

**STUDI PERPINDAHAN MASSA
DAN DEKOMPOSISI OZON PADA PROSES OKSIDASI
LANJUT BERBASIS OZON**

SKRIPSI

**RUMIA S. MONICA
06 06 07 67 85**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2010**

**STUDI PERPINDAHAN MASSA
DAN DEKOMPOSISI OZON PADA PROSES OKSIDASI
LANJUT BERBASIS OZON**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana

**RUMIA S. MONICA
06 06 07 67 85**



**UNIVERSITAS INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

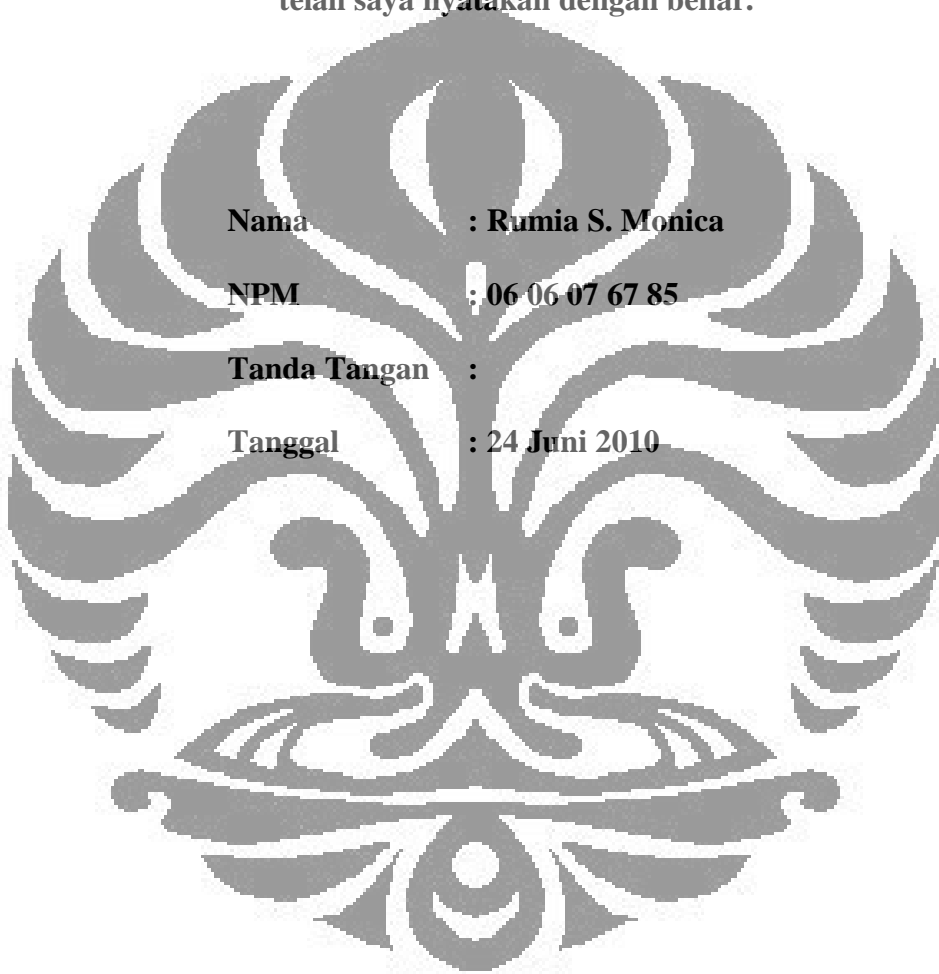
**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Rumia S. Monica

NPM : 06 06 07 67 85

Tanda Tangan :

Tanggal : 24 Juni 2010



HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Rumia S. Monica
NPM : 06 06 07 67 85
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Studi Perpindahan Massa dan Dekomposisi Ozon
pada Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Ozon

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

DEWAN PENGUJI

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

Pembimbing 2 : Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA ()

Penguji 1 : Ir. Sutrasno K, M.Sc, Ph.D ()

Penguji 2 : Dr. Ir. Nelson Saksono, MT ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Juli 2010

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Kuasa. Atas kehendak, kasih sayang, dan pertolongan-Nya skripsi ini dapat terselesaikan tepat pada waktunya.

Skripsi ini disusun untuk memenuhi persyaratan akademis dalam meraih gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Dalam penyusunan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Ir. Eva Fathul Karamah, M.T. dan Bapak Prof.Dr. Ir Setijo Bismo, DEA selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini;
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI;
3. Bapak Ir. Yuliusman, M.Eng. selaku kordinator skripsi Teknik Kimia FTUI;
4. Bapak Dr. Ir. Slamet, M.T. selaku pembimbing akademis;
5. Kedua orang tua saya, kakak, dan abang saya yang memberi dukungan dalam penyelesaian skripsi ini;
6. Linda Tjahjadi dan Sarah Irene;
7. Mang Ijal, Kang Jajat, Mas Heri, Mas Eko, Mas Opik, Mbak Tiwi, dan Pak Masturo yang telah banyak membantu dari awal hingga akhir;
8. Seluruh teman dan sahabat yang mendukung dalam penyelesaian skripsi ini;

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

Depok, 24Juni 2010

Penulis

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

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

Nama : Rumia S. Monica
NPM : 06 06 07 67 85
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 :

**Studi Perpindahan Massa dan Dekomposisi Ozon pada Proses Oksidasi
Lanjut Berbasis Ozon**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 24 Juni 2010

Yang menyatakan

(Rumia S. Monica)

ABSTRAK

Nama : Rumia S. Monica
Program Studi : Teknik Kimia
Judul : Studi Perpindahan Massa dan Dekomposisi Ozon pada Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Ozon

Proses Oksidasi Lanjut (*Advanced Oxidation Processes/AOPs*) yang berbasis ozon merupakan proses yang sudah banyak digunakan dalam pengolahan air. Proses ini memanfaatkan sifat ozon sebagai oksidator kuat dan disinfektan. Ozon mudah terdekomposisi dalam air menjadi radikal OH yang merupakan oksidator sangat kuat dalam air. Kekurangan dari penggunaan ozon adalah kelarutan dan stabilitasnya di air yang relatif rendah. Kavitasasi yang merupakan teknik pembentukan gelembung mikro dapat meningkatkan kelarutan ozon dalam air dan mempercepat pembentukan radikal hidroksil.

Pada penelitian ini diteliti signifikansi pemanfaatan kavitasasi hidrodinamika dan kavitasasi ultrasonik pada sistem ozonasi pada studi perpindahan massa dan dekomposisi ozon. Dari penelitian yang dilakukan, pada ozonasi yang dikombinasikan dengan kavitasasi hidrodinamika dan kavitasasi ultrasonik, harga $k_L a_{O_3}$ 17 kali lebih besar dari ozonasi saja, sedangkan harga R_{CT} 2,78 kali lebih besar dari ozonasi saja.

Kata kunci:

ozon,, kavitasasi hidrodinamika, kavitasasi ultrasonik, perpindahan massa, dekomposisi

ABSTRACT

Name : Rumia S. Monica
Study Program : Chemical Engineering
Title : Mass Transfer and Ozone Decomposition Study in Ozone Based Advanced Oxidation Processes

Ozone based Advanced Oxidation Processes has widely used in water treatment process. This process uses ozone characteristic as a strong oxidator and disinfectant. Ozone is easily decomposed into hydroxyl radical, which is a very strong oxidator. The weaknesses of this process were about its solubility and stability in water. Cavitation, a technique to generate micro-bubbles, can be used to increase ozone solubility in water and enhance ozone decomposition into hydroxyl radical.

The significance of hydrodynamic and ultrasonic cavitation in ozonation was evaluated in mass transfer studies and ozone decomposition. The result showed that when hydrodynamic cavitation and ultrasonic cavitation used, $k_L a_{O_3}$ value was 17 times higher than ozonation only, while R_{CT} was 2,78 times higher than ozonation only

Key words:

Ozone, hydrodynamic cavitation, ultrasonic cavitation, mass transfer, decomposition

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
BAB 1. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Batasan Penelitian	4
1.5. Model Operasional Penelitian.....	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Proses Oksidasi Lanjut.....	5
2.1.1. Ozonasi	5
2.1.2. Kavitasi.....	9
2.1.2.1. Kavitasi Hidrodinamik	10
2.1.2.2. Kavitasi Ultrasonik	10
2.1.3. Ozonasi - Kavitasi	12
2.1.4. Kelebihan dan Kekurangan Teknologi Oksidasi Lanjut.....	13
2.2. Perpindahan Massa Ozon dalam Air	14
2.3. Dekomposisi Ozon	17
2.3.1. Reaksi Langsung oleh Ozon	18
2.3.2. Reaksi Tidak Langsung oleh Ozon	19
2.4. Konsep R_{CT}	22

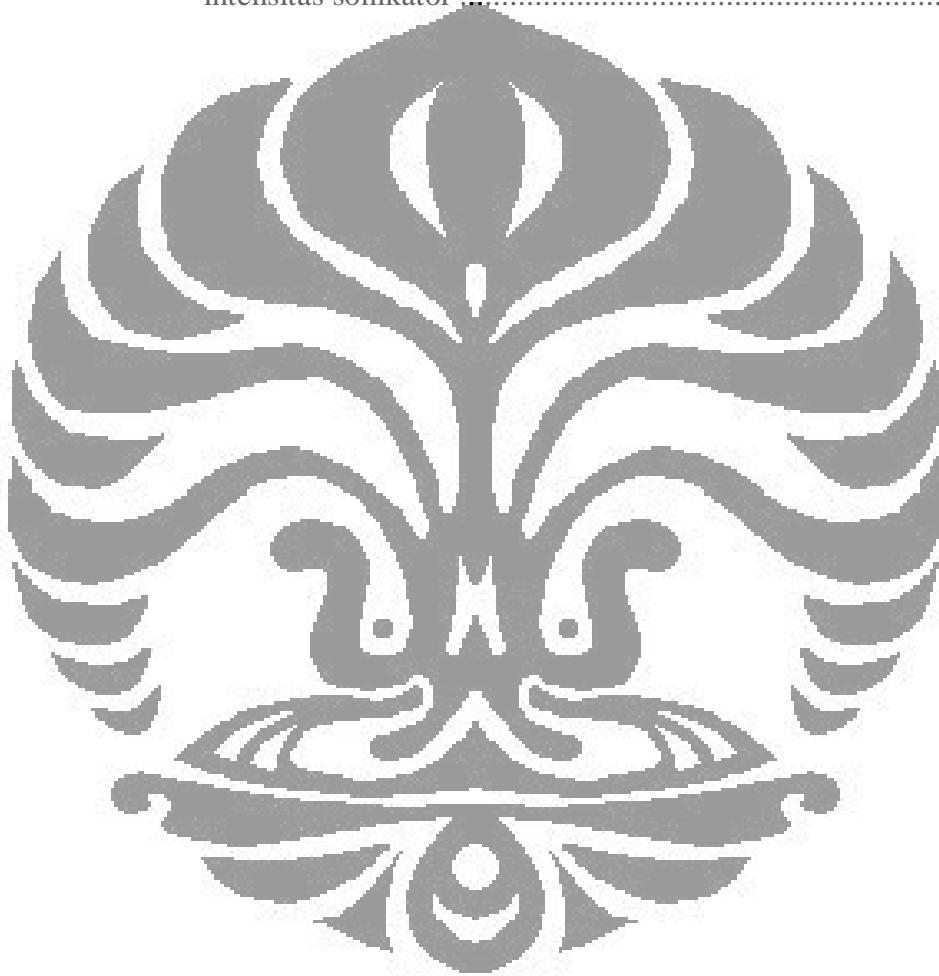
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	25
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	25
3.2. Rancangan Penelitian	26
3.2.1. Studi Perpindahan Massa	26
3.2.2. Studi Dekomposisi Ozon.....	26
3.2.3. Pengambilan sample hasil	26
3.2.4. Analisis Umpan dan Sample	27
3.3. Konfigurasi dan Penggunaan Alat	27
3.4. Alat dan Bahan.....	31
3.4.1. Penentuan k_{La}	31
3.4.2. Penentuan R_{CT}	31
3.5. Prosedur Penelitian	32
3.5.1. Penentuan k_{La} dengan proses ozonasi.....	32
3.5.2. Penentuan k_{La} dengan proses ozonasi dan Kavitasi Hidrodinamika	33
3.5.3. Penentuan k_{La} dengan proses ozonasi dan Kavitasi Ultrasonik	33
3.5.4. Penentuan k_{La} dengan proses ozonasi, Kavitasi Hidrodinamik, dan Kavitasi Ultrasonik	34
3.5.5. Penentuan R_{CT} dengan proses ozonasi	35
3.5.6. Penentuan R_{CT} dengan proses ozonasi dan Kavitasi Hidrodinamika	35
3.5.7. Penentuan R_{CT} dengan proses ozonasi dan Kavitasi Ultrasonik.....	36
3.5.8. Penentuan R_{CT} dengan proses ozonasi, Kavitasi Hidrodinamik, dan Kavitasi Ultrasonik	37
3.6. Analisis Sample	37
3.6.1. Analisis Kandungan DO3.....	38
3.6.2. Analisis konsentrasi gas ozon pada bagian <i>output</i>	38
3.6.2.1. Peralatan	38
3.6.2.2. Bahan.....	38
3.6.2.3. Prosedur.....	39

3.6.3. Analisis kandungan ion CO_3^{2-}	39
3.6.2.1. Peralatan	39
3.6.2.2. Bahan.....	39
3.6.2.3. Prosedur.....	39
3.6.3. Analisis pH	40
3.7. Pengolahan Data	40
3.7.1. Penentuan koefisien perpindahan massa	40
3.7.2. Penentuan dekomposisi ozon dan konsentrasi radikal OH dengan R_{CT}	41
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	42
4.1. Koefisien Perpindahan Massa Ozon–Air ($k_L a_{O_3}$)	42
4.1.1. Pengaruh kavitas hidrodinamik dan kavitas ultrasonik terhadap $k_L a$	43
4.1.2. Pengaruh laju sirkulasi air (Q_L) terhadap $k_L a$	47
4.1.3. Pengaruh laju alir gas (Q_G) terhadap $k_L a$	51
4.1.4. Pengaruh intensitas sonikator terhadap $k_L a$	56
4.2. Dekomposisi Ozon dengan Penentuan Koefisien R_{CT}	58
4.2.1. Perbandingan koefisien R_{CT} pada konfigurasi sistem.....	59
4.2.2. Perbandingan koefisien R_{CT} pada pH asam dan basa.....	62
4.2.3. Perbandingan koefisien R_{CT} pada variasi intensitas sonikator	64
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	66
5.1. Kesimpulan.....	66
5.2. Saran.....	67
DAFTAR PUSTAKA.....	68
LAMPIRAN A	
LAMPIRAN B	
LAMPIRAN C	

DAFTAR GAMBAR

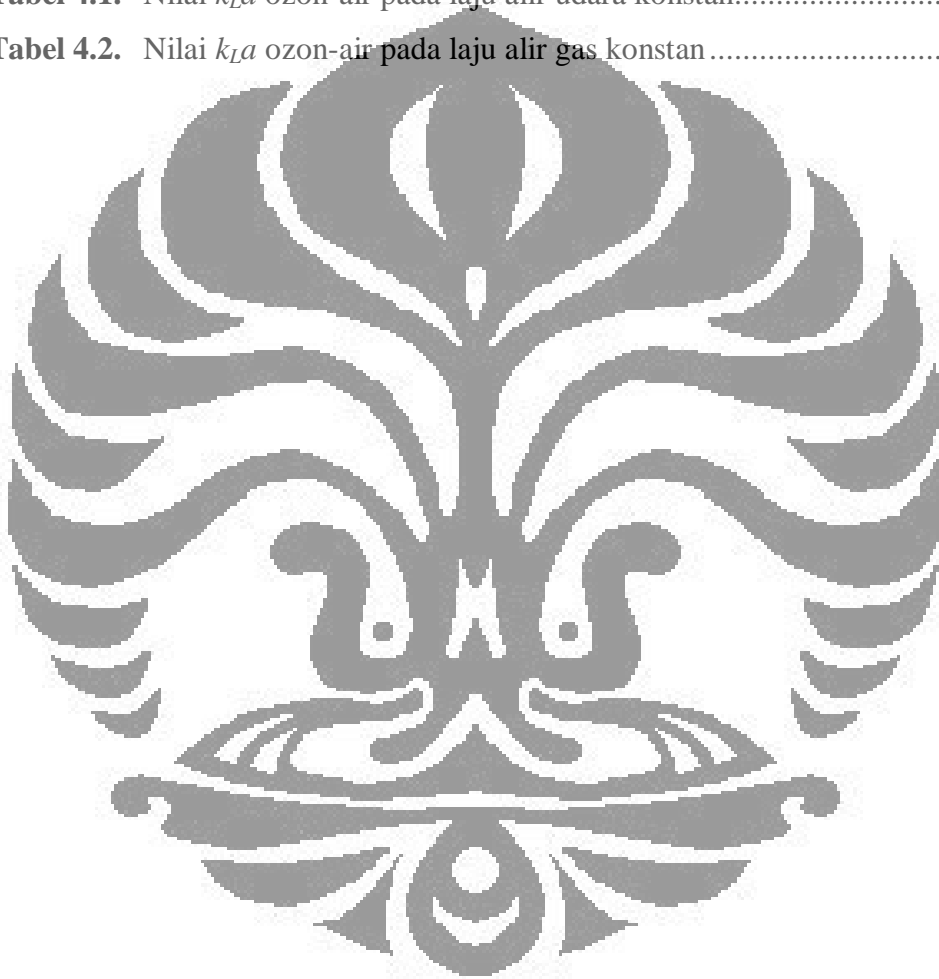
Gambar 2.1.	Perpindahan massa antara fasa gas dan fasa cair.....	15
Gambar 2.2.	Reaksi ozon dalam air	18
Gambar 3.1.	Diagram alir penelitian.....	25
Gambar 3.2.	Skema Alat untuk Proses Ozonasi.....	29
Gambar 3.3.	Skema Alat untuk Proses Ozonasi dan Kavitas Hidrodinamika...29	
Gambar 3.4.	Skema Alat untuk Proses Ozonasi dan Kavitas Ultrasonik.....30	
Gambar 3.5.	Skema Alat untuk Proses Ozonasi, Kavitas Hidrodinamika, dan Kavitas Ultrasonik.....	30
Gambar 4.1.	Perbandingan DO ₃ (ozon terlarut) terhadap waktu pada variasi skema penelitian	43
Gambar 4.2.	Perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada variasi skema percobaan	45
Gambar 4.3.	Perbandingan k_{LA} pada tiap skema percobaan.....	46
Gambar 4.4.	Perbandingan DO ₃ (ozon terlarut) terhadap waktu pada variasi laju sirkulasi air	48
Gambar 4.5.	Perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada variasi sirkulasi alir air	49
Gambar 4.6.	Grafik hubungan laju sirkulasi air (Q_L) dengan k_{LA} pada $Q_G = 400$ l/jam.....	50
Gambar 4.7.	Perbandingan DO ₃ (ozon terlarut) terhadap waktu pada variasi laju alir gas	52
Gambar 4.8.	Perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada variasi laju alir gas	53
Gambar 4.9.	Grafik hubungan laju alir gas (Q_G) dengan k_{LA} pada $Q_L = 3$ LPM	54
Gambar 4.10.	Perbandingan DO ₃ (ozon terlarut) terhadap waktu pada variasi intensitas sonikator	56
Gambar 4.11.	Perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada variasi intensitas sonikator	57
Gambar 4.12.	Perbandingan k_{LA} pada intensitas sonikator	58
Gambar 4.13.	Perbandingan koefisien R_{CT} pada tiap skema percobaan.....	60

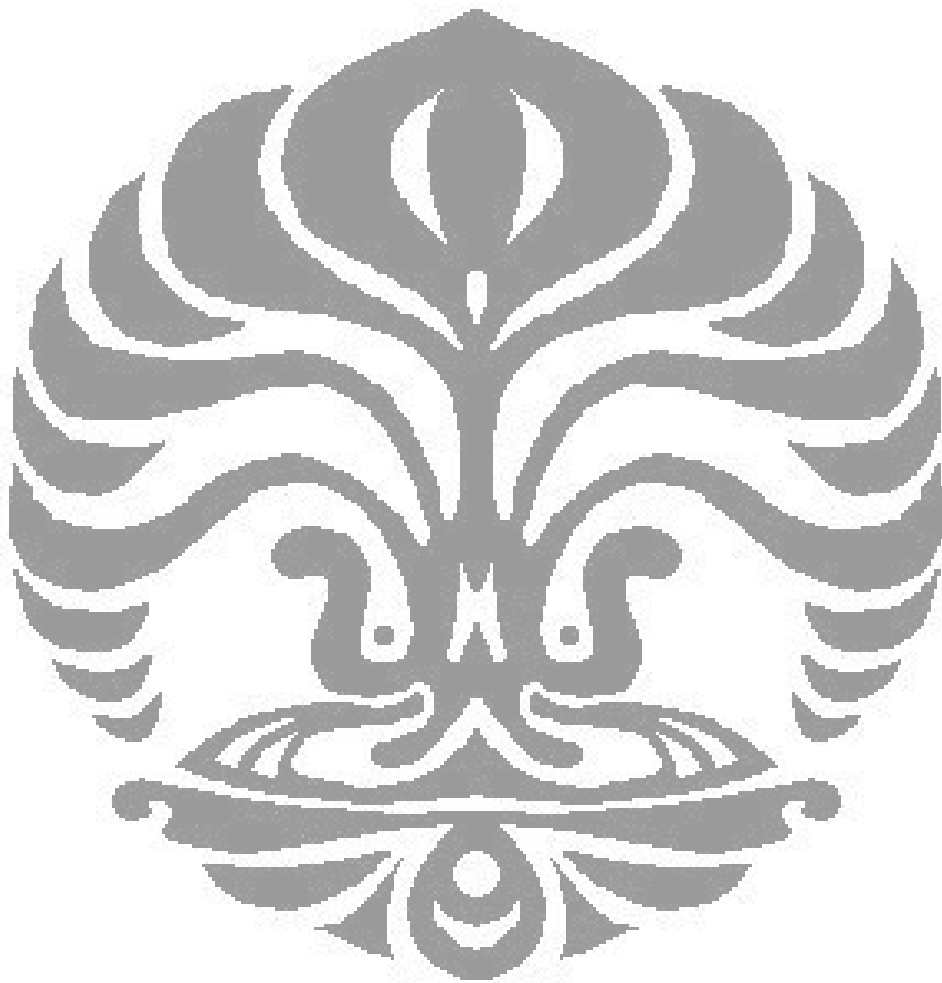
Gambar 4.14. Perbandingan selisih suhu vs waktu pada variasi skema penelitian	61
Gambar 4.15. Perbandingan koefisien R_{CT} pada kondisi asam dan basa.....	62
Gambar 4.16. Perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada variasi pH	63
Gambar 4.17. Perbandingan koefisien R_{CT} pada intensitas sonikator 30% dan 60%.....	64
Gambar 4.18. Perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada variasi intensitas sonikator	65



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Nilai koefisien Disinfeksi pada Disinfektan.....	7
Tabel 2.2. Perbandingan k_{LA} gelembung mikro dengan gelembung konvensional.....	16
Tabel 2.3. Mekanisme Reaksi Dekomposisi Ozon.....	20
Tabel 2.4. Mekanisme Reaksi Dekomposisi Ozon.....	21
Tabel 4.1. Nilai k_{LA} ozon-air pada laju alir udara konstan.....	49
Tabel 4.2. Nilai k_{LA} ozon-air pada laju alir gas konstan.....	53





BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Air bersih merupakan elemen penting bagi kehidupan manusia. Manusia selalu membutuhkan air bersih baik sebagai sumber air minum, maupun untuk melakukan aktivitas kehidupan lainnya seperti mandi, memasak, mencuci, dan lain sebagainya. Kualitas air yang buruk sangat merugikan bagi umat manusia. Air yang mengandung banyak bahan pengotor dapat menyebabkan penyakit diakibatkan oleh banyaknya kandungan polutan dan bakteri berbahaya di dalamnya. Air tersebut biasanya terkotori karena terkena polusi air. Polusi air merupakan peristiwa masuknya zat, energi, unsur atau komponen lainnya ke dalam air sehingga kualitas air terganggu (www.chem-is-try.org). Kualitas air terganggu ditandai dengan perubahan bau, rasa dan warna.

Pencemar yang banyak berada di air umumnya berasal dari hasil industri, seperti benzene yang digunakan dalam industri sebagai pelarut lemak, surfaktan yang digunakan dalam deterjen, dan fenol yang banyak ditemukan pada limbah industri-industri perminyakan, batu bara, pestisida, dan industri lain.

Untuk mendapatkan air bersih, diperlukan adanya teknologi pengolahan air yang efektif dan mudah diaplikasikan. Pengolahan tersebut dapat dilakukan dengan teknologi oksidasi lanjut berbasis ozon. Teknologi oksidasi lanjut atau banyak disebut *Advanced Oxidation Processes (AOPs)* adalah metode oksidasi fasa larutan yang terutama didasari oleh pembentukan dan penggunaan radikal hidroksil sebagai hasil sampingan di dalam proses yang dapat mengakibatkan kehancuran dari senyawa target (pencemar), dan bisa digunakan secara terpisah atau dalam berbagai kombinasi (Remtavares, 2009). Salah satu aplikasi teknologi oksidasi lanjut diantaranya adalah pengolahan limbah cair yang digerakkan dengan cara oksidasi dengan menggunakan gas ozon yang dikombinasikan dengan proses lain seperti sinar ultraviolet, peroksida, ataupun kavitasi. Teknologi oksidasi lanjut berbasis ozon dilakukan karena ozon bersifat sebagai disinfektan yang selektif. Selain itu, ozon mudah terdekomposisi menjadi senyawa-senyawa yang jauh lebih reaktif yaitu radikal OH dan akan bereaksi dengan senyawa-

senyawa lain yang tidak dapat bereaksi dengan ozon. Teknologi oksidasi lanjut berbasis ozon juga efektif digunakan dalam pengolahan air yang mengandung komponen organik yang sulit untuk dihilangkan.

Teknologi oksidasi berbasis ozon ini juga mempunyai kelemahan seperti kelarutan dan stabilitasnya di air yang relatif rendah. Ozon tidak stabil di dalam air dan dengan cepat terdekomposisi menjadi oksigen dan oksidator sekunder terutama radikal OH. Kekurangan lainnya adalah ozon bersifat selektif. Karena sifatnya yang selektif, tidak semua senyawa dapat dioksidasi dengan mudah oleh ozon. Senyawa yang tidak mudah dioksidasi ozon seperti amonia, pestisida, senyawa-senyawa aromatik, dan pelarut terklorinasi (Von Gunten, 2003).

Dalam penelitian ini, teknologi oksidasi lanjut yang digunakan merupakan gabungan ozonasi, kavitasi hidrodinamik, dan kavitasi ultrasonik. Kavitasi merupakan fenomena terjadinya pembentukan, pertumbuhan dan hancurnya gelembung mikro dalam cairan. Kavitasi hidrodinamik merupakan proses kavitasi yang terjadi karena variasi tekanan pada aliran cairan dikarenakan perubahan geometri pada sistem aliran. Kavitasi ultrasonik merupakan proses kavitasi yang terjadi karena melintasnya gelombang suara dengan frekuensi tinggi pada aliran cairan. (Jyoti dan Pandit, 2003). Fenomena kavitasi dapat meningkatkan pembentukan radikal OH dan meningkatkan perpindahan massa ozon. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, kavitasi pada proses yang sinergis dengan ozon dapat mereduksi pemakaian ozon untuk disinfektan sampai 1/3 bagian. (Jyoti dan Pandit, 2003). Hal inilah yang membuat teknologi oksidasi lanjut berbasis ozonasi dan kavitasi merupakan alternatif teknologi yang menjanjikan dan dapat dimanfaatkan untuk pengolahan air.

Pada ozonasi, laju reaksi kimia total dipengaruhi oleh kinetika reaksi dan perpindahan massa. Laju perpindahan massa ozon dapat ditingkatkan dengan memperbesar luas permukaan kontak melalui penggunaan gelembung dengan diameter yang lebih kecil atau disebut gelembung mikro. Laju perpindahan massa merupakan elemen yang penting pada ozonasi cairan karena menentukan banyaknya massa gas ozon yang berpindah atau terlarut ke pada cairan tersebut.

Proses oksidasi lanjut berbasis ozon mempunyai dua tujuan utama, yaitu oksidasi dan disinfeksi. Disinfeksi oleh ozon sedangkan oksidasi oleh ozon dan

radikal OH. Oleh karena itu, perlu diketahui konsentrasi ozon dan radikal OH pada proses. Hubungan antara pemaparan OH radikal terhadap pemaparan ozon (konsentrasi oksidan yang terintegrasi selama waktu reaksi) dapat dianalisa menggunakan parameter R_{CT} . R_{CT} merupakan rasio paparan radikal OH terhadap ozon. Penggunaan R_{CT} merupakan salah satu cara efektif untuk mengetahui konsentrasi radikal OH pada proses.

Dalam penelitian ini akan dilakukan studi perpindahan massa pada proses ozonasi dengan dan tanpa kavitas. Pada penelitian ini juga akan dilakukan studi pemaparan radikal OH terhadap pemaparan ozon. Penelitian ini diharapkan mampu memverifikasi signifikansi penggunaan kavitas untuk meningkatkan efisiensi perpindahan massa ozon dan pembentukan radikal OH, sehingga diharapkan dapat menghasilkan sistem pengolahan air yang lebih baik dan menjadi solusi bagi masalah kelangkaan air bersih.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana signifikansi pemanfaatan kavitas hidrodinamik dan sonikasi untuk meningkatkan kelarutan ozon dalam air, yang dievaluasi dengan besar koefisien perpindahan massa ($k_L a_{O_3}$), dan pengkajian terhadap dekomposisi ozon yang dievaluasi dengan rasio paparan radikal OH terhadap ozon (R_{ct}) pada penggunaan kavitas pada proses ozonasi.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- (1) Menentukan koefisien perpindahan massa ozon ke air ($k_L a_{O_3}$) pada penggunaan kavitas pada ozonasi.
- (2) Mengkaji dekomposisi ozon yang dievaluasi dengan rasio paparan radikal OH terhadap ozon (R_{ct}) yang dengan dan tanpa pengaruh kavitas.

1.4. Batasan Penelitian

Pada penelitian ini, penulis membatasi masalah sebagai berikut:

- (1) Proses berlangsung secara *semi-batch* dengan sirkulasi aliran liquid.

- (2) Ozonator yang digunakan merupakan ozonator rancangan Prof. Dr. Setijo Bismo dengan produktifitas 22 gram/jam.
- (3) Gas yang diinjeksikan ke dalam ozonator adalah udara (oksigen 21%)
- (4) Air yang digunakan adalah aquades murni
- (5) Untuk menghasilkan kavitas hidrodinamik digunakan injektor *mazzei*
- (6) Alat sonikasi yang digunakan adalah UP-800 *Ultrasonic Processor*.

1.5. Metode Operasional Penelitian

Penelitian diawali dengan rancang bangun peralatan skala laboratorium yang terdiri dari generator ozon sebagai alat pembangkit ozon, injektor sebagai pembangkit kavitas hidrodinamik serta *ultrasonic processor* sebagai alat untuk kavitas ultrasonik.

Perbedaan konfigurasi proses pada penelitian ini terletak pada penggunaan proses kavitas baik kavitas hidrodinamik, kavitas ultrasonik, maupun tanpa penggunaan kedua proses tersebut. Konfigurasi proses yang digunakan adalah ozonasi, ozonasi/kavitas hidrodinamik, ozonasi/kavitas ultrasonik, dan ozonasi/kavitas hidrodinamik/kavitas ultrasonik. Konfigurasi proses tersebut dilakukan untuk mengetahui perbandingan efektivitas tiap-tiap proses.

Nilai koefisien perpindahan massa dengan dan tanpa kavitas serta pada berbagai variasi proses akan dievaluasi. Uji dekomposisi ozon dilakukan untuk mengamati sejauh mana dekomposisi ozon yang terjadi pada berbagai kombinasi proses yang dievaluasi dengan rasio paparan radikal OH terhadap ozon (R_{CT})

Variabel operasi bebas pada penelitian ini adalah laju alir air, laju alir gas, frekuensi sonikator, dan skema proses.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proses Oksidasi Lanjut

Proses oksidasi lanjut adalah metode oksidasi fasa larutan yang terutama didasari oleh pembentukan dan penggunaan radikal OH sebagai hasil sampingan di dalam proses yang dapat mengakibatkan kehancuran dari senyawa target (pencemar), dan bisa digunakan secara terpisah atau dalam berbagai kombinasi (Remtavares, 2009). Aplikasi teknologi oksidasi lanjut yang akan dibahas pada penelitian ini adalah konfigurasi proses ozonasi, kavitasi hidrodinamik, dan kavitasi ultrasonik.

Teknologi pemurnian air dengan oksidasi lanjut, yang menggunakan ozonasi, kavitasi hidrodinamik, dan kavitasi ultrasonik masing-masing memiliki peranan dalam pemurnian air sehingga menjadi air layak minum. Ozon dapat digunakan sebagai pengoksidasi polutan yang ada seperti amonia dan sianida sehingga polutan bisa menjadi hancur serta ozon juga dapat berperan sebagai disinfektan. Sedangkan, kondisi kavitasi yang ekstrem dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan efisiensi kerja ozon. Penelitian lain menunjukkan bahwa sinergi antara proses ozonasi dan kavitasi mampu mengurangi konsentrasi ozon yang digunakan hingga setengah atau sepertiga dari yang dibutuhkan untuk proses disinfeksi tanpa kavitasi (Jyoti dan Pandit, 2004). Dengan demikian, penggunaan gelembung mikro dengan teknik kavitasi dalam proses ozonasi memungkinkan proses yang lebih ekonomis.

Ozon dapat digunakan sebagai pengoksidasi polutan yang ada seperti amonia dan sianida sehingga polutan bisa menjadi hancur serta ozon juga dapat berperan sebagai disinfektan. Teknologi oksidasi lanjut efektif digunakan dalam pengolahan air yang mengandung komponen organik yang sulit untuk dihilangkan.

2.1.1 Ozonasi

Ozon muncul sebagai gas pada suhu ruang. Gas ozon tidak berwarna dengan bau yang menusuk tercium pada konsentrasi rendah dari 0.02 sampai 0.05

ppm volum. Gas ozon bersifat sangat korosif (www.epa.gov, diakses pada 22 Juni 2009). Ozon merupakan oksidator kuat yang dapat dihasilkan dari udara atau oksigen yang disinari dengan UV (simulasi sinar ultraviolet dari matahari) atau alat elektrik lainnya. Ozonasi merupakan proses yang sudah banyak digunakan dalam pengolahan air. Tidak hanya sebatas mengolah air menjadi air bersih, tetapi juga air siap konsumsi. Proses ini memanfaatkan sifat ozon sebagai oksidator kuat dan kemampuan ozon dalam melakukan disinfeksi.

Pembentukan oksigen menjadi ozon dilakukan dengan menggunakan energi. Sebagai tambahan untuk metode ini, ozon juga dapat dibuat dari reaksi kimia dan elektrolitik. Pada umumnya pada sistem ozonasi terdapat proses *passing dry*, membersihkan udara dengan aliran listrik dengan tegangan tinggi seperti pada *corona discharge*, yang akan menghasilkan konsentrasi ozon sebesar 1% atau 10.000 mg/L. Untuk pemurnian air pada kuantitas kecil, ozonasi UV merupakan yang paling umum, sedangkan sistem dengan skala yang lebih besar dapat menggunakan *corona discharge* atau metode lainnya.

Sifat oksidasi pada ozon dihasilkan dari *nascent oxygen* atau atom oksigen (O) yang mulai terbentuk saat dekomposisi ozon. *Nascent oxygen* ini dapat mengoksidasi membran sel, yang akhirnya menyebabkan perengkahan membran dan mempengaruhi kelangsungan hidup sel. Hasilnya, terjadilah disinfeksi. Pada saat air sample dengan kadar tertentu dialirkan ozon dengan kadar tertentu pula, meningkatnya waktu pengolahan akan juga meningkatkan jumlah mikroorganisme yang dibunuh. Meningkatnya dosis ozon yang diinjeksi akan meningkatkan terbentuknya *nascent oxygen*, dan juga akan meningkatkan jumlah mikroorganisme yang dibunuh (Jyoti dan Pandit, 2004).

Saat ozon larut pada air, ozon akan mengalami tiga reaksi secara bersamaan, reaksi tersebut adalah (Bollyky, 2002):

- 1. Disinfeksi:** Proses disinfeksi pada air dapat menanggulangi bakteri, virus, dan parasit seperti *Giardia* dan *Cryptosporidium*. Ozon disebut sebagai disinfektan yang paling efektif untuk organisme yang telah disebutkan sebelumnya. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 2.4, yaitu tabel yang menunjukkan kemampuan ozon dan disinfektan lain dalam menghilangkan beberapa jenis disinfektan pada air.

Tabel 2.1. Nilai koefisien Disinfeksi pada Disinfektan (L/mg/menit)

Disinfektan	Enterobakteri	Virus	Spora	Kista Amoeba
O ₃	500	5	2	0,5
HOCl	20	>1	0,05	0,05
OCl ⁻	0,2	<0,02	<0,0005	0,005
NH ₂ Cl	0,1	0,005	0,001	0,02

(Sumber: Bollyky, 2002)

- Oksidasi:** Ozon merupakan pengoksidasi yang sangat kuat dan efektif terutama dalam menghilangkan rasa dan bau akibat adanya pencemar organik maupun anorganik. Konsentrasi ozon yang dibutuhkan dan lama reaksi untuk mengoksidasi tergantung pada jenis dan konsentrasi polutan serta kualitas air tersebut.
- Dekomposisi:** Ozon merupakan senyawa tak stabil pada suhu kamar ataupun mendekati suhu kamar dan dengan cepat terdekomposisi menjadi oksigen. Laju dekomposisi dipengaruhi oleh suhu air dan pH.

Di dalam air, ozon akan terdekomposisi menjadi radikal OH (OH•) yang merupakan oksidator paling kuat dalam air. Sebagai oksidator, ozon dan radikal OH bereaksi dengan mikropolutan organik dan anorganik sehingga dapat menghilangkan warna yang disebabkan oleh adanya ion-ion logam, humus dan material-material tanah gambut, plankton, dan limbah industri. Ozon dan radikal OH juga dapat menghilangkan bau, terutama yang disebabkan oleh adanya H₂S yang dihasilkan dari aktivitas mikroorganisme.

pH dapat mempengaruhi tindakan ozon pada bahan organik, yang dapat berupa ozonasi langsung atau tidak langsung (tanpa radikal). Reaksi yang berbeda ini akan menghasilkan produk oksidasi yang berbeda dan dibatasi dengan model kinetika yang juga berbeda. Pada pH rendah, ozon akan bereaksi secara eksklusif dengan senyawa yang mempunyai gugus spesifik melalui reaksi selektif seperti elektrofilik, nukleofilik atau reaksi tambahan dipolar (hal inilah yang disebut ozonasi langsung). Sebaliknya, pada kondisi dasar, ozon akan terdekomposisi

menghasilkan radikal OH yang merupakan pengoksidasi kuat dan bereaksi dengan jenis senyawa organik dan inorganik yang beragam pada air (hal inilah yang disebut ozonasi tidak langsung). Umumnya, pada kondisi asam ($\text{pH} < 4$) didominasi oleh ozonasi langsung, pada $\text{pH} 4-9$ ozonasi langsung dan tidak langsung terjadi, dan pada $\text{pH} > 9$ didominasi ozonasi tidak langsung. (Pera-Titus et.al, 2003)

Ozon mempunyai sifat larut pada air 13 kali lebih kuat daripada di oksigen. Pada saat pertama kali dikontakkan ke air, disinfeksi yang terjadi sangat minim. Ozon dikonsumsi secara dengan cepat, memenuhi kebutuhan ozon dari garam anorganik dan senyawa organik terlarut pada air limbah. Kemampuan disinfeksi ozon mulai nampak saat kebutuhan ozon terpenuhi, dimana kekuatan disinfeksinya 3100 kali lebih kuat dari klorinasi. Disinfeksi timbul tiga sampai delapan detik setelah pengontakkan dengan air. Dosis ozon yang dibutuhkan tergantung kualitas air yang akan diolah.

Proses ozonasi tergolong aman bagi manusia karena tidak menggunakan bahan-bahan kimia yang berbahaya bagi kesehatan. Dengan tidak digunakannya bahan-bahan kimia berbahaya, ozonasi tidak berpotensi menyebabkan terjadinya pencemaran lingkungan. Proses ozonasi tidak menimbulkan masalah lingkungan karena tidak adanya media penyimpanan ozon. Ozon amat mudah terdekomposisi sehingga tidak dapat disimpan dalam jangka waktu yang lama. Pembentukan ozon dilakukan di tempat, yaitu ketika ozon hendak digunakan saja. Penggunaan ozon telah diaplikasikan pada beberapa proses seperti disinfeksi air minum, pengolahan limbah cair, pemusnahan bakteri pathogen, dan sebagainya.

Ozon merupakan senyawa yang dapat larut dalam air. Kontak antara ozon dengan air ditandai dengan terbentuknya gelembung dalam air. Peristiwa terlarutnya ozon dalam air didorong oleh adanya perbedaan konsentrasi antara ozon terlarut aktual dengan konsentrasi ozon jenuh pada temperatur dan suhu dilakukannya percobaan (www.epa.gov, diakses pada 22 Juni 2009). Kelarutan ini menjadi kelemahan utama dalam sistem ozon mengingat laju perpindahan massa dari gas ke air yang rendah. Efisiensi perpindahan massa ozon dari fase gas ke fase cair bergantung pada karakteristik pencampuran kontaktor gas-cairan yang digunakan, kinetika dekomposisi ozon dalam air, dan jumlah serta ukuran gelembung yang

dihasilkan. Keefektifan ozon sebagai disinfektan dan oksidan dapat ditingkatkan dengan menciptakan rasio luas permukaan terhadap volume yang lebih tinggi, yaitu dengan membangkitkan gelembung dalam ukuran yang lebih kecil (Shin, et.al., 1999).

2.1.2 Kavitasasi

Kavitasasi merupakan fenomena terjadinya pembentukan, pertumbuhan dan hancurnya gelembung mikro dalam cairan. Jika fenomena ini terjadi karena adanya gelombang suara dengan frekuensi tinggi 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 hidrodinamik. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, kavitasasi yang dapat membangkitkan gelembung mikro dapat meningkatkan keefektifan proses ozonasi. Gelembung mikro ini memiliki luas permukaan dan densitas gelembung yang sangat besar, kecepatan naik di fase liquid yang kecil, dan tekanan dalam (inner pressure) yang tinggi (Li-Bing Chu, et.al., 2008).

Ozonasi adalah proses absorpsi gas melalui reaksi kimia dimana laju reaksi total dipengaruhi oleh kinetika reaksi dan perpindahan massa. Laju perpindahan massa ozon dapat ditingkatkan dengan memperbesar luas permukaan kontak melalui penggunaan gelembung dengan diameter yang lebih kecil atau gelembung mikro. Penelitian lain menunjukkan bahwa sinergi antara proses ozonasi dan kavitasasi mampu mengurangi konsentrasi ozon yang digunakan hingga setengah atau sepertiga dari yang dibutuhkan untuk proses disinfeksi tanpa kavitasasi (Jyoti dan Pandit, 2004). Dapat disimpulkan bahwa penggunaan gelembung mikro dengan teknik kavitasasi dalam proses ozonasi memungkinkan proses yang lebih ekonomis.

Proses kavitasasi telah diteliti oleh Jyoti dan Pandit yang menggunakan metode hibrida ozonasi–kavitasasi serta peroksida–kavitasasi dalam proses disinfeksi bakteri coliform dalam air. Didapatkan hasil persentase pengurangan jumlah bakteri bakteri dalam 15 menit untuk peroksida adalah 13%, ozonasi 60%, kavitasasi dengan penambahan H_2O_2 m mg/L 75%, kavitasasi dengan penambahan

ozon 2 mg/L 80%. Selain itu, keberadaan sejumlah besar gelembung pada aliran liquid meningkatkan persentase disinfeksi bakteri (Jyoti dan Pandit, 2003).

2.1.2.1 Kavitasasi Hidrodinamik

Mekanisme pembunuhan mikroorganisme dengan gelombang ultra terjadi dengan berjalannya gelombang pada cairan dan menghasilkan perubahan tekanan, yang pada intensitas tertentu dapat mengakibatkan kavitasasi pada cairan. Pengrusakan sel oleh gelombang ultra ini tergantung pada efek mekanis dari kavitasasi gas dalam cairan. Hal ini terjadi akibat peregangan mekanis yang terbentuk oleh gelombang kejut dari hancurnya kavitasasi dan dari aliran serta pembentukan turbulen oleh perluasan kavitasasi.

Kavitasasi hidrodinamik dapat dicapai saat tekanan pada lubang atau penyempitan mekanis lainnya turun hingga di bawah tekanan uap dari cairan, yang mengakibatkan terbentuknya gelembung mikro. Sekali dibentuk, gelembung mikro akan dengan cepat hancur dan akan meningkatkan suhu dan tekanan. Untuk air yang mengalir melalui lubang, penurunan pada penampang aliran akan meningkatkan kecepatan. Pada kecepatan tertentu, tekanan pada saat aliran berekspansi ulang akan menurun hingga di bawah tekanan uap air, menyebabkan timbulnya gelembung mikro. Bila ada gas yang hancur pada air, kavitasasi akan diamati pada tekanan yang sangat jauh di atas tekanan uap. Reaktor kavitasasi hidrodinamik dijalankan dengan merubah rasio antara lubang dan diameter pipa, tekanan lucutan, dan rasio *recovery* tekanan. Hasil keluaran dari kavitasasi hidrodinamik dapat dimanipulasi untuk mencocokkan dengan kondisi reaksi dan proses fisik. Gelembung mempunyai waktu hidup yang lebih lama dan kecepatan yang lebih besar pada posisi dimana gelembung tersebut tersapu dari posisi pembentukan. (Kommineni et.al, n.d).

2.1.2.2 Kavitasasi Ultrasonik

Kavitasasi ultrasonik merupakan proses kavitasasi yang terjadi karena melintasnya gelombang suara dengan frekuensi tinggi pada aliran cairan. Intensitas suara yang tinggi pada cairan akan menghasilkan perpecahan pada cairan tersebut dan menghasilkan rongga atau gelembung. Fenomena hancurnya

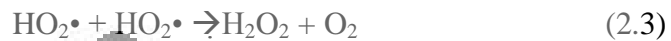
gelembung menunjukkan kondisi drastis pada tekanan dan suhu di dalam gelembung. Karena uap cairan terperangkap pada gelembung, konsentrasi energi dapat memutus ikatan kimia dan menghasilkan radikal yang sangat reaktif (umumnya radikal OH). (<http://www.enstimac.fr>, diakses pada 9 Juni 2009). Pelintasan gelombang suara dengan frekuensi tinggi pada cairan juga dapat meningkatkan ataupun mengubah reaksi kimia yang telah terjadi.

Proses pembentukan, pertumbuhan, dan hancurnya gelembung adalah sebagai berikut: gelembung yang dihasilkan berisikan partikel tidak kasat mata, atau gas gelembung, yang dapat meningkatkan tekanan intermolekular yang memungkinkan terbentuknya gelembung. Pertumbuhan gelembung sendiri terjadi selama difusi uap terlarut menuju volum gelembung. Fasa terakhir adalah hancurnya gelembung yang terjadi saat ukuran gelembung mencapai maksimal. Berdasarkan pada mekanisme hot-spot, hancurnya gelembung ke dalam ini meningkatkan suhu dan tekanan mencapai kondisi ekstrem yang menyebabkan putusannya ikatan kimia. (<http://en.wikipedia.org/sonochemistry>, diakses pada 9 Juni 2009). Fenomena hot-spot merupakan fenomena hancurnya gelembung dengan sangat cepat hingga tekanan pada gas dan uap dalam gelembung menjadi adiabatik. Fenomena ini sangat cepat terjadi ($<10\text{ms}$), menunjukkan laju pemanasan hingga sekitar 10^{10}K/s (Ince et.al, 2001).

Kavitasi akan menghasilkan efek ekstrem disekitarnya, seperti kecepatan cairan mencapai 1000 km/jam, tekanan mencapai 2000 atm, dan suhu mencapai 5000 Kelvin. Saat cairan dengan kekuatan sonik berada pada intensitas tinggi, gelombang suara yang dipropagasi menjadi media cair menghasilkan siklus tekanan tinggi (kompresi) dan tekanan rendah (penjernihan), dengan lajunya bergantung pada frekuensi. Saat siklus tekanan rendah, gelombang ultrasonik berintensitas tinggi menghasilkan gelembung vakum kecil atau hampa pada cairan. Saat gelembung mencapai volum dimana gelembung tersebut tidak dapat lagi menyerap energi, maka gelembung tersebut hancur saat siklus tekanan tinggi. Saat peledakan gelembung ke dalam terjadi, tekanan dan suhu proses yang sangat tinggi dicapai di sekitarnya (2000 atm dan 5000K). Peledakan ke dalam ini juga menghasilkan kecepatan alir cairan mencapai 150 m/s. (www.hielscher.com, diakses pada 8 Maret 2009)

Fenomena kavitasi ultrasonik juga akan menghasilkan energi tingkat tinggi yang dapat menyerang ikatan kovalen antara oksigen dan hidrogen pada molekul air (reaksi 1). Reaksi ini akan menghasilkan pembentukan spesi oksigen reaktif seperti OH radikal atau hidrogen peroksida.

Reaksi 1: Reaksi produksi radikal oksigen pada proses ultrasonik



Pada kavitasi ultrasonik, suhu akan mempengaruhi laju reaksi. Suhu yang lebih rendah akan menghasilkan viskositas yang lebih tinggi yang pada akhirnya menyebabkan pembentukan gelembung lebih sulit. Sebaliknya, pada suhu rendah efek dominan akan dicapai, yaitu mendapatkan laju reaksi yang lebih cepat. Hal inilah penyebab reaksi sonik yang menggunakan senyawa volatil dilakukan pada suhu rendah.

2.1.3 Ozonasi - Kavitasi

Penelitian teknologi oksidasi lanjut berbasis ozon dan kavitasi pernah dilakukan pada percobaan pengolahan air limbah berwarna (Li-Bing Chu, 2007). Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan gelembung mikro dapat meningkatkan perpindahan massa pada proses ozonasi, meningkatkan pembentukan radikal OH dan meningkatkan oksidasi dari molekul pewarna pada limbah tersebut. Pada proses ozonasi, laju reaksi dipengaruhi oleh kinetika reaksi dan perpindahan massa. Laju transfer massa ozon bergantung pada karakteristik gabungan dari kontaktor gas-cair yang digunakan, kinetika hancurnya ozon pada air, dan jumlah serta ukuran gelembung ozon yang dihasilkan. Keefektivan ozonasi dapat ditingkatkan dengan meningkatkan pula area permukaan ozon melalui pembentukan gelembung dengan ukuran lebih kecil.

Pada kavitasi ini, gelembung yang dihasilkan adalah gelembung mikro, yaitu gelembung dengan diameter kurang dari 1/10 μm . Dibandingkan dengan gelembung biasa berukuran beberapa mm, gelembung mikro mempunyai area antarmuka dan berat densitas yang lebih besar, peningkatan kecepatan yang

rendah, dan tekanan dalam yang besar. Peningkatan kecepatan pada gelembung mikro cenderung rendah. Gelembung mikro akan lebih banyak dihasilkan saat laju gas masukan diturunkan. Penurunan laju gas akan meningkatkan rasio luas permukaan dan volum. Konsentrasi gelembung yang besar dan luas permukaan yang besar menunjukkan tingginya intensitas dari gelembung mikro.

Penggunaan gelembung mikro meningkatkan laju massa dan oksidasi ozon dilihat dari efisiensi penghilangan TOC yang cukup tinggi. Oksidasi ozon di sini termasuk penyerangan ozon secara langsung ataupun penyerangan OH radikal. Kekuatan oksidasi OH radikal lebih besar dari molekul ozon, hal ini menyebabkan oksidasi langsung ozon lebih lambat dari oksidasi OH radikal. Gelembung mikro dengan tekanan dalam yang lebih besar dapat mempengaruhi dekomposisi ozon dan produksi OH radikal. Semakin kecil ukuran gelembung, semakin besar tekanan dalam gelembung.

2.1.4 Kelebihan dan Kekurangan Teknologi Oksidasi Lanjut

Teknologi oksidasi lanjut mempunyai kelebihan dan kekurangannya sendiri. Berikut adalah kelebihan dari teknologi oksidasi lanjut (<http://www.wilkes.edu>, diakses pada 7 Februari 2009):

1. Sangat efektif pada rentang pH yang luas dan dapat bereaksi sangat cepat dengan bakteri, virus, protozoa, dan mempunyai anti-bakteri yang lebih kuat dari klorinasi.
2. Mempunyai kekuatan oksidasi yang kuat dengan waktu reaksi yang singkat.
3. Proses ini tidak memerlukan bantuan bahan kimia lain.
4. Tingginya nilai efektivitas dan efisiensi dalam proses penguraian berbagai senyawa organik dan sedikitnya limbah lumpur (sludge) yang dihasilkan
5. Mengurangi bau tak sedap karena meningkatkan oksigen terlarut.
6. Mengurangi masalah kekurangan oksigen, turbiditas, dan surfaktan.
7. Menghilangkan hampir seluruh warna, fenolik, dan sianida.
8. Tidak terbentuk produk samping yang beracun.

9. Area instalasi pengolahan yang tidak membutuhkan tempat yang luas.

Sedangkan, kekurangan dari teknologi oksidasi lanjut adalah:

1. Tingginya biaya operasi dan peralatan dan sulitnya menemukan tenaga profesional di bidang pengolahan ozon dan pemeliharaan sistem.
2. Hasil dari ozonasi diperkirakan mengandung produk yang bersifat karsinogenik, terbrominasi, mengandung aldehid, keton, dan asam karbosilat.
3. Sistem ini memungkinkan dibutuhkannya reduksi kekerasan setelah proses oksidasi lanjut, atau penambahan polifospat untuk mencegah terbentuknya karbonasi.
4. Sifat ozon adalah lebih sedikit larut pada air dibandingkan dengan klorin, maka dari itu, diperlukan teknik khusus untuk mengatasinya.
5. Proses ozonasi memungkinkan terjadinya kebakaran.

2.2. Perpindahan Massa Ozon dalam Air

Perilaku sistem difusi, konveksi dan reaksi kimia pada sistem gas-cair dapat diprediksi dengan menggunakan model yang mensimulasikan situasi tersebut. Simulasi model berdasar pada teori yang menjelaskan fenomena absorpsi fisika gas. Telah diteliti bahwa ketika fasa gas dan cair mengalami kontak, komponen dari salah satu fasa dapat berpindah ke fasa lain untuk mencapai kesetimbangan (Nebel, 2004). Dapat diasumsikan bahwa dalam peristiwa absorpsi gas oleh cairan, komposisi yang seragam dipertahankan oleh sebagian besar gas karena pergerakan secara turbulen. Pada Gambar 2.1 terlihat bahwa pada dua lapisan film, *gas film* dan *liquid film*, terjadi difusi melalui lapisan laminar di antara *gas bulk-interface* dan *interface-liquid bulk*. Saat gas datang mendekati batas fasa liquid, gas tersebut akan terbawa oleh difusi Eddy ke dalam turbulensi liquid, dan tercampur dengan liquid. Laju difusi pada keadaan *steady-state* dari *bulk gas* ke *interface* sebanding dengan laju dari *interface* ke *bulk liquid*, yang dinyatakan dengan:

$$N_A = k'_G (P_{A_g} - P_{A_i}) = k'_L (C_{A_i} - C_{A_L}) \quad (2.5)$$

dimana:

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

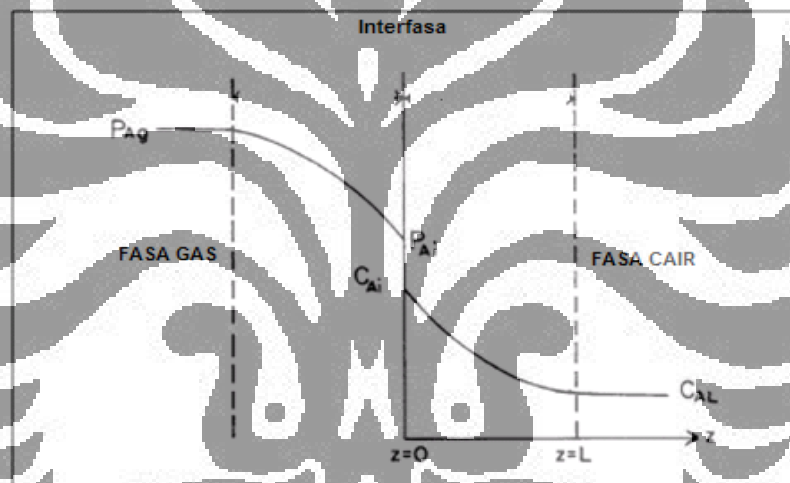
P_{A_g} = tekanan parsial dari A pada fase gas (atm)

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

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

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

C_{A_L} = konsentrasi solute A pada fase liquid



Gambar 2.1 Perpindahan massa antara fasa gas dan fasa cair

(Sumber: Beltran, 2004)

Perpindahan massa ozon-air berhubungan erat dengan besarnya kelarutan ozon dalam air. Berikut adalah faktor-faktor yang mempengaruhi perpindahan massa ozon-air :

- Konsentrasi ozon dalam air
- Metode kontak yang digunakan
- Waktu kontak
- Kinetika dekomposisi ozon dalam air
- Tekanan dan temperatur operasi
- Jumlah dan ukuran gelembung ozon yang terbentuk

Laju perpindahan massa ozon dalam dalam waktu tertentu dinyatakan dengan (Min-Tian Gao, et.al., 2004):

$$\frac{dC_{O_3}}{dt} = k_L a (C_{O_3}^* - C_{O_3}) - k_d C_{O_3} \quad (2.6)$$

dimana:

$k_L a$ = koefisien perpindahan massa

$C_{O_3}^*$ = konsentrasi ozon terlarut dalam keadaan jenuh

C_{O_3} = konsentrasi ozon terlarut pada t

k_d = konstanta dekomposisi ozon

Nilai k_d dapat diperoleh dengan menginjeksikan ozon dengan kontaktor Karman hingga konsentrasi ozon dalam air menjadi jenuh atau tidak berubah lagi secara signifikan (Min-Tian Gao et.al.). Nilai k_d dihitung berdasarkan penurunan konsentrasi ozon dalam air dengan fungsi waktu yang dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\frac{dC_{O_3}}{dt} = -k_d C_{O_3} \quad (2.7)$$

dengan C adalah konsentrasi ozon terlarut. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapat nilai k_d sebesar $2,5 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$. Besar k_d ini jauh lebih kecil dari besar $k_L a$ yang dihasilkan baik pada ozonasi dengan menggunakan kontaktor Karman maupun kontaktor-kontaktor lainnya seperti dapat dilihat dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Perbandingan nilai $k_L a$ antara ozonasi dengan Kontaktor Karman dengan kontaktor lainnya

Nomor Kontaktor	1	2	3	4	5
Volum kontaktor (L)	97	1,5	1,32	1,32	0,7
Volum cairan (L)	97	1,5	1,32	1,32	10
$k_L a$ hasil penelitian (menit^{-1})	0,18 - 1,2	0,38 - 0,82	0 - 1,5	0,54	0,5 - 1,5
$k_L a$ koreksi untuk volum cairan 100 L (menit^{-1})	0,17 - 1,15	0,006 - 0,012	0 - 0,002	0,007	0,05 - 0,15

(Sumber: Min-Tian Gao, et. al., 2004)

Dengan demikian, pengaruh k_d tidak ikut dilibatkan dalam penurunan persamaan $k_L a$, sehingga persamaan (2.7) menjadi

$$\frac{dC_{O_3}}{dt} = k_L a (C_{O_3}^* - C_{O_3}) \quad (2.8)$$

Persamaan di atas merupakan persamaan yang banyak digunakan untuk mencari koefisien perpindahan massa ozon–air pada beberapa jenis media kontak gas–liquid seperti karman kontaktor, kolom gelembung (*bubble column*), dan sebagainya. Persamaan dapat digunakan pada ukuran gelembung konvensional maupun mikro. [Won Tae Shin, et.al. \(1999\)](#) yang meneliti mengenai perpindahan massa pada gelembung mikro dalam jurnal *Ozonation using microbubbles formed by electric fields* pun menggunakan persamaan yang sama. Persamaan (2.8) tersebut dapat ditulis pula sebagai berikut:

$$\frac{dC_{O_3}}{(C_{O_3}^* - C_{O_3})} = k_L a \cdot dt \quad (2.9)$$

Dengan mengintegrasikan persamaan tersebut pada kondisi batas, $C_{O_3} = 0$ pada $t = 0$ dan $C_{O_3} = C$ pada $t = t$, diperoleh:

$$\int_0^C \frac{dC_{O_3}}{(C_{O_3}^* - C_{O_3})} = k_L a \int_0^t dt \quad (2.10)$$

$$\ln \left(\frac{C_{O_3}^*}{C_{O_3}^* - C} \right) = k_L a \cdot t \quad (2.11)$$

Persamaan (2.11) dapat digunakan untuk mencari koefisien perpindahan massa. Untuk mencari $k_L a$ dengan persamaan tersebut, perlu diketahui nilai konsentrasi ozon dalam air baik dalam keadaan jenuh maupun pada selang waktu tertentu.

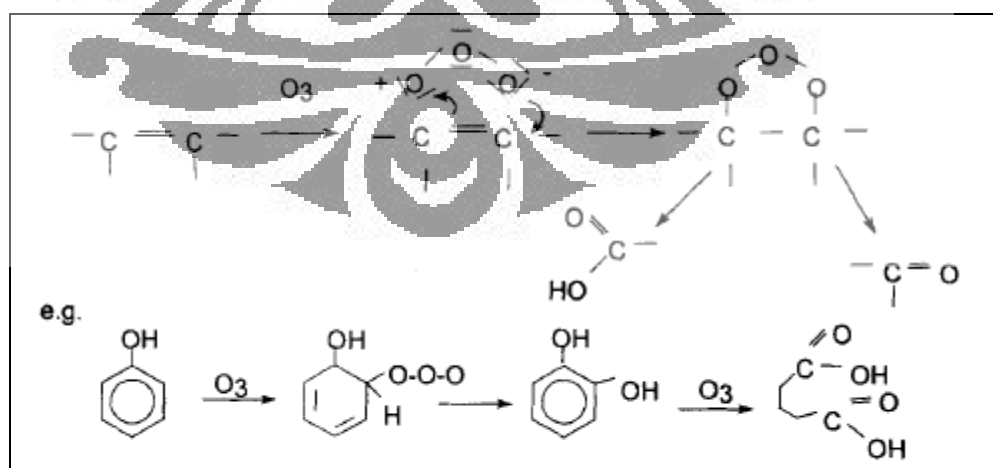
2.3 Dekomposisi Ozon

Ozon sangat mudah terdekomposisi dalam air. Salah satu karakteristik unik dari ozon adalah dekomposisinya menjadi radikal OH yang merupakan oksidator terkuat di air. Dekomposisi dapat terjadi secara langsung melalui reaksi langsung oleh ozon maupun secara tidak langsung.

2.3.1 Reaksi Langsung oleh Ozon

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

Reaksi oksidasi langsung oleh ozon dalam air merupakan reaksi yang selektif dengan konstanta laju reaksi yang kecil, umumnya berkisar antara $k_D = 1 - 10^3 \text{ M}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (Gottschalk, 2000). Molekul ozon akan bereaksi dengan menggunakan ikatan tak jenuh karena strukturnya yang dipolar dan kemudian akan memicu terjadinya pemecahan ikatan, yang biasa disebut sebagai mekanisme Criegee (Gambar 2.2).



Gambar 2.2 Reaksi ozonasi dalam air

(Sumber: Gottschalk, 2000)

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

Ozonasi langsung merupakan reaksi yang penting jika reaksi pembentukan radikal jarang terjadi. Penyebab jarang terjadi reaksi pembentukan radikal dapat disebabkan karena air yang tercemari mungkin tidak mengandung senyawa yang dapat menginisiasi reaksi berantai atau mengandung banyak senyawa yang dapat menghentikan (terminasi) reaksi berantai dengan sangat cepat.

2.3.2 Reaksi Tidak Langsung oleh Ozon

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

Mekanisme kinetik untuk dekomposisi ozon dalam air murni dapat dilihat pada Tabel 2.3 dan Tabel 2.4 dengan Tabel 2.3 menunjukkan dekomposisi ozon pada kondisi normal hingga asam dan Tabel 2.4 pada kondisi basa.

Tabel 2.3 Mekanisme Reaksi Dekomposisi Ozon (pH \cong asam - normal)

Reaksi	Konstanta reaksi	Nomor reaksi
Inisiasi		
$O_3 + OH^- \rightarrow HO_2^* + O_2^{*-}$	$70 \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.12)
Propagasi		
$HO_2^* \rightarrow O_2^{*-} + H^+$	$7,9 \times 10^5 \text{ sec}^{-1}$	(2.13)
$O_2^{*-} + H^+ \rightarrow HO_2^*$	$5,0 \times 10^{10} \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.14)
$O_3 + O_2^{*-} \rightarrow O_3^{*-} + O_2$	$1,6 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.15)
$O_3^{*-} + H^+ \rightarrow HO_3^*$	$5,2 \times 10^{10} \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.16)
$HO_3^* \rightarrow O_3^{*-} + H^+$	$3,3 \times 10^2 \text{ sec}^{-1}$	(2.17)
$HO_3^* \rightarrow HO^* + O_2$	$1,1 \times 10^5 \text{ sec}^{-1}$	(2.18)
$O_3 + HO^* \rightarrow HO_4^*$	$2,0 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.19)
$HO_4^* \rightarrow HO_2^* + O_2$	$2,8 \times 10^4 \text{ sec}^{-1}$	(2.20)
Terminasi		
$HO_4^* + HO_4^* \rightarrow H_2O_2^* + 2O_3$	$5,0 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.21)
$HO_4^* + HO_3^* \rightarrow H_2O_2^* + O_2 + O_3$	$5,0 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.22)

(Sumber: Nebel, 2004)

Tabel 2.4 Mekanisme Reaksi Dekomposisi Ozon (pH \approx basa)

Reaksi	Konstanta reaksi	Nomor reaksi
Inisiasi		
$O_3 + OH^- \rightarrow HO_2^- + O_2^{\bullet}$	$40 \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.23)
$O_3 + HO_2^- \rightarrow HO_2^{\bullet} + O_3^{\bullet-}$	$2.2 \times 10^6 \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.24)
Propagasi		
$HO_2^{\bullet} \rightarrow O_2^{\bullet-} + H^+$	$7,9 \times 10^5 \text{ sec}^{-1}$	(2.13)
$O_2^{\bullet-} + H^+ \rightarrow HO_2^{\bullet}$	$5,0 \times 10^{10} \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.14)
$O_3 + O_2^{\bullet-} \rightarrow O_3^{\bullet-} + O_2$	$1,6 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.15)
$O_3^{\bullet-} + H_2O \rightarrow HO^{\bullet} + O_2 + OH^-$	$20-30 \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.25)
$O_3^{\bullet-} + HO^{\bullet} \rightarrow HO_2^{\bullet} + O_2^{\bullet-}$	$6 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.26)
$O_3 + HO^{\bullet} \rightarrow HO_2^{\bullet} + O$	$3 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.27)
$HO_2^- + H^+ \rightarrow H_2O_2$	$5 \times 10^{10} \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.28)
$H_2O_2 \rightarrow HO_2^- + H^+$	0.25 sec^{-1}	(2.29)
Terminasi		
$O_3 + HO^{\bullet} \rightarrow O_3 + OH^-$	$2.5 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.30)

(Sumber: Nebel, 2004)

Reaksi dekomposisi ozon menjadi radikal OH juga dipengaruhi oleh kehadiran senyawa-senyawa tertentu di mana senyawa-senyawa ini memiliki peranan yang berbeda. Tiga peranan senyawa dalam dekomposisi lain antara lain sebagai inisiator, inhibitor dan promotor. Inisiator (seperti ion hidropoksida) adalah senyawa yang secara langsung bereaksi dengan ozon untuk menghasilkan

ion radikal superoksida. Ion radikal superoksida ini adalah kunci dalam pemicu terbentuknya radikal bebas karena dapat bereaksi dengan ozon dengan sangat cepat untuk menghasilkan radikal bebas, seperti radikal ion ozonida yang nantinya akan bereaksi membentuk radikal OH. Promotor adalah senyawa yang dengan bereaksi dengan radikal OH akan mempropagasi rantai radikal untuk menghasilkan kunci dari radikal bebas, yaitu ion radikal superoksida. Contoh dari senyawa ini adalah metanol dan asam format. Salah satu peran senyawa yang cukup menarik dalam dekomposisi ozon adalah hidrogen peroksida. Hidrogen peroksida merupakan agen inisiasi dari dekomposisi ozon, namun juga bertindak sebagai promotor sesuai dengan reaksi:



Namun selain itu, hidrogen peroksida juga dapat menjadi inhibitor jika konsentrasinya sangat tinggi sehingga reaksi ozon dan hidrogen peroksida akan dipengaruhi oleh transfer massanya. Peran senyawa yang terakhir adalah inhibitor yang merupakan senyawa yang bereaksi radikal OH sambil menghentikan reaksi radikal berantai. Contoh dari senyawa ini adalah tert-butanol, ion p-klorobenzoat, ion karbonat dan ion bikarbonat.

2.4 Konsep R_{CT}

Konsentrasi ozon merupakan parameter yang penting dalam proses ozonasi, baik dengan maupun tanpa penambahan proses lain seperti kavitasi hidrodinamik dan kavitasi ultrasonik. R_{CT} merupakan rasio paparan radikal OH terhadap ozon dan merupakan fungsi waktu. Penyisihan mikropolutan menggunakan ozon dan laju reaksi radikal OH dapat diprediksi dengan menggunakan kinetika reaksi ozon dan R_{CT} . (Elovitz dan von Gunten, 1998).

Salah satu kesulitan dalam proses ozonasi untuk pengolahan air minum adalah mempertahankan tingkat disinfeksi dan penyisihan mikropolutan yang sesuai, dan di sisi lain membatasi terbentuknya produk samping dari proses disinfeksi yang biasa disebut DBPs atau *disinfection byproducts*. DBPs merupakan senyawa kimia yang mempunyai potensi beracun dimana senyawa tersebut terbentuk dalam konsentrasi yang sangat rendah selama proses disinfeksi

pada pengolahan air. Senyawa yang termasuk DBPs diantaranya kloroform dan asam kloroasetik yang terbentuk selama proses klorinasi, dan bromat yang merupakan produk sampingan dari proses ozonasi.

Ozon merupakan disinfektan dan senyawa yang reaktif dengan mikroba-mikroba, tapi ozon tidak terlalu reaktif terhadap berbagai senyawa organik maupun inorganik. Sebaliknya, radikal OH, yang merupakan bentuk dari dekomposisi ozon, adalah senyawa yang reaktif dan oksidator yang tidak spesifik, dan merupakan oksidator terhadap polutan yang tidak reaktif terhadap ozon. Karena reaktivitasnya yang sangat tinggi, kemampuan disinfeksi radikal OH tidak sebesar ozon, hal ini menyebabkan tetap dibutuhkan paparan ozon yang besar untuk melakukan disinfeksi. Meningkatnya paparan ozon juga meningkatkan kemungkinan terbentuknya bromat. Pembentukan bromat merupakan hasil dari reaksi-reaksi oksidasi (termasuk reaksi ozon dan reaksi radikal OH). Terdapat kesulitan dalam meminimalisir pembentukan bromat (reaksi-reaksi ozon dan radikal OH) dan penyisihan polutan-polutan yang resisten terhadap ozon (oksidasi oleh radikal OH). Kontrol terhadap pembentukan senyawa-senyawa DBPs yang merupakan hasil sampingan dari proses oksidasi membutuhkan penggunaan oksidan seminimnya dan kontrol kesetimbangan dari konsentrasi ozon dan radikal OH. Dibutuhkan optimisasi proses untuk menyesuaikan kebutuhan disinfeksi (paparan ozon tinggi) dan oksidasi (paparan oksidator yang tinggi), juga kontrol terhadap pembentukan DBPs (paparan oksidator yang rendah). Untuk itu, dibutuhkan informasi yang tepat tentang konsentrasi ozon dan radikal OH pada reaktor ozon saat proses pengolahan air.

Pengukuran konsentrasi ozon cukup mudah dilakukan baik dengan cara elektrokimia, optikal, maupun kolorimetrik (Elovitz dan von Gunten, 1998), sedangkan pengukuran radikal OH sangat sulit karena reaktifitas senyawa tersebut terhadap air menghasilkan konsentrasi kesetimbangan yang sangat kecil, yaitu sekitar $\leq 10^{-12}$ M. Salah satu cara dalam menentukan konsentrasi radikal OH adalah dengan mengukur hilangnya ozon dan senyawa probe radikal OH secara bersamaan dalam fungsi waktu, dimana senyawa tersebut adalah CO_3^{2-} . Dengan memantau perubahan konsentrasi pada senyawa probe radikal OH, maka akan didapat pengukuran tidak langsung terhadap konsentrasi radikal OH.

Pada sistem ozonasi, probe radikal OH yang ideal hanya bereaksi dengan radikal OH, dan tidak secara signifikan bereaksi dengan ozon, oksidan lain, ataupun spesi reaksi lainnya. Karena itulah, dapat disebut bahwa penyisihan probe merupakan pengukuran tidak langsung terhadap radikal OH. Untuk penelitian ini, probe yang digunakan adalah senyawa CaCO_3 yang mengandung senyawa CO_3^{2-} dimana senyawa CO_3^{2-} mempunyai reaktivitas yang sangat tinggi terhadap radikal OH ($k_{\text{OH}/\text{CO}_3^{2-}} = 4.2 \times 10^8 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$)

Senyawa probe CO_3^{2-} mempunyai reaktivitas yang sangat besar dengan radikal OH, maka:

$$\frac{-d[\text{CO}_3^{2-}]}{dt} = k_{\text{OH}/\text{CO}_3^{2-}} [\text{CO}_3^{2-}] [\cdot\text{OH}] \quad (2.33)$$

Persamaan diatas dapat disusun kembali menjadi:

$$\ln \left(\frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{CO}_3^{2-}]_0} \right) = -k_{\text{OH}/\text{CO}_3^{2-}} \int [\cdot\text{OH}] dt \quad (2.34)$$

Dimana $\int [\cdot\text{OH}] dt$ menunjukkan konsentrasi radikal OH terhadap waktu yang sinergi dengan paparan radikal OH. Persamaan diatas menunjukkan bahwa penurunan konsentrasi senyawa probe pada waktu t merupakan pengukuran tidak langsung terhadap paparan radikal OH, untuk periode reaksi $t=0$ hingga waktu reaksi tersebut. Istilah R_{CT} dapat digunakan sebagai rasio paparan radikal OH dan ozon.

$$R_{\text{CT}} = \int [\cdot\text{OH}] dt / \int [\text{O}_3] dt \quad (2.35)$$

dimana $\int [\text{O}_3] dt$ merupakan konsentrasi ozon terhadap waktu yang juga sinergi dengan paparan ozon. Paparan ozon dapat dihitung dari integral “konsentrasi ozon vs waktu”. Hasil substitusi persamaan 4 ke persamaan 3 didapat:

$$\ln \left(\frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{CO}_3^{2-}]_0} \right) = -k_{\text{OH}/\text{CO}_3^{2-}} R_{\text{CT}} \int [\text{O}_3] dt \quad (2.36)$$

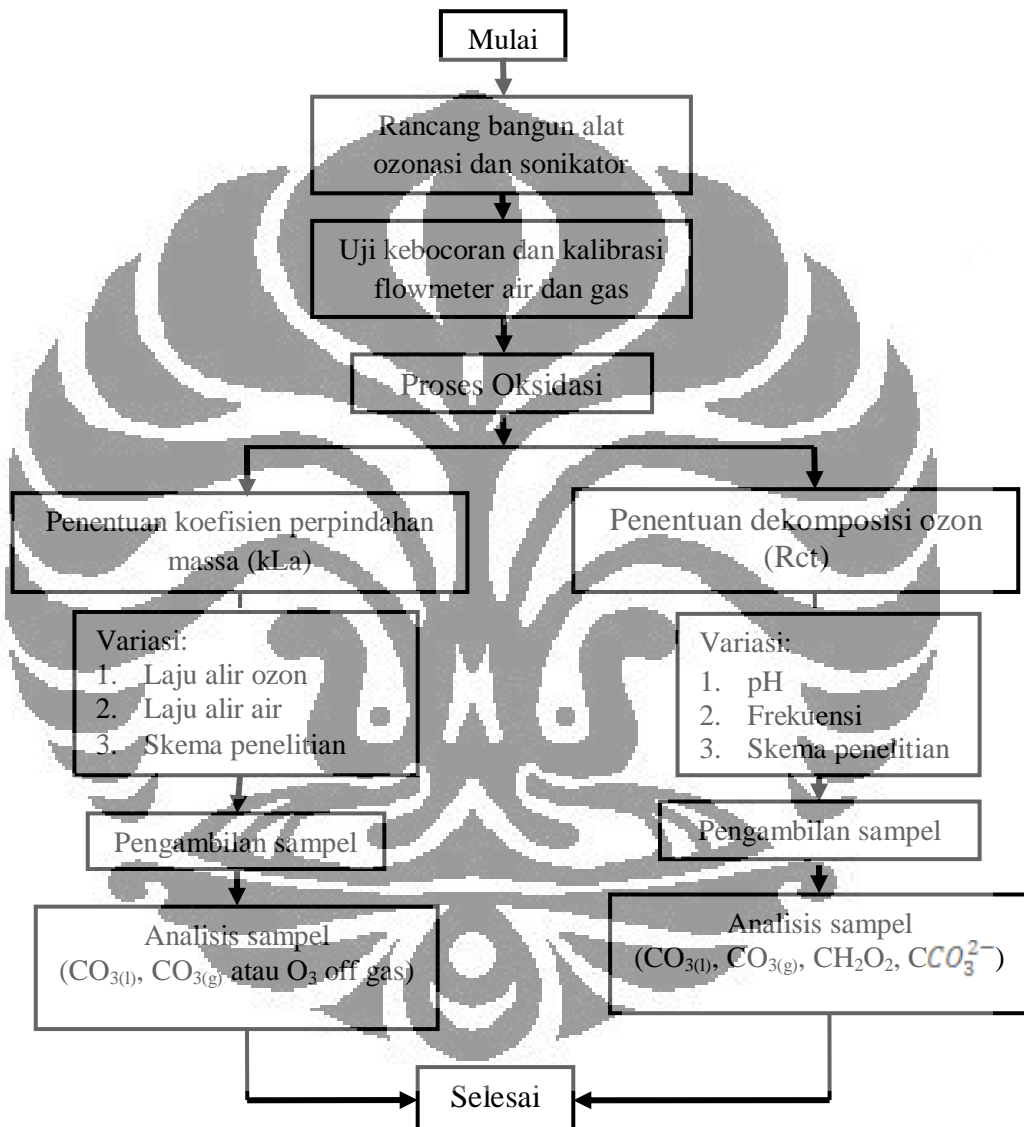
Persamaan diatas menunjukkan bahwa rasio paparan radikal OH dan paparan ozon dapat dihitung dengan mengukur pengurangan konsentrasi CO_3^{2-} dan ozon pada eksperimen.

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

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



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

3.2 Rancangan Penelitian

Penelitian ini terdiri dari 2 tahap utama, yaitu studi perpindahan massa dan studi dekomposisi ozon.

3.2.1 Studi perpindahan massa (penentuan koefisien perpindahan massa)

Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan koefisien perpindahan massa ($k_L a$) pada berbagai variasi laju alir gas, laju alir air, dan konfigurasi proses. Pada tahap ini dilakukan pengolahan air aquades dengan proses oksidasi lanjut, dimana proses dilakukan secara *semi-batch* dengan sirkulasi aliran liquid selama 30 menit. Konfigurasi proses yang dilakukan adalah proses oksidasi lanjut berbasis ozonasi, ozonasi-kavitasi hidrodinamika, ozonasi-kavitasi ultrasonik, dan ozonasi-kavitasi hidrodinamika-kavitasi ultrasonik. Koefisien perpindahan massa dapat ditentukan dari sample yang diambil dari sistem setiap lima menit selama 30 menit untuk kemudian diukur kadar ozon terlarutnya dengan menggunakan DO3meter.

3.2.2 Studi dekomposisi ozon (penentuan koefisien R_{CT})

Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan dekomposisi ozon dengan koefisien R_{CT} pada berbagai konfigurasi proses. Pada tahap ini dilakukan pengolahan air aquades yang mengandung CaCO_3 dengan proses oksidasi lanjut, dimana proses dilakukan secara *semi-batch* dengan sirkulasi aliran liquid selama 30 menit. Sebelum diolah, air terlebih dulu dijenuhkan dengan ozon selama satu jam, setelah jenuh, gas ozon yang masuk ke sistem diganti dengan udara dari kompresor. Konfigurasi proses yang dilakukan adalah proses oksidasi lanjut berbasis ozonasi, ozonasi-kavitasi hidrodinamika, ozonasi-kavitasi ultrasonik, dan ozonasi-kavitasi hidrodinamika-kavitasi ultrasonik. Dekomposisi ozon dan koefisien R_{CT} dapat ditentukan dari sample yang diambil dari sistem setiap lima menit selama 30 menit untuk kemudian diukur kadar ozon terlarutnya dengan menggunakan DO3meter dan kadar CaCO_3 dengan proses titrasi.

3.2.3 Pengambilan sample hasil

Sampel diambil dari bagian *sample port* pada reaktor kolom gelembung. Sampel hasil diambil setiap selang waktu 5 menit, selama 30 menit.

3.2.4 Analisis umpan dan sample

Sample umpan dan hasil percobaan dianalisis berdasarkan parameter-parameter berikut: kandungan ozon terlarut (DO3), spektrofotometri untuk mengetahui kandungan H_2O_2 , kandungan CO_3^{2-} , suhu dan pH.

3.3 Konfigurasi dan Penggunaan Alat

Pada penelitian ini terdapat tiga alat utama, yaitu:

1. Ozonator

Ozonator yang digunakan merupakan ozonator rancangan Prof. Dr. Setijo Bismo. Ozonator ini bekerja pada tegangan listrik antara 9-16 kilovolt pada tegangan bolak-balik (AC), tekanan atmosferik dan suhu kerja antara 15-40°C. Tabung ozonator terbuat dari bahan *acrylic/PVC* yang didalamnya terdapat elektroda dan dielektriknya terbuat dari *stainless steel*. Elektroda ini dihubungkan dengan sumber listrik tegangan tinggi. Arus listrik masukan (input) akan dinaikkan tegangannya oleh transformer sehingga menghasilkan tegangan yang tinggi. Ozonator diletakkan pada jarak yang sangat dekat dengan unit pengolahan limbah guna mencegah dekomposisi ozon.

Udara yang mengandung oksigen berasal dari kompressor dialirkan menuju ozonator melalui gas flowmeter. Di dalam ozonator, campuran gas (udara, oksigen dan ozon) akan mengalir dari bagian atas ke bagian bawah ozonator, dan selanjutnya masuk ke dalam sistem.

2. Injektor Mazzei

Pada skema, posisi Injektor mazzei diletakkan sebelum kolom gelembung. Injektor mazzei merupakan jenis injektor venturi yang memanfaatkan perbedaan tekanan masukan dan keluaran injektor. Bahan yang dapat digunakan untuk membuat injektor ini antara lain PVDF, *polypropylene*, dan *stainless steel-316*. Alat ini dapat bekerja pada berbagai laju alir mulai dari 0,5 GPM hingga 4000 GPM, dan hanya membutuhkan perbedaan tekanan yang kecil antara masukan dan keluaran injektor untuk menginisiasi kondisi vakum pada *suction*.

Injektor ini berfungsi untuk menginjeksikan ozon ke dalam air. Salah satu keuntungan menggunakan injektor mazzei adalah gelembung yang dihasilkan pada injektor jenis ini adalah gelembung mikro, sehingga dapat menghasilkan perpindahan massa ozon ke air yang lebih tinggi dibandingkan jika menggunakan *diffuser* biasa. Selain itu, efisiensinya yang cenderung konstan, konstruksinya yang sederhana, dan tidak membutuhkan aliran listrik.

Tekanan masukan pada injektor mazzei ini lebih besar bila dibandingkan dengan tekanan keluarannya. Injektor mazzei dapat mengakibatkan terjadinya perubahan struktur geometri dari aliran karena adanya perbedaan tekanan masukan dan keluaran injektor sehingga terjadilah proses kavitasi hidrodinamik.

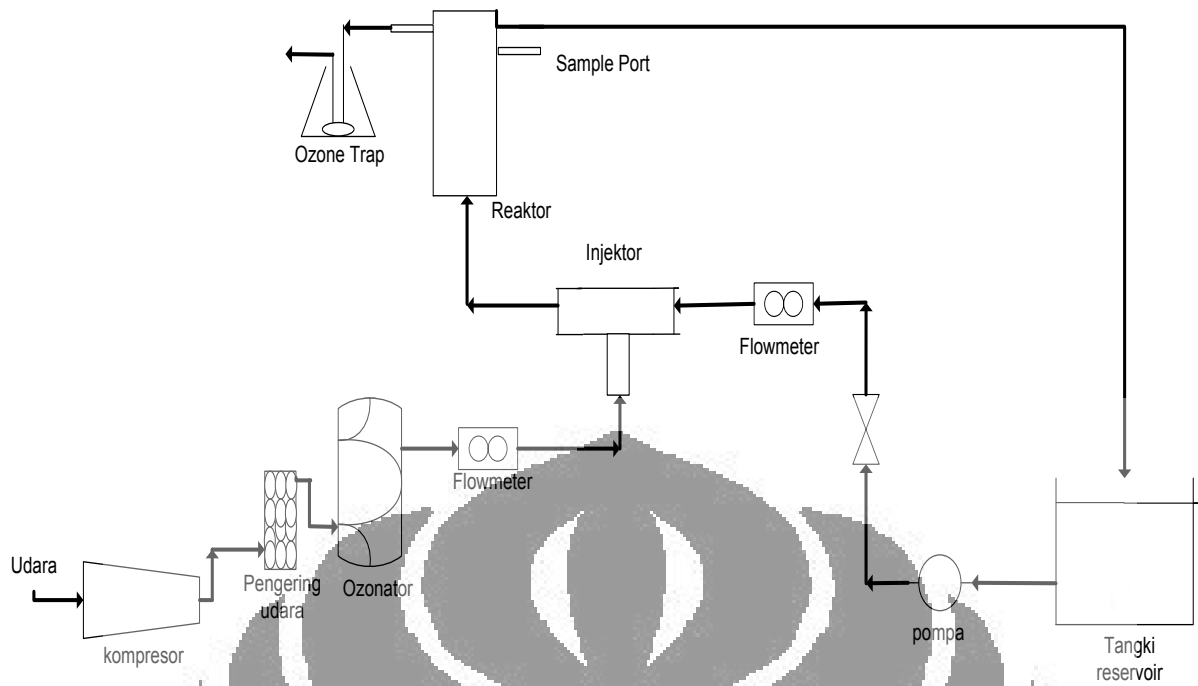
3. Sonikator (*Ultrasonik Processor*) UP-800

Sonikator akan menghasilkan sinyal elektrik berfrekuensi tinggi yang akan diubah menjadi getaran mekanis. Getaran longitudinal yang dihasilkan akan diperbesar oleh *probe* dan ditransmisikan ke cairan dan menghasilkan tekanan. Fluktuasi tekanan yang terjadi akan menghasilkan gelembung mikro, juga membesarkan ukuran gelembung, dan akhirnya meledak ke dalam. Saat gelembung meledak, jutaan gelombang udara yang bergerak cepat dan kondisi suhu dan tekanan yang ekstrim dihasilkan. Tekanan dan suhu yang tinggi inilah yang dapat digunakan secara efektif pada pengolahan air.

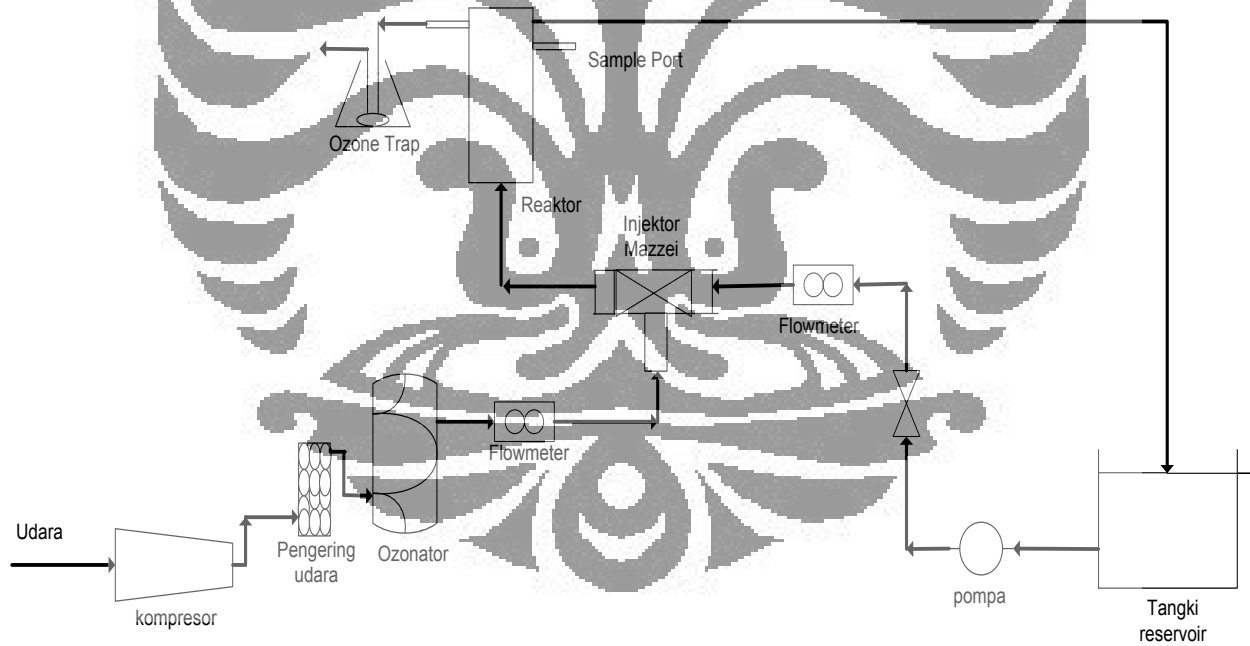
4. Reaktor Gelembung

Pada reaktor gelembung ini akan terjadi fenomena terbentuk, tumbuh dan hancurnya gelembung mikro. Gelembung mikro dihasilkan dari injektor Mazzei dan sonikator yang terhubung ke kolom gelembung.

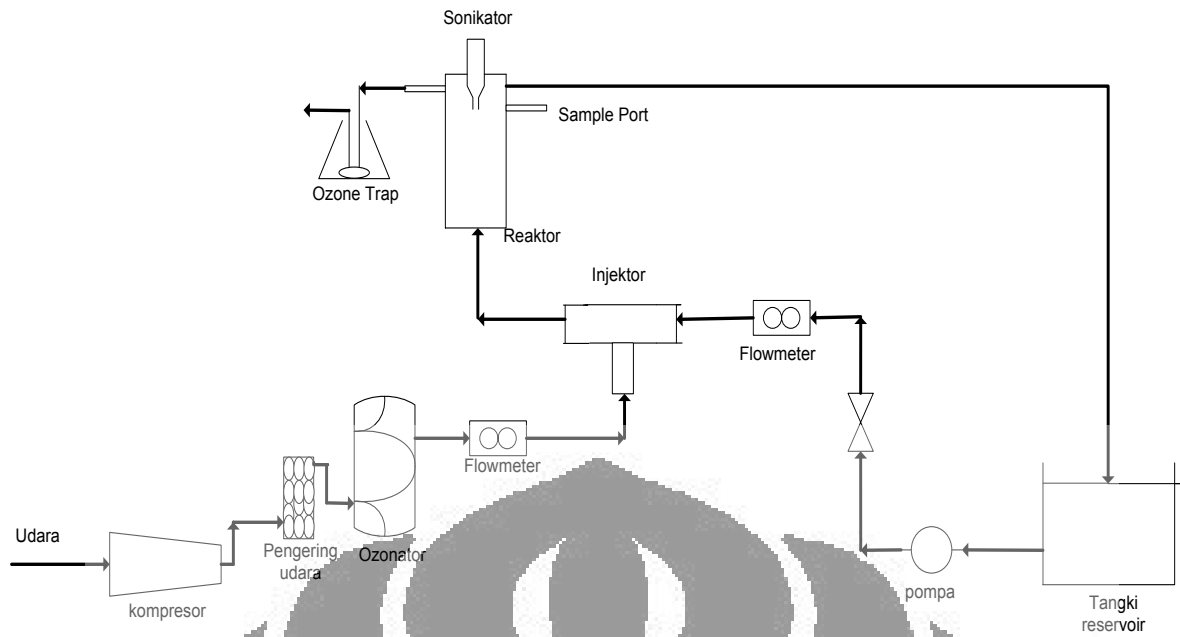
Gambar skema keseluruhan alat yang digunakan dan konfigurasi skema untuk penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 3.2, 3.3, 3.4, dan 3.5. Alat yang digunakan untuk penelitian ini terdiri dari bagian-bagian utama seperti: ozonator, injektor mazzei, sonikator, dan reaktor gelembung



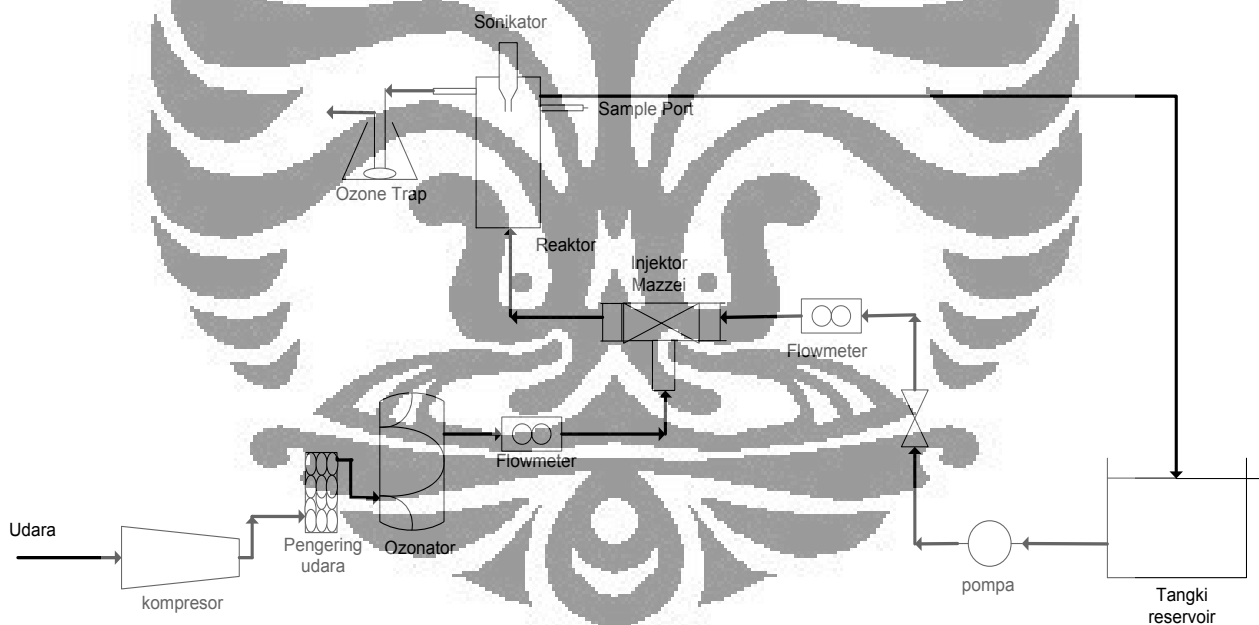
Gambar 3.2 Skema Alat untuk Proses Ozonasi



Gambar 3.3 Skema Alat untuk Proses Ozonasi dan Kavitas Hidrodinamika



Gambar 3.4 Skema Alat untuk Proses Ozonasi dan Kavitasi Ultrasonik



Gambar 3.5 Skema Alat untuk Proses Ozonasi, Kavitasi Hidrodinamika, dan Kavitasi Ultrasonik

3.4 Alat dan Bahan

Paragraf-paragraf berikut menjelaskan alat dan bahan yang digunakan pada percobaan ini:

3.4.1 Penentuan $k_L a$

Alat yang digunakan pada proses penentuan koefisien perpindahan massa adalah:

1. Ozonator
2. Kompresor
3. Reaktor gelembung
4. Injektor Mazzei
5. Sonikator (*Ultrasonik Processor*) UP-800
6. DO3 meter
7. Stopwatch
8. Gelas ukur

Bahan yang digunakan pada proses ini adalah:

1. Aquades

Air yang digunakan adalah aquades dengan harapan proses perpindahan massa ozon ke air tidak mendapatkan banyak gangguan dari keberadaan mineral-mineral pengganggu. Aquades yang digunakan memiliki pH 7, TDS nol, dan konduktivitas nol (mS).

2. H_2SO_4 18 M

H_2SO_4 18 M berfungsi untuk menjaga pH air pada kisaran 2,1. Hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya dekomposisi ozon pada air.

3.4.2 Penentuan R_{CT}

Alat yang digunakan pada proses penentuan dekomposisi ozon dan koefisien R_{CT} adalah:

1. Ozonator
2. Kompresor
3. Reaktor gelembung
4. Injektor Mazzei
5. Sonikator (*Ultrasonik Processor*) UP-800

6. DO3 meter
7. Stopwatch
8. Gelas ukur

Bahan yang digunakan pada proses ini adalah:

1. Aquades

Air yang digunakan adalah aquades dengan harapan proses perpindahan massa ozon ke air tidak mendapatkan banyak gangguan dari keberadaan mineral-mineral pengganggu. Aquades yang digunakan memiliki pH 7, TDS nol, dan konduktivitas nol (mS).

2. H₂SO₄ 18 M

H₂SO₄ 18 M berfungsi untuk menjaga pH air pada kisaran 2,1

3. NaOH 6 M

NaOH 6 M berfungsi untuk menjaga pH air pada kisaran 11 yang digunakan saat variasi pH basa.

4. CaCO₃ 16 μM

CaCO₃ 16 μM berfungsi sebagai senyawa untuk mengukur keberadaan radikal OH pada air.

3.5 Prosedur Penelitian

Berikut akan dipaparkan prosedur yang akan dilakukan dalam penelitian ini.

3.5.1 Penentuan k_La dengan proses ozonasi

Pada penelitian ini, proses berlangsung secara *semi-batch* dengan sirkulasi aliran liquid..

Prosedur percobaan:

1. Menyiapkan rangkaian alat seperti Gambar 3.2
2. Mengisi reservoir dengan limbah sintetik
3. Menambahkan larutan H₂SO₄ 18 M
4. Menyalakan pompa dengan laju alir 3 LPM
5. Mengatur tekanan pada valve aliran by-pass dan valve menuju flowmeter agar alirannya tersirkulasi.
6. Menginjeksikan ozon dengan laju alir 400 L/jam

7. Mengambil sampel dari *sample port* sebanyak 200 ml pada reaktor gelembung setiap 5 menit selama 30 menit untuk dicek kadar DO₃, lalu air sample dikembalikan ke reservoir.
8. Mengambil larutan KI hasil *ozone trap* pada bagian gas keluaran setiap 5 menit selama 30 menit dan menitrasi dengan larutan Na₂S₂O₃

3.5.2 Penentuan kLa dengan proses ozonasi dan kavitasi hidrodinamika

Pada penelitian ini, proses berlangsung secara *semi-batch* dengan sirkulasi aliran liquid.

Prosedur percobaan:

1. Menyiapkan rangkaian alat seperti Gambar 3.3
2. Mengisi reservoir dengan limbah sintetik
3. Menambahkan larutan H₂SO₄ 18 M
4. Menyalakan pompa
5. Mengatur tekanan pada valve aliran by-pass dan valve menuju flowmeter agar alirannya tersirkulasi.
6. Menginjeksikan ozon
7. Mengambil sampel dari *sample port* sebanyak 200 ml pada reaktor gelembung setiap 5 menit selama 30 menit untuk dicek kadar DO₃, lalu air sample dikembalikan ke reservoir.
8. Mengambil larutan KI hasil *ozone trap* pada bagian gas keluaran setiap 5 menit selama 30 menit dan menitrasi dengan larutan Na₂S₂O₃

3.5.3 Penentuan kLa dengan proses ozonasi dan kavitasi ultrasonik

Pada penelitian ini, proses berlangsung secara *semi-batch* dengan sirkulasi aliran liquid dan kavitasi ultraasonik dihasilkan dari alat sonikasi.

Prosedur percobaan:

1. Menyiapkan rangkaian alat seperti Gambar 3.4
2. Mengisi reservoir dengan limbah sintetik
3. Menambahkan larutan H₂SO₄ 18 M
4. Mengatur sonikator dengan intensitas 60%
5. Menyalakan pompa

6. Mengatur tekanan pada valve aliran by-pass dan valve menuju flowmeter agar alirannya tersirkulasi, laju alir air sebesar 3 LPM.
7. Menginjeksikan ozon dengan laju alir 400 L/jam.
8. Mengambil sampel dari *sample port* sebanyak 200 ml pada reaktor gelembung setiap 5 menit selama 30 untuk dicek kadar DO₃, lalu air sample dikembalikan ke reservoir.
9. Mengambil larutan KI hasil *ozone trap* pada bagian gas keluaran setiap 5 menit selama 30 menit dan menitrasi dengan larutan Na₂S₂O₃

3.5.4 Penentuan kLa dengan proses ozonasi, kavitas hidrodinamika dan kavitas ultrasonik

Pada penelitian ini, proses berlangsung secara *semi-batch* dengan sirkulasi aliran liquid dan kavitas ultraosonik dihasilkan dari alat sonikasi.

Prosedur percobaan:

1. Menyiapkan rangkaian alat seperti Gambar 3.5
2. Mengisi reservoir dengan limbah sintetik
3. Menambahkan larutan H₂SO₄ 18 M
4. Mengatur sonikator dengan intensitas 60%
5. Menyalakan pompa
6. Mengatur tekanan pada valve aliran by-pass dan valve menuju flowmeter agar alirannya tersirkulasi, laju alir air sebesar 3 LPM.
7. Menginjeksikan ozon dengan laju alir 400 L/jam.
8. Mengambil sampel dari *sample port* sebanyak 200 ml pada reaktor gelembung setiap 5 menit selama 30 untuk dicek kadar DO₃, lalu air sample dikembalikan ke reservoir.
9. Mengambil larutan KI hasil *ozone trap* pada bagian gas keluaran setiap 5 menit selama 30 menit dan menitrasi dengan larutan Na₂S₂O₃
10. Melakukan prosedur 1 sampai 7:
 - a. Dengan variasi besar intensitas sonikator 30%
 - b. Dengan variasi laju alir air 2 LPM dan 4 LPM
 - c. Dengan variasi laju alir ozon 200 L/jam, 300 L/jam, 500 L/jam, 600 L/jam, dan 700 L/jam.

3.5.5 Penentuan R_{CT} dengan proses ozonasi

Pada penelitian ini, proses berlangsung secara *semi-batch* dengan sirkulasi aliran liquid.

Prosedur percobaan

1. Menyiapkan rangkaian alat seperti Gambar 3.2 tanpa *ozone trap*
2. Menjenuhkan air aquades di reservoir selama 1 jam dengan cara mengalirkan air pada sistem dengan pompa pada laju alir 2 LPM dan laju alir ozon sebesar 600 L/jam.
3. Memasukkan $CaCO_3$ ke dalam reservoir.
4. Mengecek pH
5. Mematikan aliran listrik ozonator, sehingga udara yang masuk hanya berasal dari kompresor.
6. Mengambil sampel dari *sample port* sebanyak 200 ml pada reaktor gelembung setiap 5 menit selama 30 menit untuk dicek kadar DO_3 , lalu air sample dikembalikan ke reservoir.
7. Mengambil sampel dari *sample port* sebanyak 10 ml pada reaktor gelembung setiap 5 menit selama 30 menit untuk uji kadar $CaCO_3$ dengan metode titrasi

3.5.6 Penentuan R_{CT} dengan proses ozonasi dan kavitasi hidrodinamika

Pada penelitian ini, proses berlangsung secara *semi-batch* dengan sirkulasi aliran liquid.

Prosedur percobaan

1. Menyiapkan rangkaian alat seperti Gambar 3.3 tanpa *ozone trap*
2. Menjenuhkan air aquades di reservoir selama 1 jam dengan cara mengalirkan air pada sistem dengan pompa pada laju alir 2 LPM dan laju alir ozon sebesar 600 L/jam.
3. Memasukkan $CaCO_3$ ke dalam reservoir.
4. Mengecek pH
5. Mematikan aliran listrik ozonator, sehingga udara yang masuk hanya berasal dari kompresor.

6. Mengambil sampel dari *sample port* sebanyak 200 ml pada reaktor gelembung setiap 5 menit selama 30 menit untuk dicek kadar DO₃, lalu air sample dikembalikan ke reservoir.
7. Mengambil sampel dari *sample port* sebanyak 10 ml pada reaktor gelembung setiap 5 menit selama 30 menit untuk uji kadar CaCO₃ dengan metode titrasi
8. Melakukan prosedur 1 sampai 7 dengan variasi pH basa (pH 13)

3.5.7 Penentuan R_{CT} dengan proses ozonasi dan kavitasi ultrasonik

Pada penelitian ini, proses berlangsung secara *semi-batch* dengan sirkulasi aliran liquid.

Prosedur percobaan

1. Menyiapkan rangkaian alat seperti Gambar 3.4 tanpa *ozone trap*
2. Menjemuhkan air aquades di reservoir selama 1 jam dengan cara mengalirkan air pada sistem dengan pompa pada laju alir 2 LPM dan laju alir ozon sebesar 600 L/jam.
3. Memasukkan CaCO₃ ke dalam reservoir.
4. Mengecek pH
5. Mengatur sonikator dengan intensitas 60%
6. Mematikan aliran listrik ozonator, sehingga udara yang masuk hanya berasal dari kompresor.
7. Mengambil sampel dari *sample port* sebanyak 200 ml pada reaktor gelembung setiap 5 menit selama 30 menit untuk dicek kadar DO₃, lalu air sample dikembalikan ke reservoir.
8. Mengambil sampel dari *sample port* sebanyak 10 ml pada reaktor gelembung setiap 5 menit selama 30 menit untuk uji kadar CaCO₃ dengan metode titrasi
9. Mengambil sampel dari *sample port* sebanyak 10 ml pada reaktor gelembung setiap 5 menit selama 30 menit untuk uji kadar H₂O₂ dengan metode spektrofotometri.

3.5.8 Penentuan R_{CT} dengan proses ozonasi, kavitas hidrodinamika, dan kavitas ultrasonik

Pada penelitian ini, proses berlangsung secara *semi-batch* dengan sirkulasi aliran liquid dan kavitas ultraosonik dihasilkan dari alat sonikasi.

Prosedur percobaan

1. Menyiapkan rangkaian alat seperti Gambar 3.5 tanpa *ozone trap*
2. Menjenuhkan air aquades di reservoir selama 1 jam dengan cara mengalirkan air pada sistem dengan pompa pada laju alir 2 LPM dan laju alir ozon sebesar 600 L/jam.
3. Memasukkan CaCO_3 ke dalam reservoir.
4. Mengecek pH
5. Mengatur sonikator dengan intensitas 60%
6. Mematikan aliran listrik ozonator, sehingga udara yang masuk hanya berasal dari kompresor.
7. Mengambil sampel dari *sample port* sebanyak 200 ml pada reaktor gelembung setiap 5 menit selama 30 menit untuk dicek kadar DO_3 , lalu air sample dikembalikan ke reservoir.
8. Mengambil sampel dari *sample port* sebanyak 10 ml pada reaktor gelembung setiap 5 menit selama 30 menit untuk uji kadar CaCO_3 dengan metode titrasi
9. Mengambil sampel dari *sample port* sebanyak 10 ml pada reaktor gelembung setiap 5 menit selama 30 menit untuk uji kadar H_2O_2 dengan metode spektrofotometri.
10. Melakukan prosedur 1 sampai 7 dengan variasi intensitas sonikator 30%

3.6 Analisis Sampel

Umpan dan sampel yang telah diambil akan dianalisis nilai DO_3 , kandungan H_2O_2 , dan kandungan ion CO_3^{2-} .

3.6.1 Analisis kandungan DO3

Nilai DO3 didapat dari alat DO3meter merk DO3 Eco Sensors. Nilai ini merupakan nilai ozon terlarut pada air dalam satuan ppm (mg/L). Nilai ini didapat dengan cara meletakkan alat pada labu ukur 250 ml. Labu tersebut diisi air sample sebanyak 200 ml, setelah beberapa menit, alat akan memberikan nilai dari ozon terlarut pada air sample tersebut. Alat ini menggunakan prinsip hukum Henry.

3.6.2 Analisa konsentrasi gas ozon pada bagian *output*

Gas ozon pada bagian keluaran reactor diukur konsentrasinya dengan memasang *ozone trap* pada bagian keluaran tersebut. *Ozone trap* tersebut berupa KI yang apabila dialiri gas ozon akan bersifat mengikat gas tersebut dan warnanya berubah menjadi kuning pekat. Selanjutnya, konsentrasi ozon yang diikat oleh larutan KI didapat dengan menitrasi larutan tersebut dengan larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$. Berikut adalah alat, bahan, dan prosedur titrasi tersebut.

3.6.2.1. Peralatan

Peralatan yang digunakan:

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

3.6.2.2. Bahan

Bahan yang digunakan:

- 1) Kalium iodida (KI) 0,12 N
- 2) $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
- 3) H_2SO_4 2 N
- 4) Indikator amylum

3.6.2.3. Prosedur

Prosedur analisis sampel dengan metode iodometri adalah sebagai berikut:

- 1) Menambahkan KI 0,12 N 25 mL ke dalam sampel
- 2) Menambahkan H₂SO₄ 2 N 4 mL ke dalam sampel
- 3) Menambahkan indikator amilum hingga warna sampel menjadi biru
- 4) Menitrasi sampel dengan Na₂S₂O₃.5H₂O hingga warna menjadi bening
- 5) Mencatat volume Na₂S₂O₃.5H₂O yang digunakan untuk menitrasi sampel

3.6.3 Analisis kandungan ion CO₃²⁻

Kandungan ion CO₃²⁻ yang dilihat pada sample merupakan hasil dari percobaan untuk menganalisa laju dekomposisi ozon. Senyawa ini digunakan untuk memeriksa OH radikal karena reaktivitas senyawa ini lebih tinggi dengan OH radikal daripada dengan ozon. Analisa kandungan senyawa CO₃²⁻ dilakukan dengan proses titrasi. Berikut adalah alat, bahan, dan prosedur proses titrasi tersebut.

3.6.3.1. Peralatan

Peralatan yang digunakan:

- 1) Buret 50 ml
- 2) Statip
- 3) Labu erlenmeyer 500 ml, 1000 ml
- 4) Gelas ukur 50 ml
- 5) Pipet

3.6.3.2. Bahan

Bahan yang digunakan:

- 1) H₂SO₄ 0,02 N
- 2) NaOH 0,1 M
- 3) PP
- 4) Metil Orange

3.6.3.3. Prosedur

Prosedur analisis sampel dengan metode iodometri adalah sebagai berikut:

- 1) Menambahkan NaOH 0,1 M ke dalam sampel hingga pH mencapai 9-10
- 2) Menambahkan PP ke dalam sampel hingga warna menjadi merah-ungu
- 3) Menitrasi sampel dengan H₂SO₄ 0,02 N hingga warna sampel menjadi bening
- 4) Mencatat volume H₂SO₄ 0,02 N yang digunakan untuk menitrasi sampel
- 5) Menambahkan Metil Orange ke dalam larutan hingga menjadi warna kuning-oranye
- 6) Menitrasi larutan dengan H₂SO₄ 0,02 N hingga warna sampel menjadi merah muda
- 7) Mencatat volume H₂SO₄ 0,02 N yang digunakan untuk menitrasi sampel

3.6.5 Analisis pH

pH dapat mempengaruhi tindakan oleh ozon pada bahan organik, yang dapat berupa ozonasi langsung atau tidak langsung (tanpa radikal). Nilai pH diukur dengan menggunakan pH meter. pH menunjukkan sifat keasaman pada air produk.

3.7 Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan dengan cara berikut:

3.7.1 Penentuan Koefisien Perpindahan Massa

Koefisien perpindahan massa ($k_L a_{O_3}$) dicari dengan menggunakan data dari alat DO3meter yang menunjukkan nilai ozon terlarut pada sample. Rumus perhitungan $k_L a_{O_3}$ sebagai berikut:

$$\frac{-dC_{O_3}}{(C_{O_3}^* - C_{O_3})} = k_L a_{O_3} dt \quad (2.9)$$

Dengan mengintegrasikan persamaan tersebut pada kondisi batas, $C_{O_3} = 0$ pada $t = 0$ dan $C_{O_3} = C$ pada $t = t$, diperoleh:

$$\int_0^C \frac{dC_{O_3}}{(C_{O_3}^* - C_{O_3})} = k_L a_{O_3} \int_0^t dt \quad (2.10)$$

Selanjutnya, persamaan tersebut diturunkan menjadi:

$$\ln\left(\frac{C_{O_3}^*}{C_{O_3}^* - C_{O_3}}\right) = k_L a \cdot t \quad (2.11)$$

Dengan $C_{O_3}^* = C_L^*$. Selanjutnya, persamaan untuk tekanan parsial ozon adalah sebagai berikut:

$$P(O_3) = H \times C_L^* \quad (3.1)$$

$$C_L^* = \frac{H}{P(O_3)} \quad (3.2)$$

Dengan H adalah konstanta Henry. Selanjutnya, nilai $P(O_3)$ didapat dengan:

$$P(O_3) = \frac{C_{O_3 \text{ outlet}} \times R \times T}{MW} \quad (3.3)$$

$C_{O_3 \text{ outlet}}$ merupakan konsentrasi ozon keluaran yang menggunakan larutan KI sebagai media pengukuran. Setelah itu, nilai C_L^* sebagai $C_{O_3}^*$ dapat dihitung besarnya. Selanjutnya, dengan memasukkan nilai dari DO3 meter sebagai C_{O_3} , nilai $k_L a_{O_3}$ dapat dicari, dan dapat di plot nilai $\ln\left(\frac{C_{O_3}^*}{C_{O_3}^* - C_{O_3}}\right)$ berbanding t.

3.7.2 Penentuan dekomposisi ozon dan konsentrasi radikal OH dengan R_{ct}

R_{ct} yang merupakan fungsi waktu dari rasio paparan radikal OH terhadap ozon dapat dicari dengan menggunakan data dekomposisi ozon terhadap waktu dan dekomposisi senyawa CO_3^{2-} . Data tersebut digunakan dalam persamaan:

$$\ln\left(\frac{[CO_3^{2-}]_t}{[CO_3^{2-}]_0}\right) = -k_{OH/CO_3^{2-}} R_{ct} \int [O_3] dt \quad (2.36)$$

dengan $(k_{OH/CO_3^{2-}} = 4.2 \times 10^8 M^{-1} s^{-1})$. Dari persamaan tersebut akan didapat nilai R_{ct} . Selanjutnya, konsentrasi radikal OH didapat dari persamaan:

$$R_{ct} = \int [\cdot OH] dt / \int [O_3] dt \quad (2.35)$$

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini akan diteliti signifikansi pemanfaatan kavitas hidrodinamika dan kavitas ultrasonik pada sistem ozonasi dalam meningkatkan kelarutan ozon dalam air yang dievaluasi dengan besar koefisien perpindahan massa ($k_L a_{O_3}$). Pengaruh laju sirkulasi air dan laju alir gas juga ikut diteliti pengaruhnya. Untuk mengevaluasi keberadaan kavitas, skema proses yang divariasikan dalam percobaan ini adalah ozonasi, ozonasi-kavitas hidrodinamik, ozonasi-kavitas ultrasonik, dan ozonasi-kavitas hidrodinamik-kavitas ultrasonik. Pengkajian terhadap paparan radikal OH dan paparan ozon dalam sistem juga akan diteliti dan dievaluasi dengan koefisien R_{CT} .

4.1. Koefisien Perpindahan Massa Ozon–Air ($k_L a_{O_3}$)

Penelitian dilakukan untuk mengkaji seberapa besar pengaruh penggunaan kavitas hidrodinamik, kavitas ultrasonik, kecepatan aliran gas, dan kecepatan aliran air terhadap konsentrasi ozon terlarut dalam air.

Koefisien perpindahan massa ozon–air ($k_L a_{O_3}$) merupakan besaran yang menyatakan seberapa besar massa ozon yang berpindah atau terlarut ke dalam fasa cair (air) per satuan waktu. Harga $k_L a_{O_3}$ untuk selanjutnya akan disebutkan dengan simbol $k_L a$ saja. Berikut adalah langkah yang digunakan dalam mencari koefisien $k_L a$:

1. Mengambil data ozon terlarut (C_{O_3}) tiap selang waktu tertentu
2. Mencatat suhu sample tiap selang waktu tertentu
3. Mencatat volum titrasi KI oleh $Na_2S_2O_3$ pada gas keluaran tiap selang waktu tertentu dan data tersebut digunakan untuk nilai $C_{O_3}^*$
4. Menghitung $\ln \left(\frac{C_{O_3}^*}{C_{O_3}^* - C_{O_3}} \right)$ tiap selang waktunya.
5. Mem-plot grafik $\ln \left(\frac{C_{O_3}^*}{C_{O_3}^* - C_{O_3}} \right)$ vs t

6. Dari persamaan grafik yang didapat, dimasukkan kedalam rumus :

$$\ln \left(\frac{C_{O_3}^*}{C_{O_3}^* - C_{O_3}} \right) = k_L a \cdot t \quad (2.36)$$

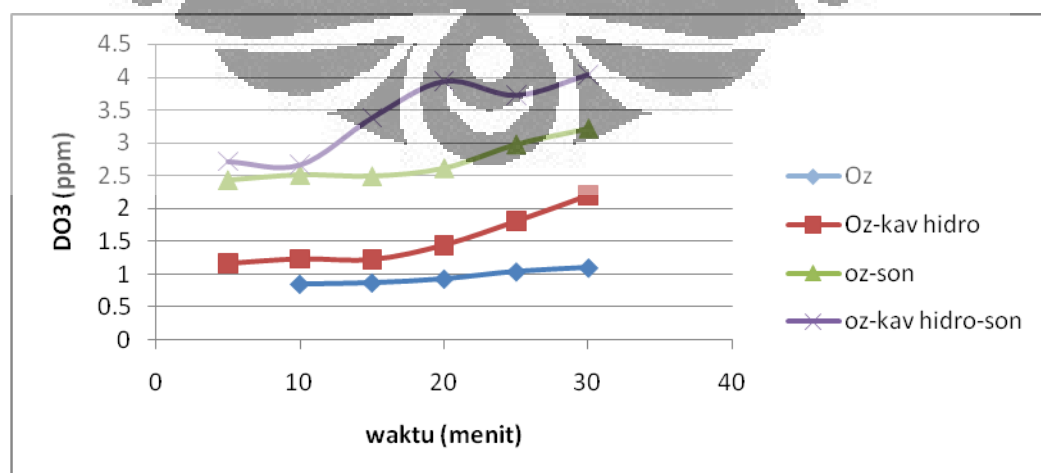
Selanjutnya, didapatkan nilai $k_L a$. Pengolahan data lebih lengkap untuk mencari nilai $k_L a$ dapat dilihat pada lampiran A.

Nilai C_L^* atau $C_{O_3}^*$ merupakan nilai yang didapat dari konsentrasi ozon pada fasa gas di bagian *effluent* atau keluaran (Gottschalk, 2000). Nilai dari konsentrasi ozon keluaran akan berubah-ubah seiring dengan waktu, hal ini menunjukkan bahwa tekanan parsial ozon pada bagian keluaran reaktor juga akan berubah-ubah seiring dengan waktu.

4.1.1. Pengaruh kavitasi hidrodinamik dan kavitasi ultrasonik terhadap $k_L a$

Pada penelitian ini dilakukan perbandingan nilai $k_L a$ yang dihasilkan pada empat konfigurasi prosess yang berbeda. Konfigurasi proses tersebut adalah ozonasi, ozonasi dengan kavitasi hidrodinamika, ozonasi dengan kavitasi ultrasonik atau sonikasi, dan ozonasi dengan kavitasi hidrodinamik dan sonikasi. Seluruh skema penelitian dilakukan pada laju sirkulasi air 3 L/menit dan laju alir gas ozon 400 L/jam.

Kelarutan ozon yang diukur dalam penelitian ini disebut DO₃ dan merupakan besar kandungan ozon terlarut (ppm) yang terdeteksi pada air. Gambar 4.1 merupakan kurva DO₃ terhadap waktu pada variasi skema percobaan.



Gambar 4.1. Perbandingan DO3 (ozon terlarut) terhadap waktu pada variasi skema penelitian

Pada Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa, penggunaan instrument kavitasi akan meningkatkan besar ozon terlarut, hal ini disebabkan penggunaan kavitasi akan menghasilkan gelembung mikro yang dapat meningkatkan ozon terlarut. Penggunaan kavitasi ultrasonik akan mengakibatkan terjadinya *transient cavitation*. *Transient cavitation* terjadi akibat terbentuknya gelembung yang tidak seragam karena proses ekspansi dan kompresi gelembung terjadi lebih ekstrim karena amplitudo dari kavitasi ultrasonik cukup tinggi. Efek dari fenomena ini adalah peningkatan suhu yang menyebabkan meningkatnya dekomposisi ozon dan terjadinya *micro streaming*, yaitu pencampuran mikro untuk mempertipis lapisan batas fasa cair-gas yang terjadi akibat gelembung yang berosilasi. Hal inilah yang memungkinkan kelarutan gas dalam air lebih besar.

Suhu merupakan variable yang mempengaruhi perpindahan massa gas ke air. Nilai suhu berpengaruh pada penentuan konstanta Henry sesuai rumus:

$$H_e = 1/10^{-0.25 - 0.013T} \quad (4.1)$$

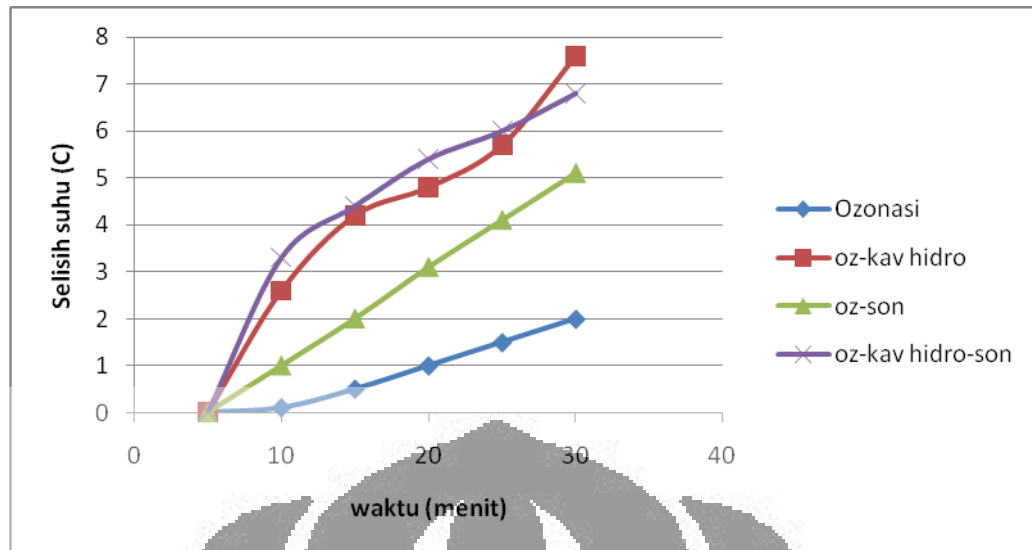
Selanjutnya, konstanta Henry digunakan untuk menentukan tekanan parsial ozon sesuai rumus:

$$P(O_3) = \frac{C_{O_3, outlet} \times R \times T}{MW} \quad (4.2)$$

Selanjutnya, tekanan parsial ozon digunakan untuk mencari nilai $C_{O_3}^*$ dengan rumus:

$$C_{O_3}^* = \frac{H}{P(O_3)} \quad (4.3)$$

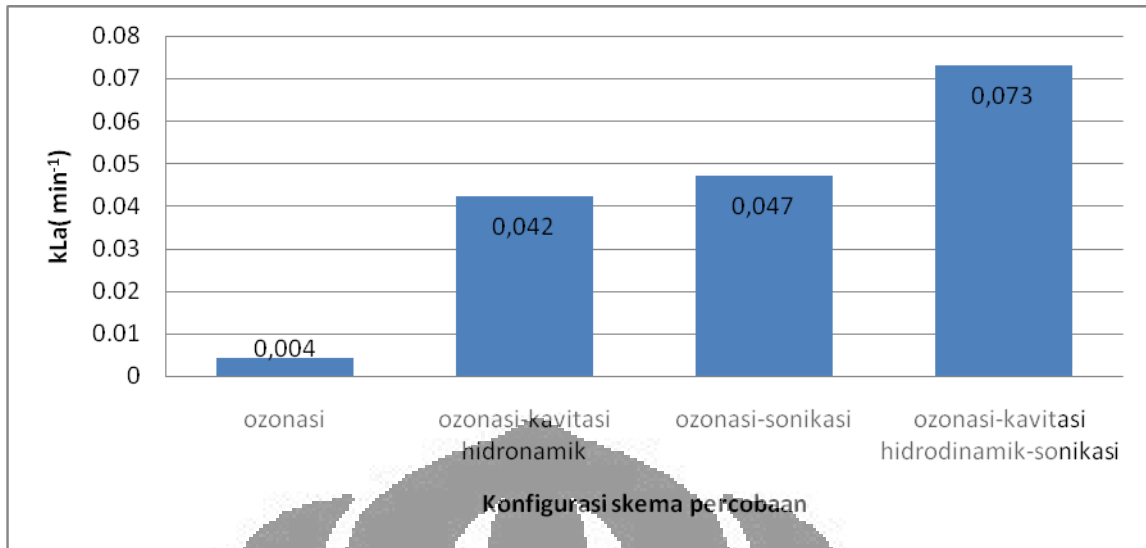
Maka, dapat disimpulkan, suhu berpengaruh terhadap nilai konsentrasi ozon terlarut dalam keadaan jenuh ($C_{O_3}^*$), sehingga juga berpengaruh terhadap perpindahan massa ozon ke air. Peningkatan suhu akan menurunkan kelarutan ozon juga menghambat perpindahan massa. Gambar 4.2 merupakan perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada penelitian dengan variasi laju sirkulasi air.



Gambar 4.2. Perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada variasi konfigurasi proses

Pada gambar 4.2, maupun pada seluruh grafik selisih suhu untuk tiap penelitian perpindahan massa, semua mempunyai profil yang sama, suhu terus meningkat. Hal ini dapat disebabkan oleh energi mekanik yang dihasilkan pompa yang diubah menjadi energi panas (untuk masing-masing konfigurasi), dan juga akibat pecahnya gelembung mikro pada proses ozonasi dengan kavitasi (hidrodinamika dan/atau sonikasi). Dapat dilihat bahwa suhu akan membesar saat penggunaan kavitasi, karena kavitasi akan meningkatkan tidak hanya tekanan tapi suhu dalam air. Peningkatan suhu akibat kavitasi ini karena hancurnya gelembung mikro yang menghasilkan fenomena hot-spot. Fenomena hot-spot secara teori hanya meningkatkan suhu secara local saja. Tetapi, efek hot-spot ini juga meningkatkan suhu pada fasa ruah. Sonikasi memberikan efek kenaikan suhu yang lebih besar dari kavitasi hidrodinamika, namun pada Gambar 4.2, suhu pada skema ozonasi-kavitasi hidrodinamika lebih besar dari ozonasi-sonikasi. Hal ini disebabkan air pendingin yang digunakan mempunyai suhu lebih rendah saat percobaan ozonasi-kavitasi sonikasi.

Setelah dilakukan pengolahan data, didapatkan nilai koefisien perpindahan massa ozon ke air, k_La , untuk tiap skema percobaan. Berikut pada Gambar 4.3 adalah nilai k_La yang didapat untuk keempat variasi skema:



Gambar 4.3 Perbandingan k_{La} pada tiap skema proses

Harga k_{La} pada sistem ozonasi-kavitasi hidrodinamik-sonikasi paling besar, diikuti oleh ozonasi-sonikasi, ozonasi-kavitasi hidrodinamik, dan ozonasi. Pada perbandingan antara skema ozonasi dengan ozonasi-kavitasi hidrodinamik maupun perbandingan antara skema ozonasi dengan ozonasi-sonikasi, peningkatan nilai k_{La} hampir mencapai 10 kali lebih besar. Sedangkan, untuk perbandingan nilai k_{La} pada proses ozonasi, kavitasi hidrodinamika, dan sonikasi 17 kali lebih besar dari pada proses ozonasi. Pada perbandingan skema ozonasi-kavitasi hidrodinamik dan ozonasi-sonikasi peningkatan nilai k_{La} kurang lebih 1,7 kali.

Nilai k_{La} pada proses ozonasi-kavitasi hidrodinamik dan skema ozonasi-sonikasi cukup dekat, tetapi masih lebih besar nilai k_{La} pada skema ozonasi-sonikasi. Hal ini disebabkan efek yang ditimbulkan dari sonikator dalam menghasilkan gelembung mikro dan senyawa radikal lebih besar dari injektor mazzei, yang merupakan sumber terbentuknya kavitasi hidrodinamika. Penggunaan injektor mazzei lebih kepada terbentuknya gelembung mikro secara fisik dan efek mekanisnya saja dalam pembangkitan gelembung mikro.

Peningkatan nilai k_{La} seiring dengan penggunaan kavitasi disebabkan kavitasi juga memberi efek fisika pada proses ozonasi yaitu peningkatan laju transfer massa gas-cair ozon. Laju transfer massa tergantung pada karakteristik campuran kontraktor gas-cair yang digunakan, dan jumlah dan ukuran gelembung

mikro yang dihasilkan. Dengan efek kavitasi yang diberikan pada ozon, maka terjadi perpindahan massa ozon ke dalam air yang lebih besar. Perpindahan massa yang semakin besar adalah karena efek mekanis seperti proses pencampuran yang lebih besar dan pemecahan gelembung-gelembung ozon ketika dilewati transduser atau injektor (Mason, 2001). Efektifitas ozonasi dapat ditingkatkan dengan memperluas area permukaan ozon melalui ukuran gelembung yang lebih kecil.

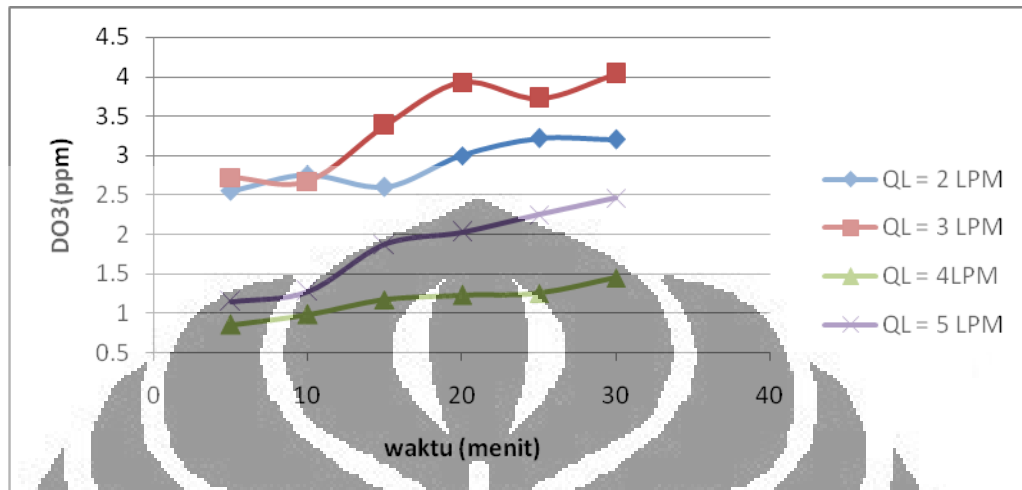
Penggunaan kavitasi hidrodinamik dan kavitasi ultrasonik pada sistem memberikan nilai koefisien perpindahan massa yang lebih besar dari skema lainnya. Hal ini disebabkan penggunaan kedua jenis kavitasi tersebut akan meningkatkan efek kavitasi terhadap perpindahan massa, yaitu efek mekanis akibat *micro streaming*. *Micro streaming* ini meningkat seiring semakin banyaknya gelembung mikro yang beresilasi hasil dari kavitasi hidrodinamik dan kavitasi ultrasonik.

Pada reaktor, saat gelembung bergerak naik ke atas sepanjang reaktor, tekanan air menurun dan menyebabkan ukuran gelembung membesar, gelembung-gelembung tersebut juga cenderung untuk bergabung, yang mengakibatkan area permukaan mengecil. Karena itu, perpindahan massa lebih besar di bagian bawah daripada di bagian atas reaktor. Untuk analisa yang lebih akurat, sebaiknya selanjutnya analisa $k_L a$ dilakukan di bagian atas dan bawah reaktor, hingga bisa didapatkan nilai $k_L a$ rata-rata.

4.1.2. Pengaruh laju sirkulasi air (Q_L) terhadap $k_L a$

Injektor mazzei yang digunakan mempunyai prinsip sebagai berikut: pada saat air bertekanan memasuki injektor, aliran air akan terhisap menuju arah ruang injeksi dan berubah menjadi aliran dengan kecepatan yang sangat tinggi. Meningkatnya kecepatan ini akan menurunkan tekanan yang memungkinkan ozon untuk masuk ke dalam *suction port* dan ikut terbawa ke dalam aliran. Laju sirkulasi air masukan injektor yang terlalu rendah menyebabkan terjadinya kegagalan dalam penarikan ozon untuk memasuki injector dan membuat sistem menjadi kurang sempurna.

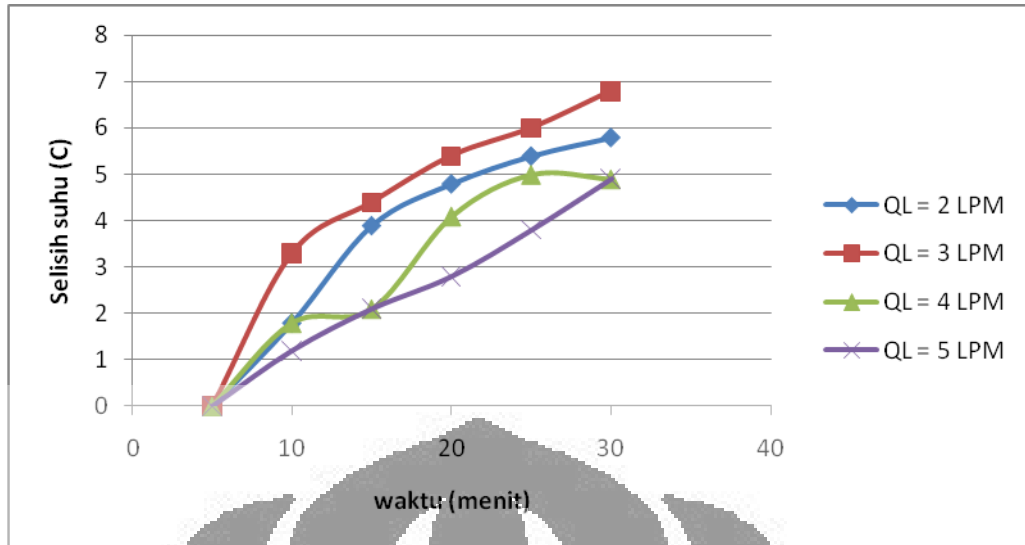
Variabel tetap pada penelitian ini adalah laju alir gas ozon (Q_G) yaitu 400 L/jam dan variable yang divariasikan adalah laju sirkulasi air. Berikut pada Gambar 4.4 merupakan kurva DO_3 terhadap waktu pada variasi laju sirkulasi air.



Gambar 4.4. Perbandingan DO_3 (ozon terlarut) terhadap waktu pada variasi laju sirkulasi air

Pada Gambar 4.4, dapat dilihat bahwa pada tiap variasi laju sirkulasi air, kandungan ozon terlarut cenderung terus meningkat. Hal ini disebabkan ozon terus menerus dipaparkan pada air yang bersirkulasi, hingga dekomposisi ozon yang terjadi diminimalisir. Pada gambar 4.4 juga dapat dilihat perbandingan besar kelarutan ozon sama seperti perbandingan koefisien perpindahan massa, k_{La} , dimana yang tertinggi adalah pada laju alir 3 LPM dan terendah pada laju alir 4 LPM. Dapat disimpulkan, pada laju alir 3 LPM, kontak antara ozon dan air paling efektif, sedangkan pada laju alir yang lebih besar dari 3 LPM, waktu kontak antara ozon dan air semakin kecil sehingga kelarutan makin rendah.

Data suhu tiap selang waktu disajikan pada Gambar 4.5 yang merupakan perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada penelitian dengan variasi laju alir gas.



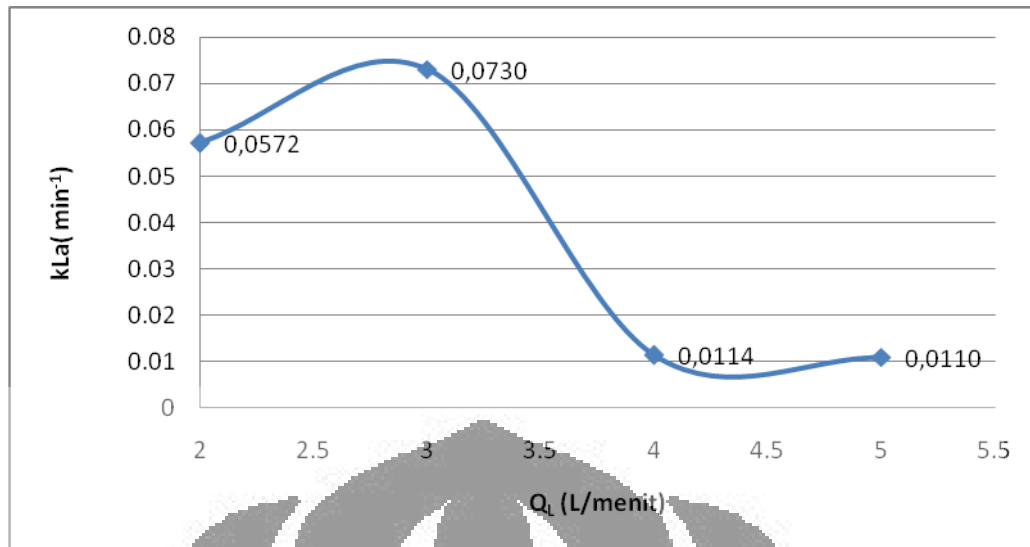
Gambar 4.5. Perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada variasi laju sirkulasi air

Dapat dilihat pada gambar 4.5. semakin kecil laju sirkulasi air, peningkatan suhu semakin besar. Hal ini dapat disebabkan karena pompa yang digunakan merupakan pompa dengan kapasitas laju alir normal 10 LPM, sehingga pompa yang digunakan bekerja lebih keras pada laju alir yang lebih kecil.

Setelah dilakukan pengolahan data, didapatkan nilai koefisien perpindahan massa ozon ke air, k_{La} , untuk tiap skema percobaan. Nilai k_{La} pada tiap kondisi operasi disajikan pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.6. yang menunjukkan hubungan antara laju sirkulasi air (Q_L) dengan k_{La} .

Tabel 4.1. Nilai K_{La} ozon-air pada laju alir udara konstan

Q_L (L/menit)	Q_G (L/jam)	$k_{La} O_3$ (menit ⁻¹)
2	400	0,0572
3	400	0,073
4	400	0,0114
5	400	0,011



Gambar 4.6. Grafik hubungan laju sirkulasi air (Q_L) dengan k_{La} pada $Q_G=400$ L/jam

Dari Tabel 4.1 dan Gambar 4.6. dapat dilihat bahwa pada laju alir gas yang tetap, untuk laju sirkulasi air awal yang kecil, semakin besar laju sirkulasi air, k_{La} cenderung semakin besar, lalu nilai k_{La} tersebut menurun drastis pada laju alir yang semakin besar dan selanjutnya cenderung konstan. Pada laju sirkulasi air 3 L/menit, k_{La} meningkat cukup tinggi (0,073 menit^{-1}) dari pada laju alir 2 L/menit (0,0572 menit^{-1}). Kenaikan laju sirkulasi air ini menyebabkan proses penarikan ozon ke dalam injektor yang lebih efektif sehingga perpindahan massa dapat berlangsung dengan baik demikian sehingga k_{La} pun meningkat.

Pada laju sirkulasi air 4 L/menit (0,12 m/s), k_{La} mengalami penurunan yang cukup tajam, sekitar tujuh kali lebih kecil, lalu pada laju alir 5 L/menit, k_{La} cenderung konstan. Penurunan ini disebabkan oleh waktu tinggal air di dalam kolom yang semakin singkat karena laju alir yang besar. Semakin singkatnya waktu tinggal ini menyebabkan air tidak mengalami kontak yang efektif dengan gas sehingga perpindahan massanya cenderung menurun.

Alasan lain untuk penurunan nilai k_{La} adalah adanya pengaruh *flash* pada tangki, yang diakibatkan tangki dalam keadaan terbuka. Akibat terbukanya tangki ini, maka ada kontak dengan udara bebas dan terdapat gas-gas lain yang masuk ke dalam tangki. Hal ini menyebabkan perpindahan massa ozon ke air menjadi tidak efektif.

Selain itu, pada saat sirkulasi air, dapat terjadi efek *degassing*. *Degassing* merupakan fenomena berkurangnya kandungan senyawa terlarut (dalam kasus ini adalah ozon) pada proses kavitasi karena senyawa tersebut menjadi inti dari gelembung mikro. Untuk membentuk gelembung mikro diperlukan inti yang berasal dari larutan, hal ini juga dapat menjadi alasan menurunnya perpindahan massa ozon ke air.

Terdapat beberapa pendapat dari peneliti sebelumnya bahwa sampai pada kecepatan tertentu, laju sirkulasi air akan menurunkan harga k_{La} karena waktu tinggal air dalam kolom yang makin berkurang; dan pada kecepatan tertentu akan kembali menaikkan harga k_{La} akibat efek turbulensi dari aliran fasa cair (Cuenca, et. al., 1981; Deckwer, 1974; Treybal, 1984). Maka, apabila penelitian dilanjutkan dengan laju sirkulasi air yang semakin besar, terdapat kemungkinan harga k_{La} meningkat pada laju alir tertentu.

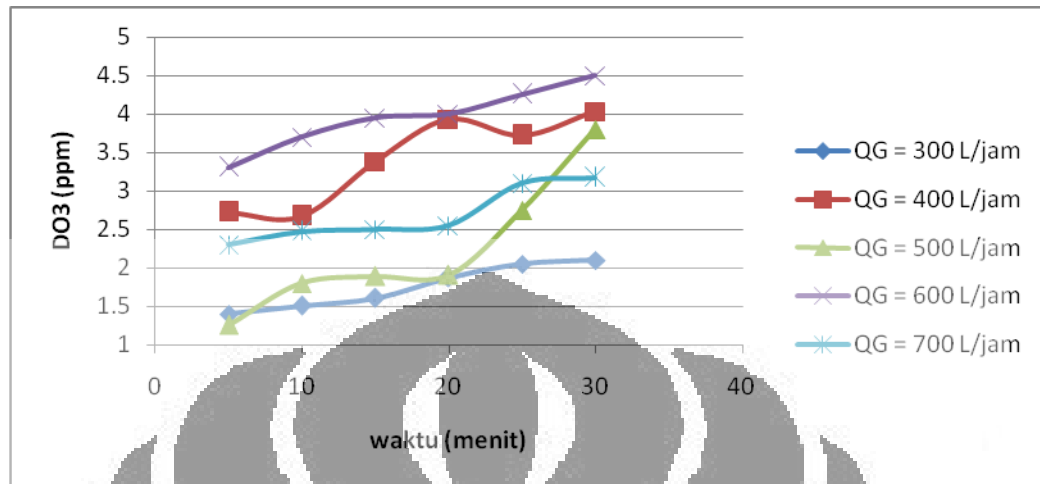
Suhu dan pH sistem pada percobaan untuk tiap laju alir tidak seragam, walau nilainya tidak terlalu beda. Perbedaan suhu dan pH ini bisa mempengaruhi perpindahan massa yang terjadi. Maka, perlu dilakukan pengulangan data untuk beberapa titik untuk memastikan keabsahan hasil data dan perhitungan yang dilakukan.

Dapat disimpulkan, pada penelitian ini, laju alir 3 LPM memberikan waktu tinggal air paling efektif untuk ozon berpindah ke fasa cair dan meningkatkan kelarutan ozon dalam air. Maka, laju alir ini merupakan kondisi yang paling optimal untuk mengontakkan ozon dengan air, hal ini dapat dilihat dari tingginya k_{La} .

4.1.3. Pengaruh laju alir gas (Q_G) terhadap k_{La}

Variabel tetap pada penelitian ini adalah laju sirkulasi air (Q_L) yaitu 3 L/menit dan variabel yang divariasikan adalah laju alir gas (Q_G). Laju alir 3 L/menit dipilih karena pada percobaan sebelumnya, laju alir ini paling efektif dalam menghasilkan nilai k_{La} yang tinggi. Pada laju sirkulasi air yang lebih kecil dikhawatirkan perpindahan massa tidak berlangsung dengan baik, sedang pada laju sirkulasi air yang lebih besar waktu tinggal air dalam kolom akan menjadi lebih singkat sehingga perpindahan massa juga tidak berlangsung secara optimal.

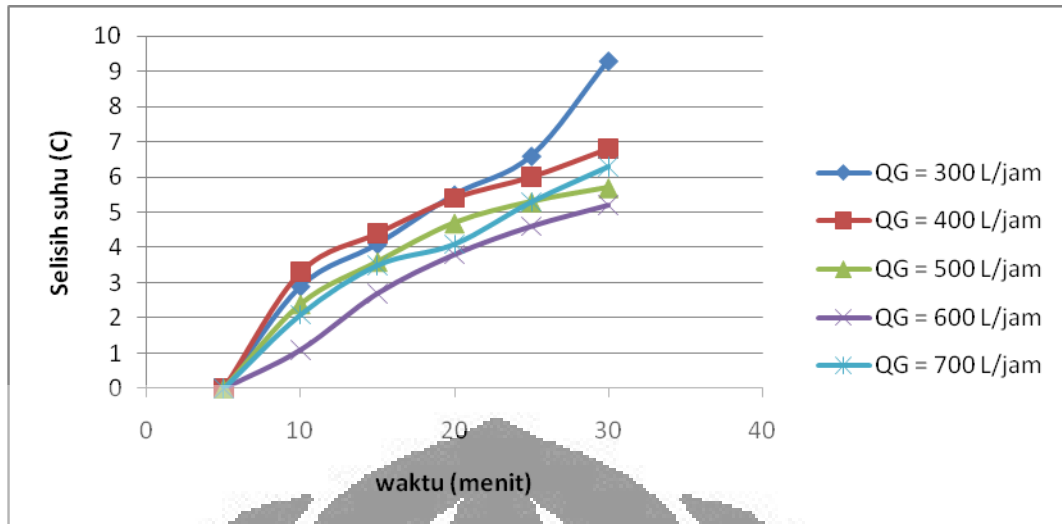
Berikut pada Gambar 4.7 merupakan kurva DO₃ terhadap waktu pada variasi laju alir gas.



Gambar 4.7. Perbandingan DO₃ (ozon terlarut) terhadap waktu pada variasi laju alir gas

Pada Gambar 4.7, sama seperti pada variasi laju sirkulasi air, dapat dilihat bahwa semua kecenderungan nilai ozon terlarut pada tiap laju alir gas sama, yaitu semakin meningkat seiring dengan waktu. Selain itu, pada penelitian ini kenaikan laju alir gas tidak selalu meningkatkan besar kelarutan ozon dalam air. Hal ini dapat disebabkan karena adanya efek *degassing* yang muncul. *Degassing* merupakan fenomena berkurangnya kandungan senyawa terlarut (dalam kasus ini adalah ozon) pada proses kavitasi karena senyawa tersebut menjadi inti dari gelembung mikro. Fenomena ini muncul saat gelembung pecah yang justru akan mengurangi kelarutan gas dalam air. Selain itu, kondisi penelitian yang sulit dibuat standar juga dapat menjadi alasan tidak meningkatnya kelarutan gas dalam air seiring peningkatan laju alir gas.

Data suhu tiap selang waktu disajikan pada Gambar 4.8 yang merupakan perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada penelitian dengan variasi laju alir gas.



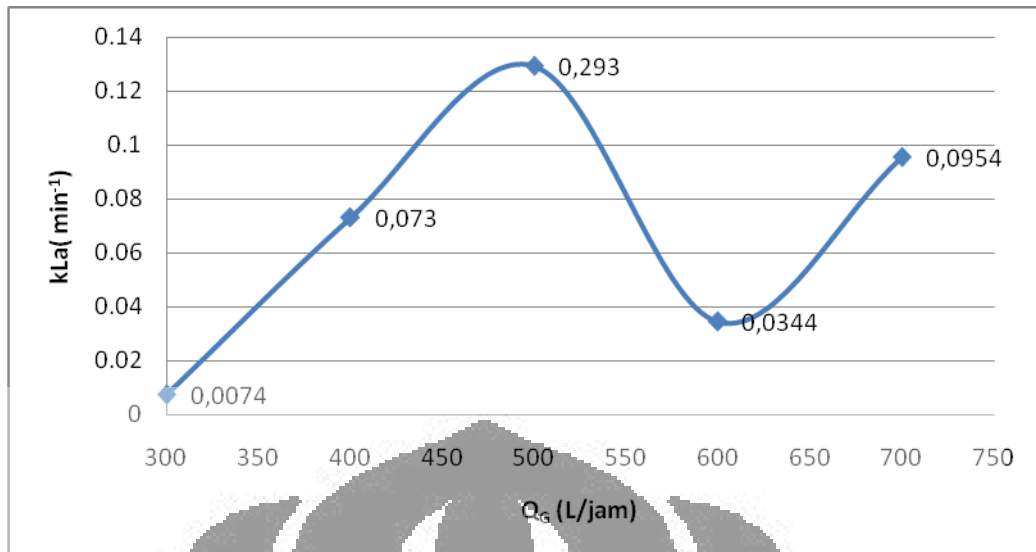
Gambar 4.8. Perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada variasi laju alir gas

Pada Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa peningkatan laju alir gas tidak berpengaruh terhadap besar suhu. Hal ini disebabkan sulitnya mengatur suhu penelitian secara seragam pada tiap percobaan yang dilakukan. Karena penggunaan air pendingin juga tidak seragam pada tiap percobaan, sulit didapat suhu yang seragam.

Setelah dilakukan pengolahan data, didapatkan nilai koefisien perpindahan massa ozon ke air, k_{La} , untuk tiap skema percobaan. Nilai k_{La} pada tiap kondisi operasi disajikan pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.9, menunjukkan hubungan antara laju alir gas (Q_G) dengan k_{La} .

Tabel 4.2. Nilai k_{La} ozon-air pada laju alir gas konstan

Q_L (L/menit)	Q_G (L/jam)	$k_{La} O_3$
3	300	0,0074
3	400	0,073
3	500	0,1293
3	600	0,0344
3	700	0,0954



Gambar 4.9. Grafik hubungan laju alir gas (Q_G) dengan k_{La} pada $Q_L = 3$ LPM

Pada Tabel 4.2. dan Gambar 4.9. pada laju alir 300 L/jam hingga 500L/jam terlihat bahwa untuk laju sirkulasi air yang tetap, nilai k_{La} akan meningkat seiring dengan meningkatnya laju alir gas. Hal ini disebabkan semakin membesarnya laju alir gas akan meningkatkan energi kinetik gas. Meningkatnya energi kinetik ini akan meningkatkan kemampuan gas ozon untuk masuk dan melarut ke dalam air. Pada laju alir gas kecil, banyak gelembung mikro yang terbentuk. Gelembung mikro akan meningkatkan perpindahan massa dan kelarutan ozon dalam air karena meningkatnya luas permukaan kontak gelembung. Konsentrasi dari ozon terlarut meningkat pada laju alir gas kecil karena perpindahan massa yang terjadi tinggi hingga mencapai titik jenuh pada kondisi laju alir 500 L/jam. k_{La} akan membesar nilainya seiring dengan kenaikan laju alir gas karena semakin banyak gelembung mikro yang dihasilkan, sehingga luas permukaan perpindahan massa membesar akibat dari membesarnya laju alir gas.

Pada laju alir 600 L/jam, harga k_{La} menurun tajam, empat kali lebih kecil dari harga k_{La} pada laju alir 500 L/jam, selain itu gelembung mikro yang terbentuk jauh berkurang dan gelembung besar muncul. Dari pengamatan didapatkan bahwa semakin tinggi laju alir gas, semakin banyak gelembung berukuran besar yang muncul di reactor, dan semakin sedikit gelembung mikro yang muncul. Laju alir yang tinggi akan mendorong terjadinya penggabungan

gelembung. Maka dari itu, luas permukaan dari gelembung akan semakin kecil dan kerapatan antar gelembung juga menurun, hal ini yang menyebabkan perpindahan massa menurun.

Kavitasi juga bisa memberikan efek kimiawi berupa dekomposisi ozon terlarut menjadi radikal OH. Dekomposisi ini akan menurunkan konsentrasi ozon dan meningkatkan suhu, sehingga kelarutan dan perpindahan massa juga akan menurun. Hal ini dapat menjadi alasan menurunnya koefisien perpindahan massa pada laju alir 500 L/jam ke 600 L/jam.

Pada laju alir 700 L/jam, harga k_{La} meningkat lagi, tiga kali lebih besar dari harga k_{La} pada laju alir 600 L/jam. Dari data konsentrasi *off gas* ozon pada laju alir 600 L/jam dan 700 L/jam, didapat bahwa terjadi penurunan konsentrasi gas keluaran, sehingga dapat diasumsikan penyerapan gas ozon ke air meningkat lagi, sehingga perpindahan massa pun meningkat.

Dekomposisi yang terjadi akibat efek kimiawi kavitasi juga dapat meningkatkan *driving force* ozon untuk melarut lagi ke dalam air. Hal ini disebabkan konsentrasi ozon yang berkurang akan menjadi pemicu untuk ozon yang dipaparkan untuk melarut lagi ke dalam air karena konsentrasi ozon terlarut belum mencapai titik jenuh. Hal ini dapat menjadi alasan koefisien perpindahan massa meningkat lagi pada laju alir 600 L/jam ke 700 L/jam.

Suhu dan pH sistem pada percobaan untuk tiap laju alir tidak seragam, walau nilainya tidak terlalu beda. Perbedaan suhu dan pH ini bisa mempengaruhi perpindahan massa yang terjadi. Maka, perlu dilakukan pengulangan data untuk beberapa titik untuk memastikan keabsahan hasil data dan perhitungan yang dilakukan.

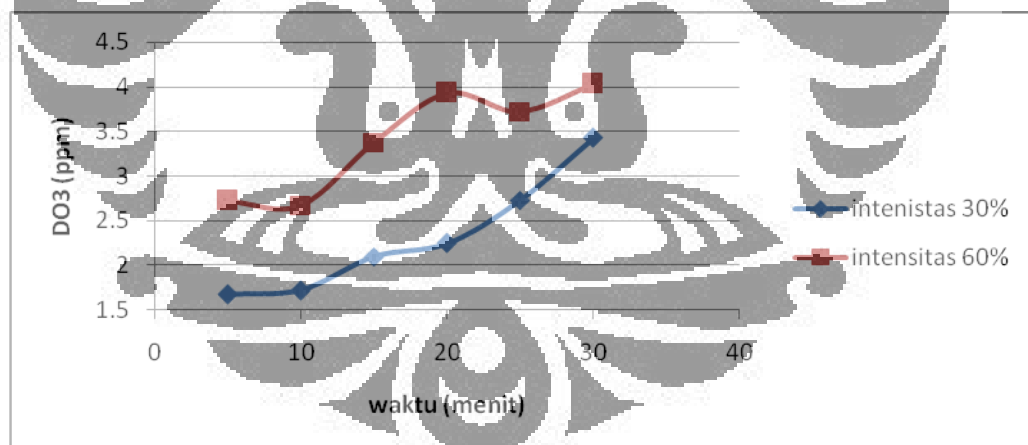
Selain itu, terdapat beberapa alasan lain untuk fluktuasi nilai k_{La} pada variasi laju alir gas ini seperti adanya pengaruh *flash* pada tangki, yang diakibatkan tangki dalam keadaan terbuka sehingga menyebabkan terjadinya kontak dengan udara bebas. Akibatnya adalah terdapat gas-gas lain yang masuk ke dalam tangki yang akan mengurangi keefektivan perpindahan massa ozon ke air. Selain itu, pada saat percobaan dapat terjadi efek *degassing*. *Degassing* merupakan fenomena berkurangnya kandungan senyawa terlarut (dalam kasus ini adalah ozon) pada proses kavitasi karena senyawa tersebut menjadi inti dari

gelembung mikro. Untuk membentuk gelembung mikro diperlukan inti yang berasal dari larutan, hal ini juga dapat menjadi alasan fluktuasi nilai perpindahan massa ozon ke air.

Maka untuk sistem penelitian ini, kondisi yang tepat untuk mendapatkan perpindahan massa yang terbaik dengan nilai k_{La} yang terbesar adalah saat laju sirkulasi air 3LPM dan laju alir gas 500 L/jam. Hal ini disebabkan pada kondisi tersebut, waktu kontak ozon dan air paling baik, gelembung yang dihasilkan dalam ukuran terkecil (secara visual), dan ozon terlarut yang didapatkan paling tinggi dibanding kondisi lainnya.

4.1.4. Pengaruh intensitas sonikator terhadap k_{La}

Pada penelitian ini dilakukan proses ozonasi, kavitasi hidrodinamik, dan sonikasi, dengan memvariasikan intensitas sonikator. Intensitas yang digunakan adalah 30% dan 60%. Kelarutan ozon dan suhu sistem juga mempengaruhi sonikator dalam meningkatkan perpindahan massa. Berikut pada Gambar 4.10 merupakan kurva DO_3 terhadap waktu pada variasi intensitas sonikator.

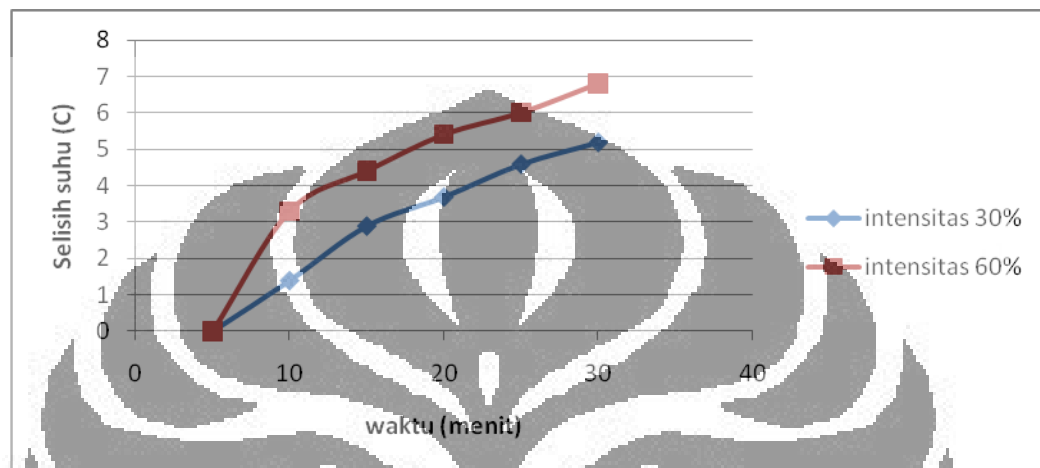


Gambar 4.10. Perbandingan DO_3 (ozon terlarut) terhadap waktu pada variasi intensitas sonikator

Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa peningkatan intensitas akan meningkatkan besar ozon terlarut. Selain itu, intensitas sonikator akan memperbesar frekuensi dan pembentukan gelembung. Semakin banyak

gelembung mikro yang dihasilkan, akan meningkatkan kelarutan ozon ke air, dan semakin besar luas permukaan perpindahan massa ozon ke air.

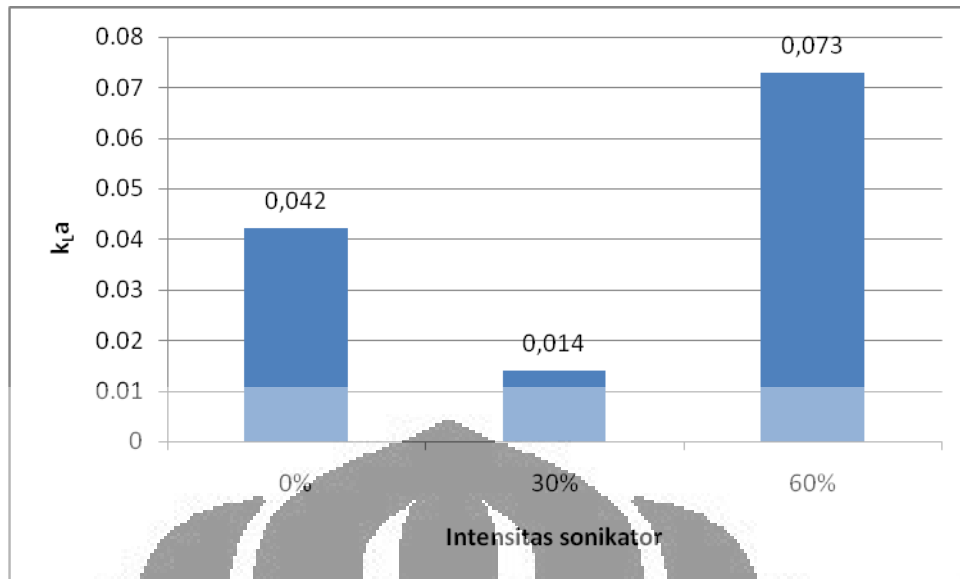
Grafik suhu tiap selang waktu disajikan pada Gambar 4.11 yang merupakan perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada penelitian dengan variasi intensitas sonikator.



Gambar 4.11. Perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada variasi intensitas sonikator

Pada Gambar 4.11, dapat dilihat bahwa peningkatan intensitas sonikator akan meningkatkan suhu sistem. Hal ini disebabkan, peningkatan intensitas akan meningkatkan energi yang di salurkan ke air, sehingga kerja sonikator akan semakin tinggi dan suhu meningkat. Selain itu, semakin besar intensitas sonikator, fenomena hot-spot yang dihasilkan sonikator akan semakin besar. Fenomena hot spot terjadi karena semakin banyak gelembung yang pecah sehingga meningkatkan laju pemanasan. Semakin tinggi intensitas, semakin besar pula kerja sonikator dalam menyalurkan energy, semakin banyak gelembung yang berekspansi dan kompresi. Hal ini menyebabkan peningkatan suhu yang lebih besar.

Setelah dilakukan pengolahan data, didapatkan nilai koefisien perpindahan massa ozon ke air, k_La , untuk tiap variasi intensitas sonikator. Perbandingan nilai k_La dapat dilihat pada Gambar 4.12



Gambar 4.12. Perbandingan k_{La} pada intensitas sonikator

Pada gambar, dapat dilihat bahwa pengaruh intensitas sonikator cukup signifikan. Koefisien perpindahan massa untuk intensitas 60% tujuh kali lebih besar dari intensitas 30%. Semakin tinggi intensitas sonikator, dekomposisi akan meningkat karena adanya *transient cavitation*. Reaksi dekomposisi akan meningkatkan nilai k_{La} .

Intensitas gelombang ultrasonik adalah energi yang melewati luas permukaan medium (www.electroniclab.com, diakses pada 15 Juni 2010), dan pada penelitian ini merupakan energi yang disalurkan sonikator ke air. Maka, energi ultrasonik dari sonikator akan meningkatkan perpindahan massa ozon ke air, dan semakin besar energi yang disalurkan ke air, semakin besar perpindahan massa yang terjadi.

4.2. Dekomposisi Ozon dengan Penentuan Koefisien R_{CT}

Koefisien R_{CT} merupakan rasio paparan radikal OH terhadap ozon dan merupakan fungsi waktu. Dekomposisi ozon dapat diteliti dengan penentuan koefisien R_{CT} karena salah satu karakteristik unik dari ozon adalah dekomposisinya menjadi radikal OH yang merupakan oksidator terkuat di air. Pada penelitian ini, digunakan senyawa radikal probe CO_3^{2-} yang direpresentasikan oleh senyawa $CaCO_3$. Radikal *probe* merupakan senyawa yang

reaktif terhadap radikal OH dan tidak reaktif terhadap ozon. Hal ini dapat terlihat dari nilai konstanta laju alir CO_3^{2-} terhadap radikal OH yang sangat besar, $k_{OH/CO_3^{2-}} = 4,2 \times 10^8 M^{-1}s^{-1}$.

Penurunan konsentrasi senyawa ini dan dekomposisi ozon bersamaan dengan fungsi waktu akan mendapatkan pengukuran tidak langsung terhadap konsentrasi radikal OH.

4.2.1. Perbandingan koefisien R_{CT} pada tiap konfigurasi sistem

Koefisien R_{CT} merupakan rasio paparan radikal OH terhadap ozon dan merupakan fungsi waktu. Langkah yang digunakan dalam mencari koefisien R_{CT} adalah:

1. Mengambil data konsentrasi ozon tiap selang waktu tertentu dan memplot ozon terlarut terhadap waktu.
2. Menghitung integral dari konsentrasi ozon tersebut tiap selang waktunya.
3. Mengambil data konsentrasi CO_3^{2-} tiap selang waktu tertentu.
4. Menghitung ln dari penyisihan kandungan CO_3^{2-} tiap selang waktunya.
5. Mem-plot grafik $\ln \left(\frac{[CO_3^{2-}]}{[CO_3^{2-}]_0} \right)$ vs $\int [O_3]$.
6. Dari persamaan grafik yang didapat, dimasukkan kedalam rumus

$$\ln \left(\frac{[CO_3^{2-}]}{[CO_3^{2-}]_0} \right) = -k_{OH/CO_3^{2-}} R_{ct} \int [O_3] dt \quad (2.36)$$

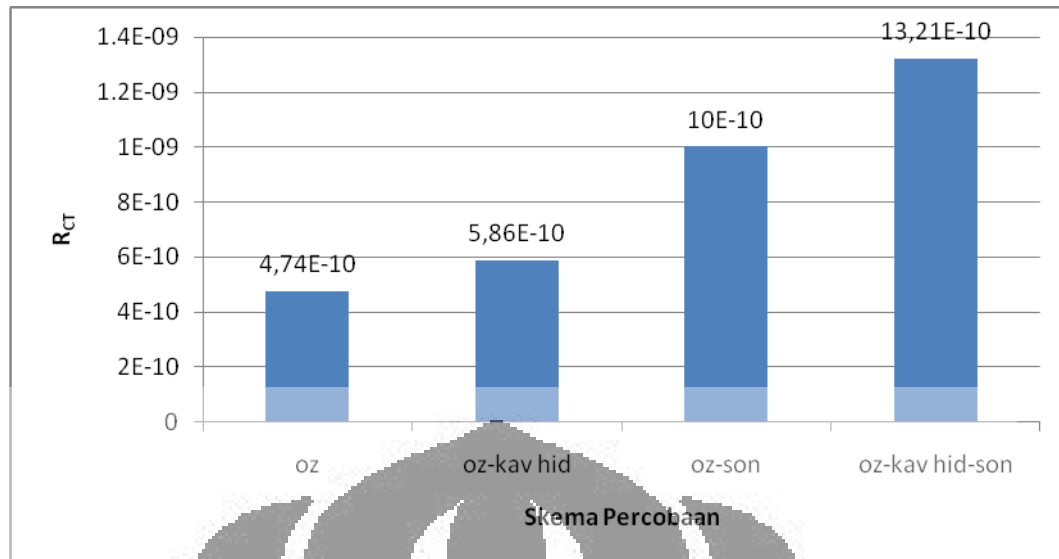
Dengan nilai ($k_{OH/CO_3^{2-}} = 4,2 \times 10^8 M^{-1}s^{-1}$).

Dari langkah-langkah tersebut dan perhitungan yang dilakukan, didapat nilai R_{CT} .

Pada penelitian ini dilakukan perbandingan nilai koefisien R_{CT} yang dihasilkan pada enam konfigurasi skema. Konfigurasi skema tersebut adalah:

1. Ozonasi (oz)
2. Ozonasi dengan kavitas hidrodinamika (oz-kav hid)
3. Ozonasi dengan kavitas ultrasonik atau sonikasi, (oz-son)
4. Ozonasi dengan kavitas hidrodinamik dan sonikasi (oz-kav hid-son)

Berikut pada gambar 4.13 adalah skema perbandingan koefisien R_{CT} .



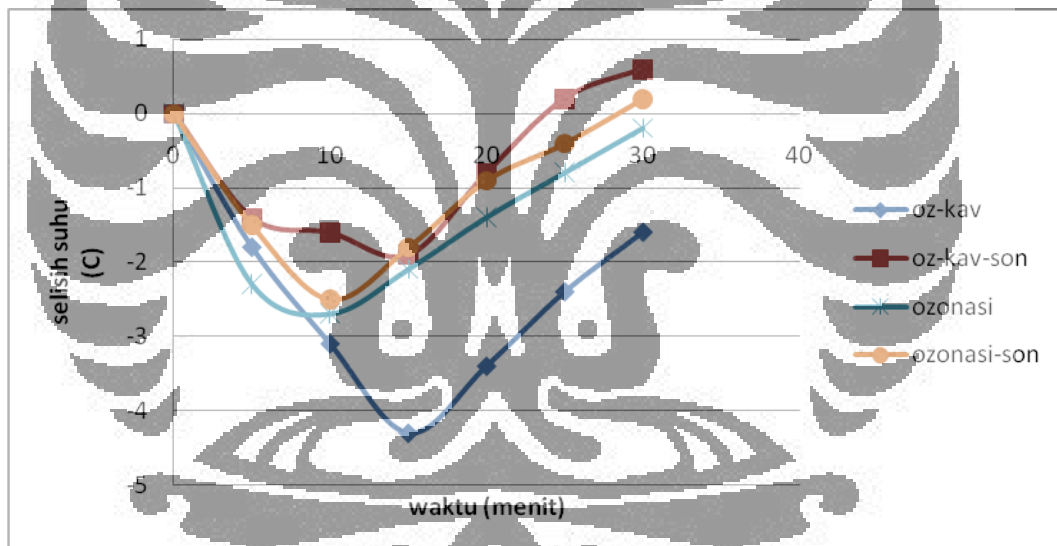
Gambar 4.13. Perbandingan koefisien R_{CT} pada tiap skema percobaan

Pada Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa nilai R_{CT} terbesar didapat saat skema percobaan ozonasi-kavitasi hidrodinamik-sonikasi dan nilai R_{CT} terkecil didapat pada percobaan dengan ozonasi saja. Hal ini diakibatkan jumlah radikal OH meningkat tajam saat dekomposisi ozon karena adanya kavitasi yang membangkitkan gelembung mikro. Penggunaan kavitasi memungkinkan terjadinya *transient cavitation*. *Transient cavitation* akan menyebabkan meningkatnya dekomposisi ozon menjadi radikal OH.. Selain itu, kavitasi akan meningkatkan pembentukan gelembung mikro yang meningkatkan luas permukaan reaksi.

Nilai R_{CT} pada skema ozonasi-sonikasi lebih besar dari nilai R_{CT} pada skema ozonasi-kavitasi hidrodinamika hal ini disebabkan sinyal elektrik berfrekuensi tinggi dari sonikator yang diubah menjadi getaran mekanis menghasilkan gelembung mikro, yang selanjutnya menjadi radikal OH, jauh lebih besar dari injektor mazzei, yang merupakan sumber terbentuknya kavitasi hidrodinamika. Injektor mazzei menghasilkan gelembung mikro secara mekanik dan hanya memanfaatkan terjadinya perubahan struktur geometri dari aliran karena adanya perbedaan tekanan masukan dan keluaran injector, sehingga radikal OH yang dihasilkan dari gelembung mikro tidak sebanyak yang dihasilkan sonikator.

Nilai R_{CT} pada skema ozonasi-kavitasi hidrodinamika-sonikasi lebih besar dari nilai R_{CT} pada skema ozonasi-kavitasi hidrodinamika maupun ozonasi-sonikasi, hal ini disebabkan meningkatnya efek *degassing* yaitu efek dimana saat gelembung pecah, kelarutan gas dalam air justru akan berkurang. Hal ini akan mempercepat dekomposisi ozon dimana tidak terbentuk gelembung baru pada sistem. Selain itu, penggunaan kavitasi hidrodinamika pada skema gabungan ini sebagai penghasil gelembung yang nantinya akan menjadi inti gelembung untuk kavitasi ultrasonik, sehingga gelembung mikro yang dihasilkan semakin banyak dan radikal OH pun meningkat.

Suhu sangat berpengaruh pada dekomposisi ozon. Peningkatan suhu akan mempercepat dekomposisi ozon. Gambar 4.14 merupakan perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada penelitian dengan variasi skema percobaan.



Gambar 4.14. Perbandingan selisih suhu vs waktu pada variasi skema penelitian

Dapat dilihat pada Gambar 4.14, maupun pada seluruh grafik selisih suhu untuk tiap penelitian dekomposisi ozon, semua mempunyai profil yang sama, yaitu suhu akan menurun lalu meningkat lagi. Hal ini dapat disebabkan, sesaat setelah penjumlahan, air pendingin segera diatur hingga dalam suhu setinggi-tingginya untuk memperlambat dekomposisi ozon. Setelah itu, suhu meningkat lagi karena suhu air pendingin meningkat lagi akibat panas dari pompa dan proses pecahnya gelembung yang dihasilkan dari proses kavitasi. Pada Gambar 4.14, suhu pada

skema yang menggunakan sonikator lebih tinggi dari yang tidak menggunakan sonikator. Hal ini disebabkan penggunaan sonikator menghasilkan radikal OH yang lebih banyak dari injector mazzei, selain itu, terjadi fenomena hot-spot yang merupakan fenomena hancurnya gelembung dengan sangat cepat hingga meningkatkan laju pemanasan. Fenomena hot-spot ini memberikan efek ke area *bulk* yang selanjutnya memberikan pengaruh tidak langsung ke peningkatan suhu cairan.

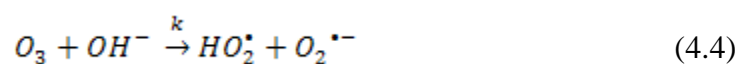
4.2.2 Perbandingan koefisien R_{CT} pada pH asam dan basa

Pada penelitian ini dilakukan perbandingan nilai koefisien R_{CT} pada pH yang berbeda, yaitu pH asam dan basa. Skema yang digunakan adalah ozonasi-kavitasi hidrodinamik-sonikasi. Berikut pada gambar 4.15 adalah skema perbandingan koefisien R_{CT} pada suasana asam dan basa.



Gambar 4.15 Perbandingan koefisien R_{CT} pada kondisi asam dan basa

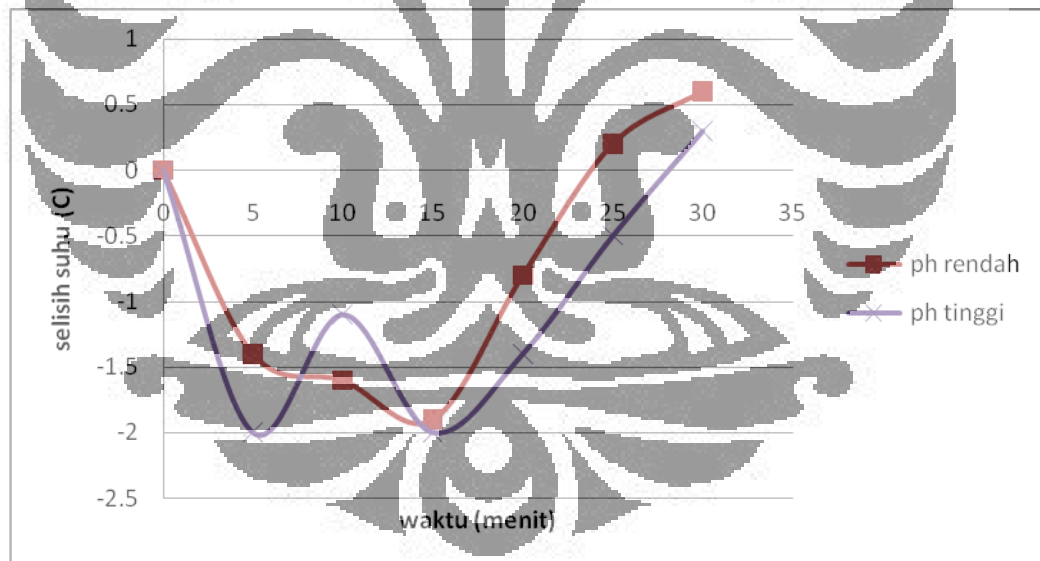
Pada Gambar 4.14 nilai R_{CT} pada skema ozonasi-kavitasi hidrodinamik-sonikasi pada pH tinggi lebih besar dari yang menggunakan pH rendah. Hal ini disebabkan, semakin besar konsentrasi OH^- , semakin besar pula dekomposisi yang terjadi. Ion OH^- merupakan pemicu terjadinya dekomposisi pada ozon yang ditunjukkan dalam reaksi berikut:



Konsentrasi ozon terlarut akan menurun seiring dengan naiknya pH, hal ini disebabkan nilai pH yang tinggi akan mempengaruhi dekomposisi ozon.

Radikal *scavengers* merupakan zat yang bereaksi dengan radikal OH dan memperlambat reaksi rantai. Hal tersebut diakibatkan produk hasil reaksi radikal *scavenger* dengan radikal OH tidak akan bereaksi lagi dengan ozon. Penambahan radikal *scavenger* dapat meningkatkan waktu paruh ozon. Reaksi yang terjadi pada penelitian ini merupakan reaksi radikal OH dengan *scavenger* CO_3^{2-} . Saat reaksi yang terjadi pada larutan ini merupakan reaksi tidak langsung, seperti pada larutan dengan pH tinggi, keberadaan radikal *scavenger* akan bereaksi dengan sangat cepat dengan radikal OH dan menurunkan kapasitas oksidasi, hal inilah penyebab dekomposisi ozon pada pH tinggi terjadi sangat cepat dan semakin besar kandungan radikal OH pada cairan.

Pada saat penelitian, didapatkan profil suhu seperti pada Gambar 4.16 yang menunjukkan perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada variasi pH.

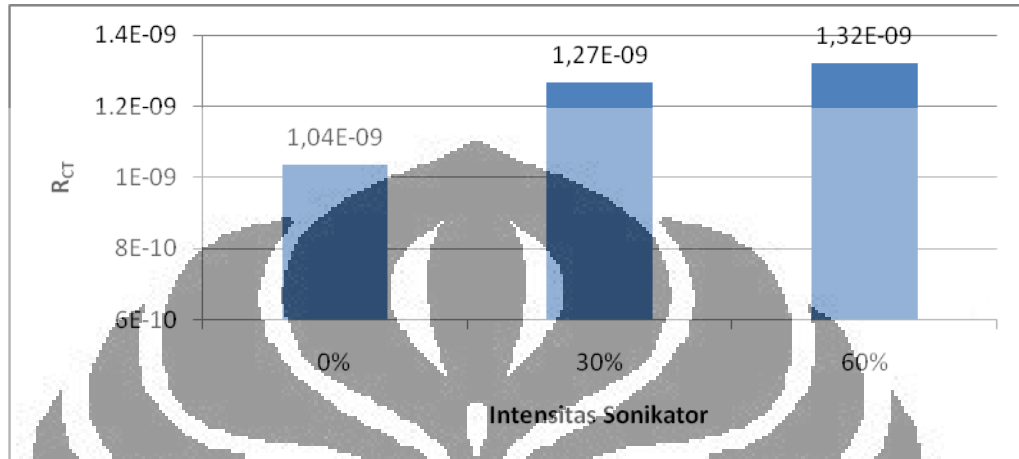


Gambar 4.16. Perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada variasi pH

Pada Gambar 4.16 dapat dilihat bahwa peningkatan suhu pada pH rendah dan tinggi cukup seragam dan perbedaannya tidak terlalu jauh. Sehingga dapat disimpulkan, pada penelitian dengan variasi pH ini, suhu tidak terlalu berpengaruh pada hasil yang didapat.

4.2.3. Perbandingan koefisien R_{CT} pada variasi intensitas sonikator

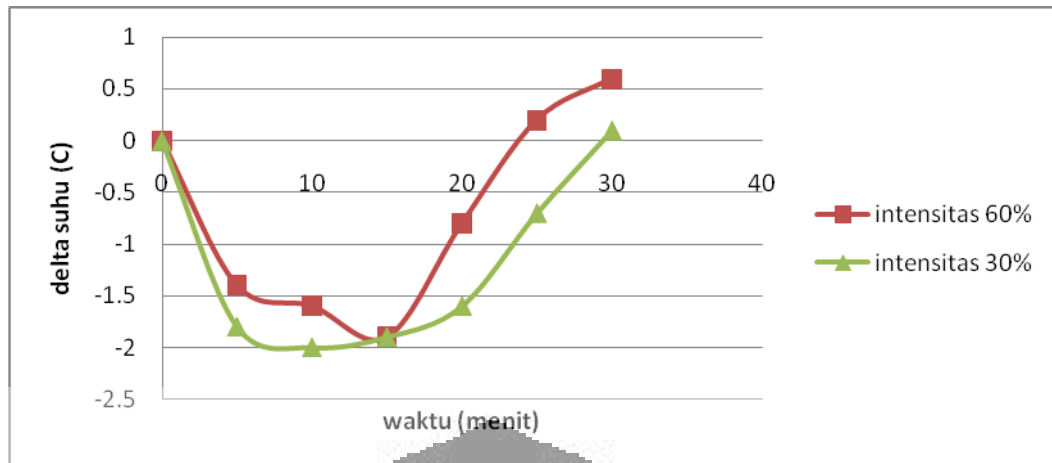
Pada penelitian ini, akan dilihat pengaruh besar intensitas sonikator terhadap nilai koefisien R_{CT} . Gambar 4.17 merupakan grafik kurva perbandingan koefisien R_{CT} pada intensitas sonikator 30% dan 60%.



Gambar 4.17 Perbandingan koefisien R_{CT} pada variasi intensitas sonikator

Pada Gambar 4.17, dapat dilihat bahwa nilai koefisien R_{CT} pada intensitas 60% lebih besar dari pada intensitas 30% maupun 0%. Hal ini disebabkan, semakin besar intensitas sonikator, semakin besar getaran yang ditransmisikan ke cairan, sehingga fluktuasi tekanan yang dihasilkan akan semakin intens. Hal tersebut akan mengakibatkan fenomena pembentukan hingga pecahnya gelembung makin sering terjadi, dan radikal OH yang dihasilkan juga semakin banyak. Intensitas sonikator akan menentukan energi yang disalurkan ke air dan meningkatkan radikal OH untuk bereaksi dengan CO_3^{2-} .

Peningkatan suhu yang terjadi pada sistem mempunyai perbedaan yang cukup signifikan seiring dengan meningkatnya intensitas sonikator, seperti dapat dilihat pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18. Perbandingan selisih suhu terhadap waktu pada variasi intensitas sonikator

Pada gambar 4.18, terlihat bahwa suhu meningkat lebih cepat pada penggunaan sonikator dengan intensitas 60%. Hal ini disebabkan, fenomena hot-spot yang dihasilkan sonikator akan semakin besar seiring dengan meningkatnya intensitas sonikator. Selain itu, semakin tinggi intensitas, semakin besar kerja sonikator dalam menyalurkan energy, semakin banyak gelembung yang dihasilkan, dan proses pecahnya gelembung semakin banyak. Hal ini menyebabkan peningkatan suhu yang lebih besar.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Harga $k_L a_{O_3}$ dan R_{CT} sangat dipengaruhi oleh penggunaan kavitasi.
2. Harga $k_L a_{O_3}$ pada proses ozonasi, kavitasi hidrodinamika, dan kavitasi ultrasonik, paling tinggi dan efektif pada laju alir air 3 LPM dan laju alir gas ozon 500 L/jam.
3. Harga $k_L a_{O_3}$ dan R_{CT} bertambah besar seiring dengan penambahan kavitasi pada skema percobaan.
4. Berikut adalah harga $k_L a_{O_3}$ pada tiap skema proses:

Tabel 5.1. Harga $k_L a_{O_3}$ pada tiap skema penelitian

Skema penelitian	$k_L a_{O_3}$ (menit ⁻¹)
Ozonasi	$4,3 \times 10^{-3}$
Ozonasi dan kavitasi hidrodinamika	$42,2 \times 10^{-3}$
Ozonasi dan kavitasi ultrasonik	47×10^{-3}
Ozonasi, kavitasi hidrodinamika, dan kavitasi ultrasonik	73×10^{-3}

5. Berikut adalah harga R_{CT} pada tiap skema proses:

Tabel 5.2. Harga R_{CT} pada tiap skema penelitian

Skema penelitian	R_{CT}
Ozonasi	$4,74 \times 10^{-10}$
Ozonasi dan kavitasi hidrodinamika	$5,86 \times 10^{-10}$
Ozonasi dan kavitasi ultrasonik	10×10^{-10}
Ozonasi, kavitasi hidrodinamika, dan kavitasi ultrasonik	$13,2 \times 10^{-10}$

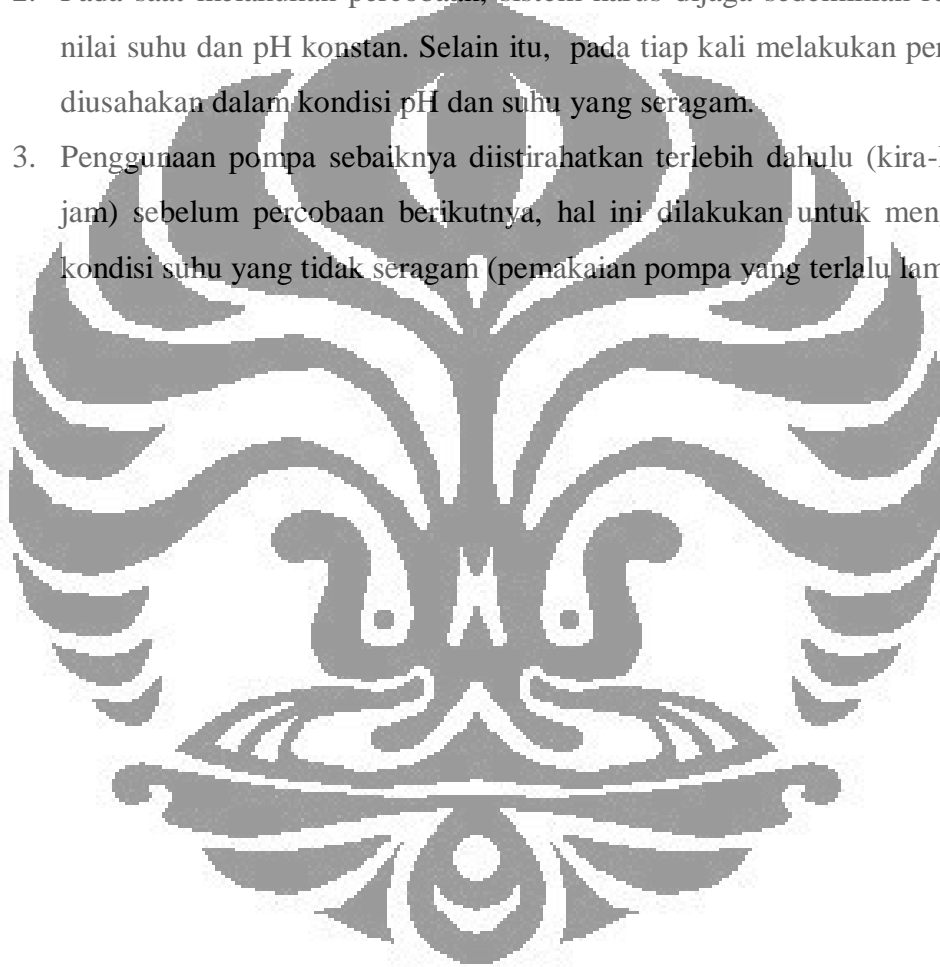
6. Kenaikan pH air mempercepat terjadinya dekomposisi ozon terlarut dalam air tersebut dan meningkatkan kehadiran radikal OH pada air.

7. Semakin tinggi intensitas sonikator, semakin efektif kerja sonikator.

5.2. Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Untuk analisa yang lebih akurat, sebaiknya pengambilan sampel dilakukan di bagian atas dan bawah reaktor, hingga bisa didapatkan nilai $k_L a_{O_3}$ dan R_{CT} rata-rata.
2. Pada saat melakukan percobaan, sistem harus dijaga sedemikian rupa agar nilai suhu dan pH konstan. Selain itu, pada tiap kali melakukan percobaan, diusahakan dalam kondisi pH dan suhu yang seragam.
3. Penggunaan pompa sebaiknya diistirahatkan terlebih dahulu (kira-kira dua jam) sebelum percobaan berikutnya, hal ini dilakukan untuk menghindari kondisi suhu yang tidak seragam (pemakaian pompa yang terlalu lama).



DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. (n.d.). Acoustic Cavitation.
<http://www.enstimac.fr>, diakses 9 Juni 2009
- Anonim. (n.d.). *EPA Guidance Manual : Alternative Disinfectants and Oxidants*.
www.epa.gov/ogwdw000/mdbp/alternative_disinfectants_guidance.pdf,
diakses 22 Juni 2009
- Anonim. (n.d.). Sonochemistry.
<http://www.wikipedia.org>, diakses 9 Juni 2009
- Anonim. (n.d.). Sumber dan Bahan Pencemar Air.
<http://www.chem-is-try.org>, diakses 9 April 2009.
- Anonim. (n.d.). Ultrasonics.
<http://www.wikipedia.org>, diakses 9 Juni 2009
- Anonim. (n.d.). Sonochemical Reaction and Synthesis.
<http://www.hielscher.com>, diakses 8 Maret 2009
- Anonim. (n.d.). Ozone Water Treatment.
<http://www.wilkes.edu>, diakses 7 February 2009.
- Beltran, Fernando J. (1955). *Ozone reactions kinetic for water and wastewater system*. New York: Lewis Publishers.
- Bollyky, Joseph L. (2002). *Benefits of Ozone Treatment for Bottled Water*. Stamford: Bollyky Associates, Inc.
- Brochier, Bernard. (n.d). *Better Understanding of Ozonation During Bleaching Processes*.
http://www.tappsa.co.za/archive3/Journal_papers/journal_papers.html,
diakses pada 14 April 2010.
- Chen, Hsiao-Ting et.al. (n.d). Modeling Ozone Mass Transfer in Reclaimed Wastewater.
http://www.researchgate.net/publication/24195811_Modeling_ozone_mass_transfer_in_reclaimed_wastewater, diakses 13 April 2009.
- Dionissios Mantzavinos. *Advanced oxidation processes for treatment of industrial effluents: Fundamental & Case Studies*.
www.remtavares.es/ResumenesWorkshop.pdf, diakses 1 Mei 2009

- Gottschalk, C., et al (2000). *Ozonation of Water and Wastewater System*. Winhem: Wiley-VCH
- Ince, N.H, et.al. (2001). Ultrasound as a catalyzer of aqueous reaction systems: the state of the art and environmental applications. *Applied Catalysis B: Environmental*, 29, 167–176.
- Jyoti, K.K., & Pandit, A.B. (2003). Hybrid cavitation methods for water disinfection: simultaneous use of chemicals with cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 10, 255–264.
- Jyoti, K.K., & A.B Pandit. (2004). Ozone and cavitation for water disinfection. *Biochemical Engineering Journal*, 18, 9-19.
- Kommineni, Sunil, et al. *Advanced Oxidation Processes*. www.nwri-usa.org/pdfs/TTChapter3AOPs.pdf, diakses 15 Mei 2009
- Mason, Timothy et al (2001). *Advances in Sonochemistry*. USA: Jan Press Inc
- Min-Tian Gao, et.al. (2005). Ozone mass transfer in a new gas–liquid contactor–Karman contactor. *Separation and Purification Technology*, 42, 145–149.
- Nebel, C. (1981). *Encyclopedia of Chemical Technology*. New York: John Wiley & Sons
- Li-Bing Chu, et.al. (2007). Enhanced ozonation of simulated dyestuff wastewater by microbubbles. *Chemosphere*, 68, 1854-1860.
- Pera-Titus, Marc, et.al. (2004). A Degradation of chlorophenols by means of advanced oxidation processes: a general review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 47, 219–256.
- Sotelo, J.L. et.al. (1989). Henry's Law Constant for the Ozone-Water System. *Water Research*, 23, 1239-1246.
- Von Gunten, Urs. (2003). Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. *Water Research*, 37, 1443–1467.
- Von Gunten, Elovitz. (1998). Hydroxyl Radical/Ozone Ratios During Ozonation Processes. I. The R_{CT} Concept. *Ozone Science & Engineering*, 21, 239-260.
- Won Tae Shin, et.al. (1999). Ozonation using microbubbles formed by electric fields. *Separation Purification Technology*, 15, 271–282.

Pengolahan Data untuk Penentuan $k_L a_{O_3}$

Berikut akan disajikan penjelasan singkat mengenai pengolahan data yang dilakukan untuk memperoleh $k_L a_{O_3}$. Langkah-langkah yang dilakukan sebagai berikut:

1. Mencatat nilai DO₃ tiap selang waktu tertentu
2. Mencatat suhu sample tiap selang waktu tertentu
3. Mencatat volum titrasi KI oleh Na₂S₂O₃ pada gas keluaran tiap selang waktu tertentu

Berikut adalah tahapan pengolahan data untuk mendapat nilai $k_L a_{O_3}$. Lampiran ini hanya menyajikan tabel pengolahan data dan grafik yang diperoleh dari tahapan-tahapan pengolahan data tersebut.

Contoh perhitungan $k_L a_{O_3}$

Apabila diketahui, data sebagai berikut:

Tabel A.1 Contoh data penelitian

t (menit)	T (celcius)	DO3 (ppm)	KI (ml Na ₂ S ₂ O ₃)
5	31.7	2.55	7.5
10	33.5	2.75	9.5
15	35.6	2.6	8.7
20	36.5	3	8.5
25	37.1	3.22	8
30	37.5	3.2	8

Data DO₃ merupakan data CO₃. Data suhu digunakan untuk mencari bilangan Henry dengan rumus

Dan data volum Na₂S₂O₃ digunakan untuk mencari nilai C_{O_3} keluaran dengan rumus:

$$C_{O_3} \text{ keluaran (mg/L)} = \left\{ \left(\frac{\text{volum titrasi} \times 0,025}{1000} \right) \times 0,5 \times 48 \right\} \times 1000 \times \frac{0,8}{2}$$

Selanjutnya, data C_{O_3} keluaran diolah menjadi data $C_{O_3}^*$ dengan rumus:

$$C_L^* = \frac{H}{P(O_3)}$$

dengan

$$P(O_3) = \frac{C_{O_3} \text{ outlet} \times R \times T}{MW}$$

Selanjutnya digunakan persamaan berikut untuk mencari $k_L a_{O_3}$:

$$\ln\left(\frac{C_{O_3}^*}{C_{O_3}^* - C_{O_3}}\right) = k_L a \cdot t$$

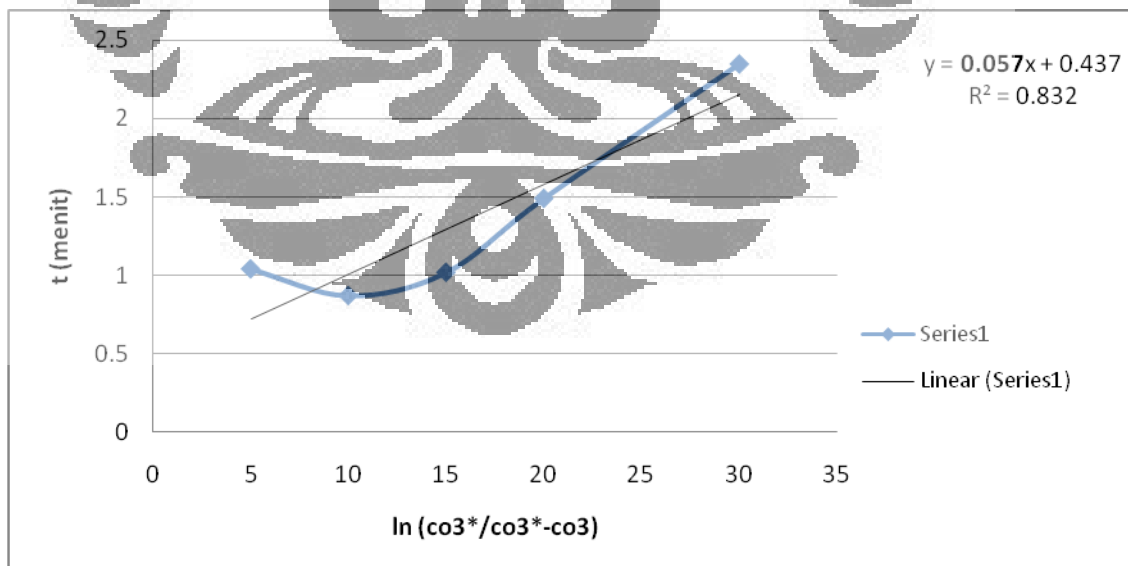
Berikut adalah hasil perhitungan:

Tabel A.2 Contoh data hasil perhitungan

t (menit)	C_{O_3}	CO3 outlet (mg/L)	He	P(O3) (kPa)	CO3* (mg/L)	(co3*/co3*-co3)	ln (co3*/co3*-co3)
5	2.55	18	4.5614	949.367120	3.9461	2.8264	1.0390
10	2.75	22.8	4.8139	1209.63558	4.7362	2.3845	0.8689
15	2.6	20.88	5.1262	1115.36148	4.0731	2.7649	1.01701
20	3	20.4	5.2662	1092.89904	3.8737	4.4335	1.4891
25	3.22	19.2	5.3616	1030.604946	3.5809	9.9202	2.2945
30	3.2	19.2	5.4262	1031.93433	3.5383	10.4575	2.3473

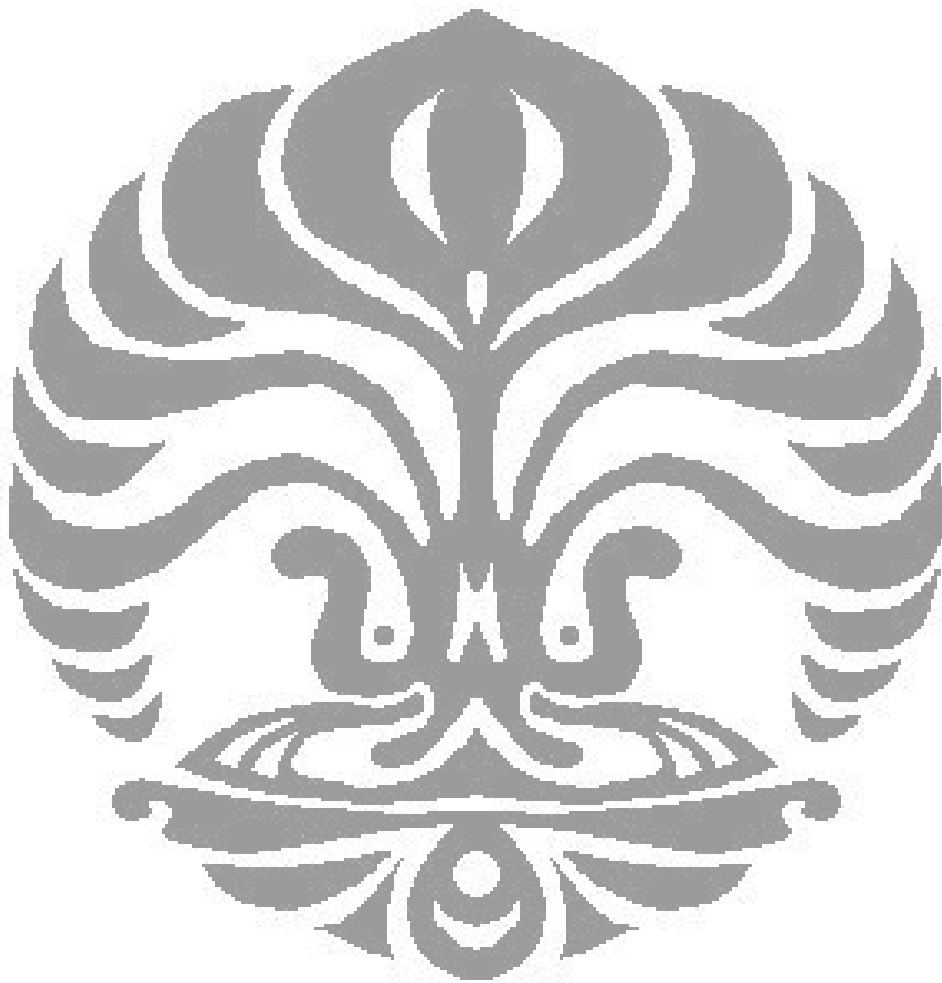
Selanjutnya nilai $k_L a_{O_3}$ dapat dicari, dan dapat di plot nilai $\ln\left(\frac{C_{O_3}^*}{C_{O_3}^* - C_{O_3}}\right)$

berbanding t. Berikut adalah grafik yang didapat:



Gambar A.1 Contoh grafik penentuan $k_L a$

Harga $k_L a_{O_2}$ yang didapat adalah $0,057 \text{ menit}^{-1}$.



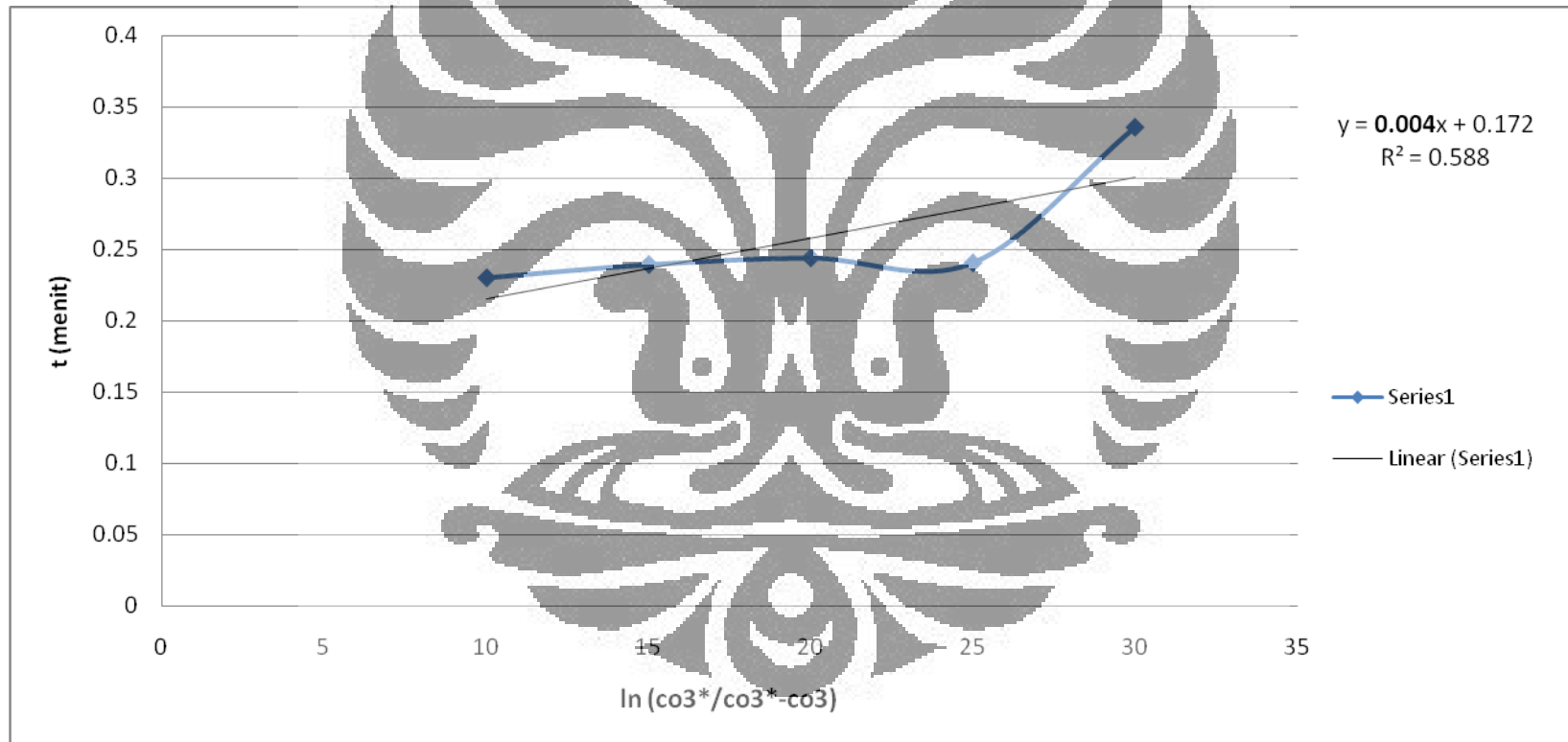
A.1. Variasi skema penelitian

A.1.1. Proses ozonasi ($Q_L = 3$ LPM, $Q_G = 400$ L/jam)

Tabel A.3 Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa $k_L a_{O_3}$ pada proses ozonasi

t (menit)	T (celcius)	DO3 (ppm)	KI (ml Na ₂ S ₂ O ₃)	CO ₃ outlet (mg/L)	He	P(O ₃) (kPa)	CO ₃ * (mg/L)	(co ₃ */co ₃ *-co ₃)	ln (co ₃ */co ₃ *-co ₃)
5	30	3.2	10	24	4.335108784	1258.760475	5.536193253	2.369749697	0.862784336
10	30.1	0.85	7.5	18	4.348104769	944.3819306	4.139734656	1.258379501	0.229824783
15	30.5	0.87	7.5	18	4.400479478	945.6282281	4.090463343	1.270147462	0.239133006
20	31	0.93	8	19.2	4.466835922	1010.33184	4.298344586	1.276100018	0.243808566
25	31.5	1.04	9.2	22.08	4.534192978	1163.792606	4.869664813	1.271564236	0.240247825
30	32	1.1	7.4	17.76	4.602565736	937.6311525	3.858717294	1.398736037	0.335568998

Dari data tersebut, diplot grafik $\ln\left(\frac{C_{O_2}^*}{C_{O_2}^* - C_{O_2}}\right)$ berbanding t, hingga didapat grafik seperti pada gambar A.2 dan diperoleh nilai $k_L a_{O_2}$ dari gradien grafik.



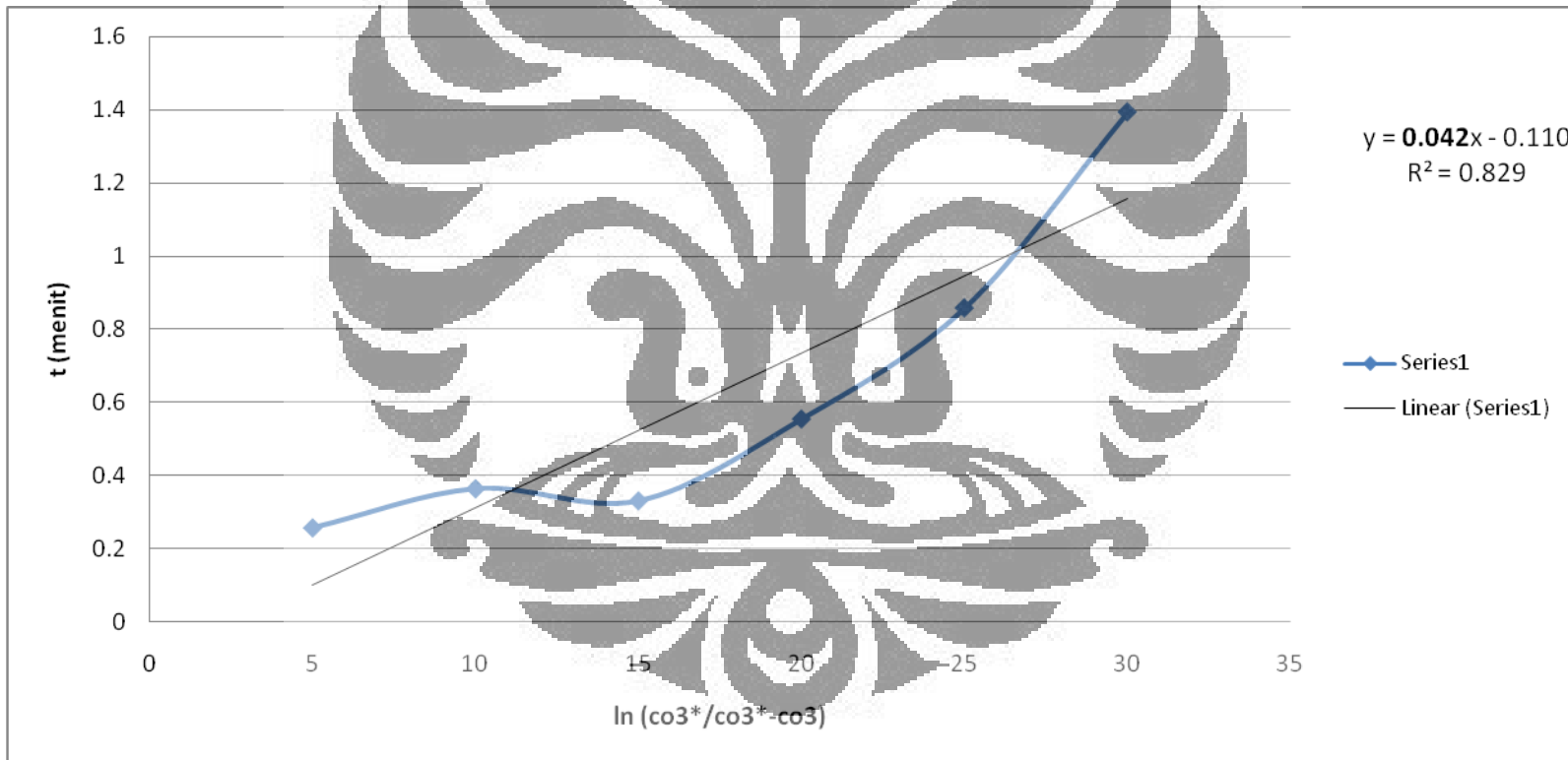
Gambar A.2. Grafik penentuan nilai $k_L a_{O_3}$ pada proses ozonasi

A.1.2. Proses ozonasi dan kavitasi hidrodinamika ($Q_L = 3$ LPM, $Q_G = 400$ L/jam)

Tabel A.4 Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa $k_L a_{O_3}$ pada proses ozonasi dan kavitasi hidrodinamika

t (menit)	T (celcius)	DO3 (ppm)	KI (ml Na2S2O3)	CO3 outlet (mg/L)	He	P(O3) (kPa)	CO3* (mg/L)	(co3*/co3*-co3)	ln (co3*/co3*-co3)
5	33.2	1.17	10.2	24.48	4.770896554	1297.495401	5.131111044	1.295371674	0.258797661
10	35.8	1.24	8.7	20.88	5.157034063	1116.084337	4.048838876	1.441463557	0.365658956
15	37.4	1.23	9.8	23.52	5.410034069	1263.71243	4.347477244	1.394549793	0.332571634
20	38	1.45	7.8	18.72	5.508076964	1007.756159	3.398645321	1.74410668	0.556242493
25	38.9	1.81	7.4	17.76	5.658482799	958.843136	3.138650524	2.362284489	0.859629155
30	40.8	2.2	7.3	17.52	5.989630064	951.6478451	2.92505544	4.034250734	1.394820593

Dari data tersebut, diplot grafik $\ln\left(\frac{c_{O_3}^*}{c_{O_3}^* - c_{O_3}}\right)$ berbanding t, hingga didapat grafik seperti pada gambar A.3 dan diperoleh nilai $k_L a_{O_3}$ dari gradien grafik.



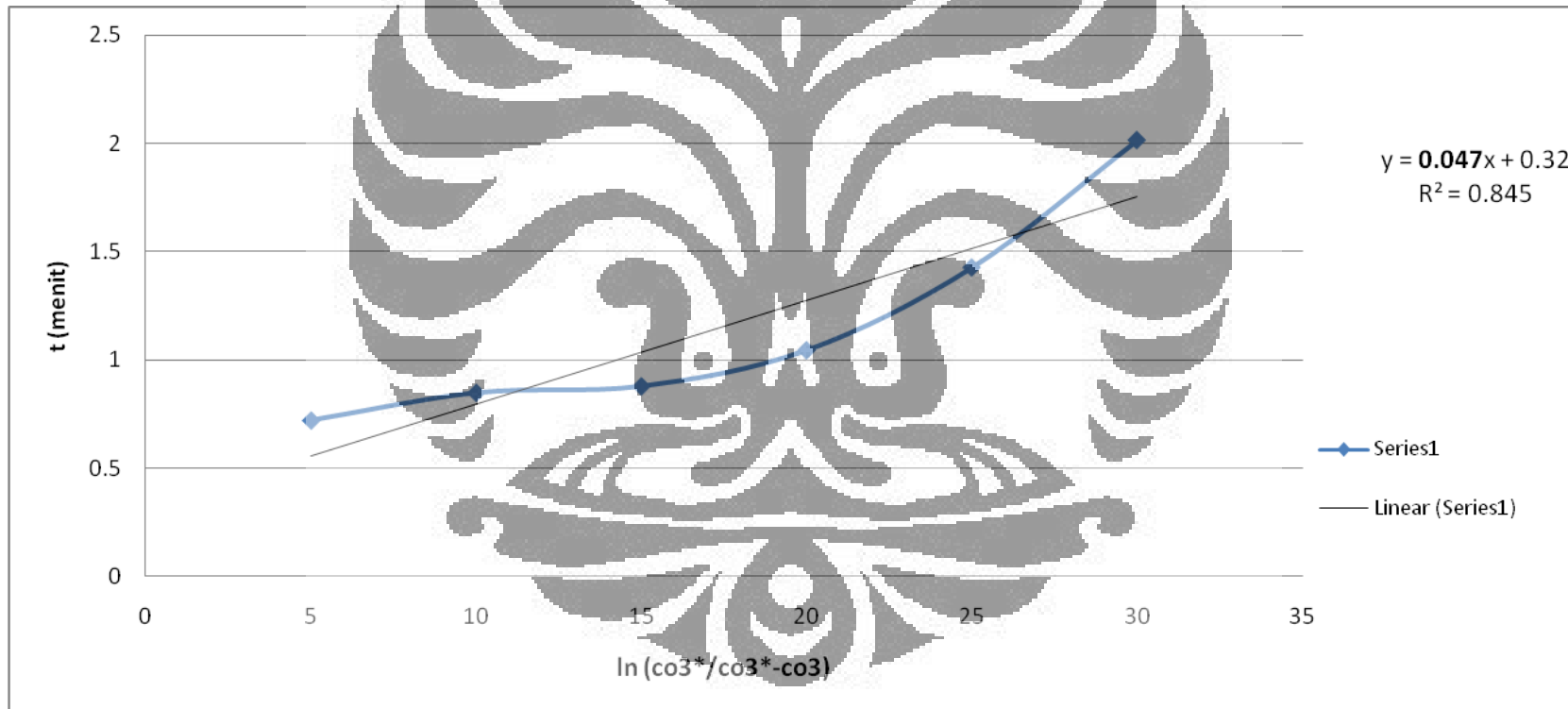
Gambar A.3. Grafik penentuan nilai $k_L a_{O_3}$ pada proses ozonasi dan kavitasi hidrodinamika

A.1.3. Proses ozonasi dan kavitasi ultrasonik ($Q_L = 3$ LPM, $Q_G = 400$ L/jam)

Tabel A.5 Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa $k_L a_{O_3}$ pada proses ozonasi dan kavitasi ultrasonik

t (menit)	T (celcius)	DO3 (ppm)	KI (ml Na2S2O3)	CO3 outlet (mg/L)	He	P(O3) (kPa)	CO3* (mg/L)	(co3*/co3*-co3)	ln (co3*/co3*-co3)
5	32	2.44	9.1	21.84	4.602565736	1153.032904	4.745179375	2.058485959	0.721970741
10	33	2.52	8.7	20.88	4.742419853	1105.964402	4.402815577	2.338421049	0.849475936
15	34	2.5	8.7	20.88	4.886523593	1109.578664	4.272976401	2.410058249	0.879650917
20	35.1	2.62	8.5	20.4	5.050100257	1087.955403	4.039523764	2.845689425	1.045805367
25	36.1	2.98	8.5	20.4	5.203553211	1091.486579	3.920398076	4.168870795	1.427645207
30	37.1	3.22	8.3	19.92	5.361669006	1069.252631	3.715261046	7.501621771	2.015119233

Dari data tersebut, diplot grafik $\ln\left(\frac{C_{O_3}^*}{C_{O_3}^* - C_{O_3}}\right)$ berbanding t, hingga didapat grafik seperti pada gambar A.4 dan diperoleh nilai $k_L a_{O_3}$ dari gradien grafik.



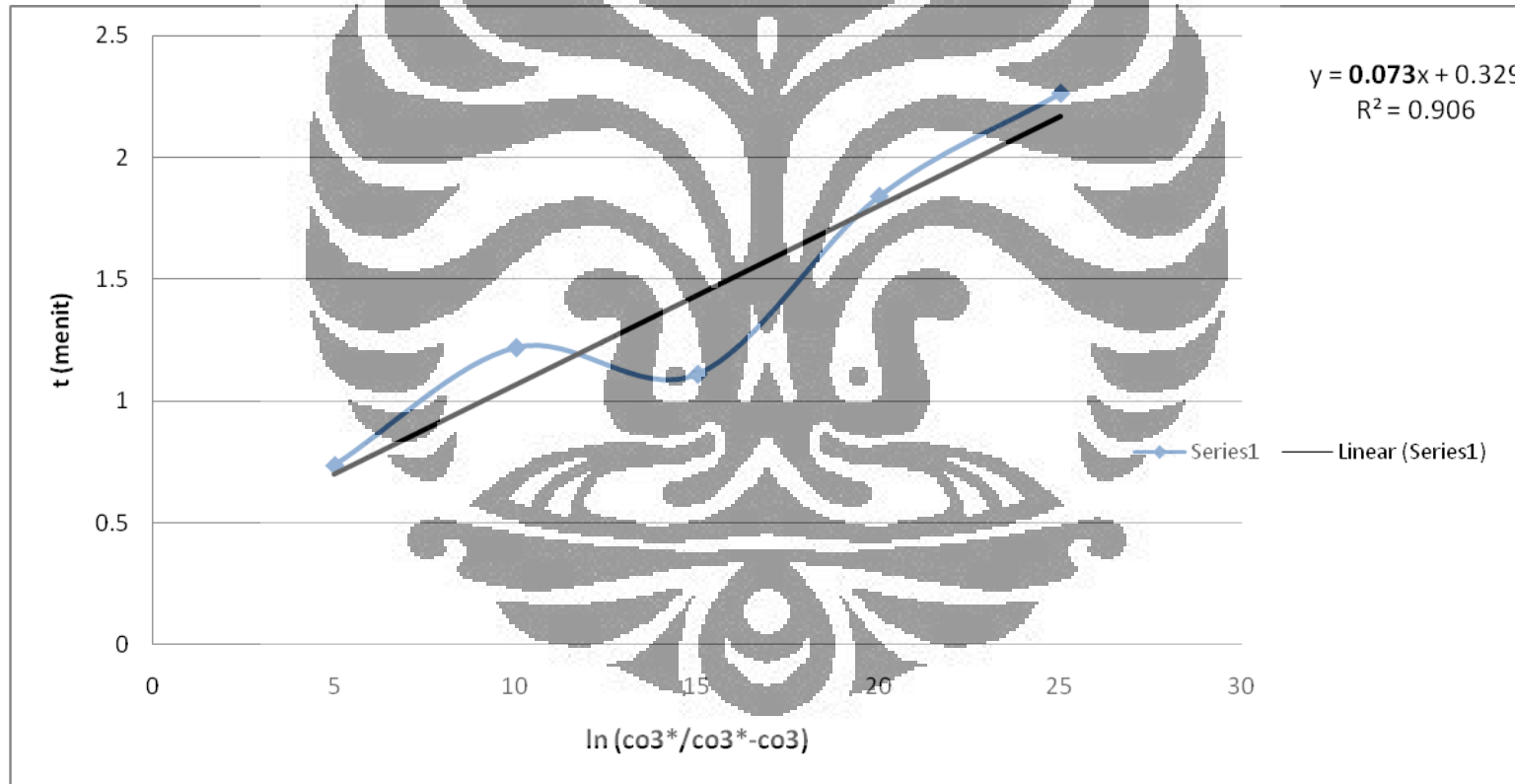
Gambar A.4. Grafik penentuan nilai $k_L a_{O_3}$ pada proses ozonasi dan kavitasi hidrodinamika

A.1.3. Proses ozonasi, kavitasi hidrodinamik dan kavitasi ultrasonik ($Q_L = 3$ LPM, $Q_G = 400$ L/jam)

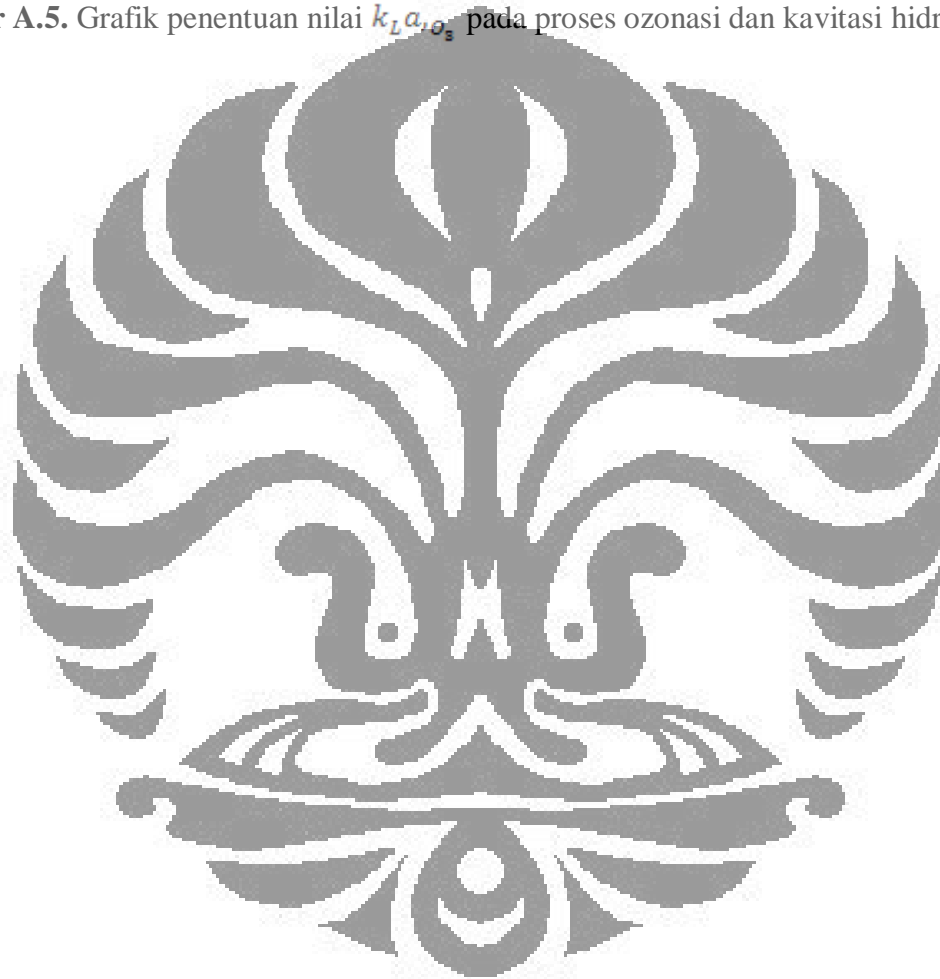
Tabel A.6 Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa $k_L a_{O_3}$ pada proses ozonasi, kavitasi hidrodinamik dan kavitasi ultrasonik

t (menit)	T (celcius)	DO3 (ppm)	KI (ml Na2S2O3)	CO3 outlet (mg/L)	He	P(O3) (kPa)	CO3* (mg/L)	(co3*/co3*-co3)	ln (co3*/co3*-co3)
5	31.9	2.72	10	24	4.588809196	1266.653693	5.230115042	2.083615673	0.734104689
10	35.2	2.67	8	19.2	5.065239676	1024.290372	3.790541264	3.382777044	1.218696983
15	36.3	3.38	11	26.4	5.23479887	1413.425995	5.043173703	3.032259165	1.109307941
20	37.3	3.93	10.5	25.2	5.393864099	1353.5414	4.671975329	6.296672066	1.84002125
25	37.9	3.72	9.5	22.8	5.491613956	1227.00066	4.151784919	9.615400489	2.263366031
30	38.7	4.03	12	28.8	5.62470824	1553.883723	5.12026558	4.696347085	1.546784991

Dari data tersebut, diplot grafik $\ln\left(\frac{c_{O_3^*}}{c_{O_3^*}-c_{O_3}}\right)$ berbanding t, hingga didapat grafik seperti pada gambar A.5 dan diperoleh nilai $k_L a_{O_3}$ dari gradien grafik.



Gambar A.5. Grafik penentuan nilai $k_L a_{O_3}$ pada proses ozonasi dan kavitasi hidrodinamika



Pengolahan Data untuk Penentuan R_{CT}

Berikut akan disajikan penjelasan singkat mengenai pengolahan data yang dilakukan untuk memperoleh R_{CT} . Langkah-langkah yang dilakukan sebagai berikut:

1. Mencatat nilai DO_3 tiap selang waktu tertentu
2. Mencatat suhu sample tiap selang waktu tertentu
3. Mencatat volum titrasi $CaCO_3$ oleh H_2SO_4 pada sample tiap selang waktu tertentu

Berikut adalah tahapan pengolahan data untuk mendapat nilai R_{CT} . Lampiran ini hanya menyajikan tabel pengolahan data dan grafik yang diperoleh dari tahapan-tahapan pengolahan data tersebut.

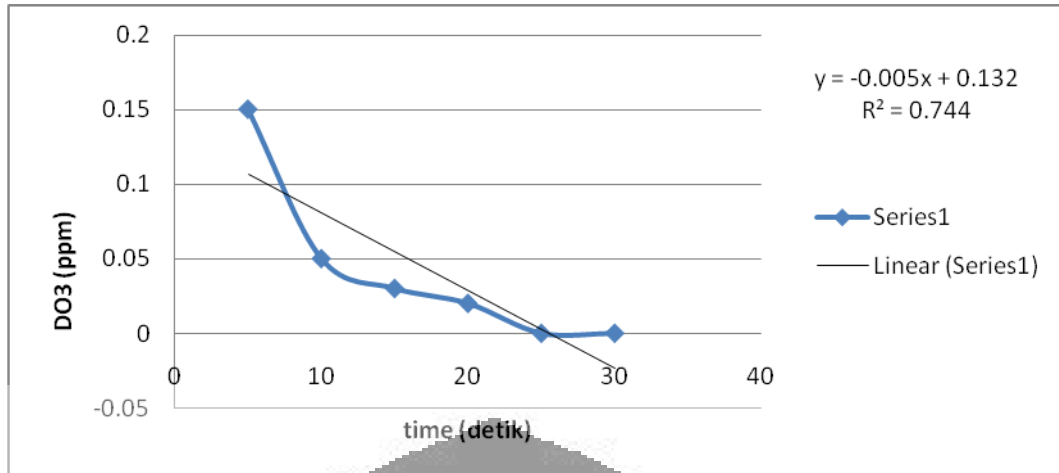
Contoh perhitungan R_{CT} untuk proses ozonasi dan kavitasi hidrodinamika

Apabila diketahui, data sebagai berikut:

Tabel B.1 Data penelitian untuk proses ozonasi dan avitasi hidrodinamika

t (menit)	T (celcius)	DO_3 (ppm)	$CaCO_3$ (ppm)
5	31.7	3.22	100
10	33.5	0.15	90
15	35.6	0.05	90
20	36.5	0.03	90
25	37.1	0.02	80
30	37.5	0	70

Data DO_3 terhadap waktu diplot untuk mendapatkan persamaa garis, seperti pada gambar B.1.



Gambar B.1. Grafik DO3 terhadap waktu untuk proses ozonasi dan avitasi hidrodinamika

Persamaan garis tersebut digunakan untuk menghitung integral ozon tiap selang waktu. Penyisihan CaCO_3 tiap waktu juga dihitung, dan digunakan untuk persamaan:

$$\ln\left(\frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{CO}_3^{2-}]_0}\right) = -k_{\text{OH}/\text{CO}_3^{2-}} R_{\text{CT}} \int [\text{O}_3] dt \quad (2.36)$$

Tabel B.2 Contoh data hasil perhitungan

t (menit)	CaCO3(t)/(CaCO3(0))	ln (CaCO3(t)/(CaCO3(0)))	$\int [\text{O}_3] dt$
5	1	0	0
10	0.9	-0.105360516	0.5975
15	0.9	-0.105360516	1.07
20	0.9	-0.105360516	1.4175
25	0.8	-0.223143551	1.64
30	0.7	-0.356674944	1.7375

Selanjutnya nilai R_{CT} dapat dicari, dan dapat di plot nilai $\ln\left(\frac{[\text{CO}_3^{2-}]}{[\text{CO}_3^{2-}]_0}\right)$ berbanding $\int [\text{O}_3] dt$ dan didapat persamaan garis. Dengan memasukkan nilai ($k_{\text{OH}/\text{CO}_3^{2-}} = 4.2 \times 10^8 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$), didapat harga $R_{\text{CT}} 5.85714 \times 10^{-10} \text{ menit}^{-1}$.

B.1. Proses ozonasi

Tabel B.3 Data penelitian dan hasil perhitungan untuk proses ozonasi

t (menit)	DO3 (ppm)	CaCO3 (ppm)	CaCO3(t)/ (CaCO3(0))	ln (CaCO3(t)/(CaCO3(0)))	∫(O3)dt
5	3.25	100	1	0	0
10	0.12	90	0.9	-0.105360516	0.49
15	0.05	80	0.9	-0.105360516	0.88
20	0.02	90	0.9	-0.105360516	1.17
25	0	90	0.8	-0.223143551	1.36
30	0	80	0.7	-0.356674944	1.45

Selanjutnya nilai R_{CT} dapat dicari, dan dapat di plot nilai $\ln \left(\frac{[CO_3^{2-}]}{[CO_3^{2-}]_0} \right)$ berbanding $\int [O_3] dt$ dan didapat persamaan garis. Dengan memasukkan nilai $(k_{OH/CO_3^{2-}} = 4.2 \times 10^8 M^{-1}s^{-1})$, didapat harga R_{CT} $4,74 \times 10^{-10}$ menit⁻¹

B.2. Proses ozonasi dan sonikasi

Tabel B.4 Data penelitian dan hasil perhitungan untuk proses ozonasi dan sonikasi

t (menit)	DO3 (ppm)	CaCO3 (ppm)	CaCO3(t)/ (CaCO3(0))	ln (CaCO3(t)/(CaCO3(0)))	∫(O3)dt
5	3.1	100	1	0	0
10	0.1	110	1.1	0.09531018	0.3625
15	0.03	100	1	0	0.65
20	0	90	0.9	-0.105360516	0.8625
25	0	80	0.8	-0.223143551	1
30	0	70	0.7	-0.356674944	1.0625

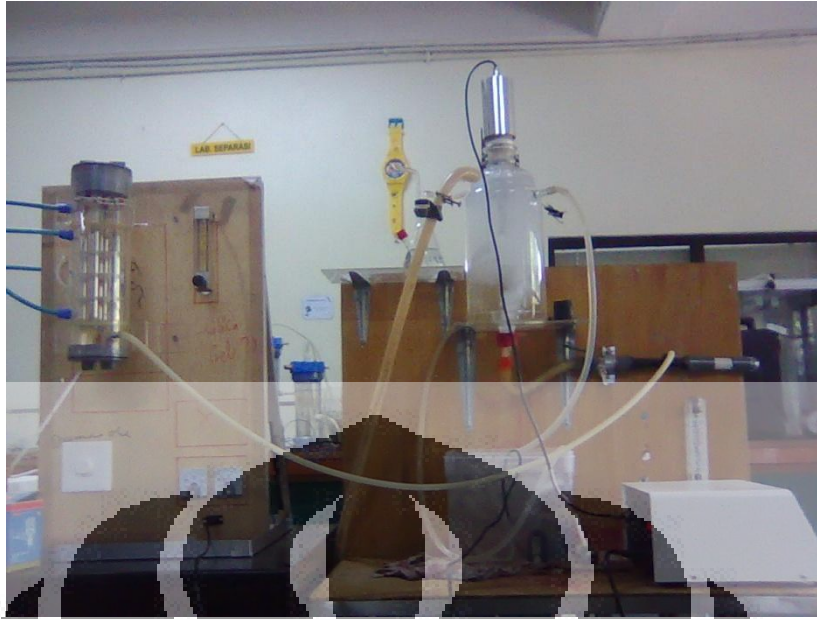
Selanjutnya nilai R_{CT} dapat dicari, dan dapat di plot nilai $\ln \left(\frac{[CO_3^{2-}]}{[CO_3^{2-}]_0} \right)$ berbanding $\int [O_3] dt$ dan didapat persamaan garis. Dengan memasukkan nilai $(k_{OH/CO_3^{2-}} = 4.2 \times 10^8 M^{-1}s^{-1})$, didapat harga didapat harga $R_{CT} 1 \times 10^{-9}$ menit⁻¹.

B.3. Proses ozonasi, kavitasi hidrodinamika, dan sonikasi

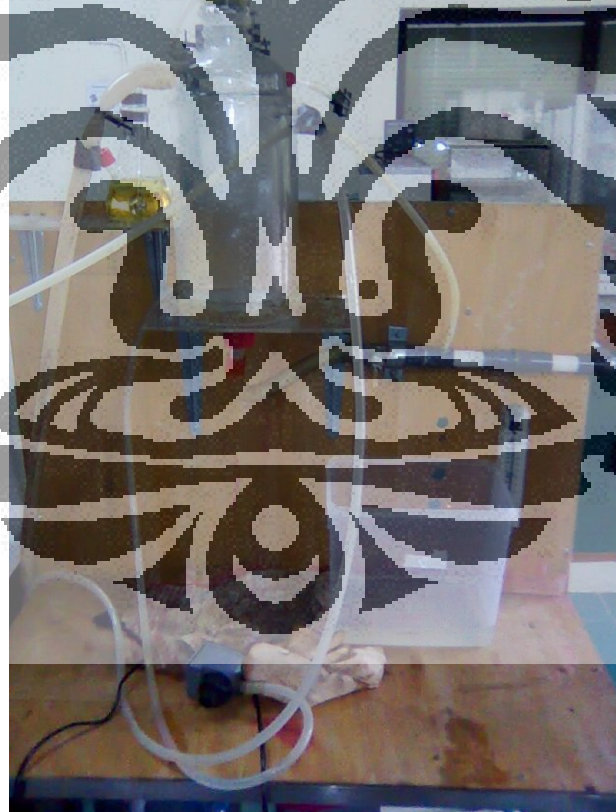
Tabel B.5 Data penelitian dan hasil perhitungan untuk proses ozonasi dan sonikasi

t (menit)	DO3 (ppm)	CaCO3 (ppm)	CaCO3(t)/ (CaCO3(0))	ln (CaCO3(t)/(CaCO3(0)))	∫(O3)dt
5	3.05	110	1	0	0
10	0.1	90	0.818181818	-0.200670695	0.51
15	0.08	70	0.636363636	-0.451985124	0.92
20	0.03	80	0.727272727	-0.318453731	1.23
25	0	60	0.545454545	-0.606135804	1.44
30	0	50	0.454545455	-0.78845736	1.55

Selanjutnya nilai R_{CT} dapat dicari, dan dapat di plot nilai $\ln \left(\frac{[CO_3^{2-}]}{[CO_3^{2-}]_0} \right)$ berbanding $\int [O_3] dt$ dan didapat persamaan garis. Dengan memasukkan nilai $(k_{OH/CO_3^{2-}} = 4.2 \times 10^8 M^{-1}s^{-1})$, didapat harga didapat harga $R_{CT} 1,33 \times 10^{-9}$ menit⁻¹.



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



Gambar C.2. Skema Penelitian Ozonasi



Gambar C.3. US Processor dan Reaktor Kaca



Gambar F.3. Reservoir dan Trafo Pembangkit Ozon

Pengolahan Data untuk Penentuan $k_L a_{O_3}$

Berikut akan disajikan penjelasan singkat mengenai pengolahan data yang dilakukan untuk memperoleh $k_L a_{O_2}$. Langkah-langkah yang dilakukan sebagai berikut:

4. Mencatat nilai DO₃ tiap selang waktu tertentu
5. Mencatat suhu sample tiap selang waktu tertentu
6. Mencatat volum titrasi KI oleh Na₂S₂O₃ pada gas masukan yang dilakukan saat uji produktivitas

Berikut adalah tahapan pengolahan data untuk mendapat nilai $k_L a_{O_2}$. Lampiran ini hanya menyajikan tabel pengolahan data dan grafik yang diperoleh dari tahapan-tahapan pengolahan data tersebut.

Contoh perhitungan $k_L a_{O_2}$

Apabila diketahui, data sebagai berikut:

Tabel D.1 Contoh data penelitian

t (menit)	T (celcius)	DO ₃ (ppm)	Produktivitas pada laju alir 300 L/jam
5	31.7	2.55	27,36 mg/L
10	33.5	2.75	
15	35.6	2.6	
20	36.5	3	
25	37.1	3.22	
30	37.5	3.2	

Data DO₃ merupakan data CO₃. Data suhu digunakan untuk mencari bilangan Henry dengan rumus.

Selanjutnya, data produktivitas keluaran diolah menjadi data $C_{O_2}^*$ dengan rumus:

$$C_L^* = \frac{H}{P(O_2)}$$

dengan

$$P(O_2) = \frac{C_{O_2} \text{ produktivitas} \times R \times T}{MW}$$

Selanjutnya digunakan persamaan berikut untuk mencari $k_L a_{O_2}$:

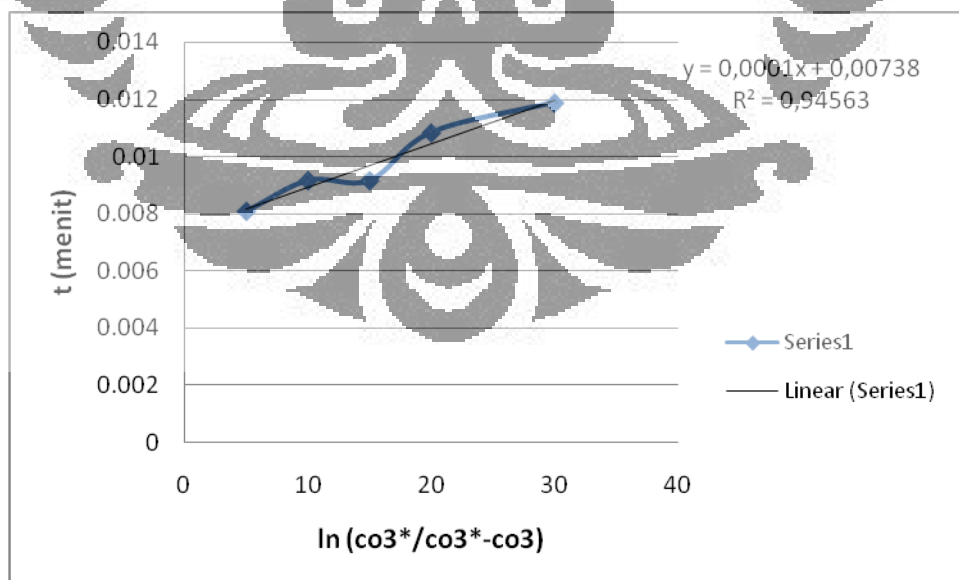
$$\ln\left(\frac{C_{O_3}^*}{C_{O_3}^* - C_{O_3}}\right) = k_L a \cdot t$$

Berikut adalah hasil perhitungan:

Tabel D.2 Contoh data hasil perhitungan

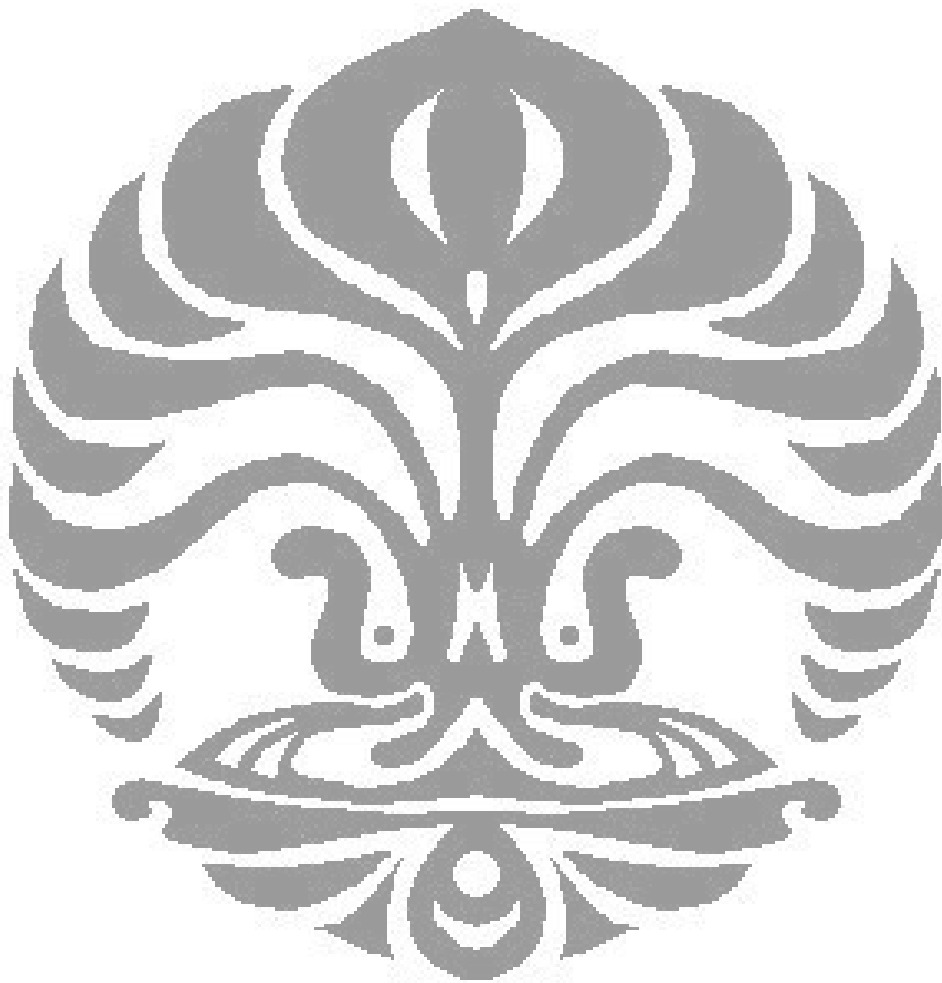
t (menit)	C_{O_3}	CO3 produktivitas	He	P(O3) (kPa)	CO3* (mg/L)	(co3*/co3*-co3)	ln (co3*/co3*-co3)
5	2.55	27,36	4.5614	1443,038023	373,7085497	1,006870379	0,006846886
10	2.75		4.8139	1451,562698	356,197657	1,007780501	0,007750389
15	2.6		5.1262	1461,508152	336,7879165	1,007780054	0,007749945
20	3		5.2662	1465,77049	328,7919931	1,009208329	0,009166191
25	3.22		5.3616	1468,612048	323,5656019	1,010051644	0,010001462
30	3.2		5.4262	1470,50642	320,126911	1,010096965	0,010046331

Selanjutnya nilai $k_L a_{O_3}$ dapat dicari, dan dapat di plot nilai $\ln\left(\frac{C_{O_3}^*}{C_{O_3}^* - C_{O_3}}\right)$ berbanding t. Berikut adalah grafik yang didapat:



Gambar A.1 Contoh grafik penentuan $k_L a$

Harga $k_L a_{O_2}$ yang didapat adalah $0,0001 \text{ menit}^{-1}$.



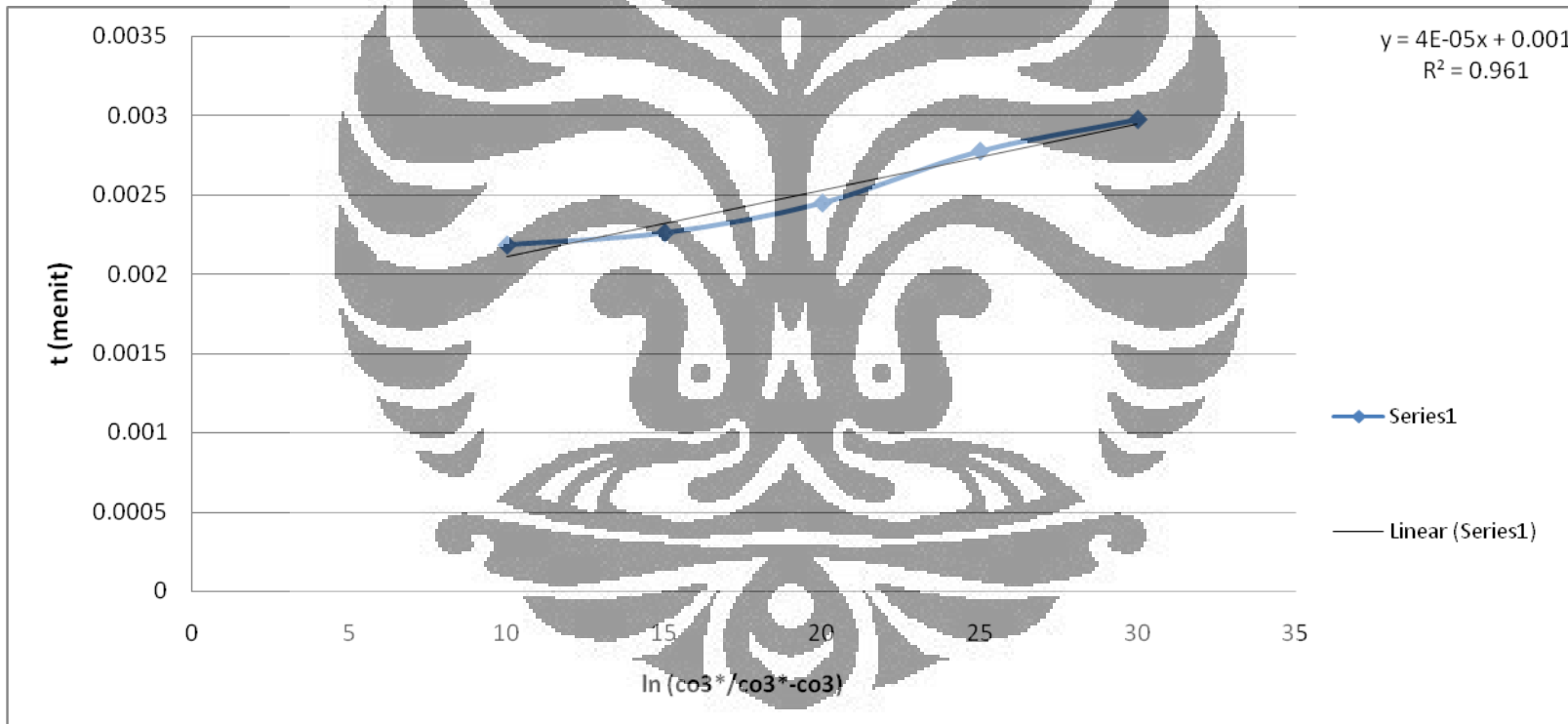
D.1. Variasi skema penelitian

D.1.1. Proses ozonasi ($Q_L = 3$ LPM, $Q_G = 400$ L/jam)

Tabel D.3 Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa $k_L a_{O_3}$ pada proses ozonasi

t (menit)	T (celcius)	DO3 (ppm)	CO3 Produktivitas	He	P(O3) (kPa)	CO3* (mg/L)	(co3*/co3*-co3)	ln (co3*/co3*-co3)
5	30	3.2	32,32 mg/L	4.335108784	1695,130773	391,0238145	1,008251169	0,008217315
10	30.1	0.85		4.348104769	1695,690222	389,9837544	1,002184339	0,002181957
15	30.5	0.87		4.400479478	1697,928019	385,8506844	1,002259854	0,002257304
20	31	0.93		4.466835922	1700,725264	380,7449599	1,002448561	0,002445568
25	31.5	1.04		4.534192978	1703,52251	375,70578	1,002775807	0,002771962
30	32	1.1		4.602565736	1706,319755	370,7322943	1,00297593	0,002971511

Dari data tersebut, diplot grafik $\ln\left(\frac{C_{O_3}^*}{C_{O_3}^* - C_{O_3}}\right)$ berbanding t, hingga didapat grafik seperti pada gambar D.2 dan diperoleh nilai $k_L a_{O_3}$ dari gradien grafik.



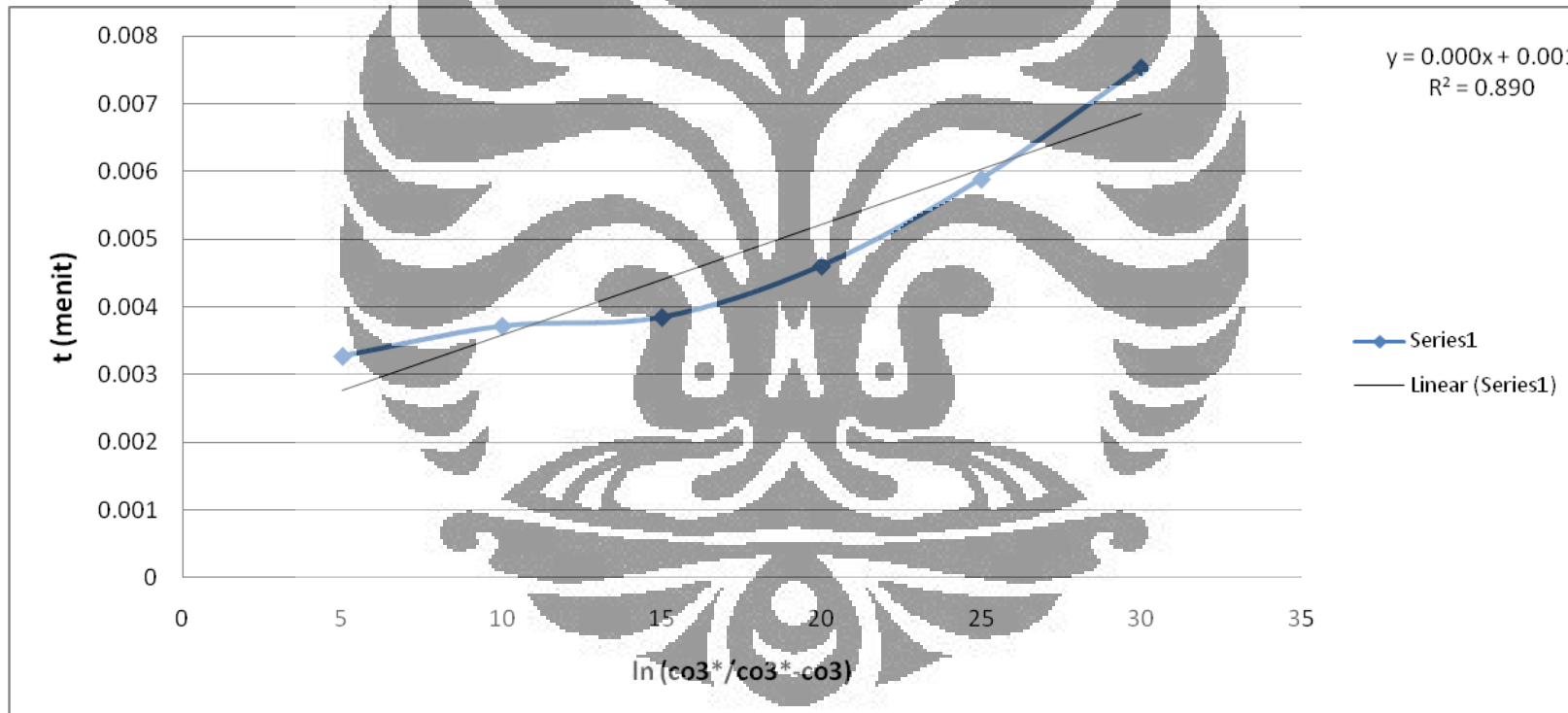
Gambar D.2. Grafik penentuan nilai $k_L a_{O_3}$ pada proses ozonasi

D.1.2. Proses ozonasi dan kavitasi hidrodinamika ($Q_L = 3$ LPM, $Q_G = 400$ L/jam)

Tabel D.4 Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa $k_L a_{O_3}$ pada proses ozonasi dan kavitasi hidrodinamika

t (menit)	T (celcius)	DO3 (ppm)	KI (ml Na ₂ S ₂ O ₃)	CO ₃ outlet (mg/L)	He	P(O ₃) (kPa)	CO ₃ * (mg/L)	(co ₃ */co ₃ *-co ₃)	ln (co ₃ */co ₃ *-co ₃)
5	33.2	1.17	10.2	24.48	4.770896554	1713,033144	359,0589577	1,00326917	0,003263838
10	35.8	1.24	8.7	20.88	5.157034063	1727,578821	334,99465	1,003715304	0,003708419
15	37.4	1.23	9.8	23.52	5.410034069	1736,530006	320,9831924	1,003846717	0,003839337
20	38	1.45	7.8	18.72	5.508076964	1739,886701	315,8791557	1,004611532	0,004600931
25	38.9	1.81	7.4	17.76	5.658482799	1744,921743	308,372722	1,005904175	0,005886814
30	40.8	2.2	7.3	17.52	5.989630064	1755,551276	293,098448	1,007562777	0,007534322

Dari data tersebut, diplot grafik $\ln\left(\frac{C_{O_3}^*}{C_{O_3}^* - C_{O_3}}\right)$ berbanding t, hingga didapat grafik seperti pada gambar D.3 dan diperoleh nilai $k_L a_{O_3}$ dari gradien grafik.



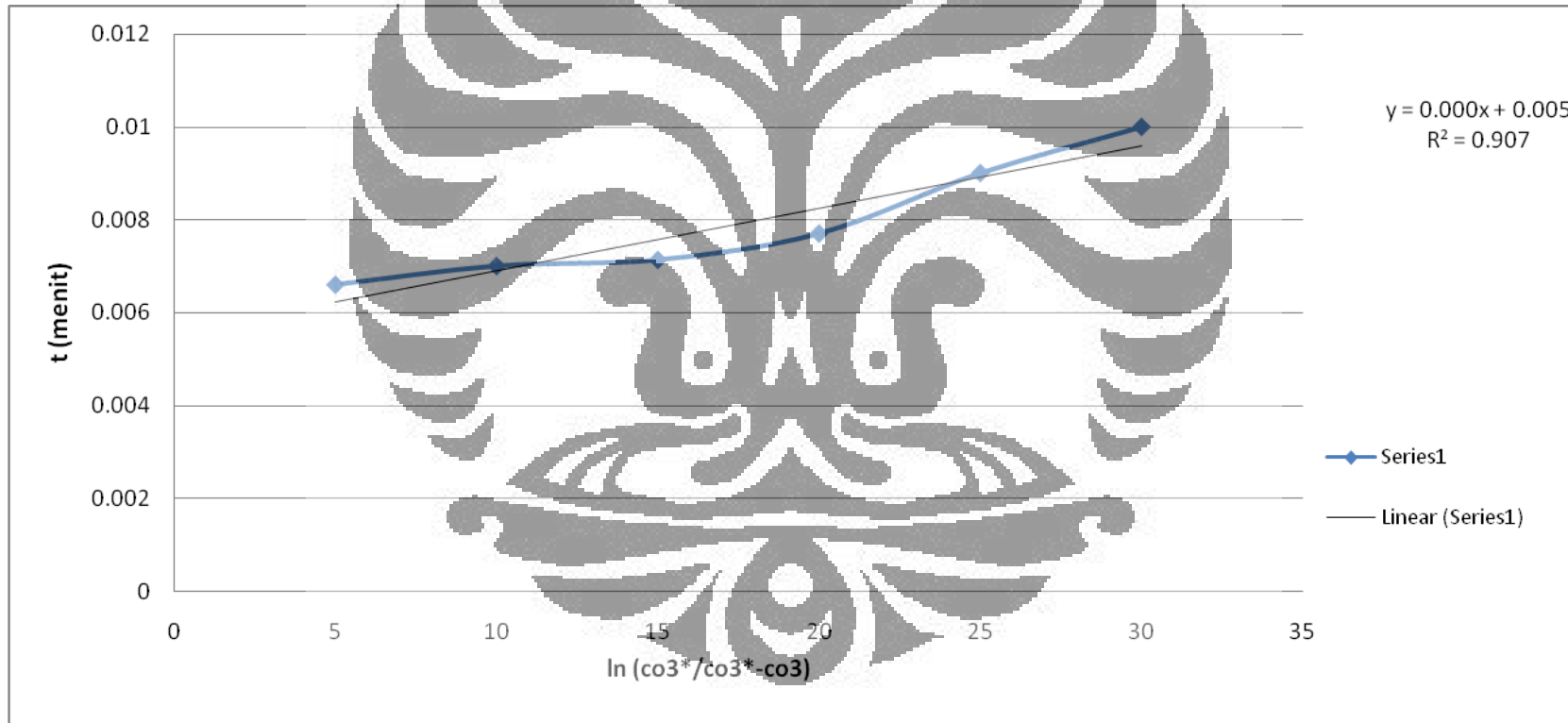
Gambar D.3. Grafik penentuan nilai $k_L a_{O_3}$ pada proses ozonasi dan kavitasi hidrodinamika

D.1.3. Proses ozonasi dan kavitasi ultrasonik ($Q_L = 3$ LPM, $Q_G = 400$ L/jam)

Tabel D.5 Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa $k_L a_{O_3}$ pada proses ozonasi dan kavitasi ultrasonik

t (menit)	T (celcius)	DO3 (ppm)	KI (ml Na ₂ S ₂ O ₃)	CO ₃ outlet (mg/L)	He	P(O ₃) (kPa)	CO ₃ * (mg/L)	(co ₃ */co ₃ *-co ₃)	ln (co ₃ */co ₃ *-co ₃)
5	32	2.44	9.1	21.84	4.602565736	1706,319755	370,7322943	1,006625173	0,006603323
10	33	2.52	8.7	20.88	4.742419853	1711,914246	360,9790569	1,007030092	0,007005496
15	34	2.5	8.7	20.88	4.886523593	1717,508737	351,4786543	1,007163762	0,007138224
20	35.1	2.62	8.5	20.4	5.050100257	1723,662677	341,312566	1,007735629	0,007705862
25	36.1	2.98	8.5	20.4	5.203553211	1729,257168	332,3223762	1,009048335	0,009007644
30	37.1	3.22	8.3	19.92	5.361669006	1734,851659	323,5656019	1,010051644	0,010001462

Dari data tersebut, diplot grafik $\ln\left(\frac{C_{O_2}^*}{C_{O_2}^* - C_{O_2}}\right)$ berbanding t, hingga didapat grafik seperti pada gambar D.4 dan diperoleh nilai $k_L a_{O_2}$ dari gradien grafik.



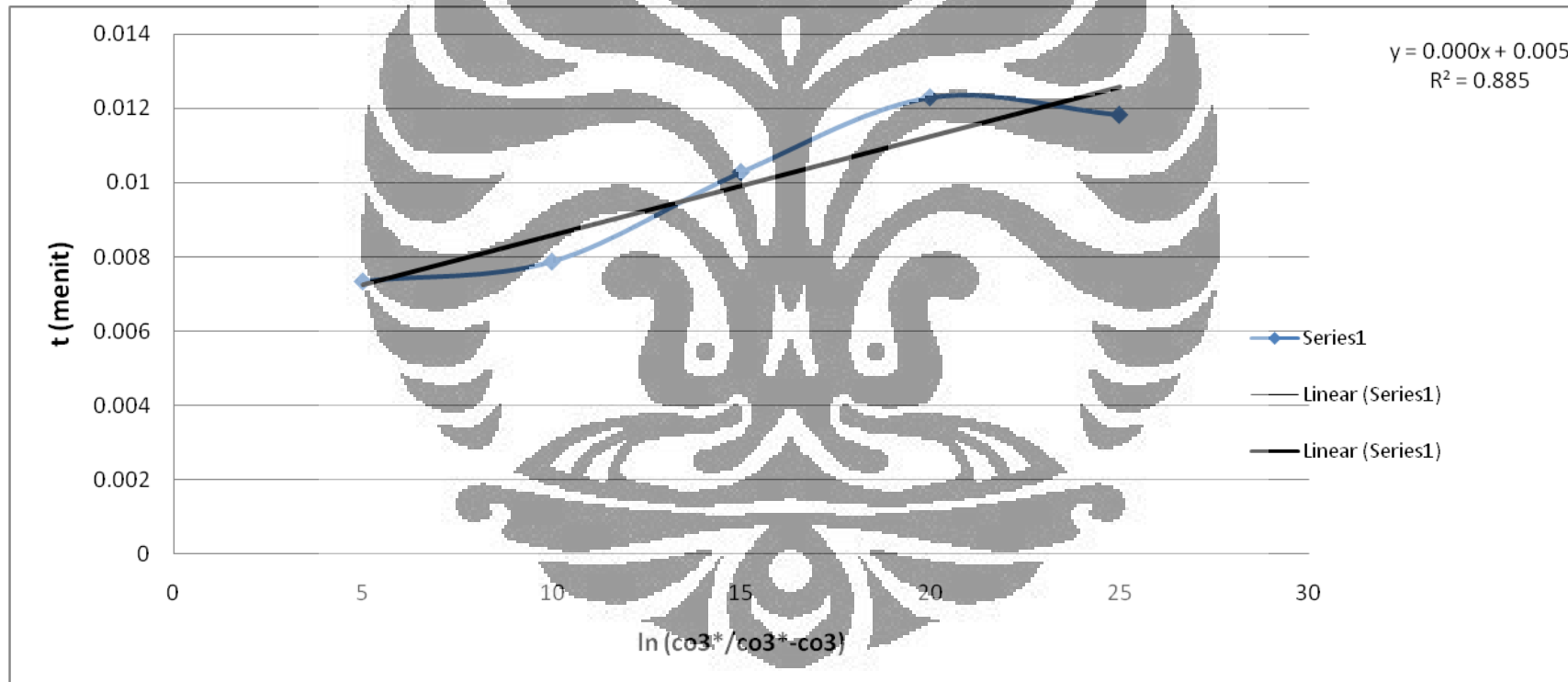
Gambar D.4. Grafik penentuan nilai $k_L a_{O_3}$ pada proses ozonasi dan kavitas ultrasonik

D.1.3. Proses ozonasi, kavitas hidrodinamik dan kavitas ultrasonik ($Q_L = 3$ LPM, $Q_G = 400$ L/jam)

Tabel D.6 Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa $k_L a_{O_3}$ pada proses ozonasi, kavitas hidrodinamik dan kavitas ultrasonik

t (menit)	T (celcius)	DO3 (ppm)	KI (ml Na2S2O3)	CO3 outlet (mg/L)	He	P(O3) (kPa)	CO3* (mg/L)	(co3*/co3*-co3)	ln (co3*/co3*-co3)
5	31.9	2.72	10	24	4.588809196	1705,760306	371,7217764	1,007371238	0,007344203
10	35.2	2.67	8	19.2	5.065239676	1724,222126	340,4028707	1,007905656	0,00787457
15	36.3	3.38	11	26.4	5.23479887	1730,376066	330,5525406	1,01033094	0,010277941
20	37.3	3.93	10.5	25.2	5.393864099	1735,970557	321,8417308	1,012361922	0,012286137
25	37.9	3.72	9.5	22.8	5.491613956	1739,327252	316,7242392	1,011884823	0,011814753
30	38.7	4.03	12	28.8	5.62470824	1743,802845	310,0254752	1,013170129	0,013084157

Dari data tersebut, diplot grafik $\ln\left(\frac{c_{O_3^*}}{c_{O_3^*}-c_{O_3}}\right)$ berbanding t, hingga didapat grafik seperti pada gambar D.5 dan diperoleh nilai $k_L a_{O_3}$ dari gradien grafik.



Gambar D.5. Grafik penentuan nilai $k_L a_{O_3}$ pada proses ozonasi dan kavitasi hidrodinamika

