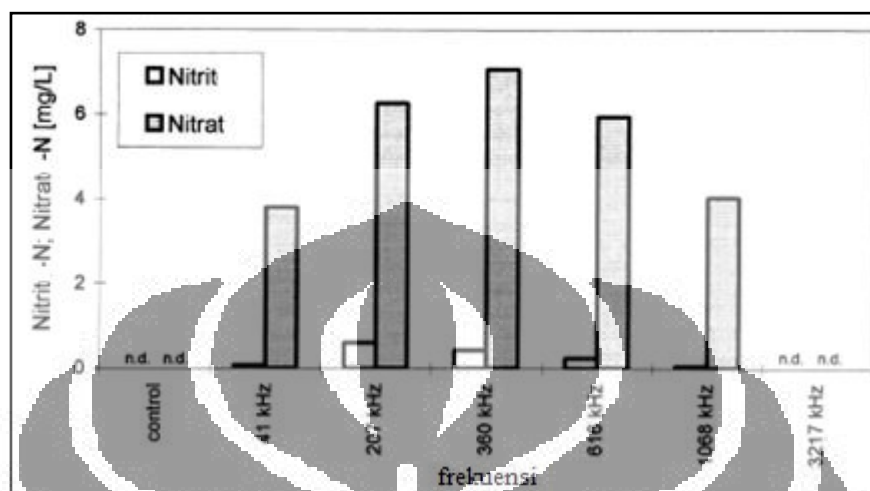
Intensitas ultrasonik tinggi akan menghasilkan gelembung dengan waktu hidup yang lebih singkat, yaitu hanya 0,4 $\mu$ s. Kavitasasi jenis ini disebut sebagai *transient cavitation*. Pada jenis kavitasasi ini, temperatur dan tekanan yang dihasilkan lebih tinggi. Energi yang dilepas ke sekitar pada *transient cavitation* jauh lebih besar dibandingkan dengan *stable cavitation*, yang disebabkan hancurnya gelembung mikro pada *transient cavitation* lebih cepat dan dahsyat dibandingkan *stable cavitation*. Dengan semakin singkatnya waktu yang dibutuhkan gelembung mikro untuk hancur maka produksi radikal hidroksil juga akan lebih besar (Pétrier, 1992).

Pada intensitas tinggi siklus kompresi dan ekspansi yang dialami gelembung juga lebih ekstrem sehingga gelembung-gelembung mikro tersebut akan cenderung untuk berosilasi terlebih dahulu di dalam larutan sebelum kemudian akhirnya pecah sehingga tranfer radikal hidroksil ke dalam larutan pun akan semakin besar karena adanya efek *microstreaming* ini (Hoffmann, M. R., Hoechemer, R. A., Hua, I, 1996).

Selain intensitas, faktor lain yang mempengaruhi kavitasasi adalah frekuensi. Frekuensi gelombang ultrasonik akan mempengaruhi gelembung kavitasasi yang terbentuk. Pada frekuensi rendah, amplitudo yang dibutuhkan untuk menimbulkan kavitasasi cukup rendah. Gelembung yang terbentuk besar, dan umurnya panjang. Sedangkan pada frekuensi tinggi, amplitudo yang dibutuhkan untuk menimbulkan kavitasasi tinggi. Gelembung yang dihasilkan lemah dan berumur pendek, saat pecah tidak terlalu keras, bahkan tidak terjadi kavitasasi pada rentang milihertz karena siklus yang terlalu pendek untuk membentuk gelembung. Pada kenyataannya, kenaikan frekuensi akan meningkatkan laju reaksi (Adewuyi, 2001). Hal ini dikarenakan frekuensi yang tinggi dapat meningkatkan jumlah senyawa radikal pada sistem. Walaupun saat pecah tidak terlalu keras, frekuensi

tinggi memungkinkan terjadinya lebih banyak kavitasi, sehingga memiliki lebih banyak kemungkinan untuk membentuk senyawa radikal.

Frekuensi juga mempengaruhi pembentukan nitrit dan nitrat seperti yang terlihat pada gambar berikut ini:



Gambar 2. 6. Efek frekuensi ultrasonik pada pembentukan nitrit dan nitrat

(Sumber: Tiehm, 2001)

### 2.3.2.2. Temperatur lingkungan

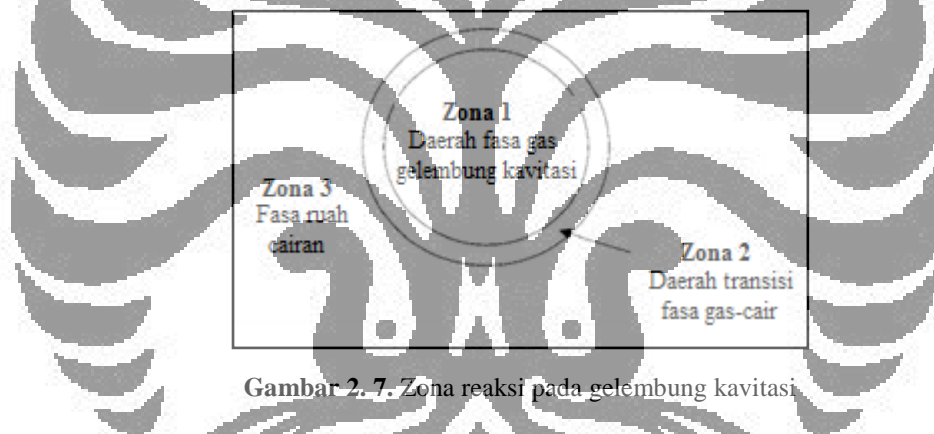
Reaksi kavitasi ultrasonik akan mengakibatkan peningkatan temperatur. Temperatur pada fasa ruah cairan akan mempengaruhi viskositas, kelarutan gas, tekanan uap, dan tegangan permukaan cairan (Mukesh, Hongqiang, Mujumdar, & Ray, 2004). Pada temperatur lingkungan yang tinggi, intensitas ultrasonik yang dibutuhkan rendah untuk menimbulkan kavitasi. Hal ini terjadi karena peningkatan temperatur akan menurunkan viskositas dan tegangan permukaan, sehingga menurunkan intensitas ultrasonik yang dibutuhkan untuk memproduksi kavitasi. Saat terjadi peningkatan temperatur, tekanan uap meningkat, sehingga gelembung kavitasi terisi dengan uap senyawa target. Peningkatan kandungan uap dan gas akan meningkatkan resistensi gerakan di dalam gelembung selama peristiwa kavitasi. Hal tersebut menyebabkan penurunan intensitas terjadinya pemecahan gelembung. Penurunan intensitas tersebut dapat mengurangi temperatur saat pecah dan mengurangi jumlah terbentuknya radikal OH sehingga menurunkan laju degradasi.

## 2.4. Penggabungan Proses Ozonasi dengan Kavitasasi

Kavitasi baik hidrodinamika dan ultrasonik telah terbukti sebagai suatu metode yang dapat meningkatkan orde reaksi pada berbagai sistem (Thompson & Doraiswamy, 1999). Berikut ini merupakan dampak yang ditimbulkan kavitasi, antara lain:

- Tekanan mekanis yang tinggi
- Memproduksi radikal H dan OH. Radikal OH terbentuk paling banyak, diikuti radikal O, H<sub>2</sub>O, H, dan H<sub>2</sub>. Senyawa radikal tersebut diproduksi pada 30 ns terakhir saat kenaikan temperatur secara cepat.
- Dekomposisi termal senyawa volatil-hidrofobik

Saat ditambahkan kavitasi timbul 3 zona reaksi pada gelembung seperti yang terlihat pada gambar berikut:



Gambar 2. 7. Zona reaksi pada gelembung kavitasasi.

Dalam penggabungannya dengan ozon, kavitasi dapat meningkatkan laju perpindahan massa ozon dalam limbah cair dengan meningkatkan distribusi ozon yang bereaksi, yang dapat dibedakan menjadi efek mekanis (fisik) dan kimia.

Efek mekanis diakomodasi oleh vibrasi (getaran) yang diakibatkan oleh gelombang ultrasonik yang diradiasikan, dan dapat mengurangi ketebalan lapisan cairan, dan mengurangi penggabungan gelembung (*bubble coalescence*) dari ozonator, sehingga dapat meningkatkan perpindahan massa gas ke dalam cairan.

Efek kimia ditimbulkan dari peningkatan jumlah radikal hidroksil yang terbentuk dari dekomposisi ozon (Weavers, 2001). Dekomposisi ozon terjadi secara termolisis pada fasa uap dalam sebuah gelembung kavitasasi (zona 1), mengikuti mekanisme reaksi dibawah ini :



Reaksi inisiasi tersebut menghasilkan atom oksigen yang bereaksi dengan air membentuk radikal OH menurut mekanisme reaksi berikut:



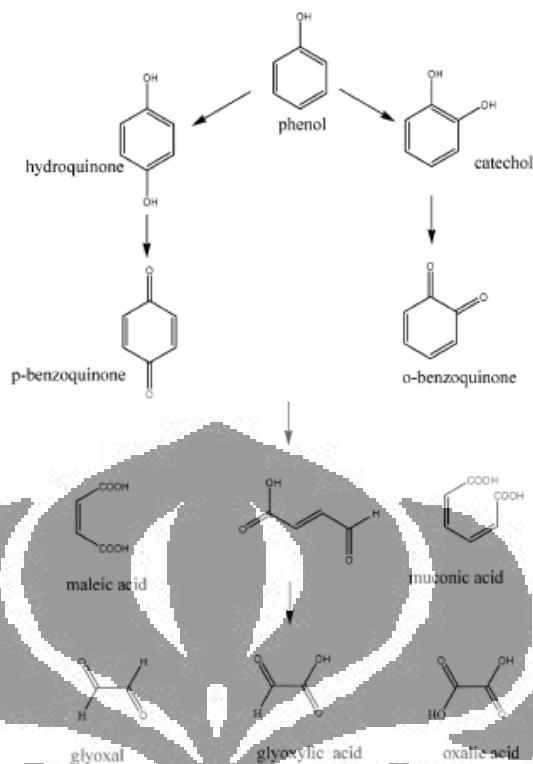
Produk radikal OH yang terbentuk kemudian akan berpindah ke lapisan antar fasa gelembung (zona 2) untuk selanjutnya menuju fasa ruah cairan (zona 3). Pada fasa uap (zona 1) juga terjadi reaksi pirolisis. Pada lapisan antar fasa (zona 2), terdapat air superkritis dan senyawa-senyawa radikal terlarut yang berpindah dari dalam gelembung. Zona ini merupakan tempat bereaksinya senyawa nonvolatil terlarut dan pirolisis fasa cair. Pada fasa ruah cairan (zona 3), terjadi peningkatan oksidan metastabil, seperti  $\text{H}_2\text{O}_2$  yang terbentuk karena reaksi rekombinasi senyawa radikal.

## 2.5. Proses Penyisihan Fenol dengan Ozonasi dan Kavitasasi

Fenol merupakan salah satu polutan yang banyak ditemukan di limbah industri, seperti industri kimia, petrokimia, cat, tekstil, pestisida dan lain-lain. Senyawa fenolik, sebagai kontaminan organik pada air dapat menghasilkan resiko lingkungan yang sangat serius sehingga perlu dihilangkan sebelum dibuang ke lingkungan. 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), 1 mg/L untuk untuk industri golongan II.

Penyisihan fenol dengan proses ozonasi-kavitasasi (ultrasonik dan hidrodinamika) melibatkan reaksi fenol dengan ozon dan radikal OH. Mekanisme reaksi langsung oleh ozon dapat terlihat pada gambar di bawah ini:





**Gambar 2. 8.** Mekanisme reaksi oksidasi fenol oleh ozon  
(sumber: Lesko, 2004)

Mekanisme reaksi tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

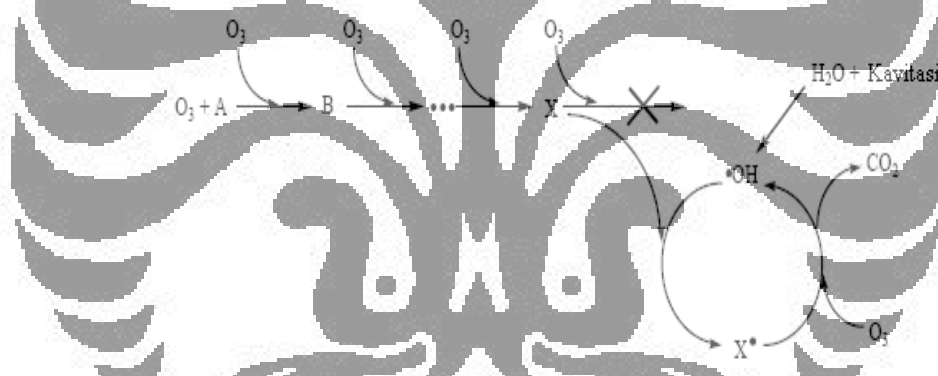
- Pertama-tama fenol akan bereaksi dengan ozon melalui serangan elektrofilik. Proses oksidasi dari fenol dan produk samping yang dihasilkan dari degradasi fenol terjadi pada fasa ruah dari larutan melalui reaksi serangan langsung oleh ozon.
- Serangan elektrofilik pada posisi orto dan para menghasilkan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

**Tabel 2. 2.** Konstanta laju reaksi fenol dan turunannya dengan ozon

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

(Sumber: Lesko, 2004)

Karena laju konstanta bimolekularnya yang minimal dengan ozon yaitu  $0,04 M^{-1}s^{-1}$  (Lesko, 2004), asam oksalat merupakan hasil akhir yang stabil yang tidak dapat dioksidasi lebih lanjut dengan ozon.

**Gambar 2. 9.** Mekanisme reaksi fenol pada proses ozonasi-kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik)

Proses oksidasi dari fenol (A) dan produk samping fenol akan terjadi secara cepat di dalam larutan melalui reaksi langsung oleh ozon. Serangan langsung dari molekul ozon menghasilkan senyawa jenuh (X) yang tidak dapat dioksidasi lebih lanjut oleh ozon seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, tapi dapat dioksidasi melalui serangan radikal hidroksil dan membentuk radikal bebas hasil oksidasi ( $X^*$ ). Radikal bebas hasil oksidasi inilah yang kemudian bisa teroksidasi lagi dengan ozon. Reaksi antara radikal bebas hasil oksidasi ( $X^*$ ) dengan ozon akan membentuk radikal hidroksil yang akan meningkatkan proses penyisihan fenol dengan penggabungan ozonasi/kavitasi.

**Tabel 2. 3.** Konstanta laju reaksi fenol dan turunannya 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	$4,3,0 \times 10^9$
Glioksilat	$6,6 \times 10^7$
Oksalat	$4,7 \times 10^7$

(Sumber: Lesko, 2004)

Konstanta laju reaksi fenol dengan ozon adalah  $1,3 \times 10^3 M^{-1}s^{-1}$ , sementara konstanta laju reaksi fenol dengan radikal OH adalah  $6,3 \times 10^9 M^{-1}s^{-1}$ . Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa fenol lebih reaktif dengan radikal OH dibandingkan dengan ozon.

## 2.6. Statistik

Statistik memiliki peranan penting dalam banyak bidang sains dan teknik, terutama dalam penelitian-penelitian ilmiah dan keteknikan. Secara umum, statistik merupakan suatu metode ilmiah dalam mengumpulkan, mengklasifikasikan, meringkas, menyajikan, menginterpretasikan, dan menganalisis data guna mendukung pengambilan kesimpulan yang valid dan berguna sehingga dapat menjadi dasar pengambilan keputusan yang masuk akal (Harinaldi, 2005). Dalam banyak hal, pengolahan data senantiasa membutuhkan penerapan metode statistik tertentu, yang pemakaiannya member dasar bagi penjelasan yang logis mengenai hubungan-hubungan yang terdapat antara variabel yang menjadi kajian.

### **2.6.1. Jenis-jenis statistik**

Berdasarkan jenisnya, statistik dibedakan menjadi dua yakni, statistik deskriptif dan statistik inferensia.

#### **2.6.1.1 Statistik deskriptif**

Statistik deskriptif merupakan jenis statistik yang berkaitan dengan cara mendeskripsikan, menggambarkan, menjabarkan, dan menguraikan data. Statistik deskriptif mengacu pada bagaimana menata atau mengorganisasi data, menyajikan, dan menganalisis data. Cara yang digunakan dalam statistik deskriptif adalah dengan membuat tabel dan grafik/diagram.

#### **2.6.1.2 Statistik inferensia**

Statistik inferensia adalah statistik yang berkenaan dengan cara penarikan kesimpulan berdasarkan data yang diperoleh dari sampel untuk menggambarkan karakteristik/ciri dari suatu populasi. Dengan demikian, dalam statistik inferensia dilakukan suatu generalisasi dari hal yang bersifat khusus menjadi hal yang bersifat lebih luas. Oleh karena itu, statistik inferensia juga disebut sebagai statistik penarikan kesimpulan. Pada statistik inferensia biasanya dilakukan pendugaan, dan pengujian hipotesis.

Terdapat kaitan yang sangat erat antara statistik deskriptif dan inferensia. Pada umumnya, tahap statistik deskriptif mendahului tahap statistik inferensia, karena sebelum dilakukan penarikan kesimpulan mengenai suatu keadaan yang diteliti maka data harus diuraikan terlebih dahulu dalam bentuk statistik deskriptif sehingga didapat kesimpulan yang akurat.

### **2.6.2 Desain eksperimen**

Metode statistik, dalam kaitannya dengan penelitian, umumnya digunakan pada akhir penelitian untuk mengolah data, namun pada kenyataannya, metode statistik juga dapat digunakan pada awal penelitian dengan mengaplikasikan *Design of Experiment* (desain eksperimen).

DOE merupakan proses dalam merencanakan suatu eksperimen/ penelitian, yang mempergunakan data-data yang berkaitan untuk dianalisis dengan metode statistik sehingga menghasilkan data yang valid, obyektif, dan tentunya mendapatkan kesimpulan yang berguna.

### 2.6.2.1. Desain faktorial

Sebagian besar eksperimen melibatkan studi efek yang diakibatkan dua atau lebih parameter (faktor). Desain faktorial sangat cocok untuk tipe eksperimen seperti ini. Dengan desain faktorial, setiap kemungkinan kombinasi level (variasi) yang diteliti dapat diinvestigasi. Sebagai contoh, terdapat  $a$  variasi dari faktor  $A$ , dan  $b$  variasi dari faktor  $B$ , setiap replikasi akan mengandung kombinasi perlakuan  $ab$ . Efek suatu faktor diartikan menurut perubahan yang dihasilkan oleh responsa faktor divariasikan. Hal ini dikenal sebagai efek utama (main effect) karena mengacu kepada faktor utama yang diamati dalam eksperimen.

Pengaturan faktorial dimana setiap faktor memiliki 3 level disebut sebagai desain faktorial  $3^k$ . desain paling sederhana untuk desain faktorial ini adalah  $3^2$ , dimana terdapat 2 faktor yang masing-masing memiliki 3 level. Maka  $a = 3$ , dan  $b = 3$ . Bila dilakukan dua kali observasi untuk tiap variasi, maka  $k$  akan bernilai 2, dan nilai observasi ke- $k$  pada level  $i$  dari faktor  $A$  dan level  $j$  dari faktor  $B$  disebut sebagai nilai  $y_{ijk}$ . Berikut ini adalah tabulasi untuk desain faktorial tersebut:

**Tabel 2. 4.** Tabulasi observasi desain faktorial  $3^2$

	j = 1		j = 2		j = 3		$y_{i...}$
i = 1	$y_{111}$	$y_{112}$	$y_{121}$	$y_{122}$	$y_{131}$	$y_{132}$	$\sum_{i=1}$
	$y_{112}$	$y_{111}$	$y_{122}$	$y_{121}$	$y_{132}$	$y_{131}$	
i = 2	$y_{211}$	$y_{ij}$	$y_{221}$	$y_{22}$	$y_{231}$	$y_{23}$	$\sum_{i=2}$
	$y_{212}$	$=$	$y_{222}$		$y_{232}$		
i = 3	$y_{311}$	$y_{31}$	$y_{321}$	$y_{32}$	$y_{331}$	$y_{33}$	$\sum_{i=3}$
	$y_{312}$		$y_{322}$		$y_{332}$		
$y_{j...}$	$\sum_{j=1}$		$\sum_{j=2}$		$\sum_{j=3}$		$y_{...} = \sum y_i$ atau $\sum y_i$

Model statistik linearnya dapat dijelaskan sebagai:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (2.3)$$

Dimana:

$$i = 1, 2, \dots, a$$

$$j = 1, 2, \dots, b$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

a = jumlah variasi dari faktor A = 3

b = jumlah variasi dari faktor B = 3

n = jumlah replikasi untuk setiap kombinasi

N = jumlah total observasi

$y_{ijk}$  = nilai observasi ke-k pada level I dari faktor A dan level j dari faktor B

$\mu$  = efek keseluruhan (overall mean effect)

$\tau_i$  = efek dari level ke-i pada faktor A

$\beta_j$  = efek dari level ke-j pada faktor B

$(\tau\beta)_{ij}$  = efek dari interaksi antara  $\tau_i$  dan  $\beta_j$

$\varepsilon_{ijk}$  = komponen error

Dengan efek variasi total dalam observasi yakni

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_E \quad (2.4)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (2.5)$$

$$= (y_{111}^2 + y_{112}^2 + \dots + y_{331}^2 + y_{332}^2) - \frac{(\sum_{i=1} + \sum_{i=2} + \sum_{i=3})^2}{3.3.2}$$

$$SS_A = \frac{1}{b.n} \sum_{i=1}^a y_i^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (2.6)$$

$$= \frac{1}{3.2} (\sum_{i=1}^2 + \sum_{i=2}^2 + \sum_{i=3}^2) - \frac{(\sum_{i=1} + \sum_{i=2} + \sum_{i=3})^2}{3.3.2}$$

$$SS_B = \frac{1}{a.n} \sum_{j=1}^b y_j^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} \quad (2.7)$$

$$= \frac{1}{3.2} (\sum_{j=1}^2 + \sum_{j=2}^2 + \sum_{j=3}^2) - \frac{(\sum_{i=1} + \sum_{i=2} + \sum_{i=3})^2}{3.3.2}$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn} - SS_A - SS_B \quad (2.8)$$

$$= (y_{11}^2 + y_{12}^2 + \dots + y_{32}^2 + y_{33}^2) - \frac{(\sum_{i=1} + \sum_{i=2} + \sum_{i=3})^2}{3.3.2} - SS_A - SS_B$$

$$SS_E = SS_T - (SS_A + SS_B + SS_{AB}) \quad (2.9)$$

Dimana:

$SS_T$  = *Sum of square total* (jumlah kuadrat total), variasi total dengan derajat kebebasan  $N-1$

$SS_A$  = *Sum of square A* (jumlah kuadrat dalam faktor A), variasi faktor A dengan derajat kebebasan  $a-1$

$SS_B$  = *Sum of square B* (jumlah kuadrat dalam faktor B), variasi faktor B dengan derajat kebebasan  $b-1$

$SS_{AB}$  = *Sum of square AB* (jumlah kuadrat dalam interaksi faktor A dan B), variasi terkait interaksi antara faktor A dan B dengan derajat kebebasan  $(a-1)(b-1)$

$SS_E$  = variasi error dengan derajat kebebasan  $ab(n-1)$

### 2.6.2.2. ANOVA

Kinerja suatu penelitian tentunya dipengaruhi oleh banyak variabel, yang memiliki tingkat pengaruh yang berbeda pada penelitian (signifikansi). Untuk meneliti satu persatu variabel tentunya membutuhkan waktu yang lama, penggunaan material atau bahan yang banyak, sumber daya manusia yang banyak, peralatan yang mahal, serta produk hasil penelitian yang mungkin tidak dapat dihasilkan secara maksimal dan menjadi terbuang, dengan DOE hal-hal tersebut dapat dihindari. metode statistik yang baik digunakan untuk menganalisis signifikansi dari lebih dari 3 variabel adalah metode ANOVA.

Analisis varians (*analysis of variance*, ANOVA) adalah suatu metode analisis statistika yang termasuk ke dalam cabang statistika inferensia. Analisis varians (ANOVA) adalah sebuah koleksi model-model statistik, dan prosedur yang terkait, di mana varians yang diamati ini dibagi menjadi komponen-

komponen yang berbeda karena variabel penjelas. ANOVA adalah teknik perhitungan yang memungkinkan secara kuantitatif mengestimasi kontribusi dari setiap parameter pada semua pengukuran respon. ANOVA yang digunakan berguna untuk membantu mengidentifikasi kontribusi parameter.

Dalam literatur Indonesia metode ini dikenal dengan berbagai nama lain, seperti analisis ragam, sidik ragam, dan analisis variansi. Ia merupakan pengembangan dari masalah Behrens-Fisher, sehingga uji-F juga dipakai dalam pengambilan keputusan. Analisis variansi pertama kali diperkenalkan oleh Sir Ronald Fisher, bapak statistika modern. Dalam praktek, analisis variansi dapat merupakan uji hipotesis (lebih sering dipakai) maupun pendugaan (*estimation*, khususnya di bidang genetika terapan).

Secara umum, analisis variansi menguji dua variansi (atau ragam) berdasarkan hipotesis nol bahwa kedua variansi itu sama. Variansi pertama adalah variansi antarcontoh (*among samples*) dan variansi kedua adalah variansi di dalam masing-masing contoh (*within samples*). Dengan ide semacam ini, analisis variansi dengan dua contoh akan memberikan hasil yang sama dengan uji-t untuk dua rerata (*mean*).

Agar hasil valid (dalam penafsiran hasilnya), analisis variansi memiliki 4 syarat yang harus dipenuhi dalam perancangan percobaan:

1. Data terdistribusi normal, karena pengujiannya menggunakan uji F
2. Variansi atau ragamnya homogen, dikenal sebagai homoskedastisitas, karena hanya digunakan satu penduga (*estimate*) untuk variansi dalam contoh
3. Masing-masing contoh saling asing (*independent*), yang harus dapat diatur dengan perancangan percobaan yang tepat
4. Komponen-komponen dalam modelnya bersifat aditif.

ANOVA relatif mudah dimodifikasi dan dapat dikembangkan untuk berbagai bentuk percobaan yang lebih rumit. Selain itu, analisis ini juga masih memiliki keterkaitan dengan analisis regresi. Akibatnya, penggunaannya sangat luas di berbagai bidang, mulai dari eksperimen laboratorium hingga eksperimen periklanan, psikologi, dan kemasyarakatan.



Dasar pengujian ANOVA ialah dengan menggunakan uji t dan uji F. Uji t digunakan untuk menguji kebebasan parameter secara individual. Sedangkan uji F digunakan untuk membandingkan antara komponen-komponen dari total deviasi. Dengan prinsip inilah signifikansi statistik diuji. Yakni dengan membandingkan uji F statistik parameter-parameter yang ada. Berikut ini merupakan penjelasan dasar dari kedua pengujian tersebut:

a. Uji t

Uji t pada dasarnya menunjukkan seberapa jauh pengaruh suatu variabel bebas secara individual dalam menerangkan variasi variabel terikat.

Untuk menguji hipotesis tersebut digunakan statistik t yang dihitung dengan cara sebagai berikut:

$$t = b/S_b \quad (2.10)$$

di mana  $b$  adalah nilai parameter dan  $S_b$  adalah standar error dari  $b$ . Standar error dari masing-masing parameter dihitung dari akar varians masing-masing. Untuk mengetahui kebenaran hipotesis digunakan kriteria bila  $t_{hitung}$  lebih besar dari  $t_{tabel}$  maka hipotesis awal ( $H_0$ ) ditolak dan hipotesis alternative ( $H_1$ ) diterima, artinya ada pengaruh antara variabel bebas terhadap variabel terikat dengan level signifikansi ( $\alpha$ ) yang menyatakan error yang diizinkan digunakan sebesar 1 %, 5%, atau 10%. Begitu pula sebaliknya bila  $t_{hitung}$  lebih kecil dari  $t_{tabel}$  maka menerima  $H_0$  dan menolak  $H_1$  artinya tidak ada pengaruh antara variabel bebas terhadap variabel terikat.

b. Uji F

Untuk menguji kebenaran hipotesis alternatif, yaitu bahwa model pilihan peneliti sudah tepat, untuk sistem  $3^2$  faktorial, maka dilakukan uji F dengan prosedur berikut (Montgomery, 2005) :

Uji F untuk efek faktor A :

$$F = \frac{MS_A}{MS_E} \quad (2.11)$$

Uji F untuk efek faktor B :

$$F = \frac{MS_B}{MS_E} \quad (2.12)$$

Uji F untuk efek interaksi antara faktor A dan B :

$$F = \frac{MS_{AB}}{MS_E} \quad (2.13)$$

Dimana :

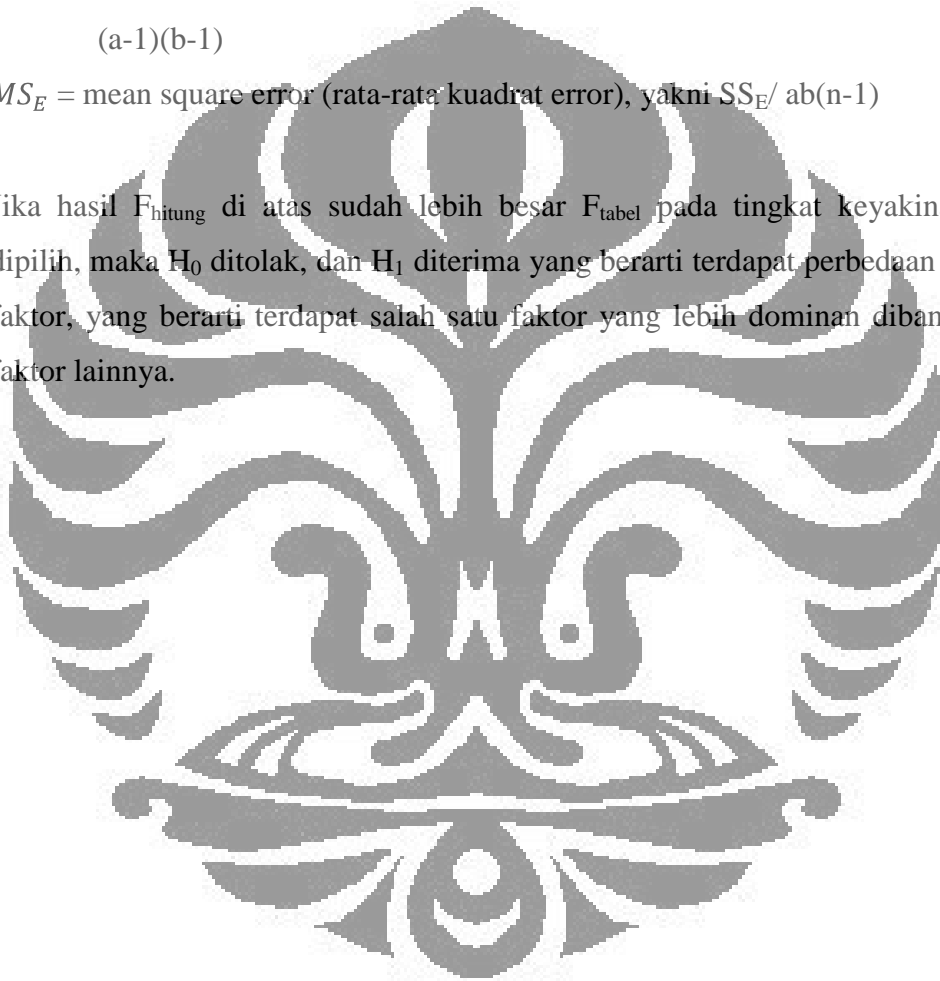
$MS_A$  = mean square A (rata-rata kuadrat faktor A), yakni  $SS_A / (a-1)$

$MS_B$  = mean square B (rata-rata kuadrat faktor B), yakni  $SS_B / (b-1)$

$MS_{AB}$  = mean square AB (rata-rata kuadrat interaksi faktor A dan B), yakni  $SS_{AB} / (a-1)(b-1)$

$MS_E$  = mean square error (rata-rata kuadrat error), yakni  $SS_E / ab(n-1)$

Jika hasil  $F_{hitung}$  di atas sudah lebih besar  $F_{tabel}$  pada tingkat keyakinan yang dipilih, maka  $H_0$  ditolak, dan  $H_1$  diterima yang berarti terdapat perbedaan diantara faktor, yang berarti terdapat salah satu faktor yang lebih dominan dibandingkan faktor lainnya.



## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

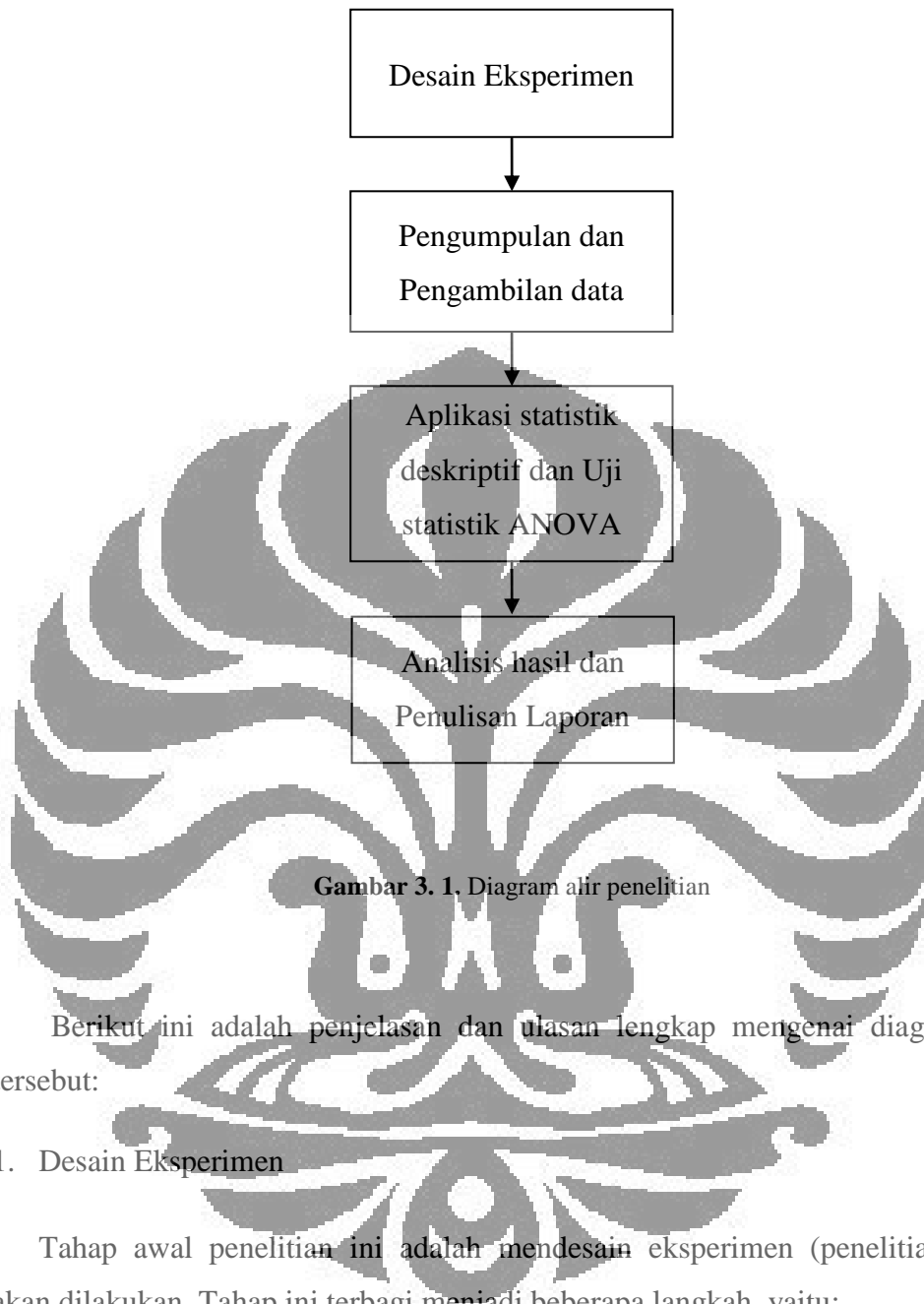
#### 3.1. Rancangan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui signifikansi pengaruh parameter terhadap kinerja proses oksidasi lanjut ozonasi/kavitasi (hidrodinamika dan ultrasonik) dalam menyisihkan fenol. Secara umum, penelitian ini dibagi menjadi empat bagian, yaitu :

1. Menganalisis pengaruh parameter konsentrasi polutan dalam limbah terhadap penyisihan fenol melalui proses ozonasi/kavitasi hidrodinamika (O/K).
2. Menganalisis pengaruh parameter konsentrasi polutan dalam limbah terhadap penyisihan fenol melalui proses ozonasi/kavitasi ultrasonik (O/S).
3. Menganalisis pengaruh parameter laju alir gas, konsentrasi polutan dalam limbah, dan intensitas ultrasonik terhadap penyisihan fenol melalui proses ozonasi/kavitasi hidrodinamika dan ultrasonik (O/K/S).
4. Menentukan kombinasi proses yang paling sensitif terhadap perubahan parameter konsentrasi awal.

#### 3.2. Prosedur Penelitian

Prosedur yang akan dilakukan dalam penelitian cukup sederhana. Penelitian ini dibagi menjadi empat tahap besar. Tahapan tersebut antara lain desain eksperimen, pengumpulan dan pengambilan data, pengujian secara statistik, dan analisis hasil. Diagram alirnya ialah sebagai berikut:

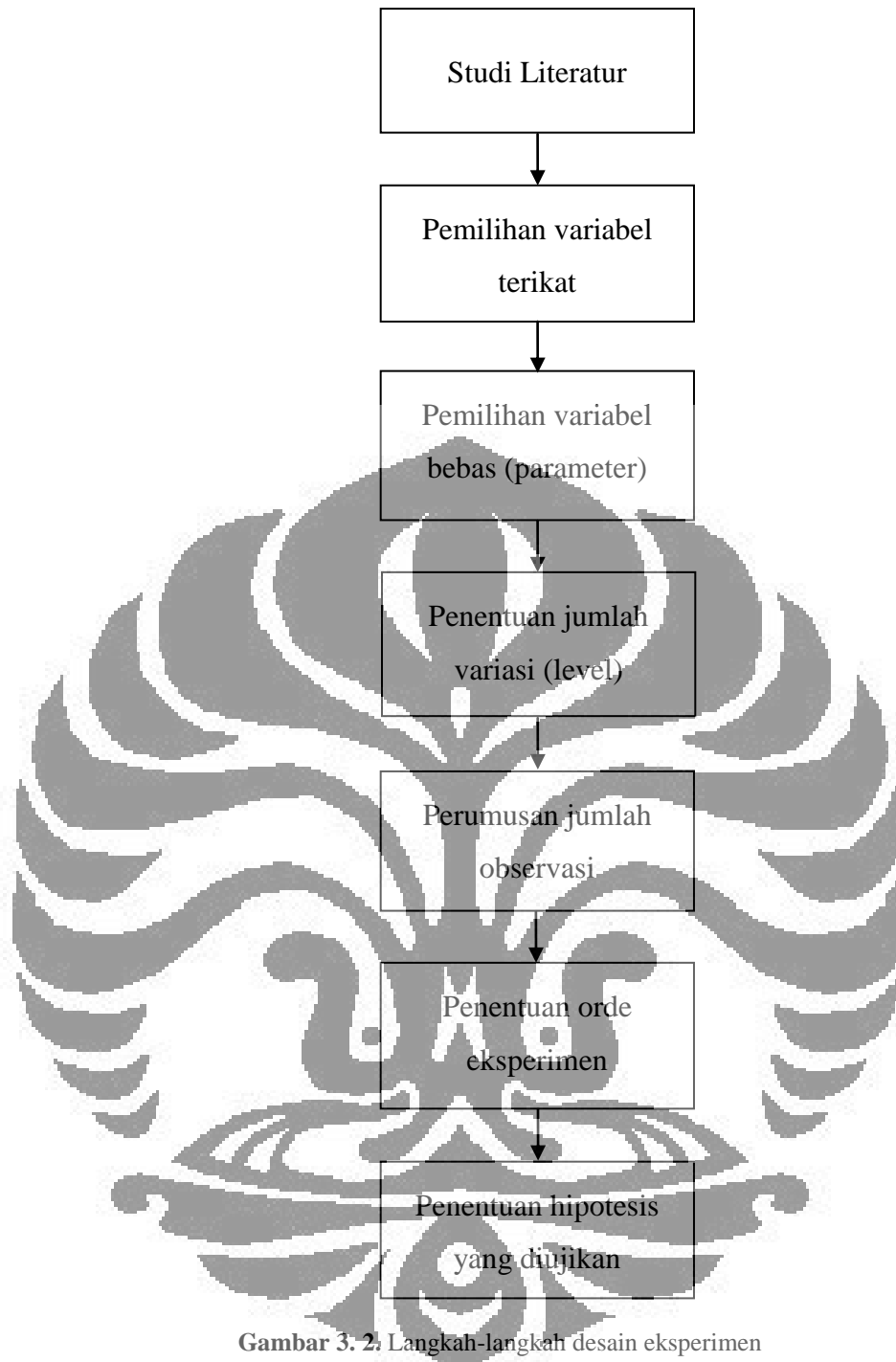


**Gambar 3. 1.** Diagram alir penelitian

Berikut ini adalah penjelasan dan ulasan lengkap mengenai diagram alir tersebut:

#### 1. Desain Eksperimen

Tahap awal penelitian ini adalah mendesain eksperimen (penelitian) yang akan dilakukan. Tahap ini terbagi menjadi beberapa langkah, yaitu:



Gambar 3. 2. Langkah-langkah desain eksperimen

- Studi literatur

Pada studi literatur, dilakukan studi berkaitan dengan materi-materi yang diperlukan dan berkenaan dengan penelitian ini. Literatur mengenai proses pengolahan limbah cair, khususnya pengolahan limbah fenoldikumpulkan. Kemudian, semua literatur yang berhubungan dengan penelitian dengan menggunakan proses gabungan ozonasi dan kavitasi (hidrodinamikaa dan

ultrasonik) dikelompokkan dan dirangkum. Sumber literatur utama adalah jurnal, khususnya jurnal internasional untuk teknologi separasi dan pemurnian. Dari studi literatur ini diharapkan diperoleh dasar yang dapat digunakan untuk memilih variabel terikat dan bebas yang digunakan dalam penelitian.

- Pemilihan variabel terikat

Untuk mengetahui keefektifan proses gabungan ozonasi dan kavitasi (hidrodinamika dan ultrasonik), dipilih variabel terikat yang akan diteliti responnya terhadap variasi variabel bebas. Dalam penelitian ini, variabel terikat yang dipilih ialah persentase penyisihan polutan fenol.

- Pemilihan variabel bebas

Pemilihan variabel bebas yang akan divariasikan didasarkan pada teori dasar yang didapatkan dari studi literatur, yakni berupa parameter yang berpengaruh terhadap proses gabungan ozonasi dan kavitasi (hidrodinamika dan ultrasonik). Parameter tersebut antara lain laju alir gas dan limbah cair, konsentrasi ozon dalam gas masukan, konsentrasi awal polutan dalam limbah cair, pH air, intensitas dan temperatur lingkungan.

Konsentrasi ozon dalam gas sangat bergantung pada laju alir gas, sehingga untuk mengetahui pengaruh dosis ozon pada suatu laju alir limbah cair yang sama, hanya diperlukan variasi laju alir gas.

Proses ozonasi sangat dipengaruhi oleh pH lingkungan. Pada kondisi asam, maka reaksi langsung dengan ozon akan lebih dominan. Sedangkan pada kondisi basa, reaksi tak langsung dengan radikal OH akan lebih dominan. Untuk melihat seberapa besar radikal OH yang dihasilkan oleh kavitasi, maka penelitian ini dilakukan pada kondisi asam, dimana dekomposisi normal ozon menjadi radikal OH dapat ditekan.

Temperatur lingkungan yang terus meningkat karena ultrasonik dapat menurunkan kinerja proses, sehingga temperatur harus terus dijaga tetap. Parameter yang dipilih untuk penelitian ini adalah laju alir gas, konsentrasi polutan dalam limbah cair, dan intensitas ultrasonik.

- Penentuan jumlah variasi (level)

Jumlah variasi minimum yang akan digunakan untuk tiap parameter agar dapat mengetahui pengaruhnya dalam proses ialah 3 variasi. Dengan level eksperimen 3, dan jumlah parameter 2 (intensitas ultrasonik dan konsentrasi awal fenol), maka desain faktorial ini disebut sebagai desain faktorial  $3^2$ .

- Perumusan jumlah observasi

Jumlah observasi yang diambil mewakili jumlah data minimum yang harus dianalisis. Untuk desain faktorial jumlah data minimum yang dibutuhkan adalah 9 data untuk tiap analisis yang harus ditambahkan dengan minimum 1 kali replikasi untuk meningkatkan keakuratan data dalam penelitian. Dalam penelitian ini akan digunakan 18 data.

## 2. Pengumpulan dan Pengambilan Data

Tahap kedua adalah pengumpulan data. Dalam penelitian ini, data yang digunakan seluruhnya merupakan data hasil penelitian penyisihan fenol dengan proses gabungan ozonasi-kavitasi ultrasonik, ozonasi-kavitasi, dan ozonasi-kavitasi ultrasonik-kavitasi milik tim peneliti pengolahan limbah cair fenolik di Laboratorium Intensifikasi Proses DTK FTUI.

Data-data ini nantinya akan diolah dengan uji signifikansi menggunakan metode statistik ANOVA untuk kemudian akan didapatkan hasil analisis dari penelitian.

## 3. Aplikasi Statistik Deskriptif dan Uji Statistik ANOVA

Tahap ketiga adalah mengaplikasikan statistik deskriptif dengan menyajikan data dalam bentuk diagram dan grafik untuk skema yang tidak memenuhi jumlah data minimum untuk diuji signifikansinya.

Dikarenakan jumlah replikasi yang dilakukan hanya satu kali, maka terdapat 2 data untuk tiap variasi kombinasi, sehingga data dapat diasumsikan homogen, dan terdistribusi secara normal, dan layak untuk dianalisis dengan ANOVA. Langkah penentuan hipotesis merupakan langkah awal dalam analisis ANOVA.

Hipotesis berupa hipotesis awal ( $H_0$ ) dan hipotesis alternatif ( $H_1$ ) yang akan dibuktikan yakni:

$H_0 : \mu_1 = \mu_2$  (tidak ada perbedaan mean, signifikansi setiap parameter adalah sama)

$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$  (terdapat perbedaan mean, terdapat perbedaan signifikansi parameter)

Uji signifikansi parameter terhadap persentase penyisihan polutan yang dilakukan dengan metode statistik ANOVA (*Analysis of Variance*) yang perhitungannya dibantu dengan teknik komputasi menggunakan perangkat lunak (*software*) statistika SPSS versi 17.0. Uji statistik ANOVA memanfaatkan uji F yang merupakan dasar pengujian pada analisis ANOVA program SPSS.

#### 4. Analisis Hasil dan Penulisan Laporan

Tahap akhir adalah penyusunan laporan. Tahap ini terdiri dari analisis dan pembahasan hasil penelitian yang kemudian disimpulkan keberhasilan penelitian ditinjau dari tujuan yang diinginkan.

Dari tahap pengujian dengan metode statistik ANOVA menggunakan bantuan *software* statistika SPSS, akan didapatkan hasil berupa signifikansi tiap parameter terhadap persentase penyisihan polutan. Dari analisis ini akan diketahui apakah tujuan penelitian tercapai atau tidak.

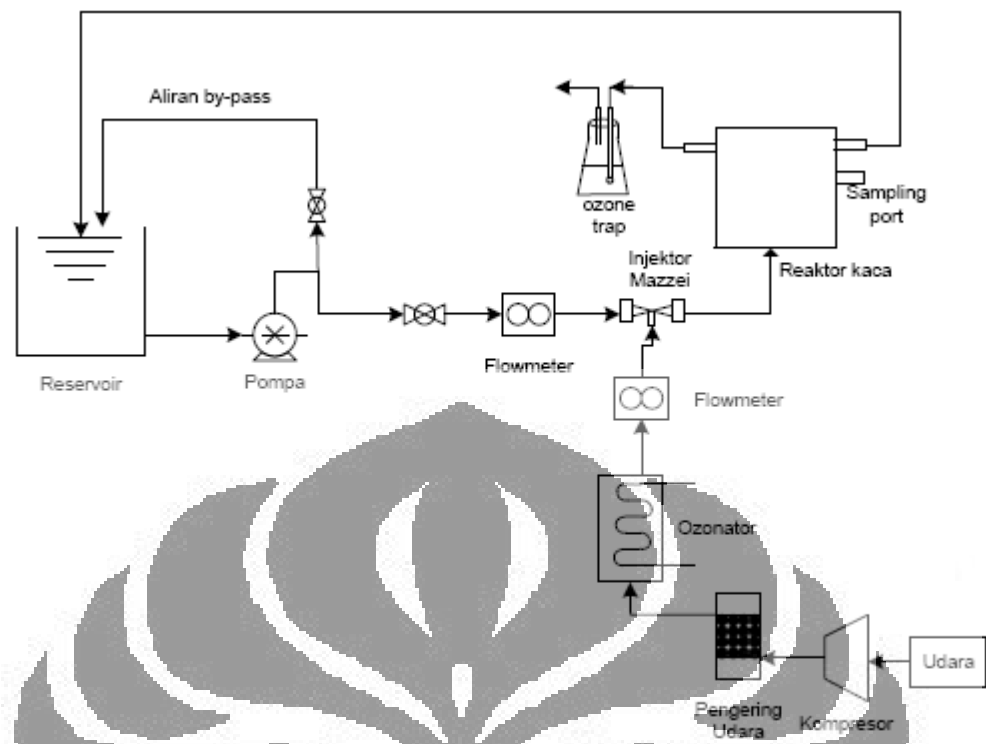
### 3.3. Alat dan Bahan

Berikut ini adalah alat dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian:

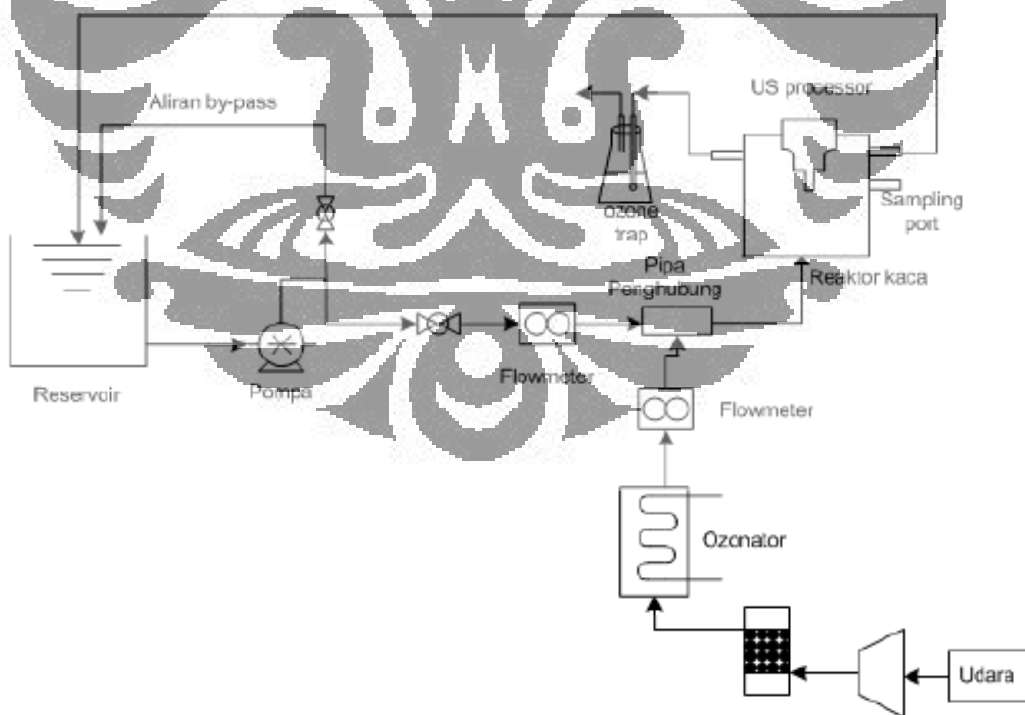
- Alat yang digunakan dalam penelitian ini untuk menguji signifikansi parameter adalah:  
Software statistika SPSS 17.0, dengan metode ANOVA.
- Bahan yang akan digunakan sebagai input parameter adalah:  
Data persentase penyisihan fenol untuk tiap variasi.

Berikut ini adalah skema alat yang digunakan dalam sistem O/K/S, O/K, dan O/S yang terdapat di Laboratorium Intensifikasi Proses DTK FTUI:

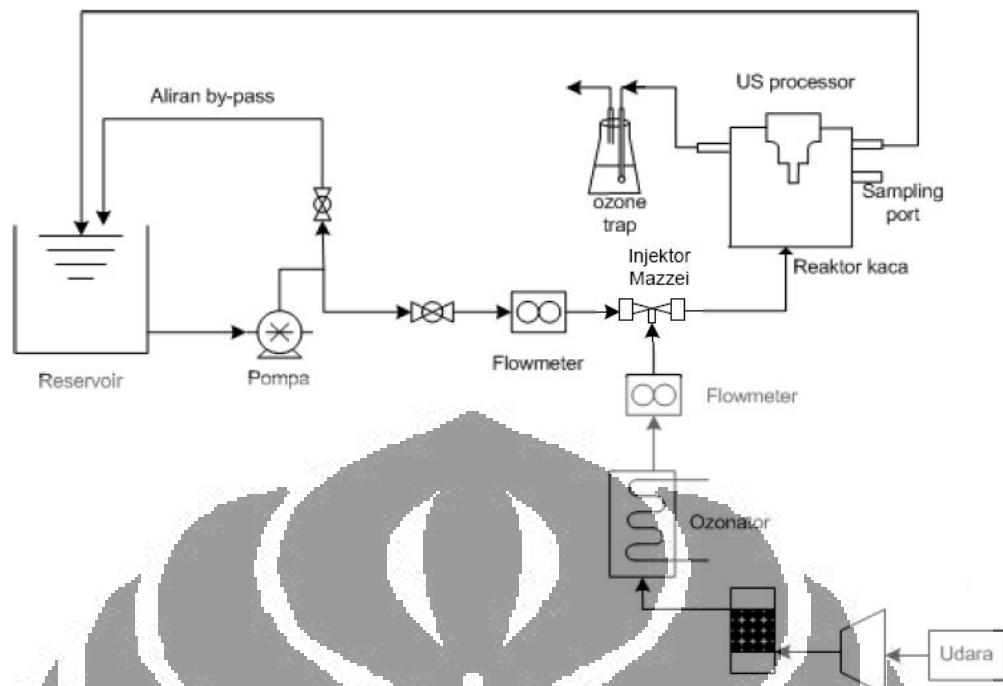




**Gambar 3. 3.** Skema alat pada sistem ozonasi-kavitasi hidrodinamika (O/K)



**Gambar 3. 4.** Skema alat pada sistem ozonasi-kavitasi ultrasonik (O/S)



Gambar 3. 5. Skema alat pada sistem ozonasi-kavitasi hidrodinamika dan ultrasonik (O/K/S)

### 3.4. Pengolahan Data dengan SPSS

Untuk memperjelas aplikasi statistik deskriptif dan uji ANOVA dalam SPSS, berikut ini akan ditampilkan contoh pembuatan profil konsentrasi fenol dan pengerjaan uji signifikansi menggunakan metode ANOVA dengan bantuan SPSS 17.0 :

#### 3.4.1. Aplikasi statistik deskriptif

Langkah pertama adalah meng-input variabel yang akan diamati pada *tab* 'variabel view', misalnya waktu ( $t$ ), konsentrasi awal fenol ( $C_0$ ), dan perubahan konsentrasi sepanjang waktu ( $C_{per\_C_0}$ ).

	Name	Type	Width	Decimals	Label	Values	Missing	Columns	Align	Measure
1	t	Numeric	8	2		None	None	8	Right	Scale
2	$C_0$	Numeric	8	2		None	None	8	Right	Scale
3	$C_{per\_C_0}$	Numeric	8	5		None	None	8	Right	Scale

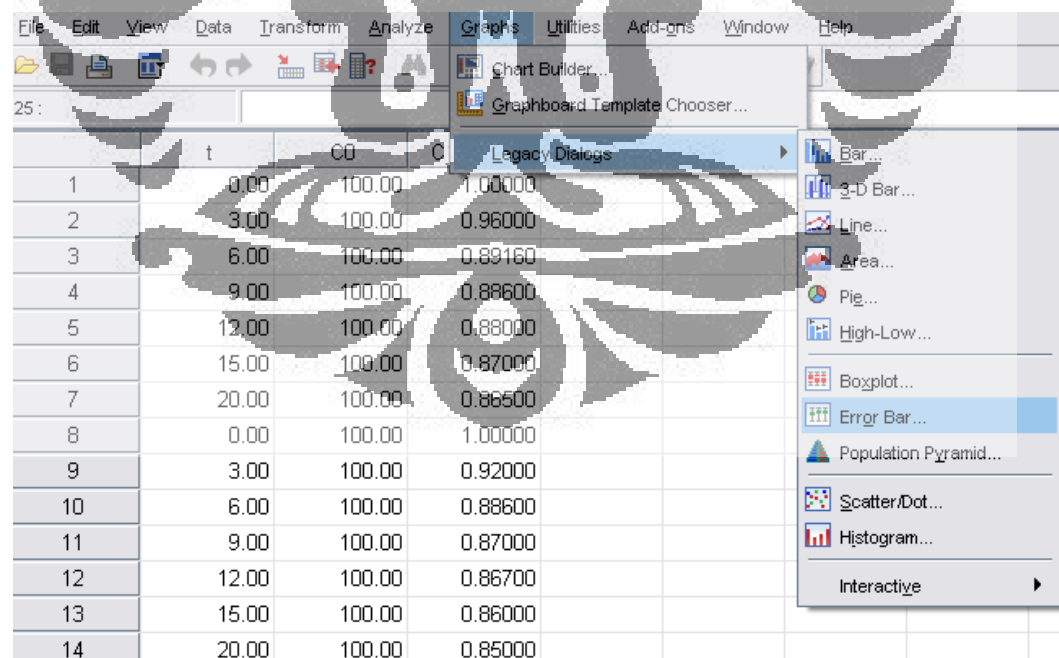
Gambar 3. 6. Membuat variabel pada SPSS 17.0

Selanjutnya, masukkan data perubahan konsentrasi fenol selama 20 menit untuk membuat profil konsentrasi fenol terhadap waktu pada tab 'data view'.

t	CO	C_per_CO
0.00	100.00	1.00000
3.00	100.00	0.96000
6.00	100.00	0.89160
9.00	100.00	0.88600
12.00	100.00	0.88000
15.00	100.00	0.87000
20.00	100.00	0.86500
0.00	100.00	1.00000
3.00	100.00	0.92000
6.00	100.00	0.88600
9.00	100.00	0.87000
12.00	100.00	0.86700
15.00	100.00	0.86000
20.00	100.00	0.85000

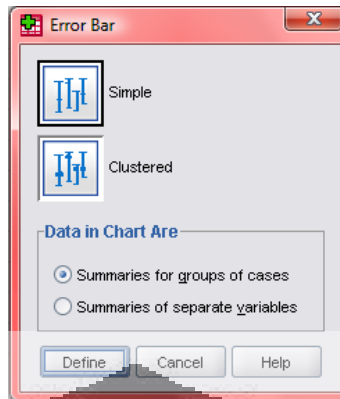
Gambar 3. 7. Memasukkan data pada SPSS 17.0

Untuk membuat grafik, klik *Graph/Legacy Dialogs/Error Bar*



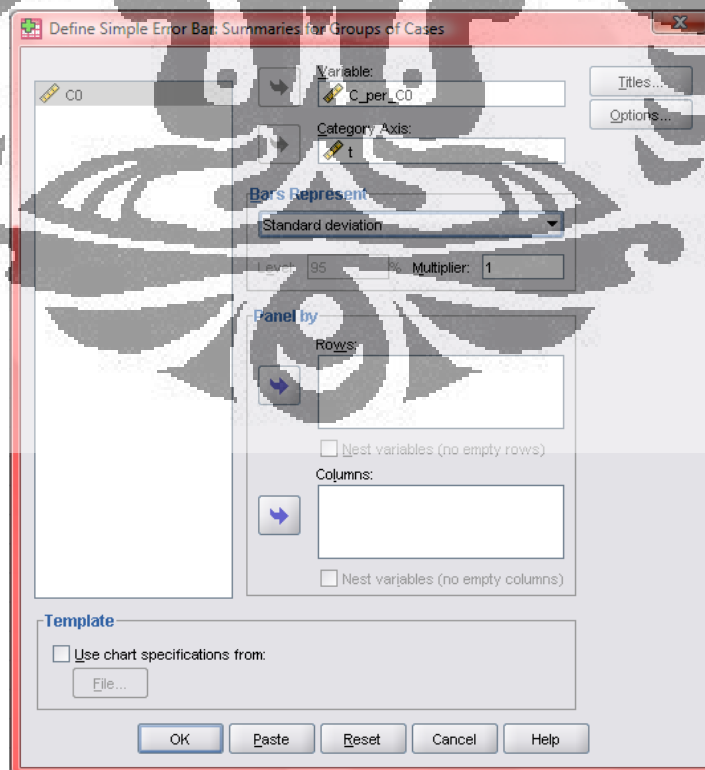
Gambar 3. 8. Fasilitas Error Bar sebagai pengolah data

Akan keluar kotak dialog seperti dibawah ini.



**Gambar 3. 9.** Kotak dialog Error Bar

Dengan fasilitas 'Error Bar', SPSS 17.0 dapat mengolah data yang dimasukkan, dengan membuat grafik nilai rata-rata data dalam range standar deviasi. Masukkan variabel yang akan dibuat grafik, yakni perubahan konsentrasi fenol sepanjang waktu, dimana 'variabel' akan menjadi sumbu Y, dan 'category axis' akan menjadi sumbu X. Ubah 'multiplier' sesuai dengan duplikasi yang dilakukan. Karena pada penelitian ini dilakukan 1 kali duplikasi, maka 'multiplier' diisi dengan nilai 1.



**Gambar 3. 10.** Kotak dialog pendefinisian grafik

Untuk membuat grafik yang sama dengan variasi konsentrasi awal ( $C_0$ ), masukkan variabel  $C_0$  pada table sebelah kiri ke dalam 'panel by: rows'.

Hasil grafik akan muncul pada jendela baru 'Output: SPSS statistik viewer'.

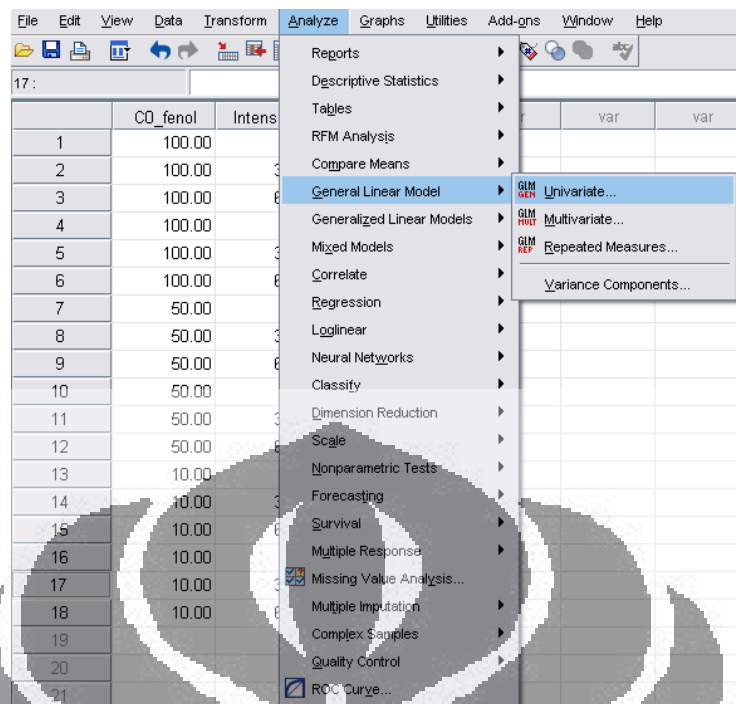
### 3.4.2. Uji signifikansi ANOVA

Dengan langkah yang sama, masukkan seperangkat dataset (18 data minimum) yang akan diuji signifikansinya. Data-data tersebut mewakili parameter intensitas ultrasonik (Intensitas) dan konsentrasi awal fenol ( $C_0$ \_fenol) pada skema proses ozonasi-kavitasi hidrodinamika (O/K), dan skema proses ozonasi-kavitasi hidrodinamika dan ultrasonik (O/K/S) yang menghasilkan persentase penyisihan (Persen\_penyisihan). Data-data tersebut dapat terlihat pada tampilan dibawah ini:

$C_0$ _fenol	Intensitas	Persen_penyisihan
100.00	0.00	13.48
100.00	30.00	18.00
100.00	60.00	24.00
100.00	0.00	14.76
100.00	30.00	19.00
100.00	60.00	26.26
50.00	0.00	17.15
50.00	30.00	22.54
50.00	60.00	24.79
50.00	0.00	19.62
50.00	30.00	22.00
50.00	60.00	25.86
10.00	0.00	20.43
10.00	30.00	24.10
10.00	60.00	41.23
10.00	0.00	22.12
10.00	30.00	24.50
10.00	60.00	33.83

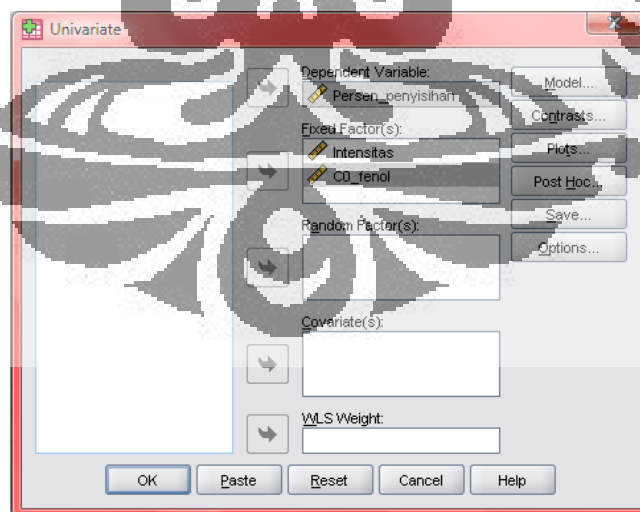
Gambar 3. 11. Dataset uji signifikansi

Langkah selanjutnya adalah menguji signifikansinya dengan ANOVA. Yakni dengan prosedur GLM (*General Linear Model*) yang dapat membentuk analisis variansi untuk desain-desain faktorial. Sebuah desain faktorial dapat digunakan untuk menguji apakah gabungan dua atau lebih parameter mempengaruhi variabel terikatnya. Berikut ini adalah cara untuk memunculkan GLM:



Gambar 3. 12. Uji signifikansi dengan ANOVA

Maka akan terbuka kotak dialog 'Univariate'. Pada kotak 'dependent variabel' (variabel terikat) masukkan persentase penyisihan fenol (Persen\_penyisihan), dan masukkan parameter yang akan diuji signifikansinya terhadap variabel terikat, yakni intensitas ultrasonik (Intensitas) dan konsentrasi awal fenol (CO\_fenol).



Gambar 3. 13. Kotak dialog Univariate ANOVA

Kemudian akan muncul hasil dari perhitungan ANOVA pada jendela baru 'Output: SPSS statistik viewer'.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis proses penyisihan fenol dengan proses oksidasi lanjut ozonasi-kavitasi (hidrodinamik dan ultrasonik) serta pengaruh parameter-parameter dalam proses. Kinerja proses dapat terlihat dari persentase penyisihan fenol, yakni dengan membandingkan konsentrasi fenol yang tersisih selama 20 menit dengan konsentrasi awal fenol. Sistem proses yang akan diteliti meliputi proses ozonasi-kavitasi hidrodinamik (O/K), proses ozonasi/kavitasi ultrasonik (O/S), dan proses ozonasi-kavitasi hidrodinamik dan ultrasonik (O/K/S). Parameter yang akan divariasikan antara lain laju alir gas ( $Q_G$ ) sebesar 150 L/jam, 200 L/jam, dan 250 L/jam, konsentrasi awal fenol ( $C_{p0}$ ) sebesar 100 ppm, 50 ppm, dan 10 ppm, serta intensitas ultrasonik ( $I$ ) sebesar 0%, 30%, dan 60%.

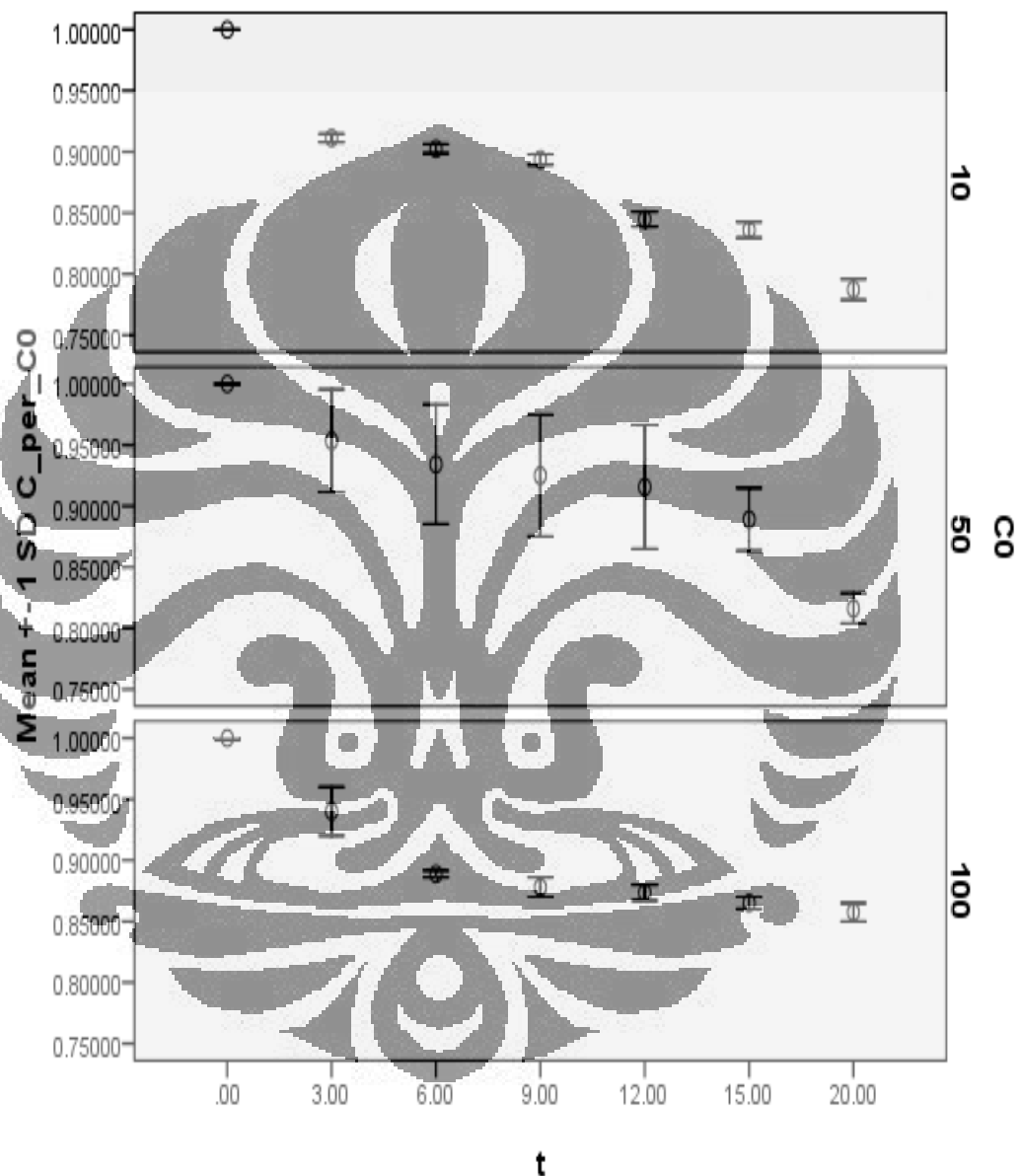
Pada penelitian ini, pH diatur sedemikian rupa sehingga diperoleh kondisi asam ( $pH \pm 3$ ). Pada kondisi asam, reaksi langsung oleh ozon lebih dominan dibandingkan radikal  $\cdot OH$ , sehingga ozon akan mengoksidasi langsung senyawa fenol. Pada kondisi asam, dekomposisi ozon menjadi lebih lambat, sehingga radikal  $\cdot OH$  yang timbul dapat seluruhnya dianggap sebagai efek dari kavitasi. Laju alir air ( $Q_L$ ) yang digunakan adalah sebesar 2 L/menit yang dipilih berdasarkan hasil penelitian sebelumnya. Laju alir ini memberikan hasil perpindahan massa paling optimal (Tjahjadi, 2010). Pada laju alir air yang lebih kecil dikhawatirkan perpindahan massa tidak berlangsung dengan baik, sedang pada laju alir air yang lebih besar waktu tinggal air dalam reaktor akan menjadi lebih singkat sehingga perpindahan massa juga tidak berlangsung secara optimal.

### 4.1. Proses Ozonasi/Kavitasi Hidrodinamik (O/K)

Pada sistem proses ozonasi-kavitasi hidrodinamik (O/K), akan diamati pengaruh perubahan konsentrasi awal ( $C_{p0}$ ) yakni sebesar 100 ppm, 50 ppm, dan 10 ppm, pada laju alir gas 200 L/jam tanpa diberikan ultrasonik (intensitas 0%). Laju alir gas 200 L/jam dipilih berdasarkan hasil penelitian karena membuat profil

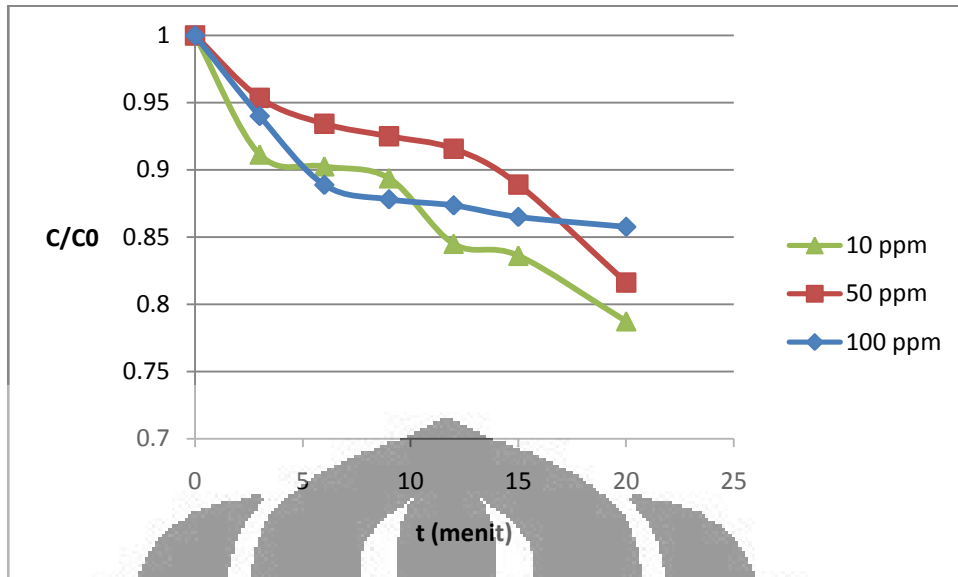
air pada reaktor cenderung stabil, dan dapat mengakomodasi perpindahan massa ozon paling optimal saat dikontakkan dengan air.

Berikut ini adalah profil perubahan konsentrasi fenol dengan variasi konsentrasi awal ( $C_{p0}$ ) yang telah diolah secara statistik:

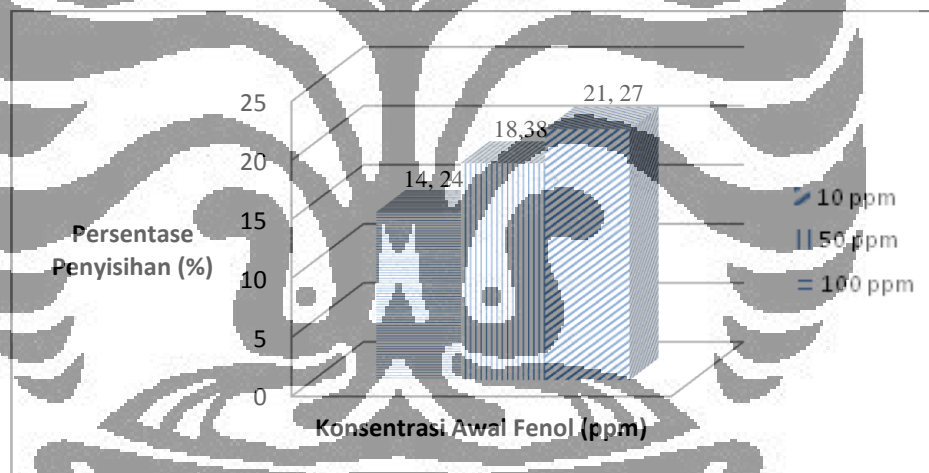


**Gambar 4. 1.** Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/K dengan variasi konsentrasi dengan deviasi standar  
(Sumber: Permadi, 2010)





Gambar 4. 2. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/K dengan variasi konsentrasi  
(Sumber: Permadi, 2010)



Gambar 4. 3. Persentase penyisihan fenol pada skema O/K dengan variasi konsentrasi  
(Sumber: Permadi, 2010)

Seluruh data (termasuk replikasi) diolah secara statistik untuk mendapatkan nilai rata-rata (*mean*) dan mengetahui deviasi yang terdapat pada data. Dalam Gambar 4.1, mean diwakili oleh bulatan di tengah garis, dan deviasi digambarkan sebagai garis atas dan bawah garis. Deviasi merupakan besarnya penyimpangan nilai data terhadap mean dari data tersebut, seperti yang terlihat pada Gambar 4.1. Profil tersebut memberikan gambaran bahwa mayoritas data memiliki suatu deviasi standar dari nilai rata-rata (*mean*)-nya yang tidak dapat

diabaikan untuk menunjukkan validitas data. Suatu data terbukti valid (secara statistik) saat data tersebut berada dalam suatu rentang (*range*) yang memperhitungkan deviasi standar dari rata-rata data tersebut (Harinaldi, 2005). Pada Gambar 4.1, terlihat bahwa terjadi deviasi (rata-rata) yang lebih besar pada konsentrasi awal fenol 50 ppm. Standar deviasi yang besar dapat terjadi karena beberapa hal, antara lain karena perbedaan waktu pengambilan sampel dan waktu analisis sampel yang cukup lama. Untuk keseluruhan data, semakin kecil nilai standar deviasinya, berarti data tersebut semakin akurat, karena berada pada rentang yang sempit.

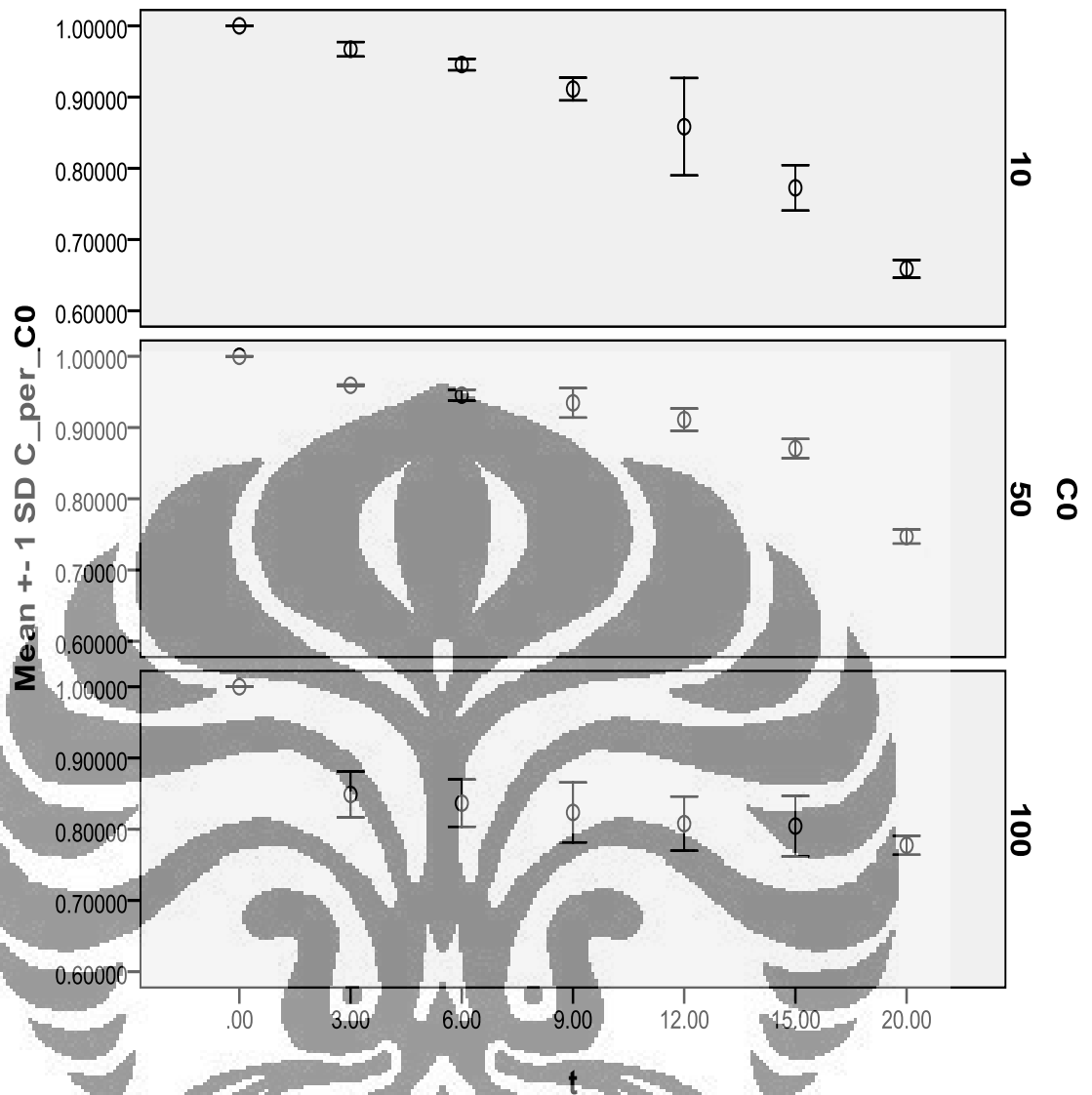
Dari profil pada Gambar 4.1 dan 4.2, terlihat bahwa skema ozonasi-kavitasi hidrodinamika, dengan laju alir gas tetap sebesar 200 L/jam, semakin meningkat dengan penurunan konsentrasi awal. Hal tersebut ditandai oleh profil penyisihan yang paling curam (paling banyak menyisihkan fenol). Hal ini mengindikasikan bahwa terjadi perbedaan laju penyisihan pada variasi konsentrasi, karena dengan jumlah ozon yang masuk ke dalam reaktor sama pada setiap konsentrasi awal fenol membuat fenol dengan konsentrasi yang lebih rendah lebih banyak terpapar ozon atau radikal OH.

Persentase penyisihan fenol paling besar terjadi pada konsentrasi 10 ppm yakni sebesar  $21,27 \pm 5 \times 10^{-5} \%$ . Sedangkan persentase penyisihan fenol yang terjadi pada konsentrasi awal 50 ppm sebesar  $18,38 \pm 2,87 \times 10^{-3} \%$ , dan persentase penyisihan fenol terkecil adalah pada konsentrasi awal 100 ppm yakni  $14,24 \pm 1,7 \times 10^{-4} \%$ .

#### 4.2. Proses Ozonasi/Kavitasi Ultrasonik (O/S)

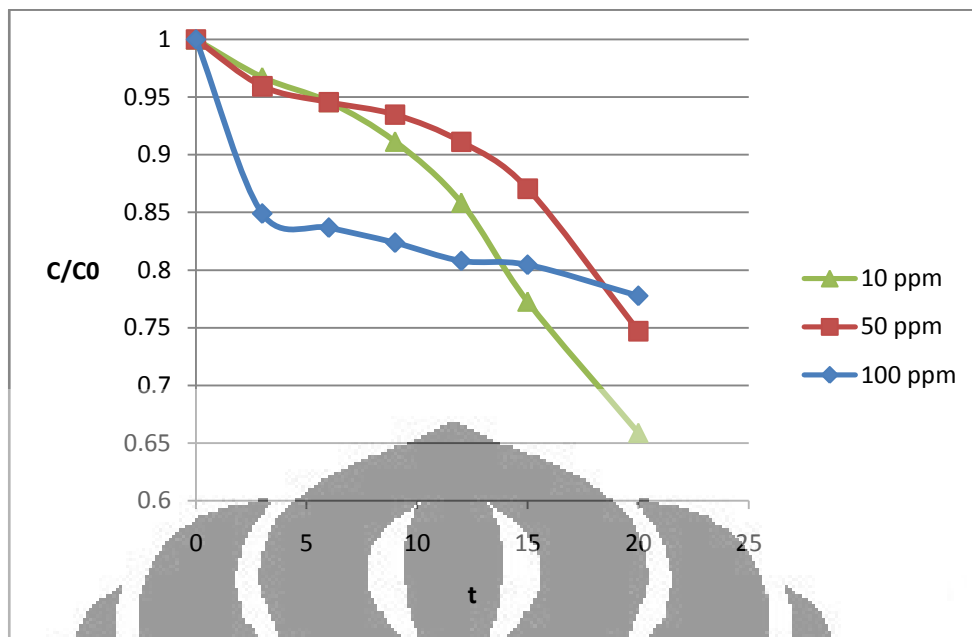
Pada sistem proses ozonasi/kavitasi ultrasonik (O/S), akan diamati pengaruh perubahan konsentrasi awal ( $C_{p0}$ ) yakni sebesar 100 ppm, 50 ppm, dan 10 ppm, pada laju alir gas 200 L/jam dengan intensitas ultrasonik 60%. Laju alir gas 200 L/jam dipilih berdasarkan hasil penelitian karena membuat profil air pada reaktor cenderung stabil, dan dapat mengakomodasi perpindahan massa ozon paling optimal saat dikontakkan dengan air.

Berikut ini adalah profil perubahan konsentrasi fenol dengan variasi konsentrasi awal ( $C_{p0}$ ) yang telah diolah secara statistik:

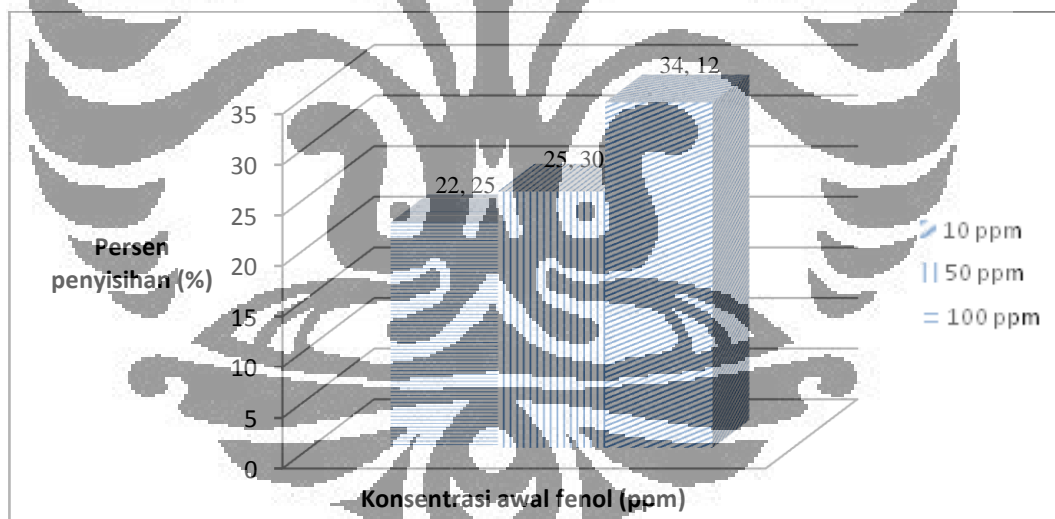


Gambar 4. 4. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/S dengan variasi konsentrasi dengan deviasi standar

(Sumber: Permadi, 2010)



Gambar 4. 5. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/S dengan variasi konsentrasi  
(Sumber: Permadi, 2010)



Gambar 4. 6. Persentase penyisihan fenol pada skema O/S dengan variasi konsentrasi  
(Sumber: Permadi, 2010)

Pada Gambar 4.4, terlihat bahwa terjadi deviasi (rata-rata) yang lebih besar pada konsentrasi awal fenol 100 ppm. Besarnya deviasi tersebut juga dapat terjadi karena hal-hal yang telah disebutkan sebelumnya.

Dari profil pada Gambar 4.4 dan 4.5, terlihat bahwa skema ozonasi-kavitasi ultrasonik, dengan laju alir gas tetap sebesar 200 L/jam, menunjukkan

hasil yang sama dengan skema O/K pada penjelasan sebelumnya. Semakin kecil konsentrasi awal fenol, akan meningkatkan penyisihan yang terjadi karena laju reaksi penyisihan semakin cepat, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Karena dengan jumlah ozon yang masuk ke dalam reaktor sama pada setiap konsentrasi awal fenol membuat fenol dengan konsentrasi yang lebih rendah lebih banyak terpapar ozon atau radikal OH

Pada Gambar 4.6, terlihat bahwa persentase penyisihan fenol paling besar terjadi pada konsentrasi 10 ppm yakni sebesar  $34,12 \pm 8,9 \times 10^{-4}$  %. Sedangkan persentase penyisihan fenol yang terjadi pada konsentrasi awal 50 ppm sebesar  $25,30 \pm 1,4 \times 10^{-4}$  %, dan persentase penyisihan fenol terkecil adalah pada konsentrasi awal 100 ppm yakni  $22,25 \pm 1,05 \times 10^{-3}$  %.

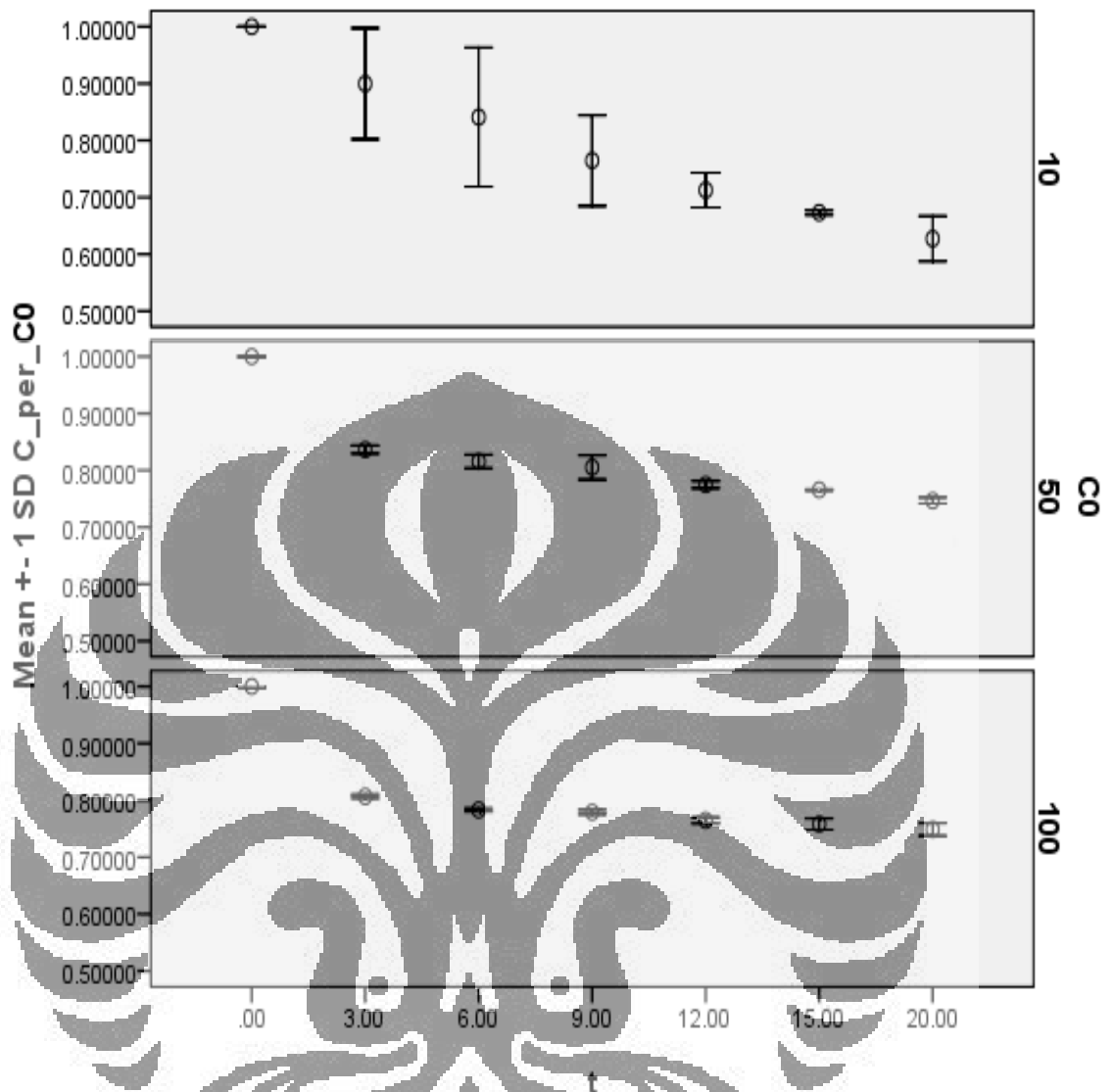
#### 4.3. Proses Ozonasi/Kavitasi Hidrodinamik dan Ultrasonik (O/K/S)

Pada sistem proses ozonasi/kavitasi hidrodinamik dan ultrasonik (O/K/S), akan diamati pengaruh perubahan konsentrasi awal ( $C_{p0}$ ), intensitas ultrasonik, dan laju alir, sebagai berikut:

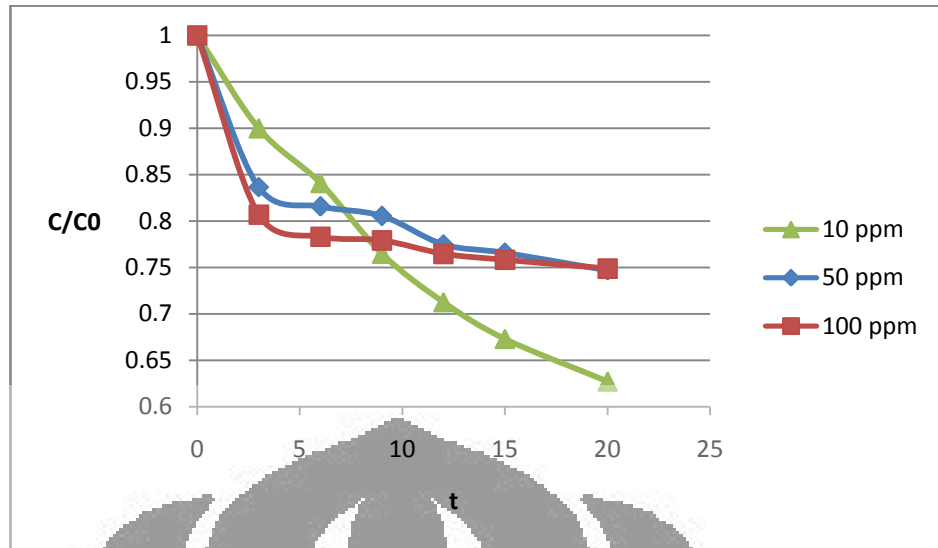
##### 4.3.1. Variasi konsentrasi awal ( $C_{p0}$ )

Konsentrasi awal ( $C_{p0}$ ) yang akan divariasikan antara lain 100 ppm, 50 ppm, dan 10 ppm, pada laju alir gas 200 L/jam dengan intensitas ultrasonik 60%. Laju alir gas 200 L/jam dipilih berdasarkan hasil penelitian karena membuat profil air pada reaktor cenderung stabil, dan dapat mengakomodasi perpindahan massa ozon paling optimal saat dikontakkan dengan air.

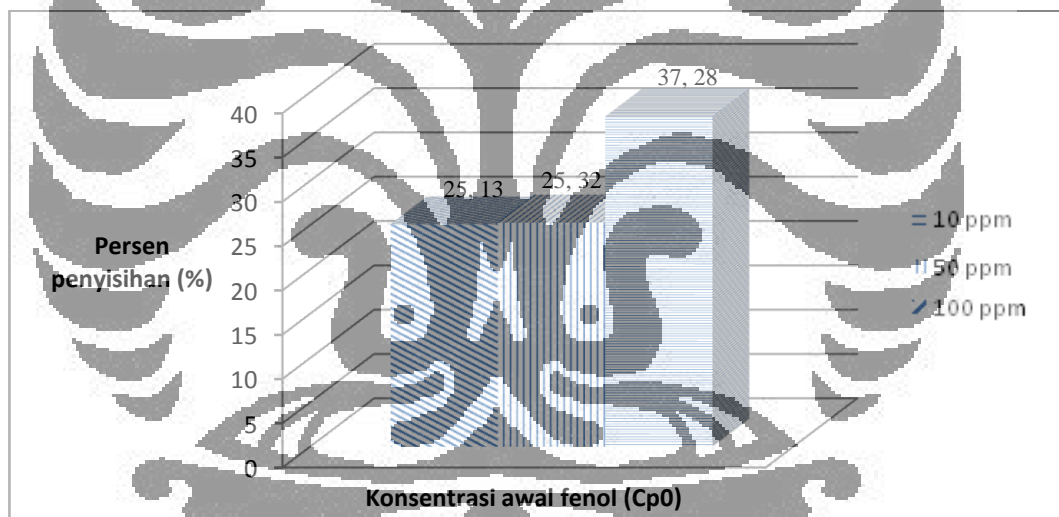
Berikut ini adalah data variasi konsentrasi awal ( $C_{p0}$ ) yang telah diolah secara statistik:



Gambar 4. 7. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/K/S pada variasi konsentrasi dengan deviasi standar (Sumber: Permadi, 2010)



Gambar 4. 8. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/K/S pada variasi konsentrasi  
(Sumber: Permadi, 2010)



Gambar 4. 9. Persentase penyisihan fenol pada skema O/K/S dengan variasi konsentrasi  
(Sumber: Permadi, 2010)

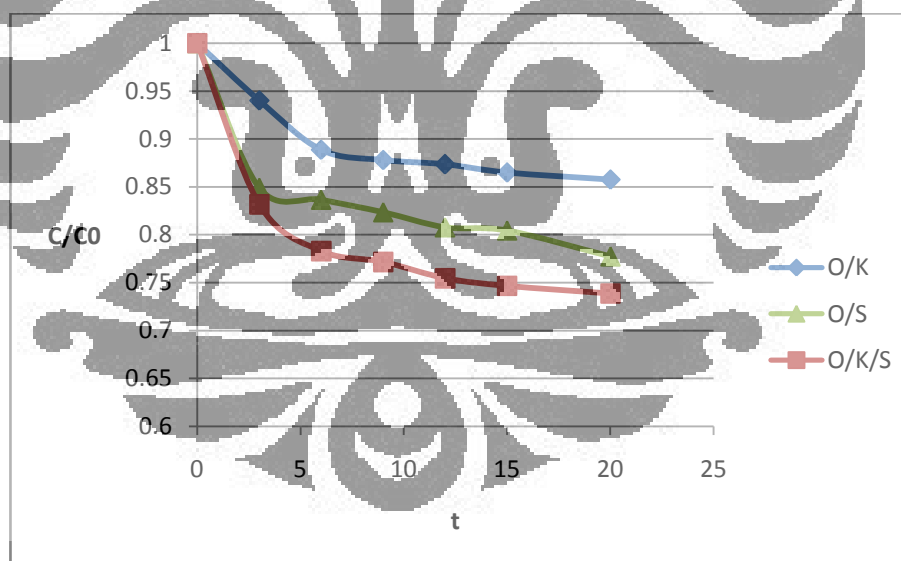
Pada Gambar 4.7, terlihat bahwa terjadi deviasi (rata-rata) yang lebih besar pada konsentrasi awal fenol 10 ppm. Besarnya deviasi tersebut juga dapat terjadi karena hal-hal yang telah disebutkan sebelumnya. Dari profil pada Gambar 4.8, terlihat bahwa besarnya penyisihan pada skema ozonasi-kavitasi ultrasonik, dengan laju alir gas tetap sebesar 200 L/jam, akan semakin besar seiring dengan menurunnya konsentrasi awal fenol. Karena dengan jumlah ozon yang masuk ke

dalam reaktor sama pada setiap konsentrasi awal fenol membuat fenol dengan konsentrasi yang lebih rendah lebih banyak terpapar ozon atau radikal OH, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Hal ini terlihat dari gradien profil penyisihan fenol, dimana pada konsentrasi awal 10 ppm, kurva masih menurun secara tajam. Penurunan tersebut berarti, bila waktu penyisihan ditambah, masih akan ada penyisihan fenol yang signifikan dibandingkan kurva konsentrasi 100 ppm dan 50 ppm yang cenderung landai (tidak ada penambahan penyisihan fenol yang signifikan bila waktu penyisihan ditambah).

Gambar 4.9 menunjukkan hasil persentase penyisihan fenol paling besar terjadi pada konsentrasi 10 ppm yakni sebesar  $37,28 \pm 9,51 \times 10^{-3} \%$ . Sedangkan persentase penyisihan fenol yang terjadi pada konsentrasi awal 50 ppm sebesar  $25,32 \pm 2 \times 10^{-4} \%$ , dan persentase penyisihan fenol terkecil adalah pada konsentrasi awal 100 ppm yakni  $25,13 \pm 8 \times 10^{-5} \%$ .

Hasil tersebut dapat dibandingkan dengan kedua skema sebelumnya, sebagai berikut:

- Konsentrasi awal ( $C_{p0}$ ) 100 ppm

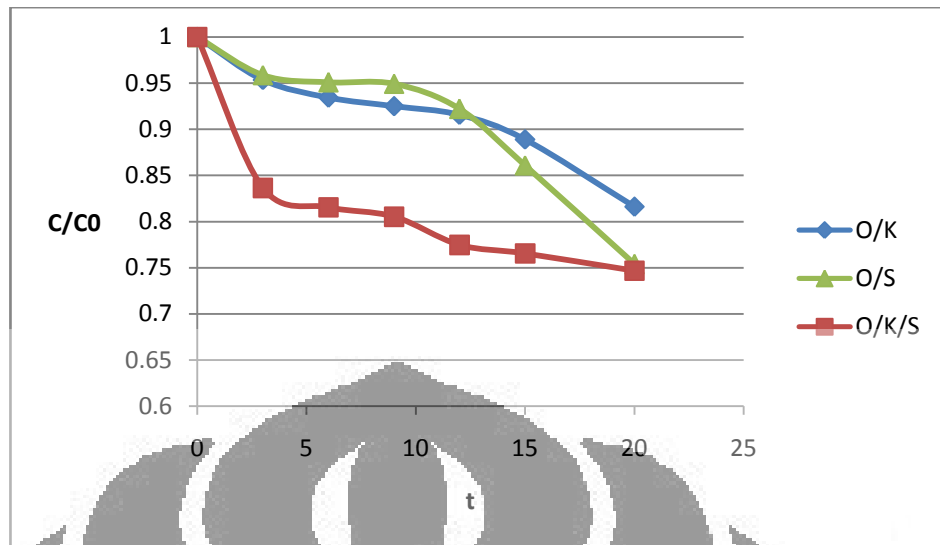


**Gambar 4. 10.** Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada konsentrasi awal 100 ppm dengan variasi skema

(Sumber: Permadi, 2010)



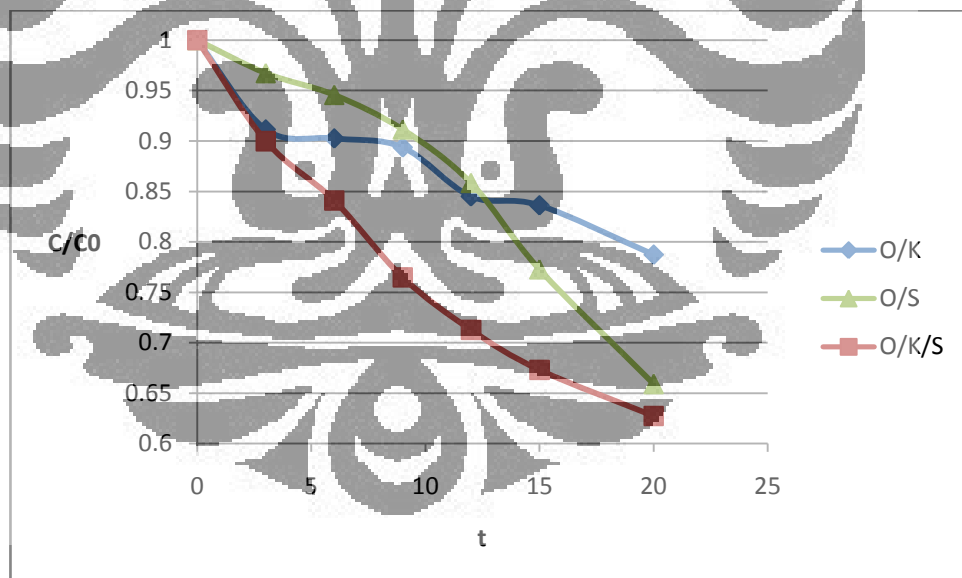
- Konsentrasi awal ( $C_{p0}$ ) 50 ppm



**Gambar 4.11.** Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada konsentrasi awal 50 ppm dengan variasi skema

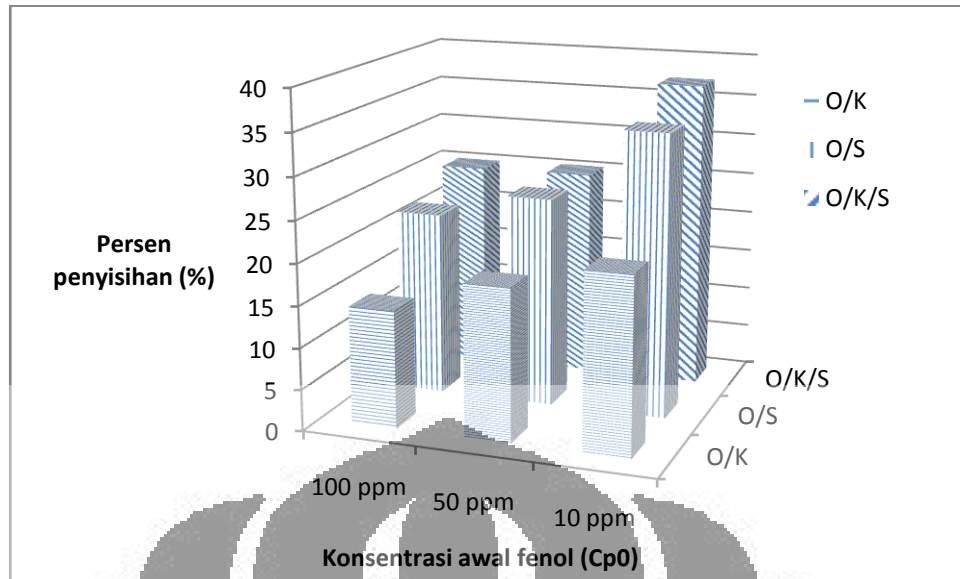
(Sumber: Permadi, 2010)

- Konsentrasi awal ( $C_{p0}$ ) 10 ppm



**Gambar 4.12.** Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada konsentrasi awal 10 ppm dengan variasi skema

(Sumber: Permadi, 2010)



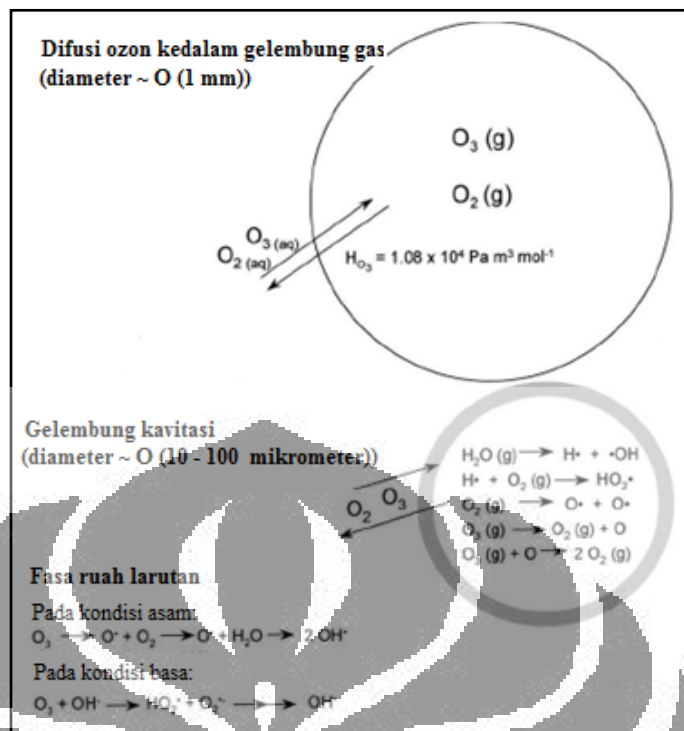
**Gambar 4.13.** Persentase penyisihan fenol pada variasi skema dengan variasi konsentrasi  
(Sumber: Permadi, 2010)

**Tabel 4.1.** Persentase penyisihan fenol pada variasi skema dengan variasi konsentrasi

Skema	O/K	O/S	O/K/S
<b>10 ppm</b>	21,27 ± 5,00 × 10 <sup>-5</sup> %	34,12 ± 8,90 × 10 <sup>-4</sup> %	37,28 ± 9,51 × 10 <sup>-3</sup> %
<b>50 ppm</b>	18,38 ± 2,87 × 10 <sup>-3</sup> %	25,30 ± 1,40 × 10 <sup>-4</sup> %	25,32 ± 2,00 × 10 <sup>-4</sup> %
<b>100 ppm</b>	14,24 ± 1,70 × 10 <sup>-4</sup> %	22,25 ± 1,05 × 10 <sup>-3</sup> %	25,13 ± 8,00 × 10 <sup>-5</sup> %

Dari Tabel 4.1 tersebut, terlihat bahwa sistem/skema yang paling optimal menyisihkan fenol pada berbagai konsentrasi awal yakni, 100 ppm, 50 ppm, dan 10 ppm dengan laju alir gas tetap sebesar 200 L/jam dan intensitas tetap sebesar 60%, adalah skema O/K/S, dan penyisihan terkecil dihasilkan oleh skema O/K. Dari tabel tersebut dapat disimpulkan bahwa kinerja penyisihan yang paling efektif berturut-turut adalah O/K/S > O/S > O/K.

Proses gabungan ozonasi-kavitasi ultrasonik merupakan sistem oksidasi yang lebih efektif dibandingkan ozonasi-kavitasi hidrodinamika karena dari tiap molekul ozon yang dipakai dapat membentuk dua molekul radikal OH. Ringkasan proses-proses tersebut, dapat terlihat pada gambar di bawah ini:



**Gambar 4. 14.** Proses yang terjadi saat gelembung ozon diberikan efek kavitasi

(Sumber: Weavers, 2001)

Selain itu, persentase penyisihan lebih besar dihasilkan oleh gabungan proses ozonasi-kavitasi ultrasonik dikarenakan waktu yang dibutuhkan-tekanan untuk dapat menghasilkan getaran dalam kavitasi hidrodinamik lebih lama bila dibandingkan dengan kavitasi ultrasonik (Ince, 2000). Akibatnya, proses pertumbuhan dan hancurnya gelembung mikro yang terjadi membutuhkan waktu yang lebih lama. Sehingga radikal OH yang terbentuk untuk menyisihkan fenol lebih sedikit dibandingkan dengan proses ozonasi-kavitasi ultrasonik.

Penambahan kavitasi hidrodinamika sebelum diberikan kavitasi ultrasonik akan mengurangi efek *degassing*. *Degassing* merupakan fenomena berkurangnya kandungan senyawa terlarut pada proses kavitasi karena senyawa tersebut menjadi inti dari gelembung mikro. Untuk membentuk gelembung mikro diperlukan inti yang berasal dari larutan. Pembentukan inti tersebut merupakan tahap pertama dari pembentukan gelembung dalam kavitasi. Umumnya gelembung mikro yang terbentuk memiliki inti dari ozon maupun molekul air.

Adanya penambahan kavitasi hidrodinamika dan kavitasi ultrasonik membuat efek mekanis/fisika dan kimia yang ditimbulkan akan lebih dahsyat.

Efek kimia timbul karena kondisi ekstrem (hotspot) yang dihasilkan kavitas (hidrodinamik dan ultrasonik). Keberadaan hotspot ini akan memperbanyak jumlah radikal OH yang dihasilkan (Ince & Tezcanli-Guyer, 2004) yang akan meningkatkan presentase penyisihan fenol.

Efek mekanis diakomodasi oleh vibrasi (getaran) yang diakibatkan oleh gelombang ultrasonik yang diradiasikan, dan dapat mengurangi ketebalan lapisan cairan, dan mengurangi penggabungan gelembung (*bubble coalescence*) dari ozonator, dan membentuk gelembung mikro yang dapat memperbesar luas permukaan kontak sehingga meningkatkan perpindahan massa ozon ke dalam larutan. Gelembung mikro yang terbentuk memiliki diameter berukuran mikron, sehingga memberikan waktu tinggal lebih lama di dalam reaktor dan menyebabkan paparan ozon ke dalam larutan lebih optimal. Mikro gelembung juga meningkatkan intensitas dekomposisi ozon menjadi radikal OH karena cepatnya waktu pecah gelembung. Efek *microstreaming* juga dapat meningkatkan kelarutan radikal OH dan ozon ke dalam larutan.

Penyisihan fenol melalui proses ozonasi-kavitas hidrodinamik dan ultrasonik sebagian besar terjadi pada fasa ruah larutan (*bulk solution*), hal ini dikarenakan sifat fenol yang hidrofilik (suka akan air). Fenol adalah senyawa yang mudah larut dalam air dan memiliki tekanan uap yang rendah (Chowdhury, 2008) sehingga fenol sukar untuk berdifusi ke dalam gelembung kavitas dan proses penyisihan fenol akan lebih dominan terjadi pada fasa ruah larutan. Maka, Semakin banyaknya radikal OH yang berada pada fasa ruah larutan akan meningkatkan penyisihan fenol.

Dari penjelasan tersebut, dapat disimpulkan bahwa penyisihan senyawa fenol dengan proses gabungan ozonasi-kavitas hidrodinamik dan ultrasonikberlangsung melalui dua cara, yaitu :

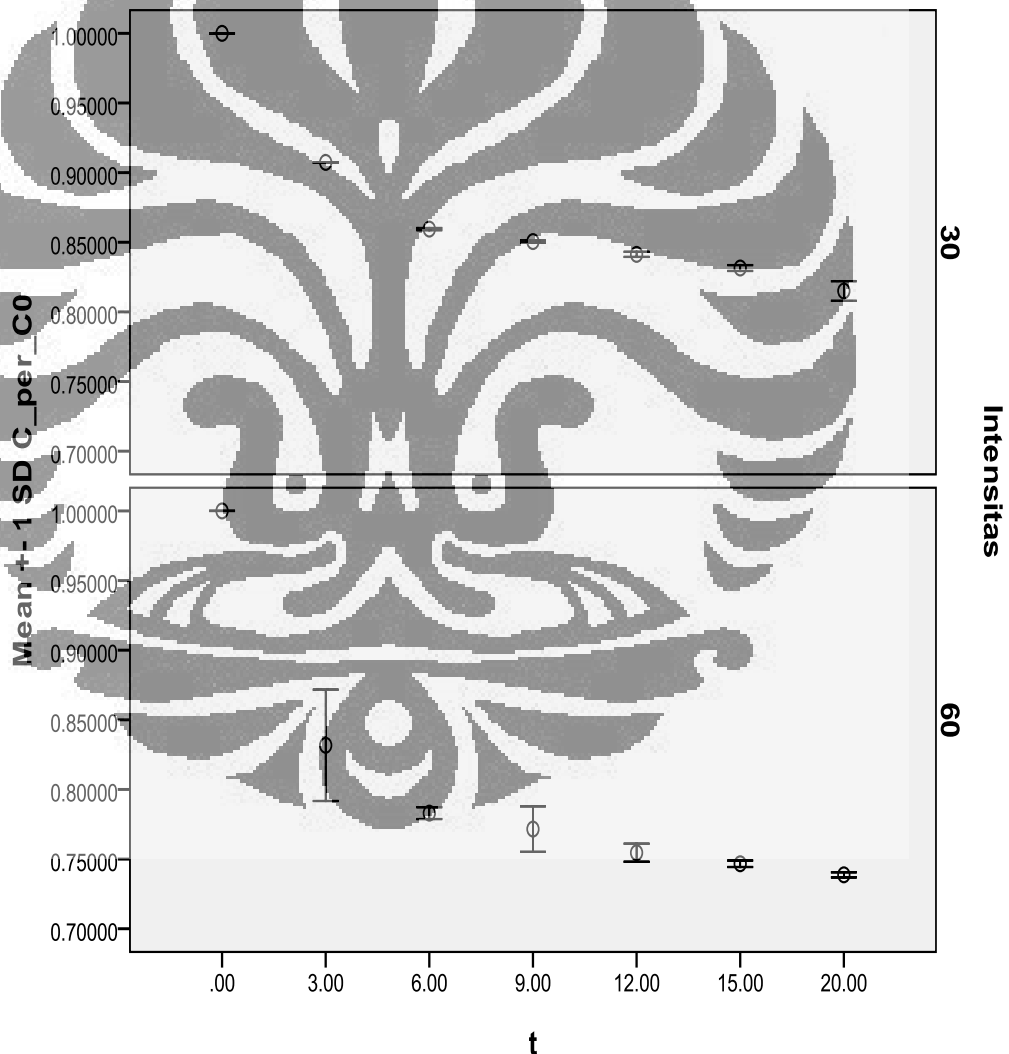
- Reaksi langsung oleh ozon (pada fasa ruah larutan), dan
- Reaksi tak langsung radikal hidroksil pada fasa ruah larutan.

Sehingga dengan meningkatnya efek fisika dan kimia yang ditimbulkan kavitas hidrodinamika dan ultrasonik membuat persentase penyisihan akan lebih besar, dibandingkan kavitas ultrasonik saja ataupun kavitas hidrodinamika saja.

### 4.3.2. Variasi intensitas ultrasonik

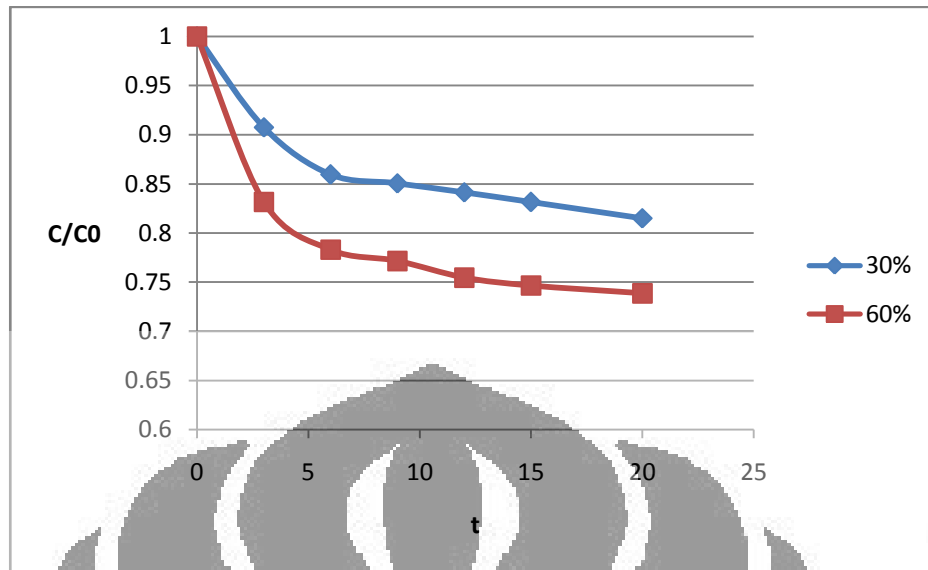
Variasi intensitas yang akan diamati ialah pada intensitas rendah (30%) dengan rentang frekuensi 30 – 100 kHz dan intensitas tinggi (60%), dengan rentang frekuensi 300– 500 kHz. Kondisi laju alir gas 200 L/jam dan konsentrasi awal fenol ( $C_{p0}$ ) 100 ppm tetap. Laju alir gas 200 L/jam dipilih berdasarkan hasil penelitian karena membuat profil air pada reaktor cenderung stabil, dan dapat mengakomodasi perpindahan massa ozon paling optimal saat dikontakkan dengan air.

Berikut ini adalah data variasi intensitas yang telah diolah secara statistik:

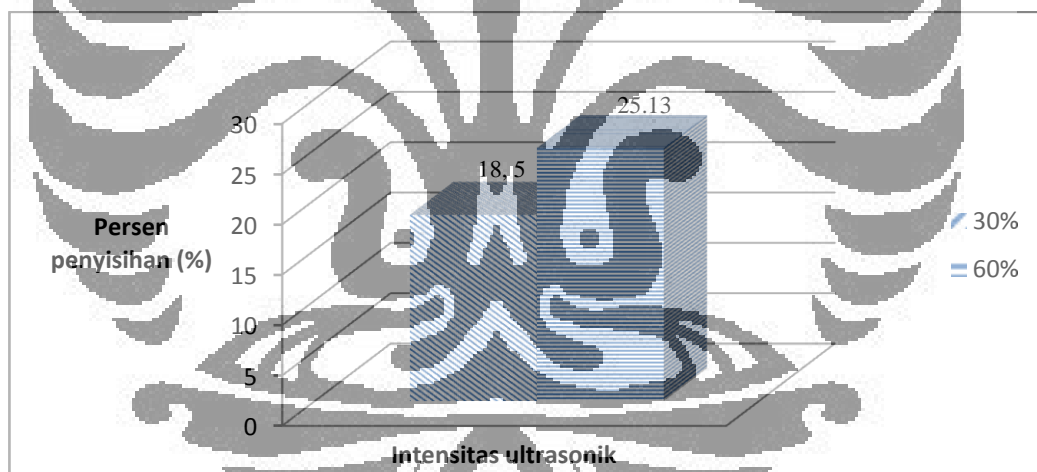


**Gambar 4. 15.** Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/K/S pada variasi intensitas dengan deviasi standar

(Sumber: Permadi, 2010)



**Gambar 4.16.** Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/K/S pada variasi intensitas  
(Sumber: Permadi, 2010)



**Gambar 4.17.** Persentase penyisihan fenol pada skema O/K/S dengan variasi intensitas  
(Sumber: Permadi, 2010)

Gambar 4.15 menunjukkan bahwa terjadi deviasi yang besar pada intensitas ultrasonik 60% yakni pada waktu penyisihan 3 menit dan 9 menit. Deviasi ini dapat terjadi karena perbedaan relatif pengambilan sampel yang tidak tepat sama pada menit ke-3 dan ke-9 dari dua kali observasi. Skema ozonasi-kavitasi ultrasonik, dengan laju alir gas tetap sebesar 200 L/jam dan konsentrasi awal fenol yang sama sebesar 100 ppm, yang terdapat pada Gambar 4.17,

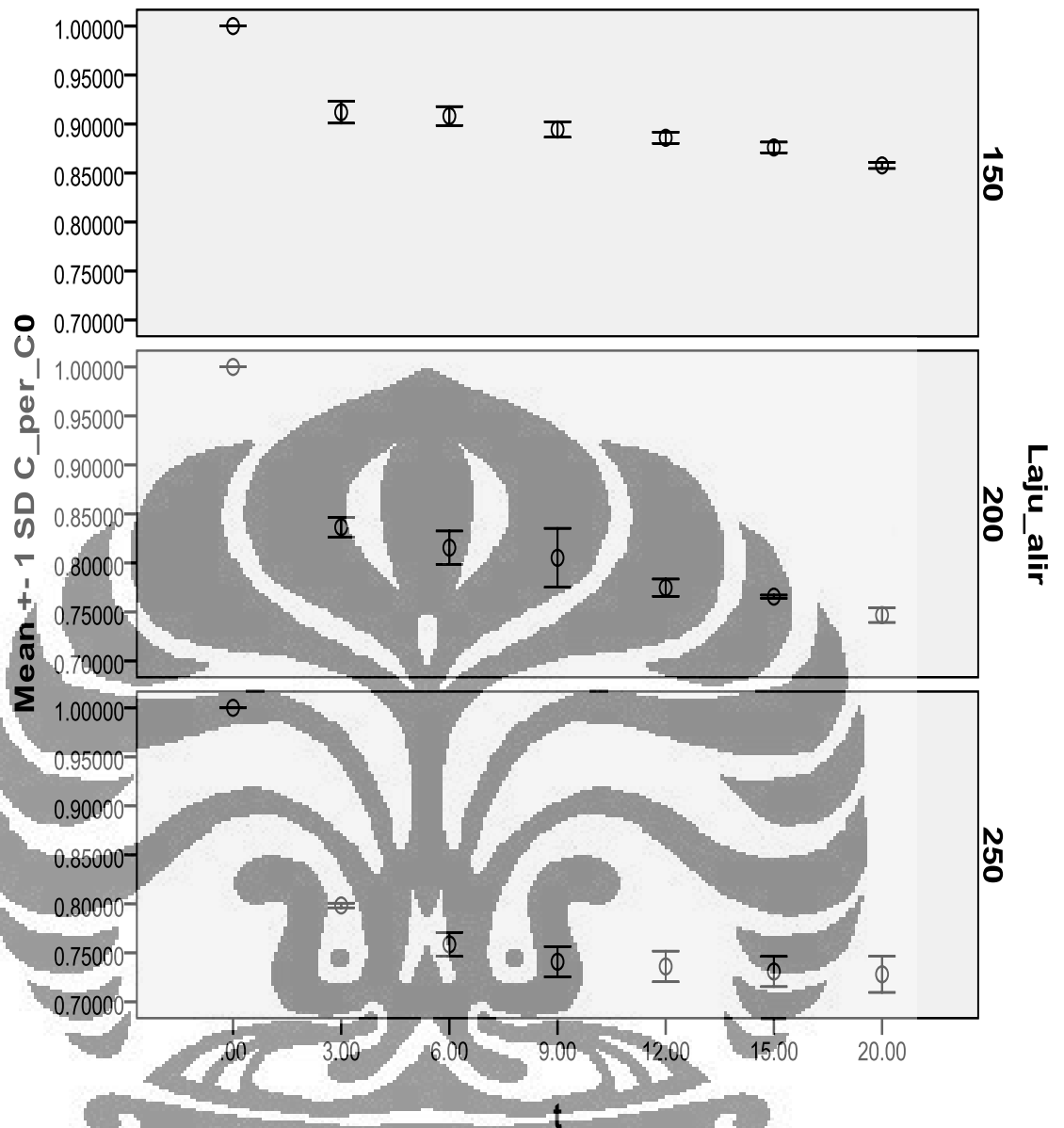
menunjukkan bahwa persentase penyisihan yang lebih besar didapatkan pada intensitas 60% yakni sebesar  $25,13 \pm 8 \times 10^{-5} \%$ , sedangkan pada intensitas ultrasonik 30%, persentase penyisihan fenol yang terjadi hanya sebesar  $18,5 \pm 8 \times 10^{-6} \%$ .

Seperti yang telah dijabarkan pada bagian 2.3.2.1, pada intensitas tinggi terjadi *transient cavitation*, siklus ekspansi dan kompresi dari gelembung mikro akan lebih singkat sehingga waktu hidup gelembung mikro pun lebih singkat, dan kenaikan temperatur karena pecahnya gelembung mikro akan lebih dahsyat. Hal tersebut meningkatkan pembentukan radikal OH dari dekomposisi ozon. Selain itu, peningkatan intensitas juga berdampak pada peningkatan laju perpindahan massa ozon dan radikal OH ke dalam larutan, dikarenakan gelembung yang dihasilkan memiliki ukuran lebih kecil (efek *microstreaming*) (Hoffmann, M. R., Hoechemer, R. A., Hua, I, 1996). Efek *microstreaming* akan mendorong ozon dalam fasa gas untuk berpindah ke dalam fasa cair (larutan).

#### 4.3.3. Variasi laju alir

Laju alir ( $Q_G$ ) yang akan divariasikan yakni sebesar 150 L/jam, 200 L/jam, dan 250 L/jam, dengan konsentrasi awal fenol ( $C_{p0}$ ) 50 ppm pada intensitas ultrasonik 60%.

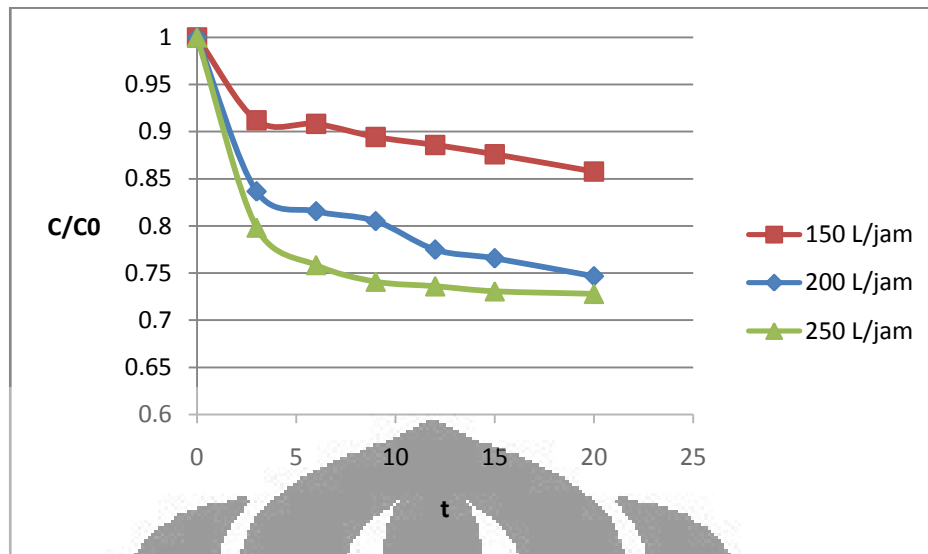
Berikut ini adalah data variasi laju alir ( $Q_G$ ) yang telah diolah secara statistik:



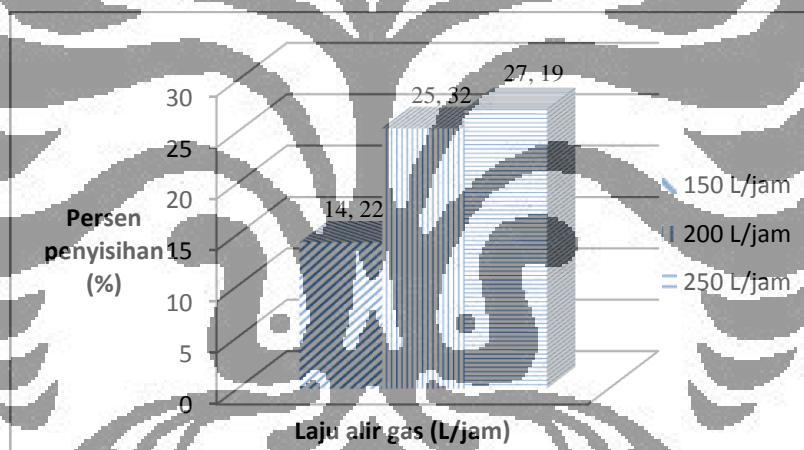
**Gambar 4. 18.** Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/K/S pada variasi laju alir dengan deviasi standar

(Sumber: Permadi, 2010)





Gambar 4.19. Profil penyisihan fenol terhadap waktu pada skema O/K/S pada variasi laju alir (Sumber: Permadi, 2010)



Gambar 4.20. Persentase penyisihan fenol pada skema O/K/S dengan variasi laju alir (Sumber: Permadi, 2010)

Deviasi (lihat Gambar 4.18) yang besar ditemukan pada laju alir 200 L/jam pada menit ke-9 yang dapat terjadi karena perbedaan relatif waktu pengambilan sampel diantara dua kali observasi.

Dari profil pada gambar 4.20, terlihat bahwa skema ozonasi-kavitasi hidrodinamika dan ultrasonik, dengan konsentrasi tetap sebesar 50 ppm dan intensitas tetap sebesar 60%, bekerja paling baik pada laju alir 250 L/jam dengan persentase penyisihan fenol paling besar yakni sebesar  $27,19 \pm 1,7 \times 10^{-4} \%$ . Sedangkan persentase penyisihan fenol yang terjadi pada laju alir 200 L/jam 25,32

$\pm 2 \times 10^{-4} \%$ , dan persentase penyisihan fenol terkecil adalah pada konsentrasi awal 100 ppm yakni  $14,22 \pm 5 \times 10^{-5} \%$ .

Walaupun nilai penyisihan paling besar didapatkan pada laju alir 250 L/jam, namun profil penyisihan (lihat Gambar 4.19) laju alir 200 L/jam masih cenderung turun, dan laju alir 200 L/jam sudah terlihat melandai. Hal ini membuktikan bahwa laju alir 200 L/jam memberikan hasil yang optimal. Karena bila waktu penyisihan ditambahkan, laju alir 200 L/jam masih dapat memberikan hasil penyisihan yang signifikan dibandingkan laju alir 250 L/jam.

Fenomena ini dapat dijelaskan dengan teori perpindahan massa, dimana pada laju alir gas yang semakin besar, energi kinetik gas juga akan menjadi semakin besar. Bertambah besarnya energi kinetik ini mengakibatkan kemampuan gas untuk masuk/larut ke dalam fasa cair meningkat, yang ditandai dengan peningkatan koefisien perpindahan massa ozon ( $kLa$ ) (Weavers & Hoffman, 1998). Hal ini mendorong semakin banyaknya ozon yang larut ke dalam air yang akan mengoksidasi senyawa fenol. Namun, pada laju alir 250 L/jam, waktu tinggal ozon akan lebih cepat, dan membuat perpindahan massa kurang optimal.

#### 4.4. Uji Signifikansi

Parameter intensitas ultrasonik dan konsentrasi awal fenol akan diuji signifikansinya secara serentak. Data yang digunakan berupa persentase penyisihan fenol dengan laju alir gas tetap sebesar 200 L/jam (skema O/K dan O/K/S), pada intensitas ultrasonik 0% (O/K) dan intensitas ultrasonik 30% dan 60% (O/K/S) untuk tiap variasi konsentrasi awal fenol ( $C_{p0}$ ) sebesar 100 ppm, 50 ppm, dan 10 ppm. Persentase penyisihan fenol dapat dilihat dari kandungan fenol setelah mengalami proses oksidasi selama 20 menit terhadap kandungan fenol awal. Berikut adalah hasil uji signifikansi ANOVA dengan SPSS 17.0:

Tabel 4. 2. Hasil ANOVA SPSS 17.0

```

UNIANOVA Persen_penyisihan BY CO_fenol Intensitas
/METHOD=SSTYPE(3)
/INTERCEPT=INCLUDE
/CRITERIA=ALPHA(0.05)
/DESIGN=CO_fenol Intensitas CO_fenol*Intensitas.

```

### Univariate Analysis of Variance

#### Between-Subjects Factors

		N
CO_fenol	10.00	6
	50.00	6
	100.00	6
Intensitas	00	6
	30.00	6
	60.00	6

#### Tests of Between-Subjects Effects

Dependent Variabel: Persen\_penyisihan

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	678.882 <sup>a</sup>	8	84.860	18.927	.000
Intercept	9483.812	1	9483.812	2115.218	.000
Intensitas	398.678	2	199.339	44.460	.000
CO_fenol	218.393	2	109.199	24.355	.000
Intensitas * CO_fenol	61.805	4	15.451	3.446	.057
Error	40.352	9	4.484		
Total	10203.046	18			
Corrected Total	719.234	17			

a. R Squared = .944 (Adjusted R Squared = .894)

Nilai Alpha (tingkat signifikansi) merupakan *1-confidence level* (CL). Sehingga bila menggunakan CL 95 % atau 0,95 otomatis tingkat signifikansinya 0,05. Tingkat signifikansi yang dipilih menentukan error yang diizinkan untuk

perhitungan. Pada Tabel 4.2, nilai *Sum of Square* (jumlah kuadrat) menunjukkan besar efek variasi parameter terhadap output, yakni persen penyisihan fenol. Sedangkan nilai *Mean Square* (rata-rata kuadrat) menunjukkan pengaruh rata-rata variasi dari tiap parameter terhadap output, yakni dengan membagi jumlah kuadrat dengan derajat kebebasan tiap parameter. Sehingga dengan derajat kebebasan (*df*) yang sama, *Sum of Square* yang lebih tinggi akan memberikan nilai *Mean Square* yang lebih besar.

Nilai F didapatkan dari nilai *Mean Square* tiap parameter dibagi dengan *Mean Square Error*. Nilai *Mean Square* yang lebih besar terhadap rata-rata error ( $MS_E$ ) yang sama akan memberikan nilai F yang lebih besar. Besarnya nilai F menunjukkan faktor lebih dominan (berpengaruh). Nilai *sig.* menunjukkan perbedaan mean yang signifikan antara hasil variasi parameter. Suatu parameter dikatakan berpengaruh terhadap output, apabila nilainya lebih kecil dibandingkan tingkat signifikansi yang dipilih (Hartman, 2000). Semakin nilai *sig.* menjauhi tingkat signifikansi, maka parameter tersebut memiliki perbedaan mean yang lebih signifikan, dan lebih berpengaruh terhadap output.

Dari tampilan *Tests of Between Subjects Effects* (lihat Tabel 4.2) dengan  $F_{hitung}$  untuk intensitas ultrasonik dan konsentrasi awal fenol lebih besar dari  $F_{tabel}$  (5,318) sehingga  $H_0$  ditolak dan  $H_1$  diterima, berarti terdapat perbedaan pengaruh antara parameter. Dari kolom *sig.* terlihat bahwa intensitas ultrasonik dan konsentrasi awal fenol berpengaruh secara signifikan (nilai signifikan < tingkat signifikansi). Karena nilai F intensitas ultrasonik (44,46) lebih besar dibandingkan F konsentrasi awal fenol (24,355), maka intensitas ultrasonik lebih dominan (berpengaruh) terhadap output (persen penyisihan) dibandingkan dengan konsentrasi awal fenol. Dari hasil tersebut (lihat Tabel 4.2), terlihat bahwa dalam laju alir tetap sebesar 200 L/jam, parameter yang paling signifikan dalam mempengaruhi penyisihan fenol adalah intensitas ultrasonik. Hal ini terlihat dari nilai  $F_{hitung}$ -nya yang lebih besar dibandingkan nilai  $F_{hitung}$  konsentrasi awal fenol.

Dengan ANOVA, telah diketahui bahwa intensitas dan konsentrasi berpengaruh secara signifikan terhadap persentase penyisihan fenol, namun tidak diketahui pada variasi parameter yang manakah yang memiliki perbedaan mean

lebih signifikan. Untuk mengetahui nilai intensitas dan konsentrasi yang signifikan terhadap proses, dilakukan post-hoc test sebagai berikut:

- Intensitas Ultrasonik

**Tabel 4. 3.** Tes Post-Hoc parameter intensitas ultrasonik

**Multiple Comparisons**

Dependent Variabel:Persen\_penyisihan

	(I) Intensitas	(J) Intensitas	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	.00	30.00	-3.7633	1.22251	.013	-6.5288	-.9978
		60.00	-11.3182	1.22251	.000	-14.0837	-8.5527
	30.00	.00	3.7633	1.22251	.013	.9978	6.5288
		60.00	-7.5548	1.22251	.000	-10.3203	-4.7893
	60.00	.00	11.3182	1.22251	.000	8.5527	14.0837
		30.00	7.5548	1.22251	.000	4.7893	10.3203

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 4.484.

\*. The mean difference is significant at the .05 level.

- Konsentrasi Awal Fenol

**Tabel 4. 4.** Tes Post-Hoc parameter konsentrasi awal

**Multiple Comparisons**

Dependent Variabel:Persen\_penyisihan

	(I) CO_fenol	(J) CO_fenol	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
						Lower Bound	Upper Bound
LSD	10.00	50.00	5.6250	1.22251	.001	2.8595	8.3905
		100.00	8.3685	1.22251	.000	5.6030	11.1340
	50.00	10.00	-5.6250	1.22251	.001	-8.3905	-2.8595
		100.00	2.7435	1.22251	.051	-.0220	5.5090
	100.00	10.00	-8.3685	1.22251	.000	-11.1340	-5.6030
		50.00	-2.7435	1.22251	.051	-5.5090	.0220

Based on observed means.

The error term is Mean Square(Error) = 4.484.

\*. The mean difference is significant at the .05 level.

Tes post-hoc membandingkan dua kondisi pada suatu parameter, sehingga didapatkan kondisi yang lebih signifikan. Tes post-hoc menunjukkan nilai intensitas ultrasonik (Tabel 4.3) dan nilai konsentrasi awal fenol (Tabel 4.4) yang menghasilkan penyisihan fenol yang signifikan. Kondisi yang menghasilkan hasil

signifikan dapat terlihat dari kolom *Mean Difference* (beda mean) dan kolom *sig.* Semakin besar perbedaan mean-nya maka kondisi tersebut mempengaruhi output dengan lebih besar. Hal ini juga tercermin dari kolom *sig.* dimana nilainya akan menjadi lebih kecil. Karena metode tes post-hoc yang digunakan adalah *Least Significant Difference* (LSD) sehingga kondisi yang berpengaruh dapat langsung dilihat dari kondisi yang menghasilkan nilai *sig.* paling kecil.

Kolom *Confidence Interval* merupakan nilai *mean difference*  $\pm$  interval (*upper* dan *lower bound*). Interval yang digunakan oleh SPSS 17.0 pada tingkat keyakinan (CL) 95%, dan ukuran sampel kecil pada tes ini adalah 2,7655.

Dari Tabel 4.3, didapatkan nilai intensitas ultrasonik yang lebih berpengaruh (signifikan) adalah pada intensitas 60% yang memiliki signifikansi lebih kecil (berarti pengaruh lebih besar). Hal ini sesuai dengan teori bahwa intensitas yang lebih tinggi akan meningkatkan persentase penyisihan karena membentuk lebih banyak radikal OH dan efek *microstreaming* seperti yang telah dijelaskan pada pembahasan sebelumnya.

Dengan cara yang sama, berdasarkan Tabel 4.4, nilai konsentrasi yang lebih berpengaruh (signifikan) adalah pada konsentrasi awal 10 ppm yang terlihat dari nilai signifikansi < tingkat signifikansi yaitu 0,05. Hal ini sesuai dengan teori bahwa konsentrasi awal yang lebih rendah akan meningkatkan persen penyisihan karena meningkatnya laju penyisihan.

Secara statistik, dapat dinyatakan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antara persen penyisihan untuk intensitas ultrasonik 60% dengan intensitas lain yang diujikan dan untuk konsentrasi awal fenol 10 ppm dengan konsentrasi awal fenol lain yang diujikan,  $F(5,318) = 18,93$ , pada tingkat signifikansi 0,05.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan, kesimpulan yang bisa diambil adalah:

1. Berdasarkan ANOVA:

- a. Parameter yang dapat mempengaruhi proses lebih signifikan adalah intensitas ultrasonik, dengan nilai  $F = 44,46$  dibandingkan dengan konsentrasi awal fenol ( $F = 24,355$ ) pada tingkat signifikansi 0.05.
- b. Berdasarkan tes post-hoc, intensitas ultrasonik yang berpengaruh secara signifikan adalah intensitas 60%.
- c. Berdasarkan tes post-hoc, konsentrasi awal fenol yang berpengaruh secara signifikan adalah 10 ppm.
- d. Variasi terhadap kombinasi parameter yang dapat mengoptimalkan proses adalah dengan laju alir 200 L/jam, konsentrasi awal fenol 10 ppm, dan intensitas ultrasonik 60%.

2. Berdasarkan statistik dekriptif:

- a. Konsentrasi awal fenol berpengaruh terhadap persentase penyisihan. Persentase penyisihan fenol terbesar diperoleh pada konsentrasi awal fenol 10 ppm, sebesar  $21,27 \pm 5 \times 10^{-5} \%$  (O/K),  $34,12 \pm 8,9 \times 10^{-4} \%$  (O/S), dan  $37,28 \pm 9,51 \times 10^{-3} \%$  (O/K/S).
- b. Intensitas ultrasonik berpengaruh terhadap persentase penyisihan. Intensitas ultrasonik tinggi (60%) memberikan persentase penyisihan fenol terbaik, yaitu sebesar  $25,13 \pm 8 \times 10^{-5} \%$ . Sedangkan pada intensitas rendah (30%) persentase penyisihan fenol hanya sebesar  $18,5 \pm 8 \times 10^{-6} \%$ .
- c. Laju alir gas berpengaruh terhadap kinerja proses. Nilai penyisihan fenol yang paling optimal diperoleh pada laju alir gas 200 L/jam, yaitu sebesar  $25,32 \pm 2 \times 10^{-4} \%$ , dan tidak berubah signifikan pada 250 L/jam ( $27,19 \pm 1,7 \times 10^{-4} \%$ ).

- d. Proses gabungan ozonasi-kavitasi hidrodinamika dan ultrasonik merupakan gabungan proses terbaik dengan persentase penyisihan fenol  $37,28 \pm 9,51 \times 10^{-3} \%$ , dibandingkan dengan proses gabungan ozonasi-kavitasi hidrodinamika ( $21,27 \pm 5 \times 10^{-5} \%$ ) dan ozonasi-kavitasi ultrasonik ( $34,12 \pm 8,9 \times 10^{-4} \%$ ).

## 5.2. Saran

1. Perlu dilakukan observasi untuk tiap variasi kombinasi proses, agar analisis eksperimen lebih akurat dalam menentukan parameter yang lebih signifikan.
2. Untuk tiap observasi, sebaiknya dilakukan lebih dari satu kali replikasi agar data yang didapatkan memiliki standard deviasi yang lebih kecil.
3. Perlu dilakukan analisis dengan GC-MS untuk mengetahui kandungan sampel.
4. Perlu diterapkan perlakuan analisis yang sama untuk tiap observasi agar data yang didapatkan lebih akurat.



## DAFTAR PUSTAKA

- Adewuyi, Y. G. 2001. *Sonochemistry: Environmental Science and Engineering Application*. Industrial and Engineering Chemistry Research, 40 (22), 4681-4715.
- \_\_\_\_\_. 2005. *Sonochemistry in Environmental Remediation: Combinative and Hybrid Sonophotochemical Oxidation Processes for the Treatment of Pollutants in Water*. Environmental Science and Technology 39, 3409-3420.
- ASTeX Sorbios GmbH. 1996. Semozon 90.2 HP, Ozone generator operation manual, Ver. 1.5 e., ASTeX SORBIOS GmbH Berlin Germany.
- Bühler, R.E., Staehelin, J., & Hoigné, J. 1984. *Ozone decomposition in water studied by pulse radiolysis  $HO_2/O_2$  and  $HO_3/O_3^-$  as intermediates*. Journal of Physic Chemistry, 88, 2560–2564.
- Chowdhury, Pankaj and T. Viararaghavan. 2009. Sonochemical degradation of chlorinated organik compounds, phenolic compounds and organik dyes – A review. Science of The Total Environment, 2474-2492.
- Dodd, M. C., Kohler, H. P. E., & Gutten, U. V. 2009. *Oxidation of Antibacterial Compounds by Ozone and hydroxyl Radical: Elimination of Biological Activity during Aqueous Ozonation Process*. Environmental Science and Technology, 43, 2498-2504.
- Gottschalk, C., Libra, J. A., & Saube, A. 2000. *Ozonation of Water and Waste Water*. Weinheim: Wiley-Vch.
- Harinaldi. 2005. *Prinsip-prinsip Statistik untuk Teknik dan Sains*. Jakarta: Erlangga.
- Hartman, Julia. 2000. Faktorial Analysis of Variance: An Interactive Tutorial for SPSS.(diunduh 28 Desember 2010). <http://www.stats.gla.ac.uk/steps/facanova.html>
- Hoffmann, M. R., Hoechemer, R. A. , Hua, I. 1996. *Application of Ultrasonik Irradiation for the Degradation of Chemical Contaminants in Water*. Ultrasoniks Sonochemistry 3 , S163-S172.

- Ince N. H. , et al., 2000. Ultrasound as a catalyzer of aqueous reaction systems: the state of the art and environmental application. *Environmental*. 29;167-176.
- Ince, N. H., & Tezcanli-Guyer, G. 2004. *Individual and Combined Effects of Ultrasound, Ozone, and UV Radiation*. *Ultrasoniks Sonochemistry*, 42, 603-609.
- Lazic, Z. R. 2004. *Design of Experiment in Chemical Engineering: A Practical Guide*. Weinheim: Wiley –Vch.
- Lesko, Timothy Michael. *Chemical Effects of Acoustic Cavitation*. Institute of Technology Pasadena, California. 2004.
- Mason, Timothy et al. *Advances in Sonochemistry*. USA: Jan Press Inc;2001
- Montgomery, Douglas C. 2005. *Design an Analysis of Experiment*. New York: Wiley Inc.
- Mukesh, G., Hongqiang, H., Mujumdar, A. S., & Ray, M. B. 2004. *Sonochemical Decomposition of Volatile and Non-Volatile Organic Compounds—A Comparative Study*. *Water Research*, 38, 4247–4261.
- Permadi, Sonny Citra. 2010. *Penyisihan Fenol dengan Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Ozon: Pengaruh Kavitasi dan Konsentrasi Awal Fenol*. Depok: Departemen Teknik Kimia UI.
- Pétrie, C., Micolle, M., Merlin, G., Luche, J.L., Reverdyk, G., 1992. Characteristics of pentachlorophenate degradation in aqueous solution by means of ultrasound. *Environ. Sci.Technol.*, Vol. 26:1639-1642.
- Rafiudin, R., & Saepudin, A. 2009. *Praktek Langsung SPSS 17*. Jakarta: Elex Media Komputindo.
- Stahelin J, Hoigne J.1983.*Reaktionsmechanismus und Kinetik des Ozonzerfalls in Wasser in Gegenwart organischer Stoffe*. *Vom Wasser* 61: 337-348.
- Slamet, dkk. 2007. *Modifikasi zeolit alam dan Karbon Aktif dengan TiO2 serta Aplikasinya sebagai Bahan Adsorben dan Fotokatalisis untuk Degradasi Polutan Organik*. Depok: UI Press
- Swamy, K. M., & Narayana, K. L. 2001. *Ultrasonically Assisted Leaching*. *Advance in Sonochemistry*, 6, 141-179.

- Thompson, L. H., & Doraiswamy, L. K. 1999. *Sonochemistry: Science and Engineering*. Industrial and Engineering Chemistry Research, 38(4), 1215-1249.
- Tiehm, a. 2001. *Combination of Ultrasonic and Biological Pollutant Degradation*. Advance in Sonochemistry, 6, 25-58.
- Tjahjadi, Linda. 2010. *Penyisihan Fenol Menggunakan Proses Oksidasi Lanjut Ozonasi-Kavitasi Hidrodinamika dan Ultrasonik*. Depok: Departemen Teknik Kimia UI.
- Tomiyasu H, Fukutomi H, Gordon G. 1985. *Kinetics and Mechanisms of Ozone Decomposition in Basic Aqueous Solutions*. Inorganic Chemistry 24: 2962-2985.
- Treybal R E. 1968. *Mass Transfer Operations*, 2<sup>nd</sup> Ed. New York: McGraw-Hill.
- Weavers, L. K., & Hoffman, M. R. 1998. *Sonolytic Decomposition of Ozone in Aqueous Solution: Mass transfer Effect*. *Environment and Science Technology*, 32 (24), 3941-3947.
- Weavers, Linda K. 2001. *Sonolytic Ozonation for the Remediation of Hazardous Pollutant*. *Advanced in Sonochemistry*, 6, 111-140.
- Zhao, L., Ma, J., & Zhai, X. 2010. *Enhanced Mechanism of Catalytic Ozonation by Ultrasound with Orthogonal Dual Frequencies for the Degradation of Nitrobenzene in Aqueous Solution*. *Ultrasoniks Sonochemistry*, 17, 84-91.



**Data Penelitian pada Proses Penyisihan Fenol dengan Proses Oksidasi Lanjut  
Ozonasi/Kavitasi Hidrodinamik/Ultrasonik (Permadi, 2010)**

**A.1. Proses Oksidasi Lanjut Ozonasi - Kavitasi Hidrodinamik (O/K)**

**A.1.1. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 100$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 0%  
(tanpa sonikasi); Jenis Asam = HCl;**

**Tabel A.1.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Hidrodinamik (O/K) (1)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.7	3.07	-	26.00	99.22	1.00	0.00
3	3.41	5.6	3.09	2.4	30.00	88.46	0.96	10.84
6	3.96	5.5	3.08	1.6	31.00	87.73	0.89	11.59
9	4.14	5.4	3.04	1.5	32.00	87.68	0.88	11.64
12	4.57	5.3	3.00	1.4	33.00	87.29	0.88	12.03
15	4.55	5.2	2.99	1.6	34.00	86.32	0.87	12.89
20	5.55	5.2	2.98	3.5	35.00	85.74	0.86	13.48

**Tabel A.2.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Hidrodinamik (O/K) (2)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.6	3.08	-	26.00	106.69	1.00	0.00
3	3.5	5.5	3.06	2.6	29.00	98.16	0.92	8.53
6	3.9	5.5	3.07	1.8	30.00	94.53	0.88	12.16
9	4.21	5.4	3.05	1.6	31.00	92.83	0.87	13.86
12	4.45	5.3	3.01	1.5	32.00	92.5	0.86	14.19
15	4.62	5.2	2.99	1.6	33.00	91.75	0.86	14.94
20	5.51	5.1	2.98	3.3	34.00	90.94	0.85	14.76

**A.1.2. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 50$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 0%  
(Intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl;**

**Tabel A.3.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Hidrodinamik (O/K) (1)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.7	3.05	-	26.0	40.97	1.00	0.00
3	4.29	5.6	3.11	4.10	30.0	40.79	0.99	0.45
6	5.11	5.6	3.07	4.00	31.0	40.28	0.98	1.69
9	5.51	5.5	3.08	3.60	31.5	39.94	0.97	2.52
12	5.13	5.4	3.07	3.00	32.0	39.59	0.97	3.37
15	5.16	5.3	3.05	2.80	33.0	37.47	0.91	8.53
20	4.75	5.3	3.04	5.15	34.0	32.93	0.80	19.62

**Tabel A.4.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Hidrodinamik (O/K) (2)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	C <sub>fenol</sub>	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.60	3.15	-	31.00	48.8	1.00	0.00
3	4.3	5.60	3.16	4.20	32.00	44.41	0.91	8.99
6	5.1	5.50	3.14	4.00	33.00	43.43	0.89	11.00
9	5.4	5.40	3.15	3.80	34.00	42.94	0.88	12.01
12	5.2	5.30	3.12	3.50	34.50	41.97	0.86	13.4
15	5.1	5.30	3.11	2.80	35.00	41.82	0.86	14.34
20	4.6	5.20	3.11	5.15	35.50	40.51	0.83	17.15

A.1.3. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 10$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 0%  
(Intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl;

**Tabel A.5.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Hidrodinamik (O/K) (1)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	C <sub>fenol</sub>	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.70	3.12	-	30.00	8.54	1.00	0.00
3	4.99	5.60	3.18	1.50	32.00	7.75	0.90	9.91
6	4.93	5.50	3.14	1.30	33.00	7.67	0.90	10.19
9	5.20	5.40	3.15	1.15	33.50	7.60	0.89	11.00
12	5.23	5.30	3.13	1.10	34.50	7.16	0.84	16.16
15	5.05	5.30	3.09	1.25	35.00	7.08	0.83	17.09
20	5.41	5.20	3.10	2.10	35.50	6.65	0.78	22.12

**Tabel A.6.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Hidrodinamik (O/K) (2)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	C <sub>fenol</sub>	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.6	3.18	-	26.0	9.25	1.00	0.00
3	4.8	5.5	3.20	1.40	28.0	8.46	0.91	6.6
6	4.7	5.4	3.16	1.30	31.0	8.39	0.90	9.29
9	5.1	5.3	3.17	1.15	33.0	8.31	0.89	10.27
12	5.2	5.3	3.15	1.10	33.5	7.87	0.85	14.92
15	5.05	5.2	3.10	1.25	35.0	7.79	0.84	15.68
20	5.4	5.1	3.09	2.00	35.5	7.36	0.79	20.43

## A.2. Proses Oksidasi Lanjut Ozonasi - Kavitas Ultrasonik (O/S)

A.2.1. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 100$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 60% (Intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl;

Tabel A.7. Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitas Ultrasonik (O/S) (1)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	$C/C_0$	% penyisihan
0	-	5.8	3.05	-	26.0	93.86	1.00	0.00
3	2.25	5.6	3.06	2.1	29.5	81.79	0.87	12.85
6	2.53	5.5	3.03	1.6	30.5	80.72	0.86	13.99
9	3.00	5.5	2.99	1.5	37.5	80.08	0.85	14.44
12	3.32	5.4	3.01	1.4	33.0	78.34	0.83	15.25
15	3.65	5.3	2.98	1.5	33.0	78.30	0.83	16.35
20	2.25	5.2	2.98	2.7	34.0	73.85	0.78	21.31

Tabel A.8. Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitas Ultrasonik (O/S) (2)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	$C/C_0$	% penyisihan
0	-	5.7	3.03	-	26.00	96.64	1.00	0.00
3	3.68	5.7	3.08	4.10	29.00	79.25	0.83	17.99
6	4.25	5.6	3.09	3.30	30.00	78.28	0.81	18.99
9	4.45	5.5	3.06	2.70	31.00	76.35	0.79	20.99
12	4.74	5.5	3.05	2.55	32.00	75.38	0.78	22.00
15	5.03	5.4	3.06	2.40	33.00	74.80	0.77	22.60
20	5.02	5.3	3.05	4.10	34.00	74.22	0.76	23.20

A.2.2. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 50$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 60% (Intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl;

Tabel A.9. Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitas Ultrasonik (O/S) (1)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	$C/C_0$	% penyisihan
0	-	5.7	3.06	-	26.0	41.13	1.00	0.00
3	3.96	5.4	3.03	2.40	32.0	39.43	0.96	4.14
6	3.86	5.4	2.99	2.20	33.0	39.11	0.95	4.91
9	4.03	5.3	2.98	2.30	34.0	39.04	0.95	5.07
12	4.32	5.2	2.93	2.25	35.0	37.92	0.92	7.80
15	4.19	5.1	2.93	1.85	35.5	35.41	0.86	13.91
20	4.28	5.1	2.96	2.90	36.0	31.01	0.75	24.61

**Tabel A.10.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik (O/S) (2)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	C <sub>fenol</sub>	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.7	3.11	-	28	51.80	1.00	0.00
3	4.31	5.6	3.09	2.60	30	49.73	0.96	4.14
6	5.10	5.5	3.03	2.40	32	48.69	0.94	4.91
9	5.42	5.4	2.99	2.50	33	47.65	0.92	5.07
12	5.21	5.3	2.95	2.45	35	46.60	0.90	7.80
15	5.14	5.2	2.93	1.95	35	45.58	0.88	13.91
20	4.60	5.1	2.95	2.95	36	38.33	0.74	26.00

A.2.3. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 10$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 60%  
(Intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl;

**Tabel A.11.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik (O/S) (1)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran	T (°C)	C <sub>fenol</sub>	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.8	3.06	-	25.0	12.94	1.00	0.00
3	3.11	5.7	3.02	3.80	29.5	12.61	0.96	2.57
6	3.85	5.6	2.99	3.00	30.0	12.31	0.94	4.86
9	3.70	5.5	3.00	2.95	31.5	11.94	0.90	7.75
12	4.40	5.5	2.97	2.40	32.0	11.73	0.81	9.32
15	4.40	5.4	2.96	2.80	33.0	10.29	0.75	20.49
20	4.60	5.3	2.95	5.00	35.0	8.64	0.65	33.24

**Tabel A.12.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik (O/S) (2)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	C <sub>fenol</sub>	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.7	3.08	-	26.00	9.84	1	0.00
3	3.10	5.6	3.04	3.9	30.00	9.44	0.96	4.07
6	3.60	5.5	2.98	3.1	31.00	9.25	0.94	5.99
9	3.70	5.4	3.00	3.0	32.00	8.86	0.9	9.96
12	4.40	5.3	2.96	2.5	33.00	7.97	0.81	19.61
15	4.40	5.3	2.96	2.8	34.00	7.38	0.75	25.00
20	4.60	5.1	2.95	5.0	35.00	6.39	0.65	35.00



**A.3. Proses Oksidasi Lanjut Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S)**

**A.3.1. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 100$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 30% (intensitas rendah); Jenis Asam = HCl;**

**Tabel A.13.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S) (1)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.8	3.05	-	26.00	93.86	1.00	0.00
3	2.25	5.6	3.06	2.1	29.50	85.17	0.90	9.26
6	2.53	5.5	3.03	1.6	30.50	80.72	0.85	13.99
9	3.00	5.5	2.99	1.5	30.50	80.09	0.85	14.67
12	3.32	5.4	3.01	1.4	33.00	79.78	0.84	15.01
15	3.65	5.3	2.98	1.5	33.00	77.90	0.83	17.00
20	2.25	5.2	2.98	2.7	34.00	75.10	0.82	18.00

**Tabel A.14.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S) (2)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.8	3.10	-	25.50	98.20	1	0.00
3	2.50	5.7	3.08	2.5	29.00	88.38	0.90	10.00
6	2.65	5.6	3.03	1.7	30.00	84.45	0.86	14.00
9	3.00	5.5	3.00	1.6	30.50	83.47	0.85	14.96
12	3.42	5.4	3.01	1.4	32.00	82.48	0.84	15.52
15	3.65	5.4	2.99	1.5	33.00	81.50	0.83	16.57
20	2.55	5.3	2.98	2.6	34.00	79.54	0.81	19.00

**A.3.2. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 100$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 60% (intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl;**

**Tabel A.15.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S) (1)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.7	3.07	-	26.00	99.22	1.00	0.00
3	3.41	5.6	3.09	2.4	30.00	80.34	0.81	19.01
6	3.96	5.5	3.08	1.6	31.00	77.38	0.78	21.99
9	4.14	5.4	3.04	1.5	32.00	76.88	0.77	22.50
12	4.57	5.3	3.00	1.4	33.00	76.39	0.77	23.00
15	4.55	5.2	2.99	1.6	34.00	76.19	0.76	23.19
20	5.55	5.2	2.98	3.5	35.00	75.39	0.76	24.00

**Tabel A.16.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S) (2)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	C <sub>fenol</sub>	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.7	3.07	-	26.00	104.16	1.00	0.00
3	3.41	5.6	3.09	2.4	28.00	83.75	0.80	19.59
6	3.96	5.5	3.08	1.6	30.00	81.87	0.79	21.40
9	4.14	5.4	3.04	1.5	31.00	81.55	0.78	21.71
12	4.57	5.3	3	1.4	32.00	79.06	0.76	24.09
15	4.55	5.2	2.99	1.6	33.00	77.91	0.75	25.28
20	5.55	5.2	2.98	3.5	35.00	76.80	0.74	26.26

**A.3.3.** Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 50$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 30% (Intensitas rendah); Jenis Asam = HCl

**Tabel A.17.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S) (1)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	C <sub>fenol</sub>	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.9	3.07	-	25.00	46.36	1.00	0.00
3	5.04	5.9	3.15	3.85	29.00	40.10	0.86	13.43
6	5.71	5.7	3.11	3.45	30.00	39.20	0.86	13.85
9	5.78	5.6	3.09	3.4	31.00	39.08	0.84	15.68
12	5.81	5.5	3.08	3.20	32.00	38.58	0.83	16.77
15	6.72	5.5	3.06	3.10	33.00	37.56	0.81	18.97
20	5.91	5.4	3.04	5.30	34.00	35.97	0.77	22.54

**Tabel A.18.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S) (2)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	C <sub>fenol</sub>	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.7	3.20	-	26.00	44.52	1.00	0.00
3	4.3	5.6	3.13	3.95	30.00	37.35	0.83	17.06
6	5.1	5.6	3.11	3.65	31.00	37.01	0.83	17.24
9	5.4	5.5	3.07	3.50	32.00	36.95	0.83	17.35
12	5.2	5.5	3.06	3.30	33.00	36.06	0.81	19.00
15	5.1	5.4	3.05	3.25	34.00	35.18	0.79	20.98
20	4.6	5.4	3.00	5.30	35.00	35.12	0.78	22.00

**A.3.4. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 50$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 60% (Intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl**

**Tabel A.19.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S) (1)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	$C/C_0$	% penyisihan
0	-	5.9	3.07	-	25.00	47.36	1.00	0.00
3	5.04	5.9	3.15	3.85	29.00	39.28	0.83	17.06
6	5.71	5.7	3.11	3.45	30.00	39.20	0.83	17.24
9	5.78	5.6	3.09	3.40	31.00	39.14	0.83	17.35
12	5.81	5.5	3.08	3.20	32.00	36.99	0.78	21.90
15	6.72	5.5	3.06	3.10	33.00	36.31	0.77	23.32
20	5.91	5.4	3.04	5.30	34.00	35.12	0.74	25.85

**Tabel A.20.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S) (2)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	$C/C_0$	% penyisihan
0	-	5.8	3.09	-	26.00	38.24	1	0.00
3	5.00	5.7	3.16	3.9	28.00	32.27	0.84	15.64
6	5.61	5.6	3.21	3.5	30.00	30.73	0.80	19.65
9	5.73	5.5	3.08	3.4	30.50	29.99	0.78	21.60
12	5.80	5.5	3.06	3.2	31.00	29.39	0.76	23.15
15	6.70	5.4	3.04	3.1	32.00	29.23	0.76	23.56
20	5.83	5.3	3.04	5.2	33.00	28.76	0.75	24.79

**A.3.5. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 10$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 30% (Intensitas rendah); Jenis Asam = HCl**

**Tabel A.21.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S) (1)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	$C/C_0$	% penyisihan
0	-	5.8	3.03	-	25	17.86	1	0.00
3	4.29	5.7	3.1	2.1	29	15.29	0.85	14.39
6	4.65	5.6	3.09	3.6	31	14.78	0.82	17.27
9	5.5	5.6	3.09	3.3	32	14.38	0.80	19.49
12	6.3	5.5	3.06	3.2	33	13.97	0.78	21.81
15	5.25	5.4	3.05	2	34	13.82	0.77	22.65
20	5.65	5.3	3.03	5	35	13.56	0.75	24.10

**Tabel A.22.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S) (2)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	C <sub>fenol</sub>	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.8	3.03	-	27.0	9.89	1	0.00
3	4.29	5.7	3.10	2.1	28.0	8.47	0.85	14.37
6	4.65	5.6	3.09	3.6	31.0	8.18	0.82	17.27
9	5.50	5.6	3.09	3.3	32.0	7.96	0.80	19.48
12	6.30	5.5	3.06	3.2	33.0	7.73	0.78	21.80
15	5.25	5.4	3.05	2.0	33.5	7.61	0.77	22.66
20	5.65	5.3	3.03	5.0	34.0	7.46	0.75	24.50

**A.3.6.** Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 10$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 60% (Intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl

**Tabel A.23.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S) (1)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	C <sub>fenol</sub>	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.8	3.03	-	25.00	12.19	1.00	0.00
3	4.29	5.7	3.10	2.1	29.00	12.16	1.00	0.26
6	4.65	5.6	3.09	3.6	31.00	11.74	0.96	3.70
9	5.50	5.6	3.09	3.3	32.00	10.30	0.84	15.56
12	6.30	5.5	3.06	3.2	33.00	9.06	0.74	25.71
15	5.25	5.4	3.05	2.0	34.00	8.16	0.67	33.11
20	5.65	5.3	3.03	5.0	35.00	7.17	0.59	41.23

**Tabel A.24.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S) (2)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	C <sub>fenol</sub>	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.50	3.17	-	29.00	15.11	1.00	0.00
3	5.13	5.50	3.22	2.55	33.00	12.12	0.80	19.79
6	4.50	5.40	3.19	1.80	35.00	10.86	0.72	28.13
9	5.28	5.30	3.19	2.15	34.00	10.35	0.68	31.50
12	4.86	5.30	3.19	1.60	35.00	10.31	0.68	31.77
15	4.96	5.20	3.15	1.70	36.00	10.23	0.68	32.29
20	5.78	5.10	3.15	2.50	36.00	10.08	0.67	33.33

**A.3.7 Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 150$  Lpj;  $C_{p0} = 50$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 60%  
(Intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl**

**Tabel A.25.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S) (1)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.9	3.07	-	25.00	56.69	1.00	0.00
3	5.04	5.9	3.15	3.85	29.00	51.25	0.90	9.58
6	5.71	5.7	3.11	3.45	30.00	51.10	0.90	9.86
9	5.78	5.6	3.09	3.40	31.00	50.39	0.89	11.12
12	5.81	5.5	3.08	3.20	32.00	50.00	0.88	11.80
15	6.72	5.5	3.06	3.10	33.00	49.44	0.87	12.78
20	5.91	5.4	3.04	5.30	34.00	48.50	0.85	14.44

**Tabel A.26.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S) (2)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.8	3.11	-	26.00	48.89	1.00	0.00
3	4.9	5.7	3.09	4.20	28.00	44.98	0.92	8.00
6	5.3	5.6	3.11	3.65	30.00	44.73	0.91	8.50
9	5.6	5.5	3.09	3.50	31.00	44.01	0.90	10.00
12	5.8	5.4	3.00	3.30	31.50	43.51	0.89	11.00
15	6.2	5.4	2.99	3.10	32.00	43.02	0.88	12.00
20	5.8	5.3	2.98	5.30	33.00	42.01	0.86	14.00

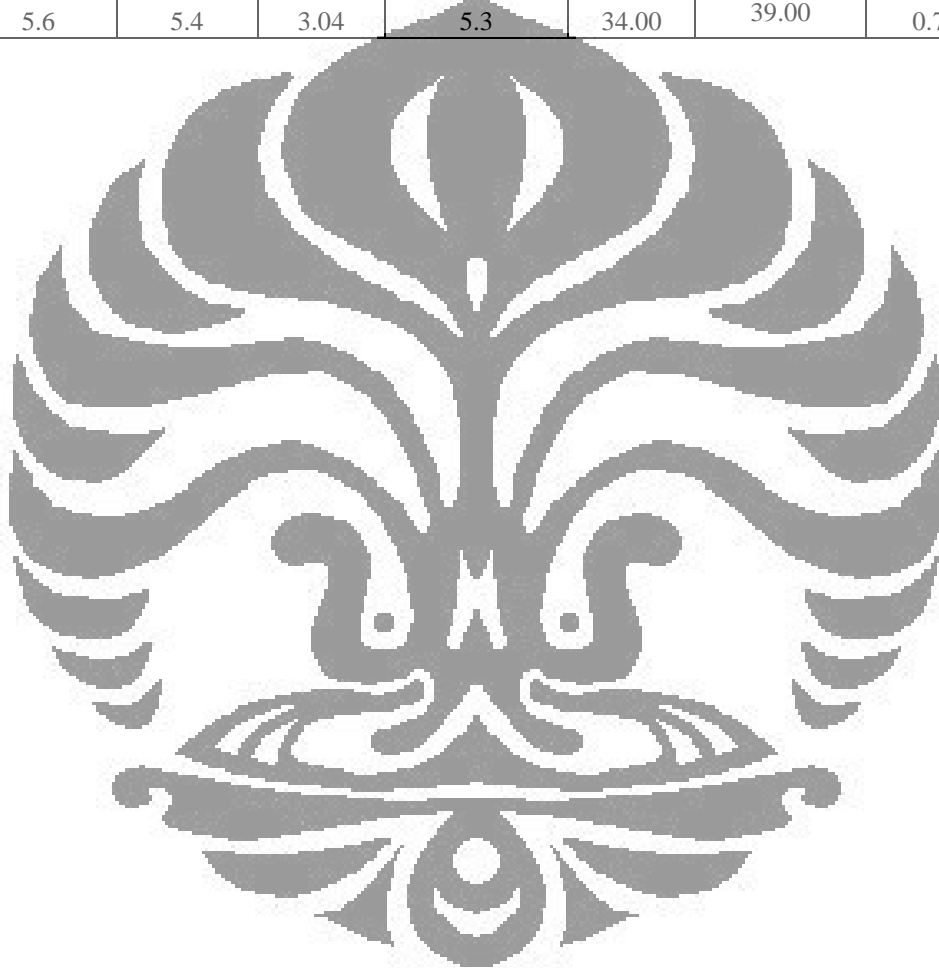
**A.3.8. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 250$  Lpj;  $C_{p0} = 50$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 60%  
(Intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl**

**Tabel A.27.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S) (1)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	$C_{\text{fenol}}$	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.9	3.08	-	26.00	58.85	1.00	0.00
3	5.05	5.8	3.15	3.9	27.00	46.88	0.79	20.34
6	5.70	5.7	3.11	3.5	30.00	45.15	0.76	23.28
9	5.80	5.6	3.09	3.4	31.50	44.25	0.75	24.82
12	5.80	5.5	3.08	3.2	32.50	43.97	0.74	25.29
15	6.72	5.4	3.06	3.1	33.00	43.66	0.74	25.82
20	5.90	5.3	3.04	5.3	34.00	43.62	0.74	25.88

**Tabel A.28.** Data pada penyisihan fenol proses Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S) (1)

t (menit)	DO3 (ppm)	DO (ppm)	pH	vol. Titran (fp=200/25)	T (°C)	C <sub>fenol</sub>	C/C <sub>0</sub>	% penyisihan
0	-	5.6	3.03	-	25.00	54.55	1.00	0.00
3	4.8	5.9	3.11	3.7	29.00	43.60	0.80	19.98
6	5.1	5.7	3.09	3.5	30.00	40.92	0.75	25.00
9	5.2	5.6	3.06	3.3	31.00	39.82	0.73	26.88
12	5.5	5.5	3.05	3.2	32.00	39.55	0.72	27.50
15	6.2	5.5	3.04	3.1	33.00	39.28	0.72	28.10
20	5.6	5.4	3.04	5.3	34.00	39.00	0.71	28.50





**Pengolahan Data Proses Penyisihan Fenol dengan Proses Oksidasi Lanjut  
Ozonasi/Kavitasi Hidrodinamik/Ultrasonik**

**B.1. Proses Oksidasi Lanjut Ozonasi - Kavitasi Hidrodinamik (O/K)**

**B.1.1. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 100$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 0%  
(tanpa sonikasi); Jenis Asam = HCl;**

$$mean = \bar{x} = \frac{y_1 + y_2}{2}$$

$$deviasi = s = (y_1 - \bar{x})^2 + (y_2 - \bar{x})^2$$

t	C/C0 (y)		Mean	deviasi
	1	2		
0	1.000	1.000	1.000	0.00000
3	0.960	0.920	0.940	0.00080
6	0.891	0.886	0.889	0.00001
9	0.886	0.870	0.878	0.00013
12	0.880	0.867	0.874	0.00008
15	0.870	0.860	0.865	0.00005
20	0.865	0.850	0.857	0.00011
Persentase Penyisihan rata-rata			14.241	
Deviasi rata-rata				0.00017

**B.1.2. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 50$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 0%  
(tanpa sonikasi); Jenis Asam = HCl;**

t	C/C0		Mean	deviasi
	1	2		
0	1.000	1.000	1.000	0.00000
3	0.911	0.995	0.953	0.00354
6	0.885	0.983	0.934	0.00479
9	0.875	0.974	0.925	0.00498
12	0.864	0.966	0.915	0.00515
15	0.863	0.914	0.889	0.00132
20	0.828	0.803	0.816	0.00030
Persentase Penyisihan rata-rata			18.380	
Deviasi rata-rata				0.00287



**B.1.3. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 10$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 0% (tanpa sonikasi); Jenis Asam = HCl;**

t	C/C0		Mean	deviasi
	1	2		
0	1.000	1.000	1.000	0.00000
3	0.914894	0.907851	0.911	0.00002
6	0.906383	0.898637	0.902	0.00003
9	0.897872	0.889422	0.893	0.00004
12	0.851064	0.83874	0.845	0.00007
15	0.842553	0.829525	0.836	0.00008
20	0.795745	0.778843	0.787	0.00014
Persentase Penyisihan rata-rata			21.270	
Deviasi rata-rata				0.00005

**B.2. Proses Oksidasi Lanjut Ozonasi - Kavitas Ultrasonik (O/S)**

**B.2.1. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 100$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 60% (Intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl;**

t	C/C0		Mean	deviasi
	1	2		
0	1.000	1.000	1.000	0.00000
3	0.826	0.871	0.848	0.00103
6	0.813	0.860	0.836	0.00110
9	0.793	0.853	0.823	0.00177
12	0.781	0.834	0.807	0.00145
15	0.774	0.834	0.804	0.00179
20	0.768	0.786	0.777	0.00018
Persentase Penyisihan rata-rata			22.250	
Deviasi rata-rata				0.00105

**B.2.2. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_p = 50$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 60% (Intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl;**

t	C/C0		Mean	deviasi
	1	2		
0	1.000	1.000	1.000	0.00000
3	0.958	0.960	0.959	0.00000
6	0.951	0.940	0.945	0.00005
9	0.949	0.920	0.934	0.00043
12	0.922	0.900	0.911	0.00024
15	0.860	0.880	0.870	0.00018
20	0.754	0.740	0.746	0.00009
Persentase Penyisihan rata-rata			25.300	
Deviasi rata-rata				0.00014

**B.2.3. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_p = 10$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 60% (Intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl;**

t	C/C0		Mean	deviasi
	1	2		
0	1.000	1.000	1.000	0.00000
3	0.960	0.974	0.967	0.00010
6	0.940	0.951	0.945	0.00006
9	0.900	0.922	0.911	0.00025
12	0.810	0.906	0.858	0.00468
15	0.750	0.795	0.772	0.00101
20	0.650	0.667	0.658	0.00016
Persentase Penyisihan rata-rata			34.120	
Deviasi rata-rata				0.00089

**B.3. Proses Oksidasi Lanjut Ozonasi-Kavitasi Ultrasonik dan Hidrodinamik (O/K/S)**

**B.3.1. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 100$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 30% (intensitas rendah); Jenis Asam = HCl;**

t	C/C0		Mean	deviasi
	1	2		
0	1.000	1.000	1.000	0.00000
3	0.907	0.907	0.907	5E-09
6	0.859	0.860	0.859	6.05E-07
9	0.851	0.850	0.850	5E-07
12	0.843	0.840	0.841	3.38E-06
15	0.833	0.830	0.831	4.5E-06
20	0.820	0.810	0.815	5E-05
Persentase Penyisihan rata-rata			18.500	
Deviasi rata-rata				8.427E-06

**B.3.2. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 100$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 60% (intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl;**

t	C/C0		Mean	deviasi
	1	2		
0	1.000	1.000	1.000	0.00000
3	0.810	0.803	0.806	0.00002
6	0.780	0.786	0.783	0.00002
9	0.775	0.783	0.779	0.00003
12	0.770	0.759	0.764	0.00005
15	0.768	0.748	0.758	0.00019
20	0.760	0.737	0.748	0.00025
Persentase Penyisihan rata-rata			25.130	
Deviasi rata-rata				0.00008

**B.3.2. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 50$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 60% (intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl;**

t	C/C0		mean	deviasi
	1	2		
0	1.000	1.000	1.000	0.00000
3	0.829	0.843	0.836	0.00010
6	0.827	0.803	0.815	0.00029
9	0.826	0.783	0.805	0.00090
12	0.781	0.768	0.774	0.00007
15	0.766	0.764	0.765	0.00000
20	0.741	0.752	0.746	0.00005
Persentase Penyisihan rata-rata			25.32	
Deviasi rata-rata				0.00020

**B.3.3. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 200$  Lpj;  $C_{p0} = 10$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 60% (intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl;**

t	C/C0		Mean	deviasi
	1	2		
0	1.000	1.000	1.000	0.00000
3	0.997	0.802	0.899	0.01906
6	0.963	0.718	0.840	0.02982
9	0.844	0.684	0.764	0.01271
12	0.743	0.682	0.712	0.00183
15	0.668	0.677	0.672	0.00003
20	0.587	0.666	0.627	0.00311
Persentase Penyisihan rata-rata			37.280	
Deviasi rata-rata				0.00951

**B.3.4. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 150$  Lpj;  $C_{p0} = 50$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 60% (intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl;**

t	C/C0		Mean	deviasi
	1	2		
0	1.000	1.000	1.000	0.00000
3	0.904	0.920	0.912	0.00012
6	0.901	0.915	0.908	0.00009
9	0.888	0.900	0.894	0.00006
12	0.881	0.890	0.885	0.00003
15	0.872	0.880	0.876	0.00003
20	0.855	0.860	0.857	0.00000
Persentase Penyisihan rata-rata			14.222	
Deviasi rata-rata				0.00005

**B.3.5. Pada  $Q_L = 2$  Lpm;  $Q_g = 250$  Lpj;  $C_{p0} = 50$  ppm; Intensitas Ultrasonik = 60% (intensitas tinggi); Jenis Asam = HCl;**

t	C/C0		Mean	deviasi
	1	2		
0	1.000	1.000	1.000	0.00000
3	0.796	0.800	0.798	0.00000
6	0.767	0.750	0.758	0.00014
9	0.751	0.730	0.740	0.00023
12	0.747	0.725	0.736	0.00024
15	0.741	0.720	0.730	0.00023
20	0.741	0.715	0.728	0.00034
Persentase Penyisihan rata-rata			27.193	
Deviasi rata-rata				0.00017