



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PERPINDAHAN MASSA  
PADA OZONASI DENGAN GELEMBUNG MIKRO**

**SKRIPSI**

**LETTI ANNASARI  
04 05 06 03 69**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JULI 2009**

**Universitas Indonesia**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI PERPINDAHAN MASSA  
PADA OZONASI DENGAN GELEMBUNG MIKRO**

**SKRIPSI**

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

**LETTI ANNASARI  
04 05 06 03 69**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
DEPOK  
JULI 2009**


**Universitas Indonesia**

**HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

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

**Nama : Letti Annasari**

**NPM : 04 05 06 03 69**

**Tanda Tangan :** 


**Tanggal : 26 Juni 2009**

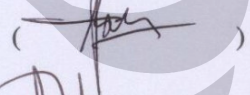
**HALAMAN PENGESAHAN**

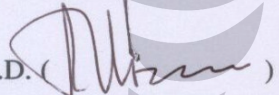
Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Letti Annasari  
NPM : 04 05 06 03 69  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Studi Perpindahan Massa pada Ozonasi dengan Gelembung Mikro

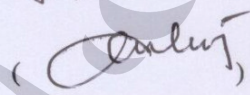
Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Kimia Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

**DEWAN PENGUJI**

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

Pembimbing 2 : Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA 

Penguji 1 : Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc., Ph.D. 

Penguji 2 : Ir. Yuliusman, M.Eng. 

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 6 Juli 2009

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala, karena berkat rahmat dan petunjuk-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ungkapan terima kasih kepada:

1. Ibu Ir. Eva Fathul Karamah, M.T. dan Bapak Dr. Ir Setijo Bismo, DEA selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini;
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI;
3. Bapak Ir. Yuliusman, M.Eng. selaku kordinator skripsi Teknik Kimia FTUI;
4. Bapak Ir. Sutrasno Kartohardjono, M.Sc., Ph.D. selaku pembimbing akademis;
5. M. Safri D.K. Simamora dan Meiriana Pulungan, kedua orang tua tercinta yang selalu memberikan doa, dukungan moral, dan material sehingga skripsi ini dapat selesai;
6. Adi Lukmanto, Fahrur Rozi, Andy Rivai, Destaninggara, Masta, Rosita, Haikal, Andri, dan rekan-rekan riset grup Teknologi Intensifikasi Proses lainnya yang telah banyak membantu dan berbagi dalam perjalanan panjang pengerjaan skripsi ini;
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. Maria Wulandari, Dwi Yulianti, Monica Andriana, Nur Istiqomah, Estu Fitri, Rizka Yulina, dan Cindy Dianita sahabat-sahabat yang telah memberikan banyak dukungan dalam penyusunan laporan skripsi ini;

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

Depok, 26 Juni 2009

Penulis

**Universitas Indonesia**

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

---

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

Nama : Letti Annasari  
NPM : 04 05 06 03 69  
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 pada Ozonasi dengan Gelembung Mikro**

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 : 6 Juli 2009  
Yang menyatakan



(Letti Annasari)

## ABSTRAK

Nama : Letti Annasari  
 Program Studi : Teknik Kimia  
 Judul : Studi Perpindahan Massa pada Ozonasi dengan Gelembung Mikro

Ozonasi merupakan proses yang sudah banyak digunakan dalam pengolahan air. Proses ini memanfaatkan sifat ozon sebagai oksidator kuat dan kemampuan ozon dalam melakukan disinfeksi. Kekurangan dari penggunaan ozon adalah kelarutan dan stabilitasnya di air yang relatif rendah. Salah satu cara untuk meningkatkan kelarutan ozon dalam air adalah dengan kavitasi. Kavitasi merupakan teknik pembangkitan gelembung berukuran mikro.

Pada penelitian ini dilakukan studi perpindahan massa pada proses gabungan ozonasi dan kavitasi atau selanjutnya disebut dengan ozonasi gelembung mikro, dengan menggunakan kolom gelembung pada aliran searah. Dari penelitian yang dilakukan, harga  $k_L a_{O_3}$  pada penggunaan gelembung mikro 2,45 kali lebih besar dari penggunaan gelembung konvensional.

**Kata kunci:**

gelembung mikro, kavitasi, ozonasi, perpindahan massa

## ABSTRACT

Name : Letti Annasari  
 Study Program : Chemical Engineering  
 Title : Mass Transfer Study in Micro-bubbles Ozonation

Ozonation has widely used in water treatment process. This process using ozone characteristic as a strong oxidator and ozone ability as a disinfectant agent. 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.

Mass transfer study in this ozonation–cavitation hybrid process, or in the following will be called as micro-bubbles ozonation was done, using bubble column on co-current mode. The result showed that  $k_L a_{O_3}$  value if micro-bubbles used was 2,45 times higher than conventional bubbles.

**Key words:**

micro-bubbles, cavitation, ozonation, mass transfer

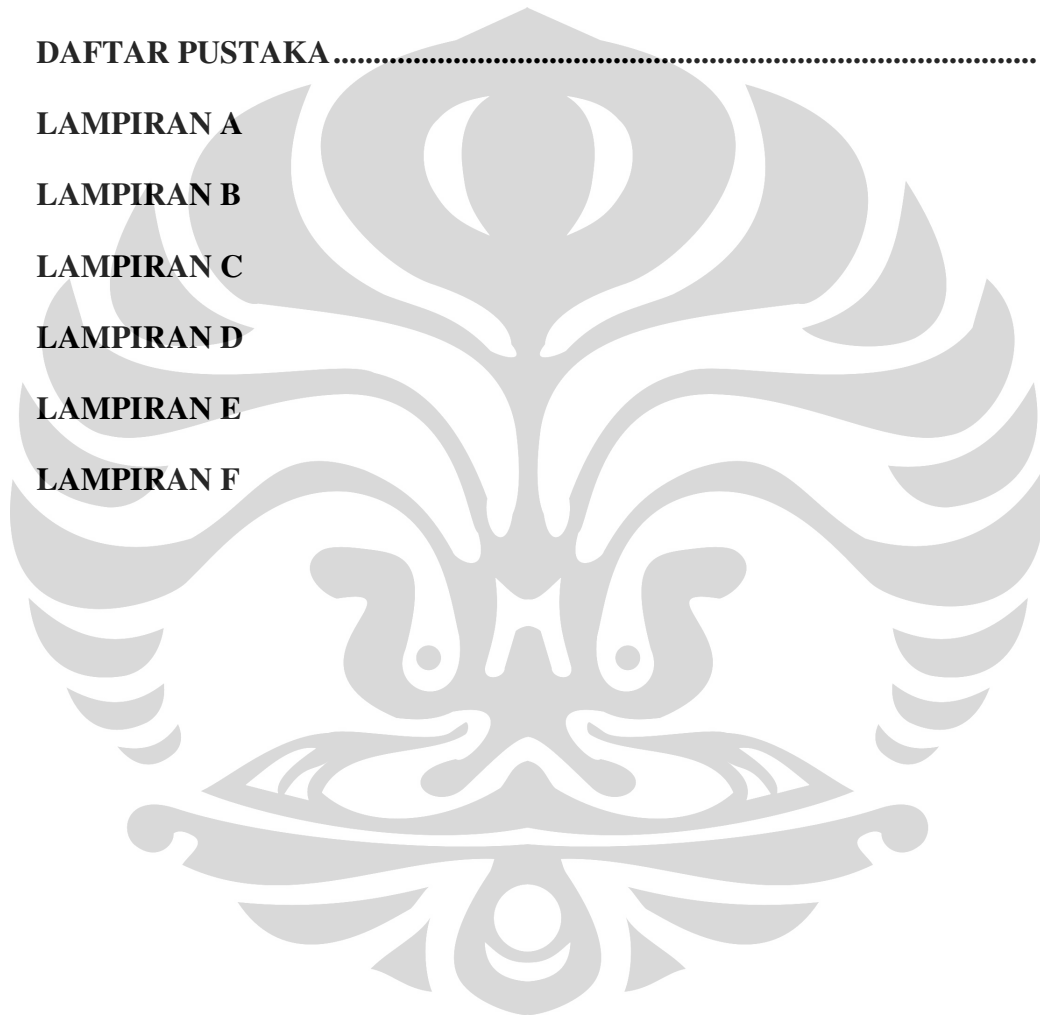
## DAFTAR ISI

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 .....	xi
<b>BAB 1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
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
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
2.1. Ozon .....	6
2.1.1. Sifat Fisika Ozon .....	6
2.1.2. Sifat Kimia Ozon .....	7
2.2. Pembentukan Ozon .....	8
2.2.1. Secara Alamiah .....	8
2.2.2. Secara Komersil .....	9
2.2.2.1. <i>Corona Discharge</i> .....	9
2.2.2.2. Elektrokimia .....	11
2.2.2.3. Radiasi Ultra Violet .....	12
2.3. Penggunaan Ozon .....	13
2.3.1. Disinfeksi Air Minum .....	13
2.3.2. Pengolahan Limbah Cair .....	13
2.3.3. Pemusnahan Bakteri Patogen dan Virus .....	14
2.4. Injeksi Ozon dalam Air .....	16



2.4.1. Injektor Venturi.....	16
2.4.2. Difuser Gelembung.....	18
2.5. Perpindahan Massa Antar Fasa .....	18
2.6. Perpindahan Massa Ozon dalam Air .....	21
2.7. Kelarutan Ozon dalam Air.....	24
2.8. Dekomposisi Ozon .....	26
<b>BAB 3. METODE PENELITIAN.....</b>	<b>28</b>
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	28
3.2. Deskripsi Rancangan Kolom Gelembung dan Peralatan Lainnya .	29
3.2.1. Ozonator.....	29
3.2.2. Injektor.....	30
3.2.3. Kolom Gelembung.....	30
3.3. Penelitian yang Dilakukan.....	31
3.4. Prosedur Penelitian.....	32
3.4.1. Penentuan Koefisien Perpindahan Massa dan <i>Hold-up Gas</i>	32
3.4.2. Uji Dekomposisi Ozon.....	33
3.4.3. Uji Reaktivitas Larutan Ozon terhadap KI .....	34
3.5. Prosedur Analisis Sampel.....	34
3.5.1. Penentuan Koefisien Perpindahan Massa dan <i>Hold-up Gas</i>	34
3.5.2. Uji Dekomposisi Ozon.....	35
3.5.3. Uji Reaktivitas Larutan Ozon terhadap KI .....	35
3.6. Pengolahan Data Penelitian.....	36
3.6.1. Penentuan Koefisien Perpindahan Massa dan <i>Hold-up Gas</i>	34
3.6.2. Uji Dekomposisi Ozon.....	40
3.6.3. Uji Reaktivitas Larutan Ozon terhadap KI .....	40
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>42</b>
4.1. Koefisien Perpindahan Massa Ozon–Air ( $k_L a_{O_3}$ ).....	42
4.1.1. Pengaruh laju alir air ( $U_L$ ) terhadap $k_L a$ .....	42
4.1.2. Pengaruh laju alir gas ( $U_G$ ) terhadap $k_L a$ .....	45
4.1.3. Perbandingan $k_L a$ gelembung mikro dengan gelembung konvensional .....	46
4.2. <i>Hold-up Gas</i> ( $\epsilon_G$ ) .....	47

4.2.1. Pengaruh laju alir air ( $U_L$ ) terhadap <i>Hold-up Gas</i> ( $\epsilon_G$ ) .....	48
4.2.2. Pengaruh laju alir gas ( $U_G$ ) terhadap <i>Hold-up Gas</i> ( $\epsilon_G$ ).....	48
4.3. Dekomposisi Ozon .....	49
4.4. Reaktivitas Ozon pada Beberapa Posisi .....	51
<b>BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>54</b>
5.1. Kesimpulan.....	54
5.2. Saran .....	54
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>55</b>
<b>LAMPIRAN A</b>	
<b>LAMPIRAN B</b>	
<b>LAMPIRAN C</b>	
<b>LAMPIRAN D</b>	
<b>LAMPIRAN E</b>	
<b>LAMPIRAN F</b>	

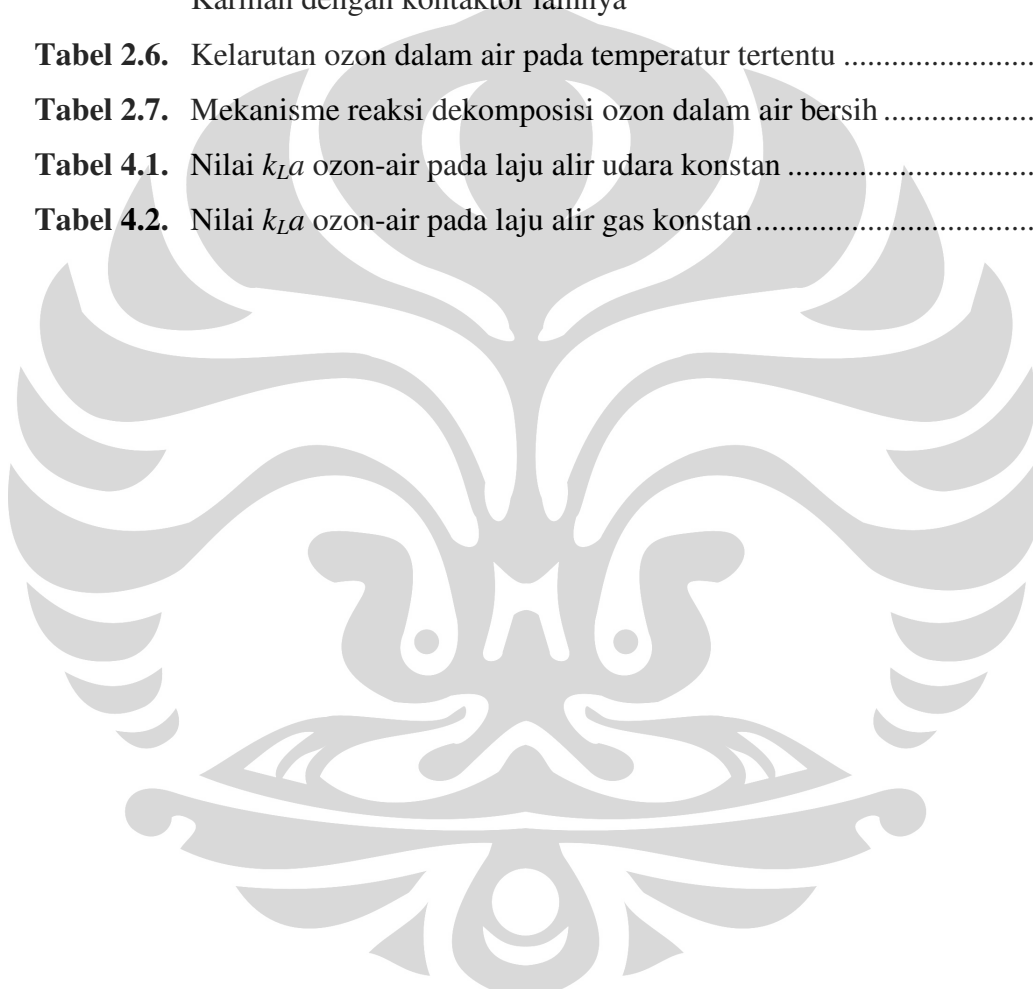


## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1.</b>	Struktur molekul ozon .....	6
<b>Gambar 2.2.</b>	Mekanisme pembentukan ozon melalui radiasi ultra violet.....	8
<b>Gambar 2.3.</b>	Sambaran petir di udara memicu terbentuknya ozon .....	9
<b>Gambar 2.4.</b>	Konfigurasi <i>dielectric barrier</i> pada teknologi <i>corona discharge</i> .	10
<b>Gambar 2.5.</b>	Skema generator ozon dengan sel elektrokimia.....	11
<b>Gambar 2.6.</b>	Pembentukan ozon dengan sinar ultra violet .....	12
<b>Gambar 2.7.</b>	Penghancuran sel bakteri oleh molekul ozon.....	14
<b>Gambar 2.8.</b>	Injektor venturi.....	16
<b>Gambar 2.9.</b>	Udara terhisap masuk ke dalam injektor venturi dan ribuan gelembung kecil terbentuk setelah <i>suction port</i> .....	17
<b>Gambar 2.10.</b>	Difuser gelembung.....	18
<b>Gambar 2.11.</b>	Perpindahan massa antara fasa gas dan fasa cair .....	19
<b>Gambar 3.1.</b>	Diagram alir penelitian.....	28
<b>Gambar 3.2.</b>	Prototipe kolom gelembung beserta kelengkapannya.....	31
<b>Gambar 3.3.</b>	Diagram alir perhitungan $k_L a_{O_3}$ .....	39
<b>Gambar 4.1.</b>	Grafik hubungan laju alir air ( $U_L$ ) dengan $k_L a$ pada $U_G = 7,01$ m/s .....	43
<b>Gambar 4.2.</b>	Injektor venturi.....	44
<b>Gambar 4.3.</b>	Grafik hubungan laju alir gas ( $U_G$ ) dengan $k_L a$ pada $U_L = 0,25$ m/s.....	46
<b>Gambar 4.4.</b>	Perbandingan $k_L a$ gelembung mikro dengan gelembung Konvensional .....	47
<b>Gambar 4.5.</b>	Grafik hubungan laju alir air ( $U_L$ ) terhadap <i>hold-up gas</i> ( $\epsilon_G$ ).....	48
<b>Gambar 4.6.</b>	Grafik hubungan laju alir gas ( $U_G$ ) terhadap <i>hold-up gas</i> ( $\epsilon_G$ ) .....	49
<b>Gambar 4.7.</b>	Kurva konduktivitas larutan terhadap waktu .....	50
<b>Gambar 4.8.</b>	Konsentrasi ozon terhadap waktu pada $Q_G = 400$ L/jam .....	51
<b>Gambar 4.9.</b>	Konsentrasi ozon terhadap waktu pada $Q_G = 600$ L/jam .....	52
<b>Gambar 4.10.</b>	Konsentrasi ozon terhadap waktu pada $Q_G = 800$ L/jam .....	52
<b>Gambar 4.11.</b>	Konsentrasi ozon terhadap waktu pada $Q_G = 1000$ L/jam .....	53

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1.</b> Perbandingan sifat fisika ozon dengan oksigen .....	7
<b>Tabel 2.2.</b> Potensial reduksi beberapa agen oksidasi.....	7
<b>Tabel 2.3.</b> Bakteri pathogen dan dosis ozon yang dibutuhkan .....	15
<b>Tabel 2.4.</b> Beberapa jenis virus dan dosis ozon yang dibutuhkan.....	16
<b>Tabel 2.5.</b> Perbandingan nilai $k_{La}$ antara ozonasi dengan Kontaktor Karman dengan kontaktor lainnya	22
<b>Tabel 2.6.</b> Kelarutan ozon dalam air pada temperatur tertentu .....	25
<b>Tabel 2.7.</b> Mekanisme reaksi dekomposisi ozon dalam air bersih .....	26
<b>Tabel 4.1.</b> Nilai $k_{La}$ ozon-air pada laju alir udara konstan .....	42
<b>Tabel 4.2.</b> Nilai $k_{La}$ ozon-air pada laju alir gas konstan.....	45



## BAB 1 PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Keberadaan air bersih amat penting dalam 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.

Perkembangan teknologi dan industri belakangan ini ternyata menyebabkan pencemaran lingkungan semakin meningkat. Tak terkecuali pencemaran air. Air bersih menjadi sulit diperoleh terutama di wilayah kota-kota besar dan kawasan industri.

Kelangkaan air bersih ini telah mendorong dilakukannya penelitian untuk mengolah sumber air yang ada seperti air danau dan air sungai yang mungkin telah tercemar, menjadi air yang layak digunakan. Saat ini telah banyak berkembang proses-proses yang dapat digunakan untuk mengolah air dari badan air menjadi air bersih. Tetapi dengan semakin ketatnya baku mutu air bersih yang ditetapkan oleh pemerintah, diperlukan suatu proses yang lebih efektif sehingga mampu memenuhi standar baku mutu tersebut.

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. Di dalam air, ozon akan terdekomposisi menjadi radikal OH ( $\text{OH}\cdot$ ) yang merupakan oksidator paling kuat dalam air. Sebagai oksidator, ozon dan radikal OH bereaksi dengan mikropolutan organik dan inorganik 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  $\text{H}_2\text{S}$  yang dihasilkan dari aktivitas mikroorganisme (<http://www.ozoneapplications.com>).

Kekurangan dari penggunaan ozon adalah 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. Stabilitas ozon di air sangat bergantung pada karakteristik air terutama pH, alkalinitas, serta jenis dan jumlah bahan organik alami (*natural organic matter*, NOM) yang terkandung dalam air.

Kekurangan lainnya adalah ozon bersifat selektif. Karena sifatnya yang selektif, tidak semua senyawa dapat dioksidasi dengan mudah oleh ozon seperti amonia, pestisida, senyawa-senyawa aromatik, dan pelarut terklorinasi (Von Gunten, 2003). Akibat sifat kelarutan, stabilitas, dan selektivitasnya ini, dalam beberapa kasus, terjadi mineralisasi yang tidak sempurna sehingga menghasilkan produk-produk oksidasi parsial (Li-Bing Chu, et.al., 2007).

Untuk mengimbangi kelarutan ozon yang rendah, cenderung dilakukan penggunaan dosis ozon yang berlebih. Hal ini menyebabkan borosnya penggunaan ozon yang menjadi salah satu faktor penyebab tingginya biaya proses ozonasi. Selain itu, dalam pemrosesan air minum, penggunaan dosis ozon berlebih memicu terbentuknya bromat yang merupakan produk samping berbahaya karena sifatnya yang karsinogenik dan sulit terdegradasi.

Ozonasi merupakan peristiwa absorpsi gas oleh zat cair melalui reaksi kimia dimana laju reaksi total dipengaruhi oleh kinetika reaksi dan perpindahan massa. Salah satu cara untuk meningkatkan kelarutan ozon dalam air adalah dengan kavitasi. Kavitasi merupakan teknik pembangkitan gelembung berukuran mikro atau biasa disebut dengan gelembung mikro. Gelembung mikro ini memiliki diameter kurang dari lima puluh mikron, sedang gelembung konvensional umumnya memiliki diameter dalam skala milimeter. Pada kavitasi terjadi fenomena pembentukan, pertumbuhan, dan pecahnya gelembung ukuran kecil yang terjadi pada interval waktu yang singkat dan mengeluarkan energi yang besar (Jyoti & Pandit, 2004). Laju perpindahan massa ozon pada proses ozonasi dapat ditingkatkan dengan memperbesar luas permukaan kontak untuk memperbesar peluang terjadinya perpindahan massa melalui penggunaan gelembung mikro. Gelembung mikro memiliki luas permukaan yang sangat besar, 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).

Jyoti dan Pandit menggunakan metode hibrida ozonasi–kavitasi serta peroksida–kavitasi dalam proses disinfeksi bakteri *coliform* dalam air. Hasilnya menunjukkan bahwa persentase pengurangan jumlah bakteri bakteri dalam 15 menit untuk peroksida adalah 13%, ozonasi 60%, kavitasi dengan penambahan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> m mg/L 75%, kavitasi dengan penambahan ozon 2 mg/L 80%. Keberadaan sejumlah besar gelembung pada aliran liquid meningkatkan persentase disinfeksi bakteri (Jyoti & Pandit, 2003).

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 & Pandit, 2004). Dengan demikian, penggunaan gelembung mikro dengan teknik kavitasi dalam proses ozonasi memungkinkan proses yang lebih ekonomis.

Dalam penelitian ini akan dilakukan studi perpindahan massa pada proses gabungan ozonasi dan kavitasi atau selanjutnya disebut dengan ozonasi gelembung mikro. Penelitian ini diharapkan mampu memverifikasi signifikansi penggunaan gelembung mikro untuk meningkatkan efisiensi perpindahan massa ozon, 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 penggunaan gelembung mikro untuk meningkatkan kelarutan ozon dalam air, yang dievaluasi dengan besar koefisien perpindahan massa ( $k_L a, C_s$ ), *hold-up gas* ( $\epsilon_G$ ), pengkajian terhadap dekomposisi ozon, dan reaktivitas larutan ozon pada berbagai posisi.

## 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- (1) Menentukan koefisien perpindahan massa ozon ke air ( $k_L a, C_s$ ) pada penggunaan gelembung mikro dan gelembung konvensional
- (2) Menentukan besar nilai *hold-up gas* ( $\epsilon_G$ ) pada penggunaan gelembung mikro

- (3) Mengkaji dekomposisi ozon yang terjadi pada penggunaan gelembung mikro
- (4) Menentukan reaktivitas larutan ozon di berbagai posisi pada penggunaan gelembung mikro

#### 1.4. Batasan Penelitian

Pada penelitian ini, penulis membatasi masalah sebagai berikut:

- (1) Proses berlangsung secara *semi-batch*
- (2) Ozonator yang digunakan merupakan ozonator rancangan Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA
- (3) Gas yang diinjeksikan ke dalam ozonator adalah udara (oksigen 21%)
- (4) Air yang digunakan adalah aquades
- (5) Untuk mengontakkan ozon ke dalam air digunakan injektor *mazzei*
- (6) Aliran fluida fasa gas dan cair pada kolom gelembung adalah searan (*co-current*) dari bawah ke atas
- (7) Perhitungan koefisien perpindahan massa ozon—air ( $k_L a_{O_3}$ ) dilakukan dengan menggunakan korelasi  $k_L a_{O_3}$  terhadap  $k_L a_{O_2}$

#### 1.5. Metode Operasional Penelitian

Penelitian diawali dengan rancang bangun peralatan skala laboratorium berupa plasmatron sebagai pembangkit plasma, generator ozon sebagai alat pembangkit ozon, injektor dan diffuser sebagai pembangkit gelembung, serta kolom gelembung untuk meneliti karakteristik gelembung mikro, perpindahan massa ozon ke air, *hold-up gas*, dan reaktivitas larutan ozon pada berbagai posisi.

Pembangkitan ozon dilakukan dengan mengalirkan udara yang sebelumnya dilewatkan melalui *silica gel* untuk menghilangkan kandungan air menuju generator ozon. Proses ozonasi dilakukan dengan mendistribusikan gelembung mikro menuju reaktor gelembung dengan menggunakan injektor *mazzei*, untuk gelembung konvensional digunakan diffuser.

Nilai koefisien perpindahan massa pada penggunaan gelembung mikro akan dibandingkan hasilnya dengan hasil dari penggunaan gelembung konvensional untuk dievaluasi seberapa besar perbedaannya. Uji dekomposisi



ozon dilakukan untuk mengamati sejauh mana dekomposisi ozon yang terjadi pada sistem kolom gelembung ini, Uji reaktivitas larutan ozon pada berbagai posisi dilakukan untuk mengetahui posisi port pada kolom gelembung yang paling reaktif.

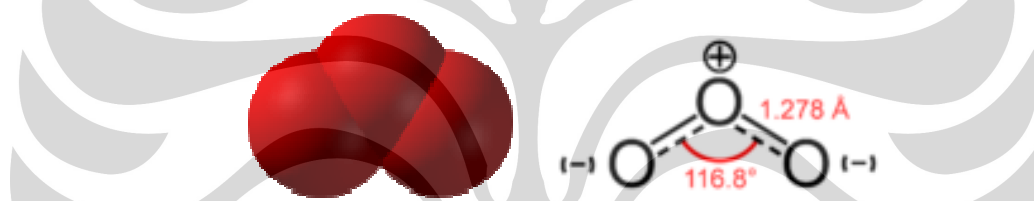


## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Ozon

Ozon pertama kali ditemukan oleh Christian Friedrich Schönbein, seorang ilmuwan Jerman, pada tahun 1840. Penamaan ozon diambil dari bahasa Yunani yaitu *ozein* yang berarti bau.

Pada tahun 1867 ilmuwan lainnya, Soret, mengumumkan bahwa ozon merupakan molekul yang terdiri dari tiga buah atom oksigen ( $O_3$ ), dan merupakan bentuk alotropik dari oksigen ( $O_2$ ). Molekul ozon memiliki struktur seperti pada Gambar 2.1, dengan panjang ikatan O–O sebesar  $1,278 \text{ \AA}$ , dan sudut ikatan sebesar  $116,8^\circ$ .



**Gambar 2.1.** Struktur molekul ozon

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

#### 2.1.1. Sifat Fisika Ozon

Ozon berwujud gas berwarna biru pada temperatur lingkungan. Tetapi warna ini hanya tampak pada ozon dengan konsentrasi yang tinggi. Sementara pada konsentrasi yang rendah, ozon hanya berupa gas tak berwarna. Ozon berwarna biru tua dalam wujud cair dan padat. Ozon cair mulai menguap pada temperatur  $-111,9^\circ\text{C}$  sementara ozon padat mulai meleleh pada temperatur  $-192,5^\circ\text{C}$ .

Ozon memiliki bau yang pedas dan tajam. Bau ozon dapat dideteksi di udara pada konsentrasi 0,01 ppm. Bau ozon dapat dirasakan segera setelah petir menyambar atau seperti bau yang keluar dari mesin fotokopi.

Ozon merupakan bentuk alotropik dari oksigen. Perbandingan sifat fisika ozon dengan oksigen dapat dilihat pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1.** Perbandingan sifat fisika ozon dengan oksigen

Propertis	Ozon	Oksigen
Rumus molekul	O <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>
Berat molekul	48 gr/mol	32 gr/mol
Warna	Biru muda	Tidak berwarna
Bau	Berbau tajam seperti bau mesin fotokopi	Tidak berbau
Kelarutan dalam air (pada suhu 20°C)	8,57 mg/L	7,6 mg/L
Densitas (pada 0°C, 1 atm)	2,144 (gr/L)	1,429 gr/L
Titik didih	161,3 K (-111,9°C)	90,20 K (-182,95°C)
Titik leleh	80,7 K (-192,5°C)	54,36 K (-218,79°C)

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

### 2.1.2. Sifat Kimia Ozon

Secara kimiawi, ozon merupakan senyawa yang sangat reaktif, tidak stabil, dan mudah sekali terdekomposisi menjadi oksigen. Ozon juga merupakan oksidator yang sangat kuat, lebih kuat dari oksigen, bahkan terkuat dalam fasa gas. Sifat oksidator ini sering dimanfaatkan dalam proses penghilangan warna dan bau pada air. Nilai potensial reduksi beberapa agen oksidasi dapat dilihat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2.** Potensial reduksi beberapa agen oksidasi

Reaksi Agen Oksidasi	Potensial Reduksi pada 25°C
Ozon	$E^{\circ} = + 2,07 \text{ V}$
Hidrogen Peroksida	$E^{\circ} = + 1,77 \text{ V}$
Permanganat	$E^{\circ} = + 1,67 \text{ V}$
Klorin Dioksida	$E^{\circ} = + 1,57 \text{ V}$
Asam Hipoklorit	$E^{\circ} = + 1,49 \text{ V}$
Gas Klor	$E^{\circ} = + 1,36 \text{ V}$
Asam Hipobromik	$E^{\circ} = + 1,33 \text{ V}$
Oksigen	$E^{\circ} = + 1,23 \text{ V}$
Bromin	$E^{\circ} = + 1,09 \text{ V}$

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

**Tabel 2.2.** Potensial reduksi beberapa agen oksidasi (lanjutan)

Reaksi Agen Oksidasi	Potensial Reduksi pada 25°C
Asam Hipoiodik	$E^{\circ} = + 0,99 \text{ V}$
Hipoklorit	$E^{\circ} = + 0,94 \text{ V}$
Klorit	$E^{\circ} = + 0,76 \text{ V}$
Iodin	$E^{\circ} = + 0,54 \text{ V}$

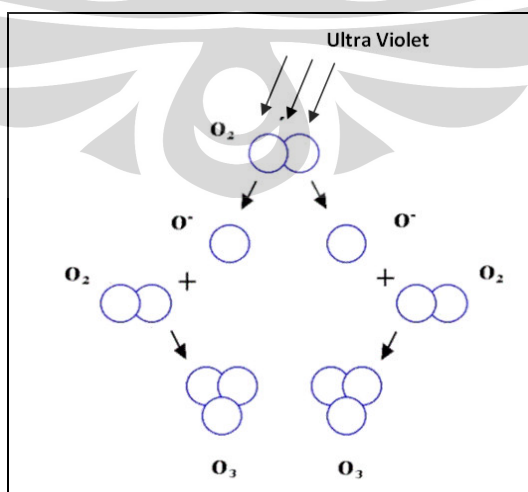
(Sumber: <http://www.ozoneapplications.com>)

## 2.2. Pembentukan Ozon

Pembentukan ozon dapat berlangsung secara alamiah di alam dan secara komersil yang dilakukan oleh manusia dengan menggunakan metode tertentu.

### 2.2.1. Secara Alamiah

Secara alamiah, ozon dapat terbentuk melalui petir dan radiasi ultraviolet dari sinar matahari. Chapman menjelaskan pembentukan ozon secara alamiah pada tahun 1930. Ia menjelaskan bahwa sinar ultraviolet dari pancaran sinar matahari mampu menguraikan gas oksigen di udara bebas. Molekul oksigen ( $O_2$ ) tadi terurai menjadi dua buah atom oksigen ( $O$ ). Proses penguraian ini dikenal dengan nama *fotolisis*. Lalu atom-atom oksigen tadi secara alamiah akan bertumbukan dengan molekul oksigen yang ada disekitarnya, dan terbentuklah ozon ( $O_3$ ). Ozon yang terdapat pada lapisan stratosfer yang kita kenal dengan sebutan lapisan ozon (*ozone layer*) merupakan ozon yang terbentuk dari proses ini. Mekanisme pembentukan ozon di alam dapat dilihat pada Gambar 2.2.

**Gambar 2.2.** Mekanisme pembentukan ozon melalui radiasi ultra violet

Mekanisme yang sama juga terjadi pada petir. Ketika petir menyambar, ratusan *pound* ozon terbentuk di udara seperti pada Gambar 2.3.



**Gambar 2.3.** Sambaran petir di udara memicu terbentuknya ozon

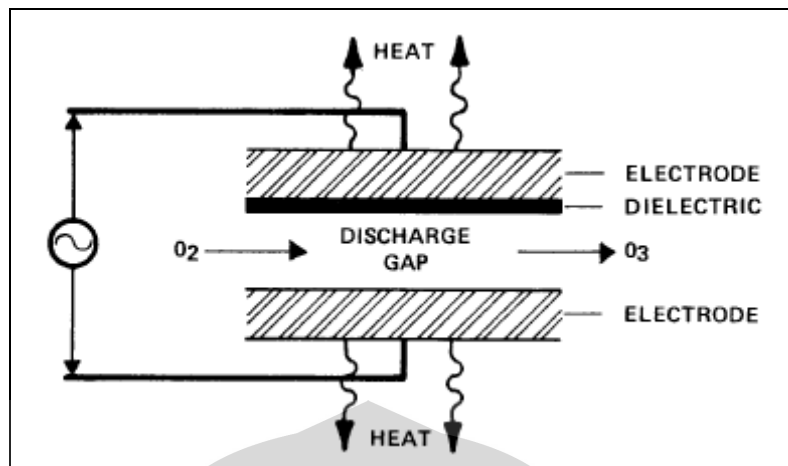
([www.ozonesolutions.com](http://www.ozonesolutions.com))

### **2.2.2. Secara Komersil**

Ozon dapat diproduksi sendiri secara *in-situ* dengan menggunakan beberapa teknologi seperti *corona discharge*, elektrolisis, dan radiasi ultraviolet.

#### **2.2.2.1. Corona Discharge**

Pembentukan ozon dengan metode *corona discharge* pertama kali dilakukan oleh Siemens pada tahun 1857 dengan menggunakan *dielectric barrier discharge*. Pada metode ini, umpan yang dapat berupa oksigen murni ataupun udara dilewatkan pada celah di antara dua elektroda yang dipisahkan oleh material dielektrik. Elektroda-elektroda ini terhubung dengan sumber tegangan tinggi *alternating-current* (AC). Tegangan tinggi yang dialirkan menuju dua elektroda ini menyebabkan terbentuknya *corona discharge*, dan membuat oksigen ataupun udara yang berada di celah *discharge* terkonversi menjadi ozon.



**Gambar 2.4.** Konfigurasi *dielectric barrier* pada teknologi *corona discharge*  
(Sumber: Carlins dan Clark)

Pembentukan ozon dengan *corona discharge* ini secara prinsip sangat sederhana. Pada tahun 1956, Devins menjelaskan bahwa tumbukan dari elektron yang dihasilkan *corona discharge* dengan molekul oksigen akan menghasilkan dua buah atom oksigen. Persamaan reaksinya dapat dilihat pada Persamaan 2.1.



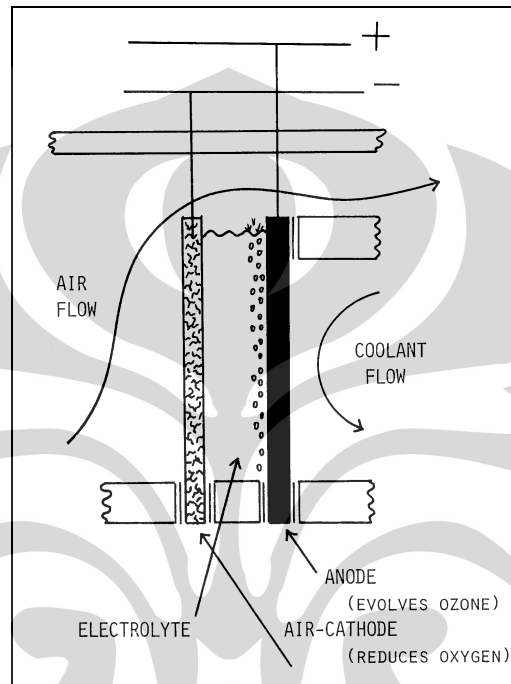
Selanjutnya atom oksigen ini secara alami akan bertumbukan kembali dengan molekul oksigen di sekitarnya sehingga terbentuklah ozon.



Dewasa ini, metode *corona discharge* merupakan metode yang paling banyak dipergunakan dalam pembuatan ozon diberbagai kegiatan industri karena memiliki keunggulan seperti sel corona yang tidak membutuhkan pemeliharaan yang rumit, tersedia untuk digunakan, dan yang paling penting teknologi ini lebih mudah diaplikasikan dalam proses pengolahan air. Kekurangannya adalah jumlah energi yang dikonsumsi cukup besar sedang konsentrasi ozon yang dihasilkan rendah sehingga teknologi ini dinilai mahal. Konsentrasi ozon yang dihasilkan bergantung pada jenis gas yang diumpankan. Apabila yang diumpankan adalah udara, konsentrasi ozon yang dihasilkan 2% berat. Apabila yang diumpankan adalah oksigen, konsentrasi ozon yang dihasilkan 7% berat (Pontius, 1990).

### 2.2.2.2. Elektrokimia

Pada metode ini, tegangan dari sumber listrik *direct-current* (DC) mengalir di antara anoda dan katoda dalam sebuah larutan elektrolit yang mengandung air dan larutan anion dengan keelektronegatifan tinggi. Ozon secara elektrokimia akan terbentuk dari air.



**Gambar 2.5.** Skema generator ozon dengan sel elektrokimia

(Sumber: Foller)

Pada proses elektrokimia, terjadi reaksi setengah sel di anoda dan katoda.

Di anoda:



Dan pada saat yang bersamaan juga terjadi reaksi:



Di katoda:

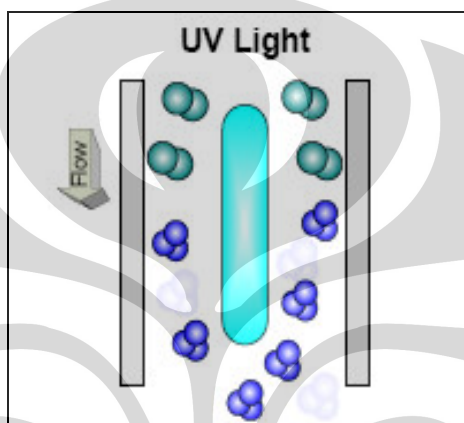


Keuntungan penggunaan teknologi ini adalah dihasilkannya konsentrasi ozon yang lebih besar dari corona discharge, yaitu sebesar 15% berat. Kelemahannya,

pembentukan ozon dengan teknologi ini memerlukan konsumsi energi yang besar. Selain itu sistemnya pun tidak banyak tersedia.

### 2.2.2.3. Radiasi Ultra Violet

Pembentukan ozon pada teknologi ini dapat dilakukan dengan menggunakan lampu UV. Pada Gambar 2.6. oksigen berubah menjadi ozon setelah dilewatkan pada sinar ultra violet dari lampu UV.



**Gambar 2.6.** Pembentukan ozon dengan sinar ultra violet

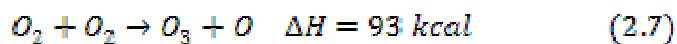
(www.ozonesolutions.com)

Pada teknologi pembentukan ozon dengan sinar ultra violet (UV), reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



Reaksi di atas berlangsung apabila cahaya yang diabsorpsi oleh oksigen berada pada rentang panjang gelombang yang lebih pendek dari 842 nm (Volman, 1963; McNesby, 1964).

Pembentukan ozon juga dapat terjadi melalui reaksi berikut:



Reaksi tersebut berlangsung apabila cahaya yang diabsorpsi oksigen berada pada panjang gelombang 307 nm (Volman, 1963; McNesby, 1964).

Keuntungan penggunaan teknologi ini adalah, konstruksinya yang lebih sederhana dibanding teknologi *corona discharge*. Biayanya pun lebih ekonomis. Tetapi konsentrasi ozon yang dihasilkan lebih sedikit dari *corona discharge*.



### 2.3. Penggunaan Ozon

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.

#### 2.3.1. Disinfeksi air minum

Ozon merupakan oksidator yang amat kuat. Sifat oksidator ini membuat ozon secara luas digunakan dalam proses pengolahan air minum. Ozon pertama kali digunakan pada tahun 1906 sebagai senyawa disinfeksi dalam distribusi air minum oleh Nies dari Prancis. Penggunaan ozon pada instalasi pengolahan air minum tersebut ditujukan untuk mengendalikan bau, rasa, dan zat-zat yang dapat menimbulkan warna pada air. Selanjutnya, penggunaan ozon dalam pengolahan air minum ini mulai diikuti oleh negara-negara Eropa (Jerman, Belanda, Swiss, dan Canada), Asia, dan Amerika.

Di Asia, pemanfaatan ozon untuk mengolah air minum pertama kali dilakukan di Amagasaki, Jepang, pada tahun 1973. Namun, pemanfaatan pada waktu tersebut masih terbatas hanya untuk menghilangkan bau saja. Di Amerika, pemanfaatan ozon termasuk lambat, ozon dipergunakan pertama kali pada pusat pengolahan air di Los Angeles pada tahun 1987.

#### 2.3.2. Pengolahan Limbah Cair

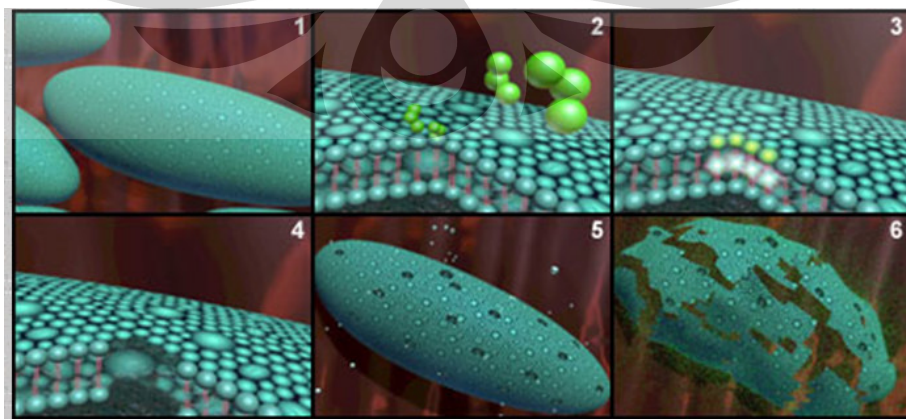
Luasnya ruang lingkup penggunaan ozon ini tidak terlepas dari sifat ozon yang dikenal memiliki sifat radikal sehingga mudah bereaksi dengan senyawa disekitarnya. Ozon telah terbukti sangat efektif digunakan untuk menyisihkan limbah cair yang mengandung senyawa fenolik (Bismo, et.al., 2000).

Ozon dengan kemampuan oksidasinya dapat menguraikan berbagai macam senyawa organik dan anorganik beracun yang terkontaminasi dalam air. Dalam praktiknya ozon dapat menghancurkan senyawa anorganik seperti senyawa sulfida, sianida, dan nitrit. Ozon dapat mengurangi kompleksitas logam berat, menghilangkan besi, mangan, bau, rasa, dan padatan terlarut dalam air. Ozon juga dapat memecah ikatan rangkap dua, rangkap tiga, bahkan aromatik. Tetapi reaktivitasnya rendah untuk senyawa alifatik dengan ikatan tunggal (Langlais, et.al., 1991). Ozon juga tidak dapat digunakan secara luas untuk mendegradasi kontaminan organik karena selektifitasnya yang rendah, juga dalam mendegradasi jenis mikropolutan lain yang tahan terhadap ozon.

### 2.3.3. Pemusnahan Bakteri Pathogen dan Virus

Secara mikroskopis, bakteri berukuran amat kecil dan merupakan satu sel tunggal saja. Tubuh bakteri dilapisi oleh dinding membran. Keberadaan ozon akan mengganggu metabolisme sel bakteri, seperti menghambat dan menghalangi operasi sistem kontrol enzimatis. Jumlah ozon yang cukup akan merusak membran sel yang berlanjut menuju penghancuran bakteri.

Gambar 2.7. berikut menunjukkan tahapan penghancuran sel bakteri oleh ozon. Pada gambar tersebut, awalnya tampak sebuah sel bakteri yang masih utuh. Kemudian molekul-molekul ozon datang dan berkontak dengan dinding bakteri. Selanjutnya molekul ozon menembus dinding bakteri dan menciptakan lubang pada dinding bakteri tersebut. Pada akhirnya sel bakteri menjadi hancur.



**Gambar 2.7.** Penghancuran sel bakteri oleh molekul ozon

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

Virus juga berukuran amat kecil. Tidak seperti bakteri, virus mengganda hanya di dalam sel induk. Virus mengubah protein sel induk menjadi protein untuk mereka. Ozon menghancurkan virus dengan berdifusi dari lapisan protein menuju inti *nucleic acid*, yang mengakibatkan kerusakan RNA virus. Pada konsentrasi yang lebih tinggi, ozon merusak kapsid sehingga mempengaruhi struktur DNA/RNA.

Melalui proses oksidasinya, ozon mampu memusnahkan berbagai macam mikroorganisme seperti bakteri *Escherichia coli*, *Salmonella enteritidis*, serta banyak bakteri patogen, virus, dan jamur. Beberapa jenis bakteri patogen dan virus yang dapat dimusnahkan dengan ozon beserta dosis ozon yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.3. dan Tabel 2.4. Jumlah dosis yang digunakan bersifat spesifik, bergantung jenis bakteri. Apabila dosis yang diberikan kurang sedikit saja dari dosis yang dianjurkan, bakteri akan tetap hidup, tidak terpengaruh oleh keberadaan ozon tersebut.

**Tabel 2.3.** Bakteri patogen dan dosis ozon yang dibutuhkan

Bakteri Patogen	Dosis Ozon
Aspergillus Niger	1,5 mg/L hingga 2 mg/L
Bacillus	0,2 mg/L dalam 30 detik
Bacillus Anthracis	Mudah dihancurkan dengan sedikit ozon
Clostridium Botulinum (spora)	0,4 mg/L hingga 0,5 mg/L
Diphtheria Pathogen	1,5 mg/L hingga 2 mg/L
Escherichia Coli Bacteria (dari feces)	0,2 mg/L dalam 30 detik
E-coli (pada air bersih)	99,99% hancur pada dosis 0,25 mg/L dalam 1,6 menit
E-coli (pada air kotor/air limbah)	99,9% hancur pada dosis 2,2 mg/L dalam 19 menit
Penicillium Bacteria	Mudah dihancurkan dengan sedikit ozon
Salmonella Bacteria	Mudah dihancurkan dengan sedikit ozon
Streptococcus Bacteria	0,2 mg/L dalam 30 detik
Vibrio Cholera	Mudah dihancurkan dengan sedikit ozon

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

**Tabel 2.4.** Beberapa jenis virus dan dosis ozon yang dibutuhkan

Bakteri Patogen	Dosis Ozon
Virus Hepatitis A	99,5% berkurang pada dosist 0,25 mg/L dalam 2 detik pada larutan buffer fosfat
Virus Herpes	0,1 mg/L hingga 0,8 mg/L dalam waktu kurang dari 30 detik
Virus Influenza	0,4 hingga 0,5 mg/L
Virus Poliomyelitis	99,9% hancur pada dosis 0,3-0,4 mg/L dalam 3-4 menit
Virus Stomatitis	0,1 mg/L hingga 0,8 mg/L dalam waktu kurang dari 30 detik
Virus Vesicular	0,1 mg/L hingga 0,8 mg/L dalam waktu kurang dari 30 detik

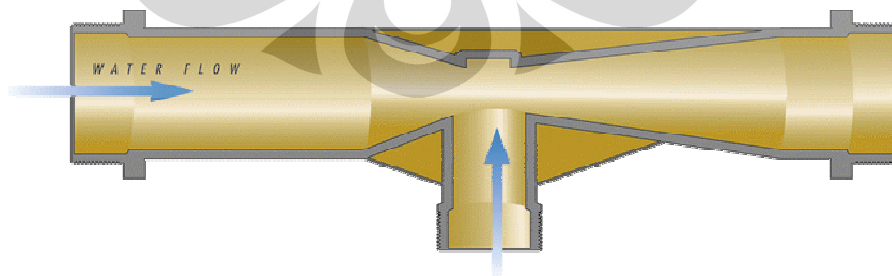
(Sumber: <http://www.ozoneapplications.com>)

## 2.4. Injeksi Ozon dalam Air

Injeksi ozon dalam air dapat dilakukan dengan menggunakan injektor venturi dan difuser gelembung. Baik injektor venturi maupun difuser gelembung bekerja berdasarkan prinsip perbedaan tekanan.

### 2.4.1. Injektor Venturi

Pada injektor venturi, perbedaan tekanan antara masukan dengan keluaran akan menciptakan kondisi vakum pada badan injektor yang akan menginisiasi pengisapan pada *suction port*. Model injektor venturi dapat dilihat pada Gambar 2.8.



**Gambar 2.8.** Injektor venturi

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

Keunggulan penggunaan injektor ini antara lain diperolehnya laju perpindahan massa ozon–air yang tinggi (hingga 90%), efisiensi yang cenderung konstan, konstruksinya yang sederhana, dan tidak membutuhkan aliran listrik. 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*.

Cara kerja injektor ini adalah ketika cairan operasi bertekanan masuk ke dalam injektor, aliran cairan akan terhisap menuju arah ruang injeksi dan berubah menjadi aliran dengan kecepatan yang sangat tinggi. Peningkatan kecepatan ini akan menurunkan tekanan. Penurunan tekanan memungkinkan ozon untuk masuk ke dalam *suction port* dan ikut terbawa ke dalam aliran. Kemudian saat aliran dengan kecepatan tinggi bergerak menuju keluaran injektor, kecepatannya akan berkurang. Penurunan kecepatan ini menyebabkan terjadinya kenaikan tekanan. Namun besar tekanan keluaran ini masih lebih kecil dari besar tekanan masukan injektor. Bertemunya ozon dengan ruang vakum menyebabkan terbentuknya ribuan gelembung mikro seperti pada Gambar 2.9.



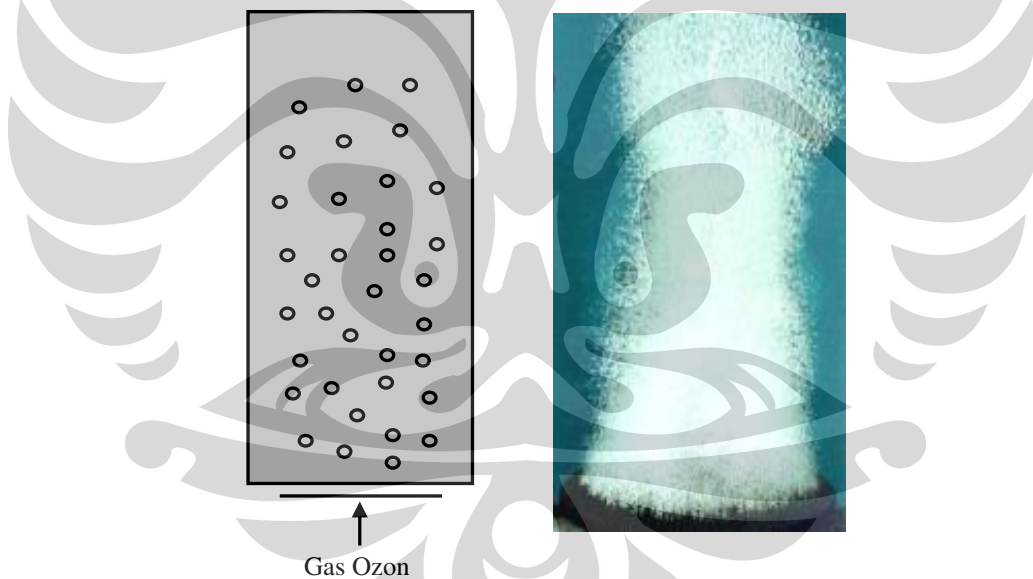
**Gambar 2.9.** Udara terhisap masuk ke dalam injektor venturi dan ribuan gelembung kecil terbentuk setelah *suction port*

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

### 2.4.2. Difuser Gelembung

Difuser gelembung biasanya memiliki bentuk seperti piringan. Difuser ini bekerja dibawah tekanan dan menghasilkan gelembung. Keuntungan penggunaan diffuser ini adalah konstruksinya yang sederhana dan cocok digunakan untuk sistem pengolahan air dengan volume yang besar. Kelemahannya adalah efisiensinya bergantung pada kedalaman kolom kontak dan ukuran gelembung.

Pada difuser gelembung, laju perpindahan massa ozon–air lebih kecil dibandingkan pada injektor venturi, yaitu hanya berkisar 10-15%. Nilai efisiensinya akan meningkat seiring bertambahnya kedalaman. Difuser ini membutuhkan pompa udara untuk mentransfer ozon dari bawah permukaan difuser. Selain itu, lubang-lubang pada diffuser dapat tersumbat sehingga akan menurunkan efisiensi perpindahan massa. Bentuk diffuser Gelembung dapat dilihat pada Gambar 2.10.



**Gambar 2.10.** Difuser gelembung

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

## 2.5. Perpindahan Massa Antar Fasa

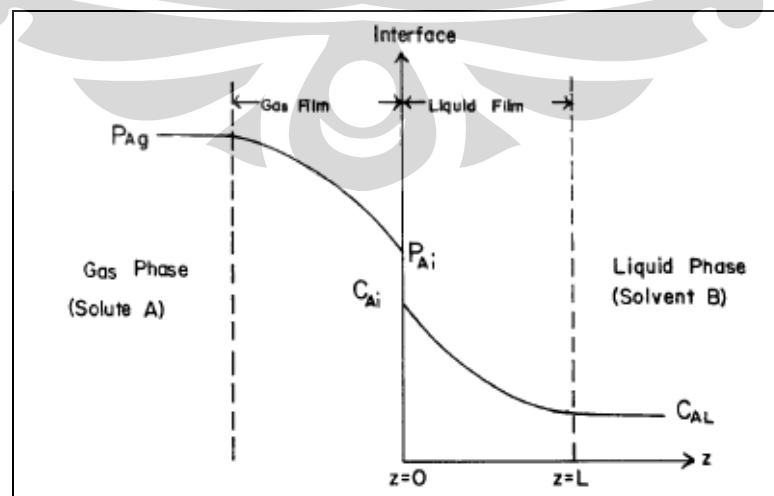
Menurut Whitman, perpindahan massa antar fasa terdiri atas tiga tahapan, yaitu:

- 1) Perpindahan massa dari kondisi *bulk* di suatu fasa ke permukaan *interface*
- 2) Perpindahan massa melintasi permukaan *interface* menuju ke fasa lainnya
- 3) Perpindahan massa dari permukaan *interface* ke kondisi *bulk* fasa lainnya

Teori ini memiliki dua asumsi dimana laju perpindahan massa antar dua fasa dikendalikan oleh laju difusi melalui fasa pada salah satu sisi *interface* dan tidak ada tahanan yang menahan perpindahan *interface* pada permukaan *interface*.

Perpindahan massa antara dua fasa, dalam hal ini antara fasa gas dan cair, dihasilkan dari adanya gradien konsentrasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11. Dalam peristiwa absorpsi gas oleh cairan, dapat diasumsikan komposisi yang seragam dipertahankan oleh sebagian besar gas karena pergerakan secara turbulen. Gambar 2.11. menjelaskan bahwa pada dua lapisan film, *gas film* dan *liquid film*, terjadi difusi melalui lapisan laminar di antara *gas bulk-interface* dan *interface-liquid bulk*.

Pada Gambar 2.11. perbedaan tekanan parsial ( $P_{Ag} - P_{Ai}$ ) merupakan gaya pendorong yang diperlukan untuk perpindahan komponen A dari kondisi *gas bulk* ke permukaan *interface*. Sedangkan perbedaan konsentrasi ( $C_{Ai} - C_{AL}$ ) merupakan gaya pendorong yang diperlukan untuk melanjutkan perpindahan komponen A ke fasa cair.



**Gambar 2.11.** Perpindahan massa antara fasa gas dan fasa cair

Ketika gas datang mendekati batas fasa liquid, gas tersebut akan terbawa oleh difusi Eddy ke dalam turbulensi liquid, dan tercampur dengan liquid. Laju difusi pada keadaan *steady-state* dari *bulk gas* ke *interface* sebanding dengan laju dari *interface* ke *bulk liquid*, yang dinyatakan dengan:

$$N_A = k'_G (P_{A_g} - P_{A_i}) = k'_L (C_{A_i} - C_{A_L}) \quad (2.8)$$

dimana:

$k'_G$  = koefisien perpindahan massa sisi gas untuk absorpsi fisika  
(mol/cm<sup>2</sup>.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 sisi *liquid* untuk absorpsi fisika  
(mol/cm<sup>2</sup>.sec.atm)

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

$C_{A_L}$  = konsentrasi solute A pada fase liquid

Besarnya perpindahan massa yang terjadi dalam suatu sistem gas-cair biasa diwakili dengan koefisien perpindahan massa fasa cair ( $k_L a$ ). Koefisien perpindahan massa fasa cair ( $k_L a$ ) merupakan suatu besaran yang menyatakan banyaknya massa gas yang berpindah atau terlarut ke dalam fasa cair per satuan waktu.

Dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh para pakar perpindahan massa yang meneliti perpindahan massa di dalam kolom gelembung, dapat diketahui faktor-faktor yang mempengaruhi harga  $k_L a$ , yaitu:

a. *Kecepatan superfisial gas*

Kenaikan kecepatan superfisial gas akan meningkatkan harga  $k_L a$ . Biasanya peningkatan harga  $k_L a$  adalah linier terhadap kenaikan kecepatan superfisial gas. Dengan meningkatnya kecepatan superfisial gas, maka energi kinetik fasa gas makin bertambah sehingga memperbesar massa gas yang dapat terlarut dalam fasa cair.

b. *Kecepatan superfisial fasa cair*

Sebagian pakar menyimpulkan dari hasil penelitian mereka bahwa kecepatan superfisial cairan tidak mempengaruhi  $k_L a$ , sebagian lagi menyimpulkan



bahwa sampai pada kecepatan tertentu akan menurunkan harga  $k_{LA}$  karena waktu tinggal air dalam kolom yang makin berkurang; dan mulai kecepatan tertentu akan kembali menaikkan harga  $k_{LA}$  akibat efek turbulensi dari aliran fasa cair (Cuenca, et. al., 1981; Deckwer, 1974; Treybal, 1984).

c. *Ukuran gelembung gas*

Hal ini berkaitan dengan jenis distributor gas yang digunakan, sehingga menghasilkan *hold-up gas* yang berbeda dengan distribusi ukuran gelembung gas yang berbeda pula. Ukuran gelembung yang kecil cenderung meningkatkan harga  $k_{LA}$  karena luas antarmuka yang makin meningkat. Ukuran gelembung gas juga dipengaruhi oleh sifat-sifat fisik fluida.

d. *Konsentrasi elektrolit*

Bila konsentrasi elektrolit dalam fasa cair bertambah, maka harga  $k_{LA}$  akan menurun. Hal ini dapat diterangkan dengan mengasumsikan adanya *electric double layer* pada permukaan gas–cair sehingga meningkatkan tegangan antar permukaan yang membuat perpindahan massa antar permukaan lebih sulit.

e. *Temperatur sistem*

Kelarutan gas dalam fasa cair umumnya akan berkurang dengan naiknya temperatur sistem. Ini berarti kenaikan temperatur pada sistem gas–cair akan menurunkan  $k_{LA}$ .

## 2.6. Perpindahan Massa Ozon–Air

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

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

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

Pada penelitian yang dilakukan oleh Min-Tian Gao et.al., untuk memperoleh  $k_d$ , ozon diinjeksikan dengan menggunakan kontaktor Karman

hingga konsentrasi ozon dalam air menjadi jenuh. Kemudian nilai  $k_d$  dihitung berdasarkan penurunan konsentrasi ozon dalam air dengan fungsi waktu yang dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\frac{dC_{O_3}}{dt} = -k_d C_{O_3} \quad (2.10)$$

dimana  $C$  merupakan konsentrasi ozon terlarut. Berdasarkan perhitungan yang dilakukan, diperoleh 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 2.5.

**Tabel 2.5.** Perbandingan nilai  $k_L a$  antara ozonasi dengan Kontaktor Karman dengan kontaktor lainnya

Comparison between the Karman contactor with the other contactors reported					
Number	1	2	3	4	5
Volume of contactors [L]	97	1.5	1.32	1.32	0.7
Volume of liquid treated [L]	97	1.5	1.32	1.32	10
$k_L a$ reported ( $\text{min}^{-1}$ )	0.18–1.2	0.38–0.82	0–1.5	0.54	0.5–1.5
$k_L a$ corrected for 100 L liquid ( $\text{min}^{-1}$ )	0.17–1.15	0.006–0.012	0–0.02	0.007	0.05–0.15

(1) Tall bubble column (i.d.: 0.15 m, height: 5.5 m). Experimental conditions: pH 7–8;  $[O_3] = 8\text{--}60 \text{ g/m}^3$ ;  $v_G = 0.3\text{--}1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $v_L = 0.10\text{--}0.45 \text{ m}^3/\text{h}$ ; liquid phase: water. (2) Cocurrent upflow packed bed reactor containing silica gel. Experimental conditions: pH 6;  $[O_3] = 30 \text{ g/m}^3$ ;  $v_G = 5\text{--}10 \text{ m}^3/\text{h}$ ; height of fixed bed: 0.5 m; liquid phase: water. (3) Electrostatic sprayer. Experimental conditions:  $[O_3] = 10 \text{ g/m}^3$ ;  $v_G = 2.1 \text{ mL/min}$ ; voltage applied:  $V = 0\text{--}4 \text{ kV}$ ; liquid phase: water. (4) Column with medium pore-size bubble diffuser. Experimental conditions were the same as those of reactor 3 with the exception of no voltage applied. (5) The Karman contactor. Experimental conditions: pH 7;  $[O_3] = 10 \text{ g/m}^3$ ;  $v_G = 1\text{--}4 \text{ L/min}$ ;  $v_L = 11\text{--}14 \text{ L/min}$ ; liquid phase: water.

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

Dengan demikian, pengaruh  $k_d$  tidak ikut dilibatkan dalam penurunan persamaan  $k_L a$ , sehingga persamaan (2.6) menjadi

$$\frac{dC_{O_3}}{dt} = k_L a (C_{O_3}^* - C_{O_3}) \quad (2.11)$$

Persamaan inilah yang banyak digunakan dalam aplikasi perhitungan koefisien perpindahan massa ozon–air pada beberapa jenis media kontak gas–liquid seperti karman kontaktor, kolom gelembung (*bubble column*), dan sebagainya. Persamaan ini juga berlaku pada ukuran gelembung baik 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:

$$\frac{dC_{O_3}}{(C_{O_3}^* - C_{O_3})} = k_L a \cdot dt \quad (2.12)$$

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

$$\int_0^C \frac{dC_{O_3}}{(C_{O_3}^* - C_{O_3})} = k_L a \int_0^t dt \quad (2.13)$$

$$\ln \left( \frac{C_{O_3}^*}{C_{O_3}^* - C_{O_3}} \right) = k_L a \cdot t \quad (2.14)$$

Persamaan (2.11) dapat digunakan untuk mencari koefisien perpindahan massa. Tetapi untuk mencari  $k_L a$  dengan persamaan tersebut, perlu diketahui nilai konsentrasi ozon dalam air baik dalam keadaan jenuh maupun pada selang waktu tertentu. Hal ini sulit dilakukan karena ozon mudah sekali terdekomposisi menjadi oksigen.

Terdapat cara lain dalam menentukan besar koefisien perpindahan massa ozon. Cara ini menggunakan metode yang dilakukan secara tidak langsung, yaitu dengan menentukan koefisien perpindahan massa oksigen ( $k_L a_{O_2}$ ) untuk memperoleh koefisien perpindahan massa ozon ( $k_L a_{O_3}$ ). Persamaan yang menunjukkan hubungan keduanya adalah sebagai berikut:

$$k_L a_{O_3} = \left( \frac{D_{O_3}}{D_{O_2}} \right)^n \cdot k_L a_{O_2} \quad (2.15)$$

Dimana  $D_{O_3}$  merupakan koefisien difusi ozon yang bernilai  $1,26 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  pada  $T = 20^\circ \text{C}$  (Matrosov et.al., 1978),  $D_{O_2}$  merupakan koefisien difusi oksigen yang bernilai  $2,025 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  pada  $T = 20^\circ \text{C}$  (St. Denis, 1971), dan  $n$  merupakan faktor yang berhubungan dengan hidrodinamika reaktor. Besar  $n$  bervariasi mulai dari 0,5 hingga 1,0. Untuk ozonasi dalam kolom gelembung,  $n$  biasa diasumsikan bernilai 1,0. Dengan demikian, persamaan (2.12) menjadi:

$$k_L a_{O_3} = 0,622 k_L a_{O_2} \quad (2.16)$$

Persamaan (2.13) tersebut valid pada kondisi  $T = 20^\circ\text{C}$ . Temperatur mempengaruhi semua sifat-sifat fisika yang relevan dalam perpindahan massa seperti viskositas, densitas, tegangan permukaan, dan difusivitas. Pada temperatur yang berbeda, dapat digunakan suatu faktor empiris yang sering digunakan dalam perhitungan yaitu faktor *theta*,  $\Theta$ .

$$k_{LA20} = k_{LAT} \cdot \Theta^{(20-T)} \quad (2.17)$$

dimana:

$k_{LA20}$  =  $k_{LA}$  pada  $20^\circ\text{C}$

$k_{LAT}$  =  $k_{LA}$  pada temperatur  $T$  ( $^\circ\text{C}$ )

$\Theta$  = faktor koreksi temperatur

Menurut [Strenstrom & Gilbert \(1981\)](#), nilai  $\Theta$  bervariasi mulai dari 1,008 hingga 1,047; dan disarankan menggunakan nilai  $A$  dengan keakuratan  $\pm 5\%$ . Nilai  $k_{LA, O_2}$  sendiri dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = k_{LA} (C_{O_2}^* - C_{O_2}) \quad (2.18)$$

## 2.7. Kelarutan Ozon dalam Air

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.

Kelarutan ozon dalam air secara umum dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti:

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

Menurut Langlais et.al. (1991), konsentrasi ozon terlarut dalam keadaan jenuh,  $C_s$ , dapat dijabarkan melalui hubungan kelarutan ( $S$ ) ataupun koefisien absorpsi ( $\beta$ ). Rasio kelarutan merupakan rasio antara volume gas dengan volume cairan pada suhu dan tekanan di bawah konsiderasi, serta pada nilai kesetimbangan gas pada tekanan 1 atm.

$S$  disebut juga rasio kelarutan, yang merupakan konsentrasi relatif ozon dalam air (mg/L) terhadap ozon dalam gas (mg/L). Sementara koefisien absorpsi ( $\beta$ ) merupakan besarnya volume gas yang dilarutkan pada keadaan setimbang oleh volume cair tertentu pada temperatur dan tekanan parsial gas (atm).

Kelarutan ozon dalam air mengikuti hukum Henry. Ini berarti nilai  $C_s$  sebanding dengan tekanan ozon pada suhu yang diberikan. Konsentrasi ozon terlarut dalam keadaan jenuh pada kondisi termodinamika ideal adalah sebagai berikut:

$$C_s = \beta \cdot M \cdot P_\gamma \quad (2.19)$$

dimana:

$C_s$  = konsentrasi ozon terlarut dalam keadaan jenuh ( $\text{kg/m}^3$ )

$\beta$  = koefisien absorpsi

$M$  = molaritas zat (molar)

$P_\gamma$  = tekanan gas (atm)

Kelarutan ozon amat dipengaruhi oleh temperatur. Kelarutan ozon akan rendah pada temperatur tinggi. Beberapa nilai kelarutan ozon dalam air pada konsentrasi ozon dan temperatur tertentu dapat dilihat pada Tabel 2.6.

**Tabel 2.6.** Kelarutan ozon dalam air pada temperatur tertentu

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

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

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

## 2.8. Dekomposisi Ozon

Ozon merupakan senyawa yang tidak stabil. Setelah pembentukannya, ozon akan dengan mudah terdekomposisi kembali membentuk oksigen. Di dalam air, ozon menjadi tidak stabil dan secara cepat terdekomposisi melalui serangkaian mekanisme reaksi (Staelin, Hoigné, dan Bühler, 1984) yang dapat dilihat pada Tabel 2.7. Persamaan pada Tabel 2.7. tersebut berlaku bagi semua sistem yang melibatkan ozon dan air tanpa adanya pengaruh senyawa lain. Keberadaan senyawa kimia lain memiliki pengaruh yang besar terhadap reaksi tersebut.

Tabel 2.7. Mekanisme reaksi dekomposisi ozon dalam air bersih

Reaksi	Konstanta reaksi	Nomor reaksi
Inisiasi		
$O_3 + OH^- \xrightarrow{k_{i1}} HO_2^* + O_2^{*-}$	$70 \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.20)
Propagasi		
$HO_2^* \xrightarrow{k_1} O_2^{*-} + H^+$	$7,9 \times 10^5 \text{ sec}^{-1}$	(2.21)
$O_2^{*-} + H^+ \xrightarrow{k_2} HO_2^*$	$5,0 \times 10^{10} \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.22)
$O_3 + O_2^{*-} \xrightarrow{k_3} O_3^{*-} + O_2$	$1,6 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.23)
$O_3^{*-} + H^+ \xrightarrow{k_4} HO_3^*$	$5,2 \times 10^{10} \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.24)
$HO_3^* \xrightarrow{k_5} O_3^{*-} + H^+$	$3,3 \times 10^2 \text{ sec}^{-1}$	(2.25)
$HO_3^* \xrightarrow{k_6} HO^* + O_2$	$1,1 \times 10^5 \text{ sec}^{-1}$	(2.26)
$O_3 + HO^* \xrightarrow{k_7} HO_4^*$	$2,0 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.27)

$HO_4^{\bullet} \xrightarrow{k_{T1}} HO_2^{\bullet} + O_2$	$2,8 \times 10^4 \text{ sec}^{-1}$	(2.28)
--	------------------------------------	--------

**Tabel 2.7.** Mekanisme reaksi dekomposisi ozon dalam air bersih (lanjutan)

Reaksi	Konstanta reaksi	Nomor reaksi
Terminasi		
$HO_4^{\bullet} + HO_4^{\bullet} \xrightarrow{k_{T2}} H_2O_2^{\bullet} + 2O_3$	$5,0 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.29)
$HO_4^{\bullet} + HO_3^{\bullet} \xrightarrow{k_{T3}} H_2O_2^{\bullet} + O_2 + O_3$	$5,0 \times 10^9 \text{ M}^{-1}\text{sec}^{-1}$	(2.30)

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

Di dalam air murni, seperti dijelaskan dalam sejumlah studi, proses auto-dekomposisi pada ozon diinisiasi oleh keberadaan ion hidroksida dan dipropagasi dengan keberadaan spesi radikal intermediet seperti radikal hidroksil ( $OH^{\bullet}$ ), superoksida ( $HO_2^{\bullet}/O_2^{\bullet-}$ ), dan ozonida ( $HO_3^{\bullet}/O_3^{\bullet-}$ ) (Staehelin, Hoigné, dan Bühler, 1984).

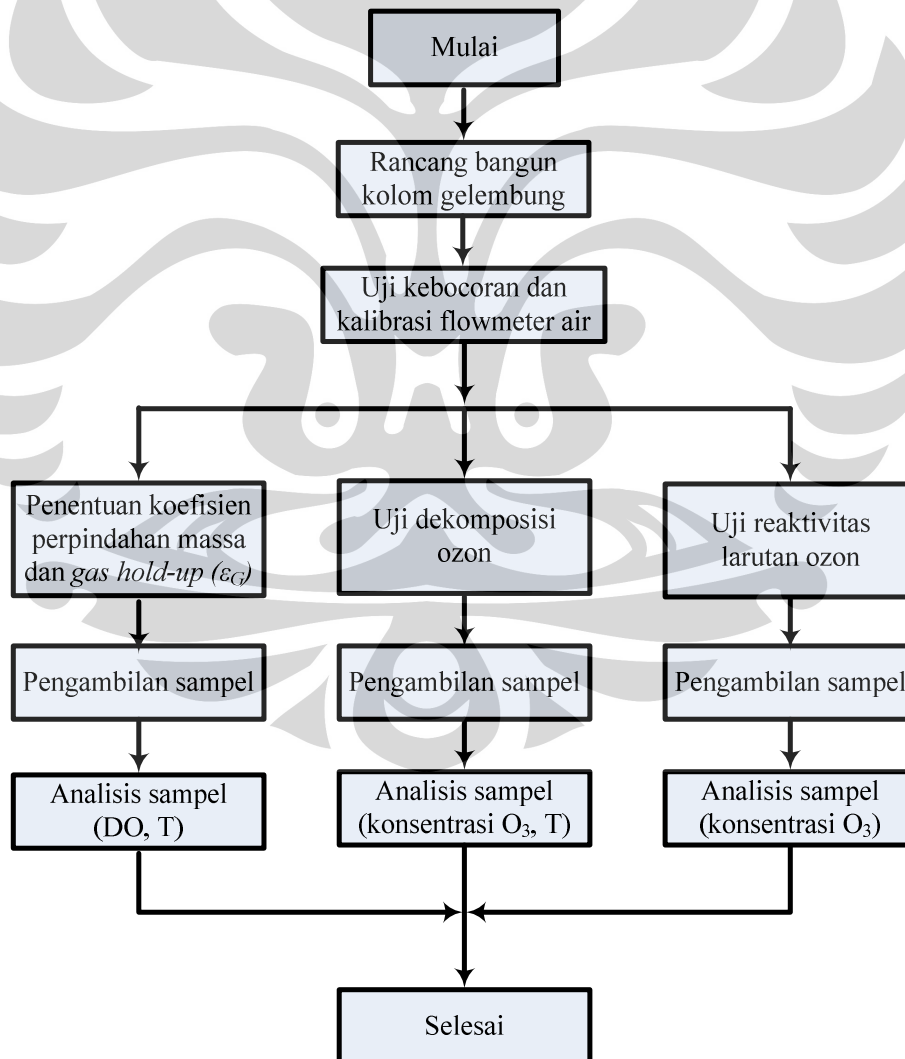
Laju dekomposisi ozon akan dipengaruhi oleh temperatur dan pH. Ozon akan lebih mudah terdekomposisi pada temperatur yang lebih tinggi. Peningkatan pH juga memicu terjadinya dekomposisi.

## BAB 3 METODE PENELITIAN

Pembahasan pada bab ini terbagi menjadi enam bagian utama, yaitu: diagram alir penelitian, deskripsi rancangan kolom gelembung dan peralatan lainnya, penelitian yang dilakukan, prosedur penelitian, prosedur analisis sampel, dan pengolahan data penelitian.

### 3.1. Diagram Alir Penelitian

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



**Gambar 3.1.** Diagram alir penelitian



### 3.2. Deskripsi Rancangan Kolom Gelembung dan Peralatan Lainnya

Sistem peralatan ini terdiri dari tiga peralatan utama: ozonator, injektor, dan kolom gelembung.

#### 3.2.1. Ozonator

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

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

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

Di dalam ozonator, campuran gas (nitrogen, oksigen, dan ozon) akan mengalir dari bagian atas ke bagian bawah ozonator, sedangkan air pendingin akan mengalir dari bawah ke atas agar waktu kontak dalam perpindahan energi panas lebih besar sehingga temperatur ozonator tidak terlalu tinggi dan dijaga agar relatif konstan.

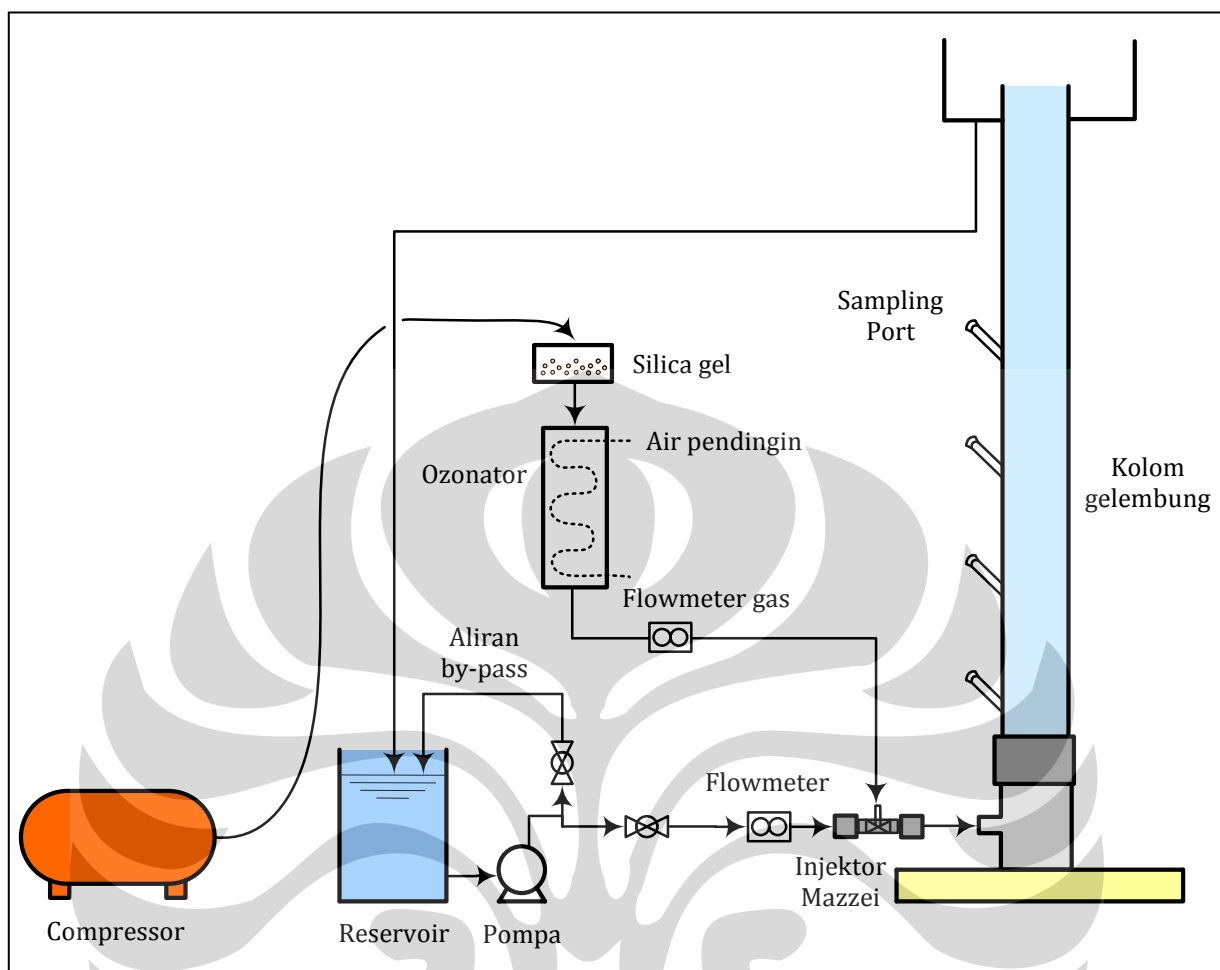
### 3.2.2. Injektor

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

### 3.2.3. Kolom gelembung

Kolom gelembung dirancang untuk mengamati perpindahan massa antara ozon dan air. Kolom gelembung dibuat dari bahan kaca untuk memudahkan pengamatan. Kolom gelembung ini memiliki diameter 5,5 cm dan tinggi 70 cm. Kolom dilengkapi dengan *sampling port* untuk pengambilan sampel pada titik-titik tertentu dan wadah penampung di bagian atas kolom untuk memudahkan sirkulasi aliran air ke *reservoir*. Sistem sirkulasi ini dibuat karena injektor ozon yang digunakan hanya dapat bekerja pada aliran sirkulasi. Penyusunan kolom gelembung beserta peralatan lainnya dapat dilihat pada Gambar 3.2.

Pada Gambar 3.2 di atas dapat dilihat keberadaan aliran *by-pass*. Aliran ini dirancang untuk mengurangi laju alir air dari pompa yang terlalu besar (25 L/menit) karena dalam studi perpindahan massa laju alir air yang terlalu besar menyebabkan waktu kontak ozon–air terlalu singkat. Pompa yang digunakan terbuat dari bahan *stainless steel* karena tahan terhadap ozon.



**Gambar 3.2.** Prototipe kolom gelembung beserta kelengkapannya

### 3.3. Penelitian yang Dilakukan

Cakupan dalam penelitian ini antara lain untuk menentukan koefisien perpindahan massa dan *hold-up gas* pada penggunaan gelembung mikro, melakukan uji dekomposisi ozon pada kolom gelembung, dan melakukan uji reaktivitas larutan ozon terhadap KI dengan penggunaan gelembung mikro. Untuk penentuan koefisien perpindahan massa pada penggunaan gelembung mikro, hasilnya akan dibandingkan dengan hasil pada penggunaan gelembung konvensional.

### 3.4. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan dibagi berdasarkan jenis penelitian yang dilakukan.

#### 3.4.1. Penentuan Koefisien Perpindahan Massa dan *Hold-up Gas*

Dalam menentukan koefisien perpindahan massa dan *hold-up gas*, peralatan dan bahan yang dibutuhkan, serta prosedur yang dilakukan dijabarkan sebagai berikut.

##### 3.4.1.1. Peralatan

Peralatan yang digunakan:

- 1) Sistem peralatan kolom gelembung
- 2) Stop watch
- 3) Gelas beaker
- 4) DO meter

##### 3.4.1.2. Bahan

Bahan yang digunakan:

- 1) Aquades

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

- 2) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 18 M

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 18 M berfungsi untuk menjaga pH air pada kisaran 2,1. Hal ini dilakukan untuk mencegah terjadinya dekomposisi ozon pada air.

##### 3.4.1.3. Prosedur

Prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- 1) Mengisi reservoir dengan aquades sebanyak 10 liter
- 2) Menambahkan H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 18 M sebanyak 100 ml ke dalam reservoir
- 3) Menyalakan pompa

- 4) Mengatur valve menuju sistem, dan valve *by-pass* agar aliran air tersirkulasi dengan baik sesuai laju alir yang nanti divariasikan
- 5) Menginjeksikan ozon ke dalam air dengan laju alir yang divariasikan
- 6) Mengambil sampel air di port 1 setiap selang waktu tertentu (setiap 3 menit selama 60 menit)
- 7) Mengukur kadar oksigen terlarut (*dissolved oxygen / DO*) dan temperatur pada sampel tersebut
- 8) Mencatat level ketinggian air dalam kolom gelembung pada saat proses berlangsung
- 9) Mematikan pompa dan mencatat level ketinggian akhir air dalam kolom
- 10) Melakukan hal yang sama untuk beberapa variasi seperti laju alir air dan dosis ozon

#### **3.4.2. Uji Dekomposisi Ozon**

Dalam melakukan uji dekomposisi ozon, peralatan dan bahan yang dibutuhkan, serta prosedur yang dilakukan dijabarkan sebagai berikut.

##### **3.4.2.1. Peralatan**

Peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut:

- 1) Sistem peralatan kolom gelembung
- 2) *Stop watch*
- 3) *Conductivity meter*
- 4) Gelas beaker

##### **3.4.2.2. Bahan**

Bahan yang digunakan adalah:

- 1) Aquades sebanyak 10 liter
- 2) KOH

##### **3.4.2.3. Prosedur**

Prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- 1) Mengisi reservoir dengan aquades sebanyak 10 liter

- 2) Menyalakan pompa
- 3) Mengatur valve menuju sistem, dan valve *by-pass* agar aliran air tersirkulasi dengan baik pada kecepatan 4 L/menit
- 4) Mengukur pH awal sistem
- 5) Menyalakan ozonator selama 40 menit
- 6) Mengambil sampel air di port 1
- 7) Mengukur konduktivitas pada sampel dengan *conductivity meter*
- 8) Mengambil sampel sebanyak 100 ml setiap selang waktu tertentu
- 9) Mematikan pompa
- 10) Melakukan hal yang sama untuk beberapa variasi pH (7 dan 11)

### **3.4.3. Uji Reaktivitas Larutan Ozon**

Dalam uji reaktivitas larutan ozon, peralatan dan bahan yang dibutuhkan, serta prosedur yang dilakukan dijabarkan sebagai berikut.

#### **3.4.3.1. Peralatan**

Peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut:

- 1) Sistem peralatan kolom gelembung
- 2) Stop watch
- 3) Gelas beaker

#### **3.4.3.2. Bahan**

Bahan yang digunakan adalah:

- 1) Aquades sebanyak 10 liter
- 2) KI

#### **3.4.3.3. Prosedur**

Prosedur penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- 1) Mengisi reservoir dengan aquades
- 2) Menyalakan pompa
- 3) Mengatur valve menuju sistem, dan valve *by-pass* agar aliran air tersirkulasi dengan baik pada kecepatan 4 L/menit

- 4) Menginjeksikan ozon ke dalam air dengan laju alir yang divariasikan
- 5) Mengambil sampel air di port 1, 2, dan 3 setiap selang waktu tertentu sebanyak 25 ml
- 6) Mengukur kadar ozon terlarut pada sampel dengan metode iodometri
- 7) Mematikan pompa

### **3.5. Prosedur Analisis Sampel**

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai prosedur yang dilakukan dalam menganalisis sampel pada penelitian penentuan koefisien perpindahan massa dan *hold-up gas*, uji dekomposisi ozon, dan uji reaktivitas larutan ozon.

#### **3.5.1. Penentuan Koefisien Perpindahan Massa dan *Hold-up Gas***

Sampel yang diambil berupa air dalam kolom gelembung bagian bawah, tengah, dan atas. Sampel diambil dengan menggunakan suntikan yang dimasukkan melewati *sampling port*. Sampel tersebut akan diukur kandungan *dissolved oxygen*-nya (DO) dan temperaturnya. Sampel diambil dalam selang waktu tertentu untuk setiap variasi sistem yang dilakukan.

#### **3.5.2 Uji Dekomposisi Ozon**

Sampel yang diambil berupa air dalam kolom gelembung bagian bawah (port 1). Sampel dianalisis besar konduktivitasnya dengan menggunakan *conductivity meter*.

#### **3.5.3. Uji Reaktivitas Larutan Ozon terhadap KI**

Sampel yang diambil berupa air dalam kolom gelembung bagian bawah (port 1), tengah (port 2), dan atas (port 3). Sampel dianalisis dengan metode titrasi iodometri. Adapun peralatan, bahan, dan prosedur yang dilakukan pada titrasi iodometri adalah sebagai berikut.

##### **3.5.3.1. Peralatan**

Peralatan yang digunakan:

- 1) Buret 50 ml

- 2) Statip
- 3) Beaker glass 50 ml, 500 ml
- 4) Labu erlenmeyer 500 ml, 1000 ml
- 5) Gelas ukur 10 ml, 50 ml
- 6) Labu ukur 250 ml, 1000 ml

### 3.5.3.2. Bahan

Bahan yang digunakan:

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

### 3.5.3.3. Prosedur

Prosedur analisis sampel dengan metode iodometri adalah sebagai berikut:

- 1) Menambahkan KI 0,12 N 25 ml ke dalam sampel
- 2) Menambahkan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  2 N 4 ml ke dalam sampel
- 3) Menambahkan indikator amylum hingga warna sampel menjadi biru
- 4) Menitrasi sampel dengan  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
- 5) Mencatat volume  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  yang digunakan untuk menitrasi sampel

## 3.6. Pengolahan Data Penelitian

Pada bagian ini akan dijelaskan mengenai prosedur pengolahan data yang dilakukan pada penelitian penentuan koefisien perpindahan massa dan *hold-up gas*, uji dekomposisi ozon, dan uji reaktivitas larutan ozon.

### 3.6.1. Penentuan Koefisien Perpindahan Massa dan *Hold-up Gas*

Koefisien perpindahan massa ozon ( $k_L a_{O_3}$ ) dicari dengan menggunakan metode tidak langsung, yaitu dengan korelasi  $k_L a_{O_3}$  terhadap  $k_L a_{O_2}$ . Maka dari itu, dalam pengolahan data penelitian ini, yang dilakukan adalah mencari nilai  $k_L a_{O_2}$  untuk kemudian dikonversi menjadi  $k_L a_{O_3}$  melalui sebuah persamaan. Nilai  $k_L a_{O_2}$  sendiri dapat dicari dengan menggunakan persamaan berikut:



$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = k_L a (C_{O_2}^* - C_{O_2}) \quad (3.1)$$

$$\frac{dC_{O_2}}{(C_{O_2}^* - C_{O_2})} = k_L a \cdot dt \quad (3.2)$$

$$\int_0^c \frac{dC_{O_2}}{(C_{O_2}^* - C_{O_2})} = k_L a \int_0^t dt \quad (3.3)$$

$$\ln \left( \frac{C_{O_2}^*}{C_{O_2}^* - C_{O_2}} \right) = k_L a \cdot t \quad (3.4)$$

dimana:

$k_L a$  = koefisien perpindahan massa oksigen

$C_{O_2}^*$  = konsentrasi oksigen terlarut dalam keadaan jenuh

$C_{O_2}$  = konsentrasi oksigen terlarut pada  $t$

$t$  = waktu

Data  $C_{O_2}$  dan  $t$  diperoleh dari penelitian yang dilakukan. Sementara data  $C_{O_2}^*$  diperoleh dengan cara melakukan perhitungan menggunakan persamaan (3.5) berikut:

$$\% \text{ kejenuhan } O_2 = \frac{100 \times C_{O_2}}{C_p} \quad (3.5)$$

Dan  $C_p$  dicari dengan menggunakan persamaan berikut:

$$C_p = C^* \times P \left[ \frac{\left( \frac{1 - P_{wv}}{P} \right) (1 - \theta \cdot P)}{(1 - P_{wv})(1 - \theta)} \right] \quad (3.6)$$

dimana:

$C_p$  = konsentrasi kesetimbangan oksigen pada tekanan tidak standar (mg/L)

$C^*$  = konsentrasi kesetimbangan oksigen pada tekanan standar 1 atm (mg/L)

$P$  = tekanan tidak standar (atm)

$P_{wv}$  = tekanan parsial uap air (atm), dihitung dari:

$$\ln P_{wv} = 11,8571 - (3840,70/T) - (216961/T^2);$$

dimana  $T$  = temperatur (K)

$$\theta = 0,000975 - (1426 \times 10^{-5} t) + (6436 \times 10^{-8} t^2)$$

dimana  $t$  = temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )

Dari persamaan (3.5) di atas, dapat diketahui persen kejenuhan  $O_2$ . Persen kejenuhan  $O_2$  sendiri menunjukkan persen kejenuhan  $O_2$  pada harga  $C_{O_2}$  yang dimasukkan. Biasanya nilainya belum mencapai 100%, seperti 80% sampai 95%. Dari persen kejenuhan tersebut, dapat dibuat suatu persamaan untuk mencari persen kejenuhan 100% seperti persamaan berikut:

$$\frac{x \%}{C_{O_2}} = \frac{100 \%}{C_{O_2} \text{ jenuh}} \quad (3.7)$$

atau

$$C_{O_2} \text{ jenuh} = \frac{100 \%}{x \%} \times C_{O_2} \quad (3.8)$$

Kembali ke persamaan (3.4). Dengan memplot data  $\ln\left(\frac{C_{O_2}^*}{C_{O_2}^* - C_{O_2}}\right)$  dan  $t$  ke dalam sebuah kurva, akan diperoleh gradien kurva yang menyatakan besar  $k_L a_{O_2}$ .

Selanjutnya  $k_L a_{O_2}$  tersebut dikonversi menjadi  $k_L a_{O_3}$  melalui persamaan:

$$k_L a_{O_3} = \left(\frac{D_{O_3}}{D_{O_2}}\right)^n \cdot k_L a_{O_2} \quad (3.9)$$

Dimana  $D_{O_3}$  merupakan koefisien difusi ozon yang bernilai  $1,26 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  pada  $T = 20^\circ\text{C}$  (Matrosov et.al., 1978),  $D_{O_2}$  merupakan koefisien difusi oksigen yang bernilai  $2,025 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  pada  $T = 20^\circ\text{C}$  (St. Denis, 1971), dan  $n$  merupakan faktor yang berhubungan dengan hidrodinamika reaktor. Besar  $n$  bervariasi mulai dari 0,5 hingga 1,0. Untuk ozonasi dalam kolom gelembung,  $n$  biasa diasumsikan bernilai 1,0. Dengan demikian, persamaan (3.9) menjadi:

$$k_L a_{O_3} = 0,622 k_L a_{O_2} \quad (3.10)$$

Persamaan (3.10) tersebut valid pada kondisi  $T = 20^\circ\text{C}$ . Temperatur mempengaruhi semua sifat-sifat fisika yang relevan dalam perpindahan massa seperti viskositas, densitas, tegangan permukaan, dan difusivitas. Pada temperatur yang berbeda, dapat digunakan suatu faktor empiris yang sering digunakan dalam perhitungan yaitu faktor *theta*,  $\Theta$ .

$$k_L a_{20} = k_L a_T \cdot \Theta^{(20-T)} \quad (3.11)$$

$$k_L a_T = \frac{k_L a_{20}}{\Theta^{(20-T)}} \quad (3.12)$$

dimana:

$k_{LaT} = k_{La}$  pada temperatur T ( $^{\circ}\text{C}$ )

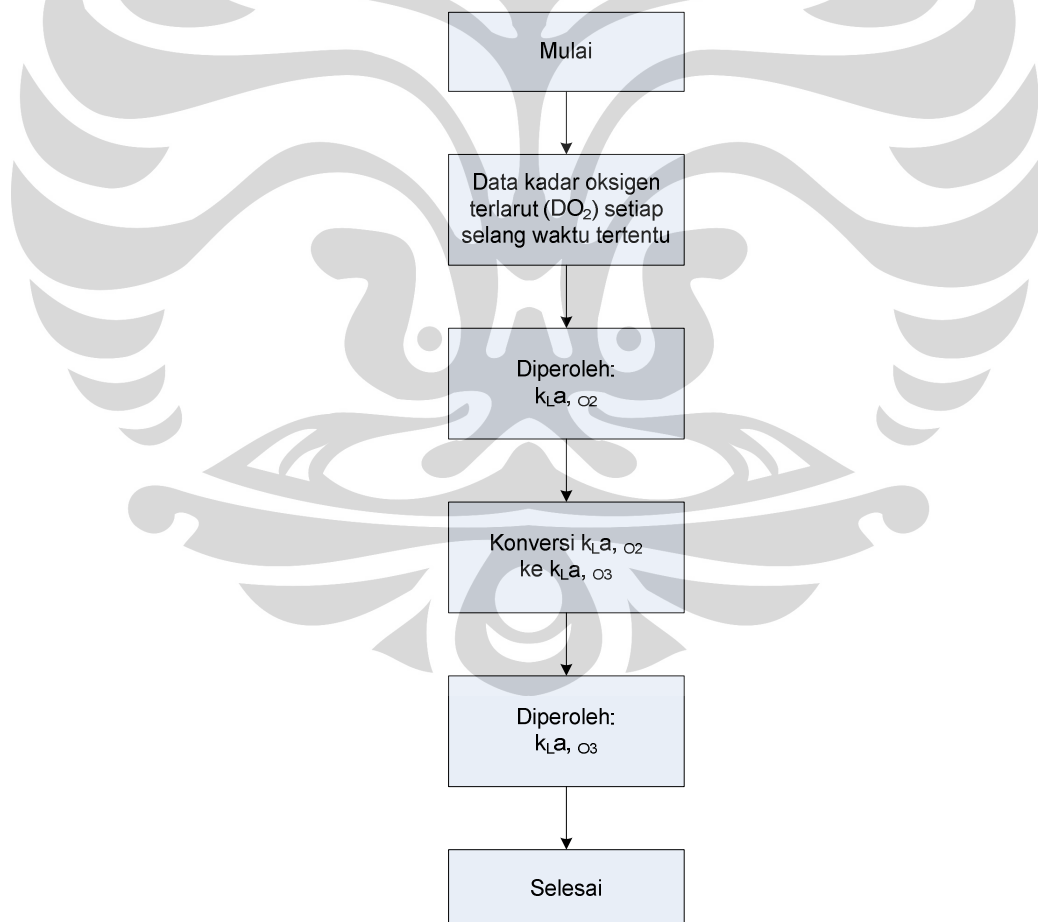
$k_{La20} = k_{La}$  pada  $20^{\circ}\text{C}$

$\theta$  = faktor koreksi temperatur

Menurut [Strenstrom & Gilbert \(1981\)](#), nilai  $\theta$  bervariasi mulai dari 1,008 hingga 1,047; dan disarankan menggunakan  $\theta = 1,024$  dengan keakuratan  $\pm 5\%$ .

Hasil  $k_{La, O_3}$  yang diperoleh selanjutnya akan dibandingkan dengan  $k_{La, O_2}$  pada variasi laju alir gas dan laju alir air yang berbeda untuk dilihat mana yang terbesar. Besar laju alir air yang memberikan nilai  $k_{La, O_3}$  terbaik akan digunakan sebagai laju alir air di penelitian *hold-up gas*, uji dekomposisi, dan uji reaktivitas ozon.

Diagram alir prosedur perhitungan  $k_{La, O_3}$  dapat dilihat pada Gambar 3.3. berikut.



**Gambar 3.3.** Diagram alir perhitungan  $k_{La, O_3}$

Koefisien *hold-up gas* dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\varepsilon_G = \frac{V_G}{V_G + V_L} \quad (3.13)$$

dimana:

$\varepsilon_G$  = *hold-up gas*

$V_G$  = volume gas dalam kolom gelembung

$V_L$  = volume cairan dalam kolom gelembung

Nilai *hold-up gas* yang diperoleh akan dibandingkan dengan nilai *hold-up gas* pada laju alir gas yang berbeda untuk dilihat kecenderungannya, apakah akan semakin meningkat seiring bertambah besarnya laju alir gas atau tidak.

### 3.6.2. Uji Dekomposisi Ozon

Uji dekomposisi ozon dilakukan untuk melihat sejauh mana dekomposisi yang terjadi dalam sistem kolom gelembung ini. Data yang diperoleh berupa nilai konduktivitas dalam satuan *milli Siemens (mS)*. Konduktivitas sendiri menyatakan besarnya ion-ion yang bermuatan dalam suatu larutan. Semakin banyak ion bermuatan dalam suatu larutan, semakin besar pula nilai konduktivitasnya.

Pada penelitian ini, sampel air yang mengandung ozon (100 ml) dicampur dengan KI 0,12 M (10 ml). Di dalam air, KI akan terurai menjadi  $K^+$  dan  $I^-$ . Kemudian dengan keberadaan ozon di air,  $I^-$  akan teroksidasi menjadi  $I_2$  sehingga terjadi perubahan pada nilai konduktivitas dalam larutan.

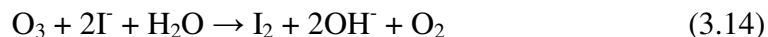
Nilai konduktivitas yang diperoleh setiap selang waktu tertentu akan di plot dalam sebuah kurva dan dibandingkan kecenderungannya pada pH 7 dan 11 untuk melihat apakah penambahan pH mempengaruhi dekomposisi.

Selanjutnya akan dibuat sebuah persamaan yang menunjukkan hubungan antara waktu dekomposisi (t) dengan konduktivitas (C).

### 3.6.3. Uji Reaktivitas Larutan Ozon terhadap KI

Pada uji reaktivitas, data volume  $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$  yang digunakan untuk menitrasi sampel akan diolah untuk mendapatkan kadar ozon terlarut di port 1, port 2, dan port 3.

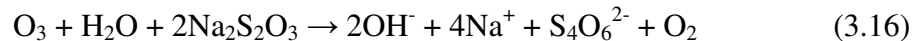
Reaksi ozon dengan KI:



Reaksi pembebasan iodium dengan menitrasi sampel dengan  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ :



Sehingga reaksi total dan produknya adalah seperti pada persamaan reaksi berikut:



Dari reaksi (3.20), diperoleh hubungan antara mol ozon dengan mol  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , yaitu  $1 \text{ mol O}_3 \approx 2 \text{ mol Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ .

Prosedur perhitungan yang dilakukan untuk mendapatkan konsentrasi  $\text{O}_3$  terlarut adalah sebagai berikut:

$$[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}] = 0,00025 \text{ M}$$

$$n_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}} (\text{ml}) \times 0,00025 \text{ M}}{1000 \text{ ml}} \quad (3.17)$$

$$n_{\text{O}_3} = \frac{n_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}}}{2} \quad (3.18)$$

$$m_{\text{O}_3} (\text{gr}) = n_{\text{O}_3} \times \text{Mr}_{\text{O}_3} \quad (3.19)$$

Untuk mendapatkan dosis  $\text{O}_3$  dalam satuan mg/L atau ppm, massa  $\text{O}_3$  yang diperoleh dari persamaan (3.19) dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$m_{\text{O}_3} (\text{mg/L}) = \frac{m_{\text{O}_3} (\text{gr}) \times 1000}{V_{\text{sampel}} (\text{L})} \quad (3.20)$$

Selanjutnya, data konsentrasi  $\text{O}_3$  di port 1, port 2, dan port 3 pada setiap selang waktu 10 menit selama 60 menit dengan variasi beberapa laju alir gas akan dibandingkan untuk dilihat pada posisi manakah ozon lebih reaktif.

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk melihat signifikansi penggunaan gelembung mikro untuk meningkatkan kelarutan ozon dalam air, yang dievaluasi dengan besar koefisien perpindahan massa ( $k_L a_{O_3}$ ), *hold-up gas* ( $\epsilon_G$ ), pengkajian terhadap dekomposisi ozon, dan reaktivitas larutan ozon pada berbagai posisi.

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

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  $k_L a_{O_3}$  di dalam suatu kolom gelembung dapat ditentukan dengan menggunakan pendekatan  $k_L a$  oksigen–air ( $k_L a_{O_2}$ ) dengan meneliti profil konsentrasi oksigen dalam air selama rentang waktu tertentu.  $k_L a_{O_3}$  untuk selanjutnya akan disebutkan dengan simbol  $k_L a$  saja.

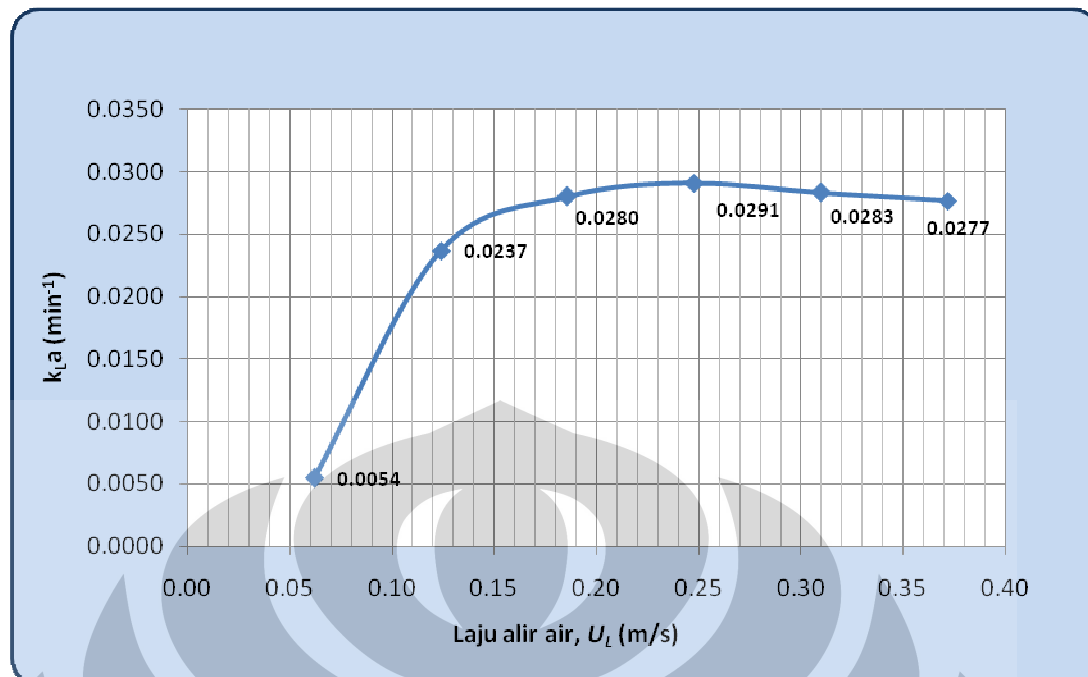
Penelitian dilakukan untuk mengkaji seberapa besar pengaruh kecepatan aliran gas/udara dan kecepatan aliran air terhadap konsentrasi ozon terlarut dalam air.

##### 4.1.1. Pengaruh laju alir air ( $U_L$ ) terhadap $k_L a$

Penelitian ini dilakukan pada kondisi laju alir gas yang tetap (600 L/jam atau 7,01 m/s) dan laju alir air ( $U_L$ ) yang divariasikan. Tabel 4.1. menunjukkan hasil perhitungan  $k_L a$  pada setiap kondisi operasi, sedang Gambar 4.1. menunjukkan hubungan antara laju alir air ( $U_L$ ) dengan  $k_L a$ .

**Tabel 4.1.** Nilai  $K_L a$  ozon-air pada laju alir udara konstan

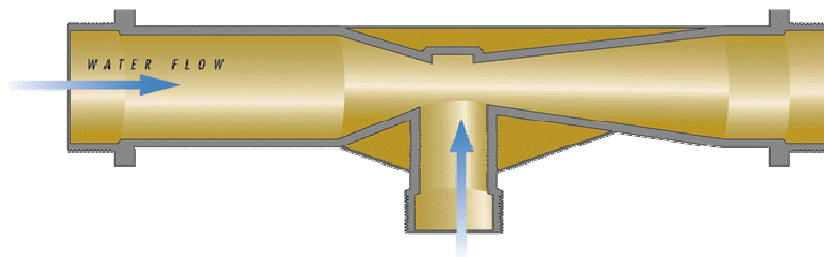
$Q_L$ (L/menit)	$Q_G$ (L/jam)	$U_L$ (m/s)	$U_G$ (m/s)	$k_L a_{O_3}$ (menit <sup>-1</sup> )
1	600	0,06	7,01	0,0054
2	600	0,12	7,01	0,0237
3	600	0,19	7,01	0,0280
4	600	0,25	7,01	0,0291
5	600	0,31	7,01	0,0283
6	600	0,37	7,01	0,0277



**Gambar 4.1.** Grafik hubungan laju alir air ( $U_L$ ) dengan  $k_{La}$  pada  $U_G = 7,01$  m/s

Dari Tabel 4.1. maupun Gambar 4.1. terlihat bahwa pada laju alir gas yang tetap, semakin besar laju alir air,  $k_{La}$  cenderung semakin besar, walaupun kecenderungan tersebut semakin berkurang pada laju alir air yang lebih besar. Pada laju alir air 1 L/menit (0,06 m/s),  $k_{La}$  amat kecil (0,0054  $\text{menit}^{-1}$ ) dibandingkan dengan  $k_{La}$  pada laju alir yang lain (0,0237  $\text{menit}^{-1}$  sampai 0,0291  $\text{menit}^{-1}$ ). Kecilnya  $k_{La}$  disebabkan karena injektor belum bekerja secara optimal pada laju alir air 1 L/menit. Batasan minimal bagi injektor untuk bekerja secara optimal pada penelitian ini adalah pada laju alir air 4 L/menit (0,25 m/s).

Injektor ozon yang digunakan bekerja berdasarkan prinsip venturi seperti pada Gambar 4.2. Prinsip kerja injektor ini adalah ketika air bertekanan memasuki injektor, aliran air akan terhisap menuju arah ruang injeksi dan berubah menjadi aliran dengan kecepatan yang sangat tinggi. Peningkatan kecepatan ini akan menurunkan tekanan. Penurunan tekanan memungkinkan ozon untuk masuk ke dalam *suction port* dan ikut terbawa ke dalam aliran. Laju alir air masukan injektor yang terlalu rendah menyebabkan terjadinya kegagalan dalam penarikan ozon untuk memasuki injektor.



**Gambar 4.2.** Injektor venturi

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

Pada laju alir air 2 L/menit (0,12 m/s),  $k_{La}$  mengalami kenaikan lebih dari empat kali lipat (dari 0,0054 menit<sup>-1</sup> menjadi 0,0237 menit<sup>-1</sup>). Kenaikan laju alir air menyebabkan proses penarikan ozon ke dalam injektor yang lebih efektif sehingga perpindahan massa dapat berlangsung dengan baik. Dengan demikian,  $k_{La}$  pun meningkat.

Pada laju alir air 3 L/menit (0,19 m/s) dan 4 L/menit (0,25 m/s) juga terjadi kenaikan terhadap nilai  $k_{La}$ . Namun kenaikan ini tidak signifikan. Besarnya kenaikan amat kecil (dari 0,0280 menit<sup>-1</sup> ke 0,0291 menit<sup>-1</sup>) bahkan dapat dianggap konstan.

Pada laju alir air yang lebih besar, 5 L/menit (0,31 m/s) dan 6 L/menit (0,37 m/s), perpindahan massa sudah tidak berlangsung efektif lagi seiring penambahan laju alir air.  $k_{La}$  cenderung konstan bahkan sedikit mengalami penurunan. 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.

Selain itu, dari hasil penelitian yang dilakukan terhadap *hold-up gas* (pembahasan mengenai *hold-up gas* selengkapnya ada pada bagian 4.2.1.), *hold-up gas* pada laju alir air yang semakin besar cenderung mengalami penurunan, yang berarti luas kontak antar fasa gas dan cair semakin berkurang. Kedua faktor inilah yang mengakibatkan jumlah ozon yang berpindah ke fasa cair akan semakin berkurang sehingga konsentrasi ozon terlarut dalam fasa cair menurun. Dengan demikian harga  $k_{La}$  relatif semakin kecil.



Sebagian pakar menyimpulkan dari hasil penelitian mereka bahwa kecepatan cairan tidak begitu mempengaruhi  $k_{La}$ . Sebagian lagi menyimpulkan bahwa sampai pada kecepatan tertentu 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).

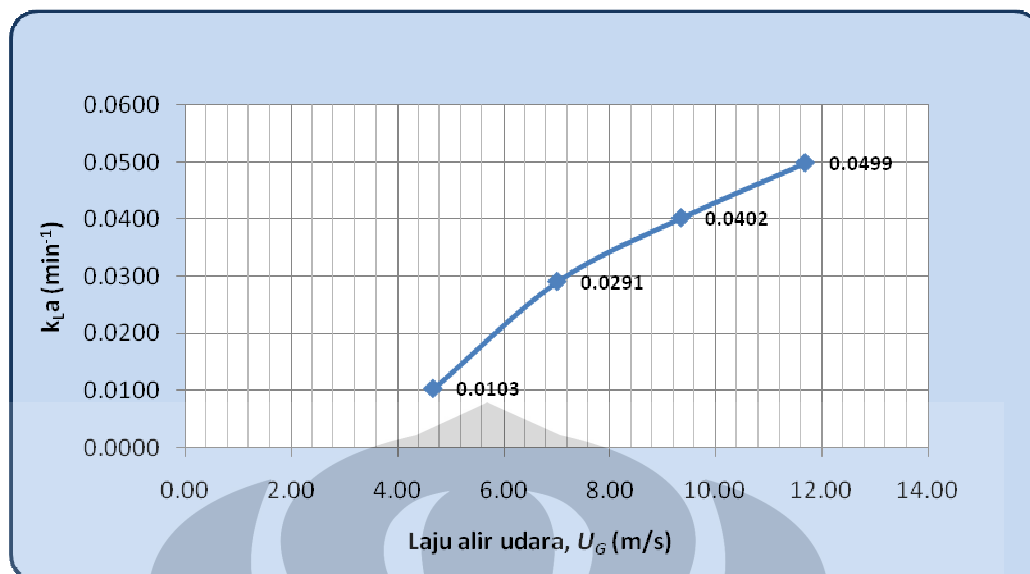
Maka dari itu disimpulkan bahwa pada pertambahan laju alir air di atas 4 L/menit, kenaikan  $k_{La}$  tidak terlalu signifikan. Dengan kata lain, pada sistem kolom gelembung ini, pada kondisi efektif injektor bekerja (laju alir air di atas 4 L/menit), nilai  $k_{La}$  tidak begitu dipengaruhi oleh laju alir air.

#### 4.1.2. Pengaruh laju alir gas ( $U_G$ ) terhadap $k_{La}$

Penelitian ini dilakukan pada kondisi laju alir air yang tetap 4 L/menit (0,25 m/s) dan laju alir gas ( $U_G$ ) yang divariasikan. Laju alir 4 L/menit dipilih karena dianggap paling optimal. Pada laju alir air yang lebih kecil dikhawatirkan perpindahan massa tidak berlangsung dengan baik, sedang pada laju alir air yang lebih besar waktu tinggal air dalam kolom akan menjadi lebih singkat sehingga perpindahan massa juga tidak berlangsung secara optimal. Tabel 4.2. menunjukkan hasil perhitungan  $k_{La}$  pada setiap kondisi operasi, sedang Gambar 4.3. menunjukkan hubungan antara laju alir gas ( $U_G$ ) dengan  $k_{La}$ .

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

$Q_L$ (L/menit)	$Q_G$ (L/jam)	$U_L$ (m/s)	$U_G$ (m/s)	$k_{La} O_3$
4	400	0,25	4,67	0,0103
4	600	0,25	7,01	0,0291
4	800	0,25	9,35	0,0402
4	1000	0,25	11,69	0,0499

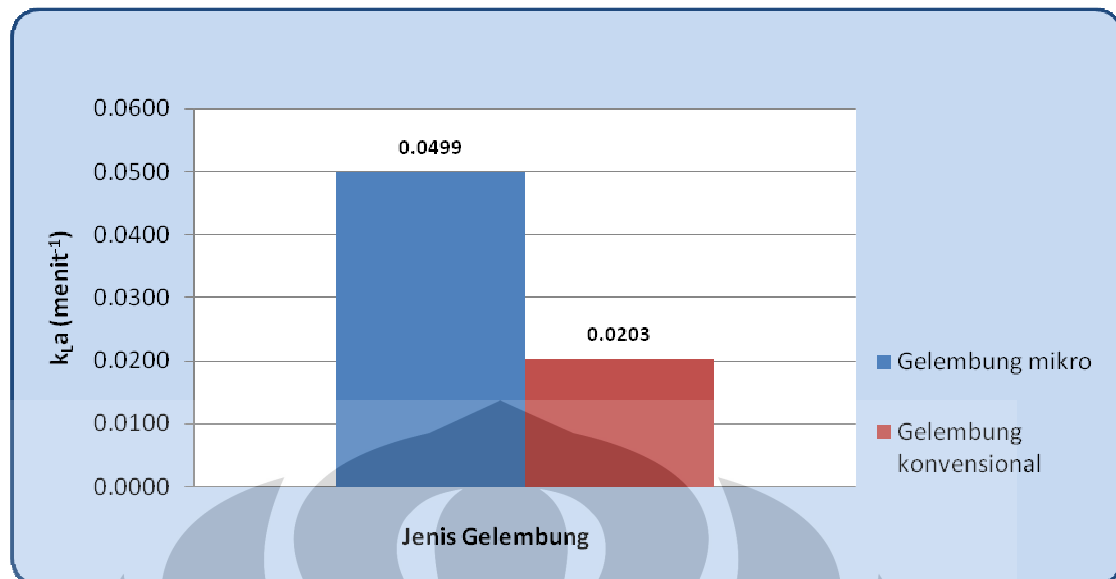


**Gambar 4.3.** Grafik hubungan laju alir gas ( $U_G$ ) dengan  $k_{La}$  pada  $U_L = 0,25$  m/s

Pada Tabel 4.2. dan Gambar 4.3. terlihat bahwa untuk laju alir air yang tetap, semakin besar laju alir gas, maka nilai  $k_{La}$  akan semakin besar pula. Hal ini disebabkan oleh semakin besarnya laju alir gas, energi kinetik gas menjadi semakin bertambah besar. Bertambah besarnya energi kinetik ini mengakibatkan kemampuan gas untuk masuk/larut ke dalam fasa cair meningkat. Selain itu, dengan semakin besarnya laju alir gas akan semakin banyak pula gelembung gas yang terbentuk (*hold-up gas* semakin bertambah), sehingga luas permukaan kontak antara fasa gas dan cair akan meningkat. Hal ini mendorong semakin banyaknya ozon yang larut ke dalam air sehingga nilai  $k_{La}$  juga meningkat.

#### 4.1.3. Perbandingan $k_{La}$ gelembung mikro dengan gelembung konvensional

Dilakukan perbandingan nilai  $k_{La}$  pada penggunaan gelembung mikro dengan gelembung konvensional dengan menggunakan kolom gelembung yang sama, dimana gelembung konvensional dibangkitkan dengan menggunakan diffuser biasa dengan diameter lubang 2 mm. Penelitian dilakukan pada laju alir air 0,25 m/s dan laju alir udara 11,69 m/s. Dari hasil penelitian yang dilakukan diperoleh perbandingan  $k_{La}$  seperti dalam Gambar 4.4. berikut:



**Gambar 4.4.** Perbandingan  $k_{La}$  gelembung mikro dengan gelembung konvensional

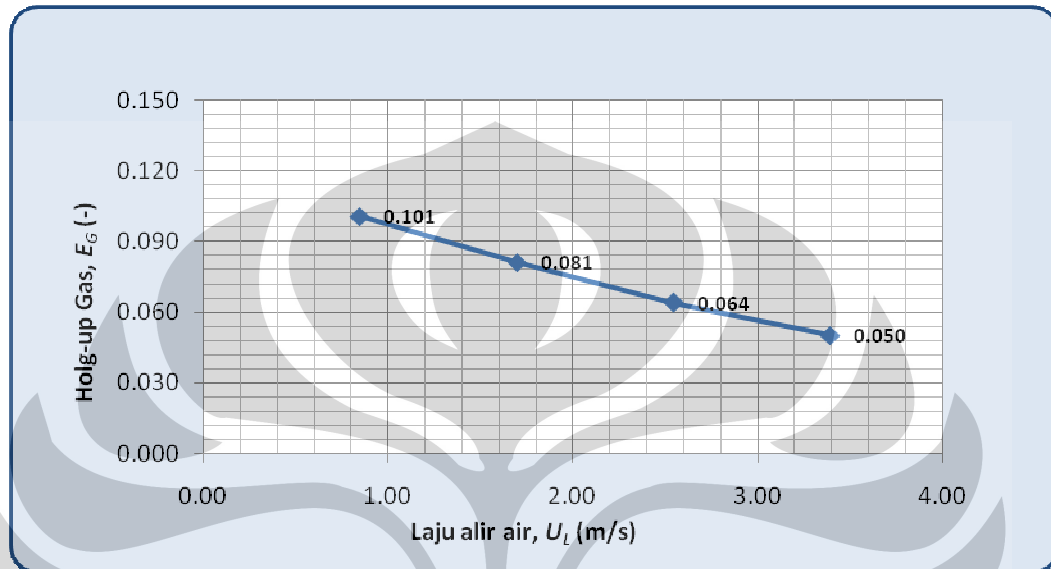
Harga  $k_{La}$  pada gelembung mikro adalah sebesar 0,0499 (menit<sup>-1</sup>) sedang pada gelembung konvensional sebesar (0,0203 menit<sup>-1</sup>).  $k_{La}$  pada gelembung mikro 2,45 kali lebih besar dengan  $k_{La}$  pada gelembung konvensional. Hal ini dipengaruhi oleh ukuran gelembung itu sendiri. Gelembung mikro memiliki ukuran yang lebih kecil (1-50 mikron). Ukuran gelembung yang kecil cenderung meningkatkan harga  $k_{La}$  karena luas antarmuka (*interface*) yang makin meningkat. Luas antarmuka yang meningkat akan memperbesar luas permukaan kontak antara ozon dengan air sehingga meningkatkan perpindahan massa ozon ke dalam air. Dengan demikian harga  $k_{La}$  pada gelembung mikro lebih besar dibandingkan dengan  $k_{La}$  pada gelembung konvensional.

#### 4.2. Hold-up Gas ( $\epsilon_G$ )

*Hold-up gas* ( $\epsilon_G$ ) menyatakan besarnya jumlah gas dalam suatu sistem campuran gas–air. Dengan demikian  $\epsilon_G$  merupakan besar fraksi gas dalam sistem. Penelitian dilakukan untuk mengkaji seberapa besar pengaruh laju alir gas/udara dan laju alir air terhadap  $\epsilon_G$ .

#### 4.2.1. Pengaruh laju alir air ( $U_L$ ) terhadap *Hold-up Gas* ( $\varepsilon_G$ )

Pada penelitian ini akan dikaji seberapa besar pengaruh laju alir air terhadap  $\varepsilon_G$  pada prototipe kolom gelembung yang telah dibuat. Dari penelitian yang dilakukan diperoleh hasil seperti pada Gambar 4.5. berikut.

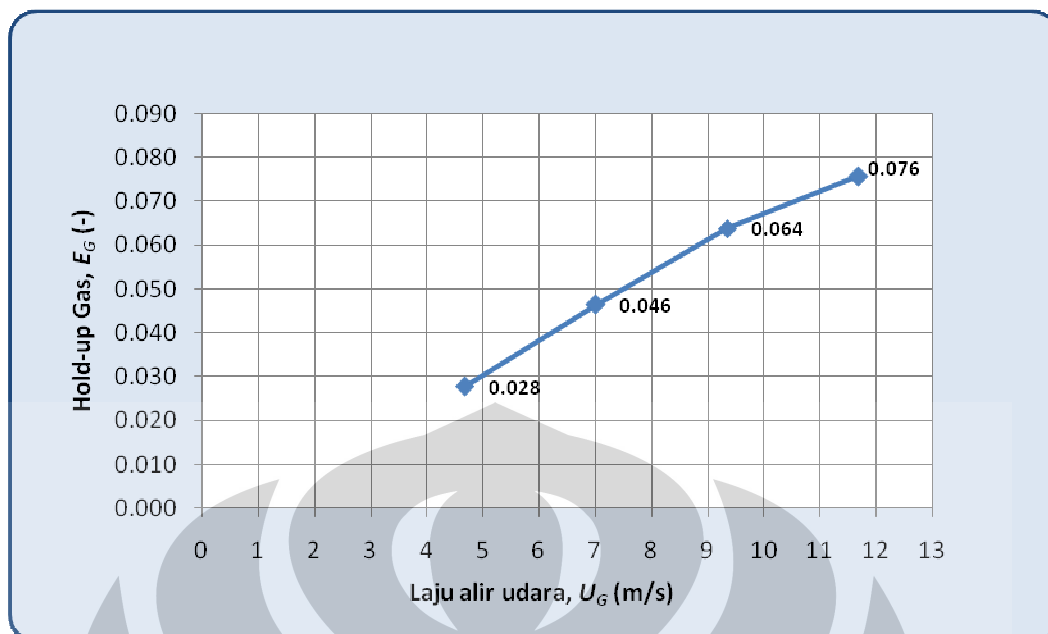


**Gambar 4.5.** Grafik hubungan laju alir air ( $U_L$ ) terhadap *hold-up gas* ( $\varepsilon_G$ )

Gambar 4.5. tersebut menunjukkan bahwa pada laju alir gas yang tetap (600 L/jam atau 7,01 m/s), semakin besar laju alir air, maka  $\varepsilon_G$  dalam kolom gelembung akan semakin kecil. Hal ini disebabkan oleh semakin besarnya laju alir air, volume air di dalam kolom akan semakin besar sedang volume gas tetap, sehingga  $\varepsilon_G$  akan semakin kecil.

#### 4.2.2. Pengaruh laju alir gas ( $U_G$ ) terhadap *Hold-up Gas* ( $\varepsilon_G$ )

Pada penelitian ini akan dikaji seberapa besar pengaruh laju alir gas terhadap  $\varepsilon_G$  pada prototipe kolom gelembung yang telah dibuat. Dari penelitian yang dilakukan diperoleh hasil seperti pada Gambar 4.6. berikut.



**Gambar 4.6.** Grafik hubungan laju alir gas ( $U_G$ ) terhadap *hold-up gas* ( $\epsilon_G$ )

Gambar 4.6. tersebut menunjukkan bahwa pada laju alir air yang tetap (4 L/menit atau 0,25 m/s) , nilai  $\epsilon_G$  cenderung semakin meningkat dengan kenaikan laju alir gas. Peningkatan tersebut linier terhadap laju alir gas. Hal ini disebabkan semakin besar laju alir gas, volume gas dalam kolom gelembung akan semakin besar, dan sebaliknya volume air tetap, sehingga mengakibatkan  $\epsilon_G$  akan bertambah besar.

### 4.3. Dekomposisi Ozon

Pada penelitian ini, pengamatan terhadap dekomposisi ozon yang terjadi dalam kolom gelembung diamati dari segi konduktivitasnya. Konduktivitas listrik biasa dihubungkan dengan kemampuan suatu larutan untuk menghantarkan arus listrik. Konduktivitas digunakan untuk mengukur konsentrasi zat terlarut yang telah terionisasi dalam larutan polar seperti air (Heyda, 2006). Konduktivitas sendiri merupakan besaran yang menyatakan jumlah ion-ion yang bermuatan dalam suatu larutan. Semakin banyak ion bermuatan dalam suatu larutan, semakin besar pula nilai konduktivitasnya.

Pada penelitian ini, sampel air yang mengandung ozon (100 ml) dicampur dengan KI 0,12 M (10 ml). Di dalam air, KI akan terurai menjadi  $K^+$  dan  $I^-$ .

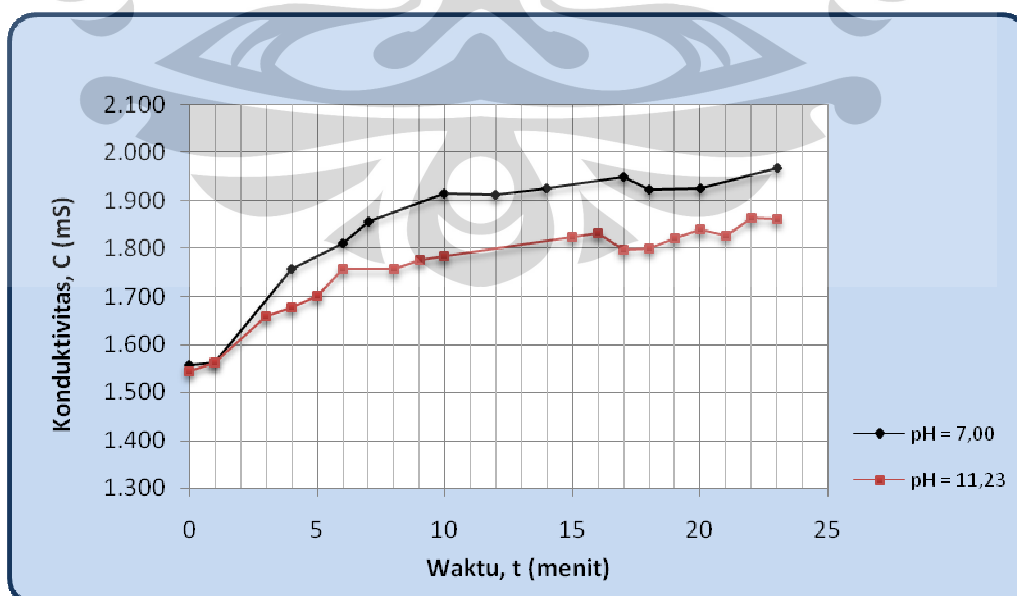
Kemudian dengan keberadaan ozon di air, I<sup>-</sup> akan teroksidasi menjadi I<sub>2</sub> sehingga terjadi penurunan nilai konduktivitas dalam larutan.

Gambar 4.7. menunjukkan dekomposisi yang terjadi pada pH 7 dan 11,23. Kedua kurva tersebut, baik pada pH 7 maupun 11,23 menunjukkan kecenderungan yang sama. Pada menit ke nol, saat ozon belum terdekomposisi, nilai konduktivitasnya rendah. Hal ini mengindikasikan konsentrasi keberadaan ozon yang besar dimana ozon tersebut mengoksidasi I<sup>-</sup> menjadi I<sub>2</sub> sehingga nilai konduktivitasnya menjadi rendah. Selanjutnya nilai konduktivitas akan naik secara berkala yang mengindikasikan konsentrasi ozon yang mulai berkurang. Di menit-menit selanjutnya nilai konduktivitas cenderung konstan. Ini menunjukkan keberadaan ozon sudah mulai menghilang.

Dari Gambar 4.6. tersebut, nilai konduktivitas pada pH 11,23 cenderung lebih rendah dibandingkan nilai konduktivitas pada pH 7. Pada pH yang lebih tinggi atau lebih basa, keberadaan ion OH<sup>-</sup> lebih banyak. Ion OH<sup>-</sup> ini merupakan pemicu terjadinya dekomposisi pada ozon yang ditunjukkan dalam reaksi berikut:



Semakin besar pH, semakin besar konsentrasi OH<sup>-</sup>, semakin besar pula dekomposisi yang terjadi, semakin banyak I<sup>-</sup> yang teroksidasi menjadi I<sub>2</sub> yang menyebabkan nilai konduktivitasnya semakin kecil.



**Gambar 4.7.** Kurva konduktivitas larutan terhadap waktu

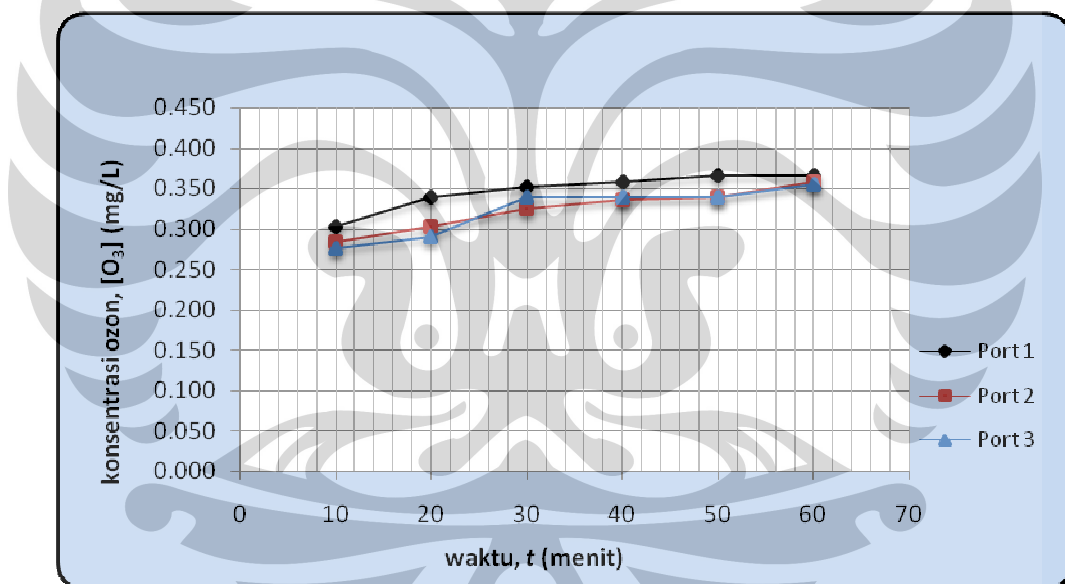
Adapun persamaan korelasi antara konduktivitas dengan waktu dekomposisi dapat ditunjukkan dengan persamaan berikut:

$$\text{Pada pH} = 7,00 \quad ; C = 1,588 \cdot t^{0,071} \quad ; r^2 = 0,957$$

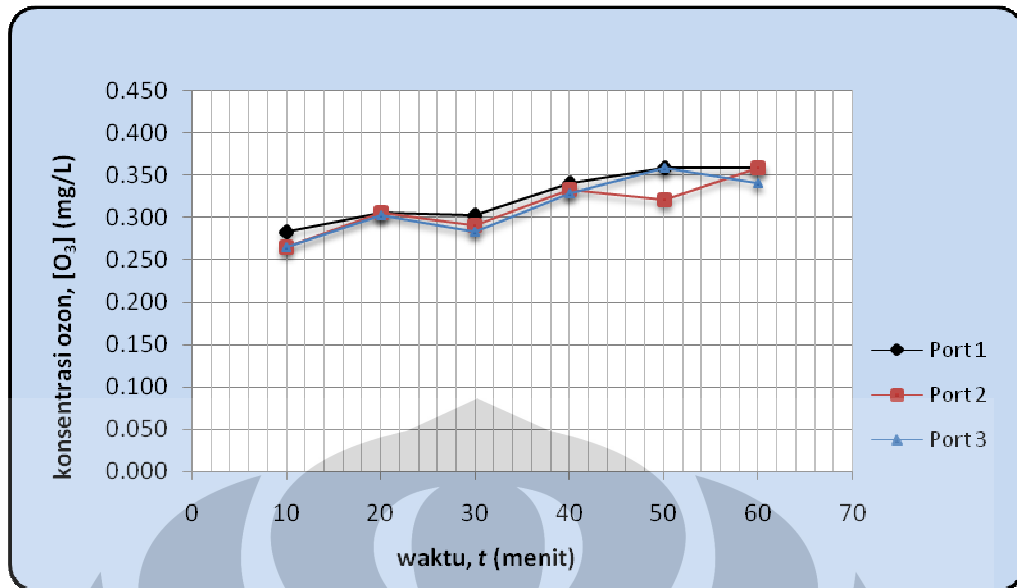
$$\text{Pada pH} = 11,23 \quad ; C = 1,568 \cdot t^{0,053} \quad ; r^2 = 0,962$$

#### 4.4. Reaktivitas Ozon pada Beberapa Posisi

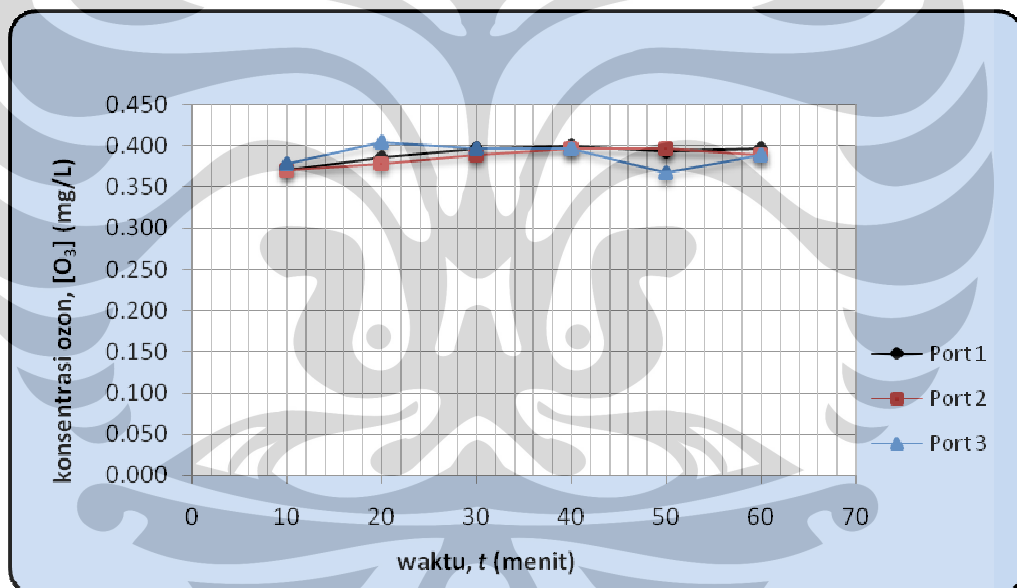
Penelitian ini dilakukan untuk mengamati pada posisi mana ozon lebih reaktif yang ditandai dengan besarnya konsentrasi ozon terlarut dalam air (mg/L). Posisi yang dipilih adalah pada bagian bawah (port 1), tengah (port 2), dan atas (port 3) kolom gelembung, dengan jarak antar port 15 cm. Gambar 4.8; 4.9; 4.10; dan 4.11. menunjukkan hubungan konsentrasi ozon terhadap waktu pada beberapa besar laju alir udara.



Gambar 4.8. Konsentrasi ozon terhadap waktu pada  $Q_G = 400$  L/jam

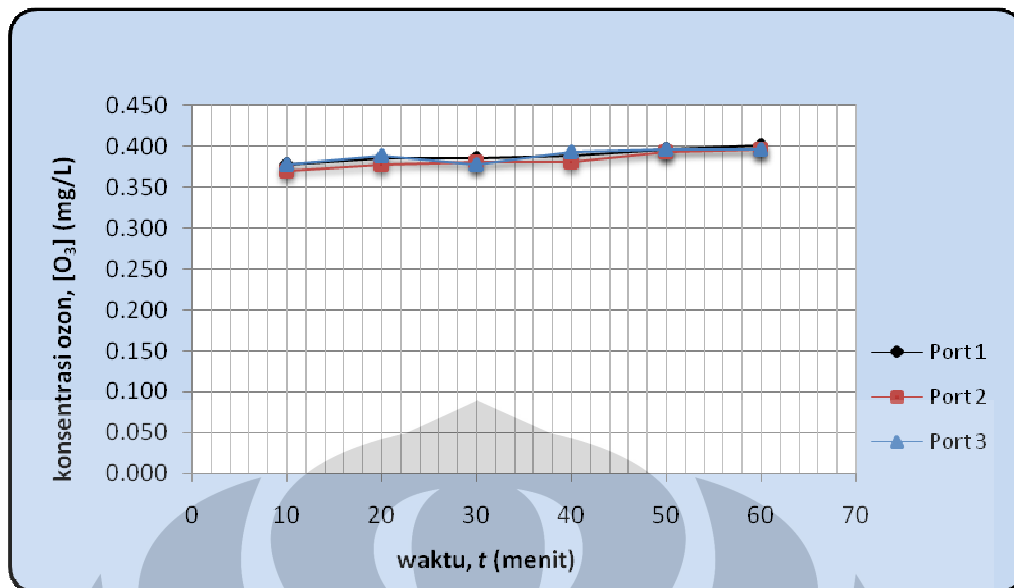


**Gambar 4.9.** Konsentrasi ozon terhadap waktu pada  $Q_G = 600$  L/jam



**Gambar 4.10.** Konsentrasi ozon terhadap waktu pada  $Q_G = 800$  L/jam





**Gambar 4.11.** Konsentrasi ozon terhadap waktu pada  $Q_G = 1000$  L/jam

Dari Gambar tersebut dapat diamati bahwa konsentrasi ozon di setiap posisi (port) umumnya tidak jauh berbeda. Umumnya konsentrasi ozon di port 1 lebih tinggi dibanding port 2 dan port 3, walaupun perbedaannya amat sedikit. Hal ini disebabkan ozon belum terdekomposisi pada posisi-posisi tersebut.

Dapat diamati pula bahwa konsentrasi ozon pada setiap port cenderung meningkat seiring pertambahan waktu. Peningkatan konsentrasi ini disebabkan oleh sistem *semi-batch* berupa aliran sirkulasi pada kolom gelembung. Aliran sirkulasi ini memungkinkan air yang mengandung ozon bersirkulasi dan berkontak kembali dengan gas ozon masuk sehingga konsentrasi ozon dalam air meningkat.

## BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Harga  $k_L a_{O_3}$  sangat dipengaruhi oleh laju alir udara ( $U_G$ )
2. Harga  $k_L a_{O_3}$  hanya dipengaruhi oleh laju alir air ( $U_L$ ) pada  $U_L$  di bawah 4 L/menit (0,25 m/s), dan tidak begitu dipengaruhi pada  $U_L$  diatas 4 L/menit (0,25 m/s)
3. Harga  $k_L a_{O_3}$  bertambah besar seiring kenaikan laju alir gas pada laju alir air yang tetap.
4. Harga  $k_L a_{O_3}$  pada penggunaan gelembung mikro 2,45 kali lebih besar dari penggunaan gelembung konvensional. Harga  $k_L a_{O_3}$  pada penggunaan gelembung mikro adalah 0,0499 menit<sup>-1</sup>, sedang pada penggunaan gelembung konvensional adalah 0,0203 menit<sup>-1</sup>.
5. Pada laju alir air yang tetap, semakin besar laju alir udara, semakin besar *hold-up gas*. Pada laju alir udara yang tetap, semakin besar laju alir air, semakin kecil *hold-up gas*.
6. Kenaikan pH air mempercepat terjadinya dekomposisi ozon terlarut dalam air tersebut.
7. Reaktivitas terbesar ozon berada di port bagian paling bawah kolom gelembung atau port 1.

### 5.2. Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui karakteristik gelembung mikro seperti diameter gelembung, densitas gelembung, dan pola aliran gelembung dalam kolom gelembung.
2. Dalam mengukur konsentrasi ozon terlarut sebaiknya digunakan metode atau alat ukur yang lebih sensitif terhadap ozon, misalnya dengan metode titrasi kolorimetri ataupun dengan menggunakan DO<sub>3</sub> meter.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. (2007, December 7). Dissolved Oxygen. May 27, 2009.  
<http://www.waterontheweb.org/under/waterquality/oxygen.html>
- Anonim. (n.d.). Effect of ozone on bacteria. March 8, 2009.  
<http://www.ozoneapplications.com>
- Anonim. (n.d.). Oxidizing potential of various reagents. March 8, 2009.  
<http://www.ozoneapplications.com>
- Anonim. (n.d.). Ozone. March 8, 2009. <http://www.wikipedia.org>
- Anonim. (n.d.). Ozone creation in nature. April 2, 2009.  
<http://www.ozonesolutions.com>
- Anonim. (n.d.). Ozone effect on specific bacteria, viruses, and molds. February 7, 2009. <http://www.ozoneapplications.com>
- Anonim. (n.d.). Ozone properties. March 8, 2009.  
<http://www.ozoneapplications.com>
- Anonim. (n.d.). Venturi Injection vs. Bubble Diffusers. February 7, 2009.  
<http://www.ozoneapplications.com>
- Beltran, Fernando J. (1955). *Ozone reactions kinetic for water and wastewater system*. New York: Lewis Publishers.
- Bismo, Setijo, et.al. (2000). *Rekayasa Pengolahan Limbah Fenolik dan Limbah Cair Organik Lainnya dengan Teknik Ozonasi*. RUT VI Universitas Indonesia.
- Bühler, R.E., Staehelin, J., & Hoigné, J. (1984). Ozone decomposition in water studied by pulse radiolysis  $\text{HO}_2/\text{O}_2^-$  and  $\text{HO}_3/\text{O}_3^-$  as intermediates. *Journal of Physic Chemistry*, 88, 2560–2564.
- Bühler, R.E., Staehelin, J., and Hoigné, J. (1984). Ozone decomposition in water studied by pulse radiolysis  $\text{OH}$  and  $\text{HO}_4^-$  as intermediates. *Journal of Physic Chemistry*, 88, 5999–6004.
- Carlins, James J., & Clark, Richard G. (1982). Ozone generation by corona discharge. In Rice, Rip G., & Netzer, Aharon (Ed.). *Handbook of ozone technology and application* (vol.1, pp. 41–75). Ann Arbor Science.

- Cuenca, M. Alvarez, and Nerenberg, M.A. (1981). Oxygen Mass Transfer in Bubble Columns Working at Large Gas and Liquid Flow Rates. *AIChE Journal* (vol.27, pp. 66–72).
- Deckwer, W.D., et.al. (1974). Mixing and Mass Transfer in Tall Bubble Columns. *Chemical Engineering Sciences (Pergamon Press)* (vol.29, pp. 2177–2188).
- Foller, Peter C. (1982). Status of research on ozone generation by electrolysis. In Rice, Rip G., & Netzer, Aharon (Ed.). *Handbook of ozone technology and application* (vol.1, pp. 85–102). Ann Arbor Science.
- F. Xu, & C. Liu. (1990). Mass balance analysis of ozone in a conventional bubble column. *Ozone Science Engineering*, 12, 269–279.
- Heyda, Mark. (2006). A practical guide to conductivity measurement. June 19, 2009. [http://www.mbhes.com/technical\\_articles.htm](http://www.mbhes.com/technical_articles.htm)
- 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., & Pandit, A.B. (2004). Ozone and cavitation for water disinfection. *Biochemical Engineering Journal*, 18, 9–19.
- Langlais, Bruno, Reckhow, David A., & Brink, Deborah R. (1991). *Ozone in water treatment: application and engineering*. New York: Lewis Publisher.
- Li-Bing Chu, et.al. (2007). Enhanced ozonation of simulated dyestuff wastewater by microbubbles. *Chemosphere*, 68, 1854–1860.
- Li-Bing Chu, et.al. (2008). Enhanced treatment of practical textile wastewater by microbubble ozonation. *Process Safety and Environmental Protection*, 86, 389–393.
- Li-Bing Chu, et.al. (2008). Enhanced sludge solubilization by microbubble ozonation. *Chemosphere*, 72, 205–212.
- Lin, J., & Nakajima, T. (2003). An AM1 study of decomposition of aqueous ozone. *Journal of Molecular Structure (Teochem)*, 625, 161–167.

- Matrozov, V., Kachtunov, S., & Stephanov, S. (1978). Experimental determination of the molecular diffusion. *Journal of Applied Chemistry, USSR*, 49, 1251–1255.
- McNesby, J.R., & Okabe, H. (1964). Vacuum ultraviolet photochemistry. In *Advances in Photochemistry* (vol.3, pp.157). New York: Interscience Publishers.
- Min-Tian Gao, et.al. (2005). Ozone mass transfer in a new gas–liquid contactor–Karman contactor. *Separation and Purification Technology*, 42, 145–149.
- Pontius, F.W. (1990). *Water quality and treatment* (4<sup>th</sup> ed.). American Water Works Association. New York: Mc Graw Hill.
- Rakness, Kerwin L. (2001). *Ozone in drinking water treatment: process design, operation, and optimization*. American Water Works Association.
- Stenstrom, M.K., & Gilbert, R.G. (1981). Review paper: Effect of alpha, beta, and theta factor upon the design specification and operation of aeration systems. *Water Research*, 30, 222–227.
- St. Denis, C.E., Fell, C.J. (1971). Diffusivity of oxygen in water. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 49, 885.
- Treybal, Robert E. (1981). *Mass Transfer Operation* (3<sup>rd</sup> ed.). Singapore: Mc Graw Hill.
- Volman, D.H. (1963). Photochemical gas phase reactions. In *Advances in photochemistry* (vol.1, pp.43). New York: Interscience Publishers.
- Von Gunten, Urs. (2003). Ozonation of drinkingwater: Part II. Disinfection and by-product formation in presence of bromide, iodide or chlorine. *Water Research*, 37, 1469–1487.
- Won Tae Shin, et.al. (1999). Ozonation using microbubbles formed by electric fields. *Separation Purification Technology*, 15, 271–282.



**Tabel A.1.**

Konversi laju alir volumetrik ke laju alir non-volumetrik

**A.1.1. Laju alir udara**

$Q_G$ (L/jam)	$d_{in}$ selang (cm)	A selang (cm <sup>2</sup> )	$U_G$ (cm/s)	$U_G$ (m/s)
400	0,55	0,238	467,485	4,67
600	0,55	0,238	701,227	7,01
800	0,55	0,238	934,970	9,35
1000	0,55	0,238	1168,712	11,69

**A.1.2. Laju alir air**

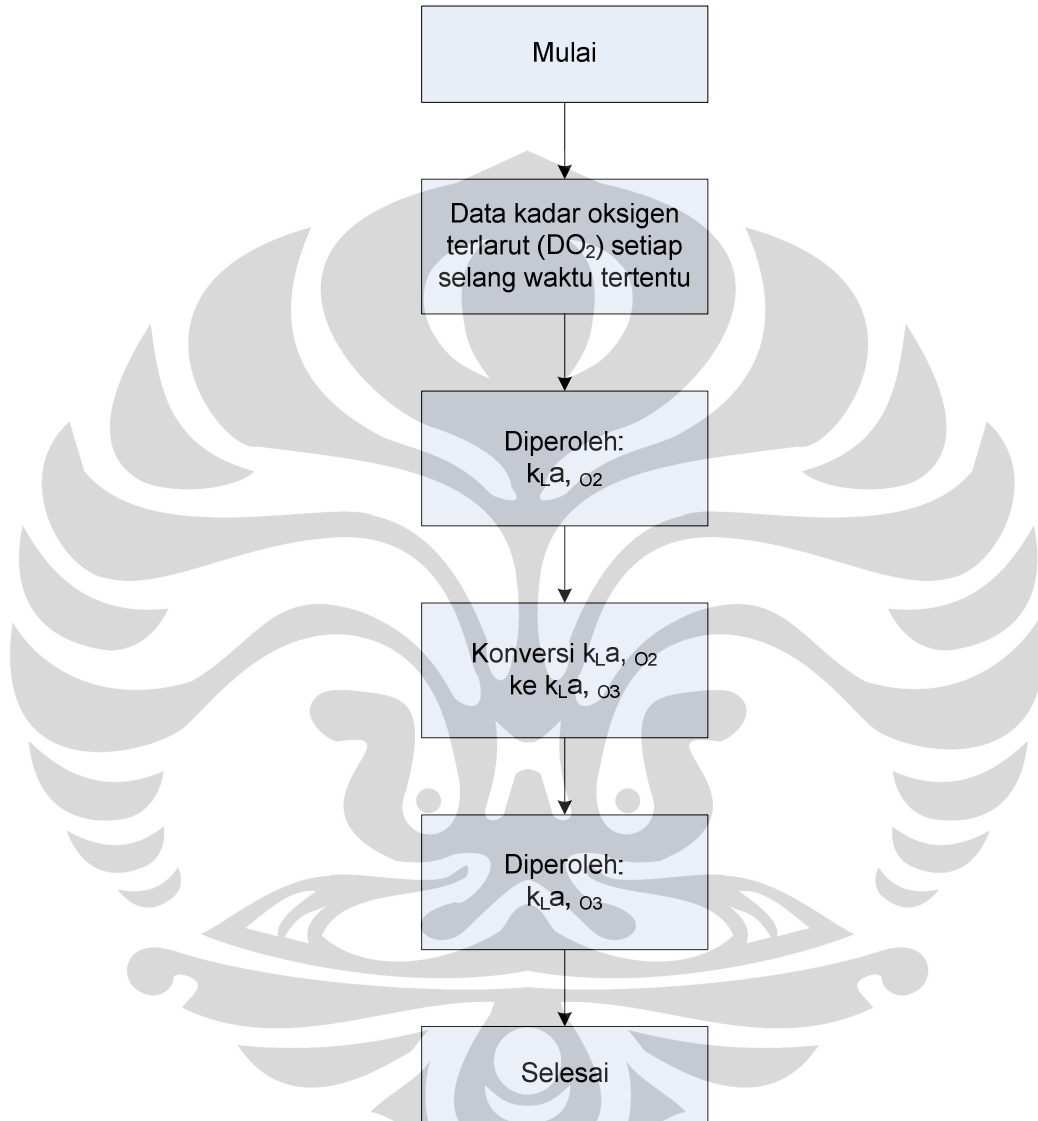
$Q_L$ (L/menit)	$d_{in}$ selang (cm)	A pipa (cm <sup>2</sup> )	$U_L$ (cm/s)	$U_L$ (m/s)
1	1,85	2,689	6,198	0,06
2	1,85	2,689	12,396	0,12
3	1,85	2,689	18,594	0,19
4	1,85	2,689	24,791	0,25
5	1,85	2,689	30,989	0,31
6	1,85	2,689	37,187	0,37





## B. Pengolahan Data pada Penentuan $k_{L,a,O_2}$ Menggunakan Korelasi $k_{L,a,O_2}$

Lampiran B ini menyajikan ulasan singkat mengenai pengolahan data yang dilakukan untuk memperoleh  $k_{L,a,O_2}$ . Langkah-langkah yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar B.1. berikut:



**Gambar B.1.** Diagram alir perhitungan  $k_{L,a,O_2}$

$k_{L,a,O_2}$  diperoleh dari gradien kurva waktu ( $t$ ) terhadap DO. Setelah itu dilakukan konversi terhadap  $k_{L,a,O_2}$  menjadi  $k_{L,a,O_3}$ . Ulasan lebih lengkap mengenai langkah-langkah penentuan  $k_{L,a,O_2}$  dapat dilihat pada bagian metode penelitian. 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,  $k_L a_{O_2}$  adalah sebesar 0,013 menit<sup>-1</sup>, maka untuk mengkonversi harga  $k_L a_{O_2}$  tersebut menjadi  $k_L a_{O_3}$  dapat dilihat pada perhitungan berikut:

Diketahui  $k_L a_{O_2}$  pada  $T = 30,18^\circ\text{C}$  yang diperoleh dari gradient kurva  $DO$  terhadap  $t$  adalah sebesar 0,013 menit<sup>-1</sup>.

$$k_L a_{O_3} = 0,622 k_L a_{O_2}$$

$$k_L a_{O_3} = 0,622 (0,013 \text{ menit}^{-1})$$

$$k_L a_{O_3} = 0,0081 \text{ menit}^{-1}$$

Harga  $k_L a_{O_3}$  tersebut hanya valid pada  $T = 20^\circ\text{C}$ . Pada temperatur yang berbeda, dapat digunakan suatu faktor empiris yang sering digunakan dalam perhitungan yaitu faktor *theta*,  $\theta$ .

$$k_L a_T = \frac{k_L a_{20}}{\theta^{(20-T)}}$$

$$k_L a_T = \frac{0,0081}{1,024^{(20-30,18)}}$$

$$k_L a_T = 0,0103 \text{ menit}^{-1}$$

Dengan demikian diperoleh harga  $k_L a_{O_3}$  pada  $T = 30,18^\circ\text{C}$  adalah sebesar 0,0103 menit<sup>-1</sup>.

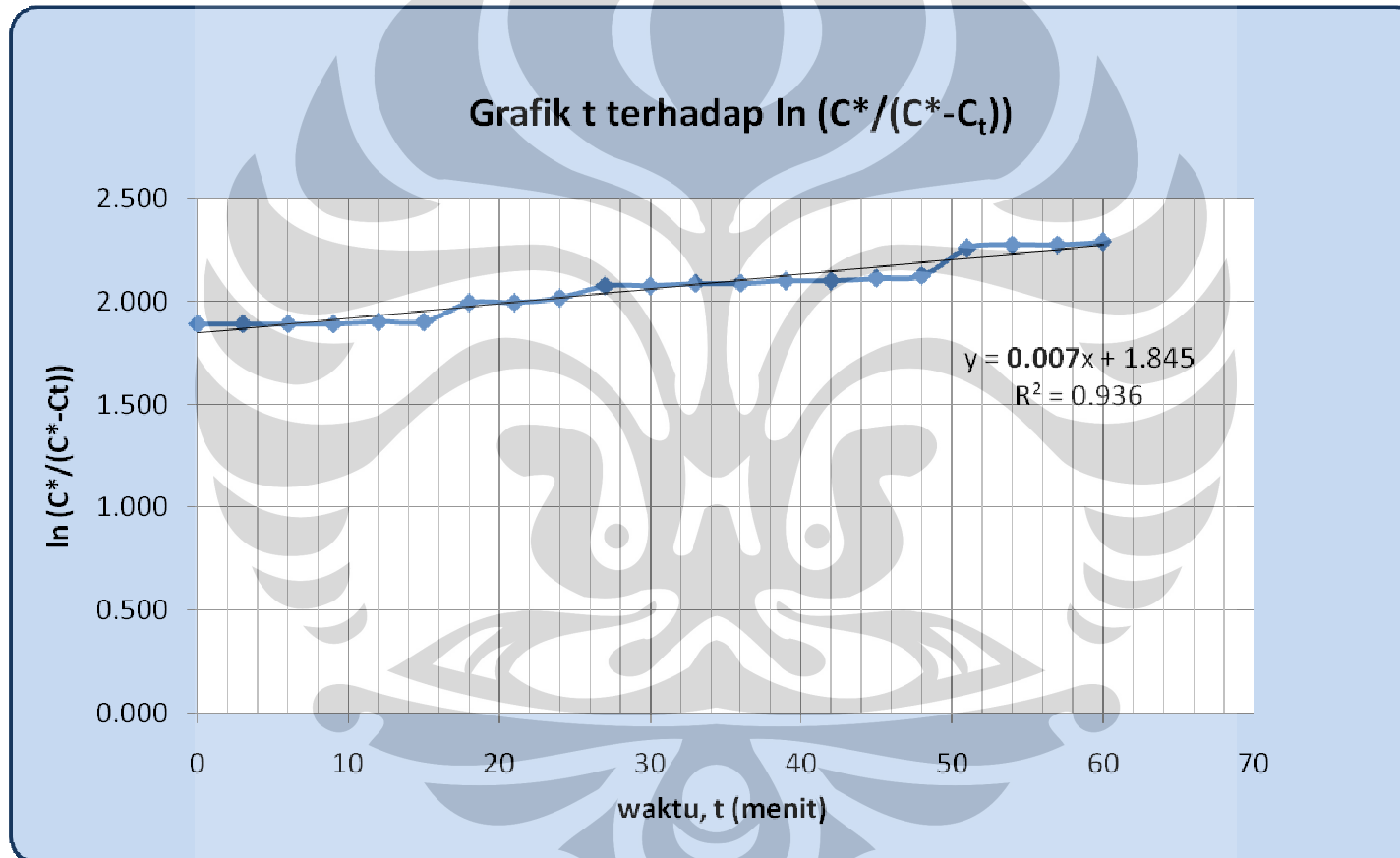
**B.1. Variasi Laju Alir Air (dengan Injektor Mazzei)**

**B.1.1. Pada  $U_G = 7,01$  m/s dan  $U_L = 0,06$  m/s**

**Tabel B.1.** Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa Oksigen–Air ( $k_L a_{O_2}$ ) dengan injektor mazzei

t (menit)	C O <sub>2</sub> (mg/L)	T (°C)	P (atm)	C <sub>p</sub>	% Saturation	C* O <sub>2</sub> (mg/L)	X (t)	Y [ln (C*/(C*-C <sub>t</sub> ))]
0	6.4	28.8	0.977	7.538	84.905	7.538	0	1.891
3	6.4	28.8	0.977	7.538	84.905	7.538	3	1.891
6	6.4	28.8	0.977	7.538	84.905	7.538	6	1.891
9	6.4	28.8	0.977	7.538	84.905	7.538	9	1.891
12	6.4	28.9	0.977	7.525	85.055	7.525	12	1.901
15	6.4	28.9	0.977	7.525	85.055	7.525	15	1.901
18	6.5	28.9	0.977	7.525	86.384	7.525	18	1.994
21	6.5	28.9	0.977	7.525	86.384	7.525	21	1.994
24	6.5	29.1	0.977	7.498	86.687	7.498	24	2.016
27	6.5	29.6	0.977	7.433	87.447	7.433	27	2.075
30	6.5	29.6	0.977	7.433	87.447	7.433	30	2.075
33	6.5	29.7	0.977	7.420	87.599	7.420	33	2.087
36	6.5	29.7	0.977	7.420	87.599	7.420	36	2.087
39	6.5	29.8	0.977	7.407	87.751	7.407	39	2.100
42	6.5	29.8	0.977	7.407	87.751	7.407	42	2.100
45	6.5	29.9	0.977	7.394	87.904	7.394	45	2.112
48	6.5	30.0	0.977	7.382	88.056	7.382	48	2.125
51	6.6	30.1	0.977	7.369	89.566	7.369	51	2.260
54	6.6	30.2	0.977	7.356	89.720	7.356	54	2.275
57	6.6	30.2	0.977	7.356	89.720	7.356	57	2.275
60	6.6	30.3	0.977	7.344	89.875	7.344	60	2.290

Dilakukan pemlotan terhadap  $t$  dengan  $\ln(C^*/(C^*-C_t))$  sehingga diperoleh grafik seperti pada Gambar B.2. berikut dan diperoleh nilai  $k_L a_{O_2}$  yang merupakan gradient dari grafik, yaitu sebesar  $0,007 \text{ menit}^{-1}$ .



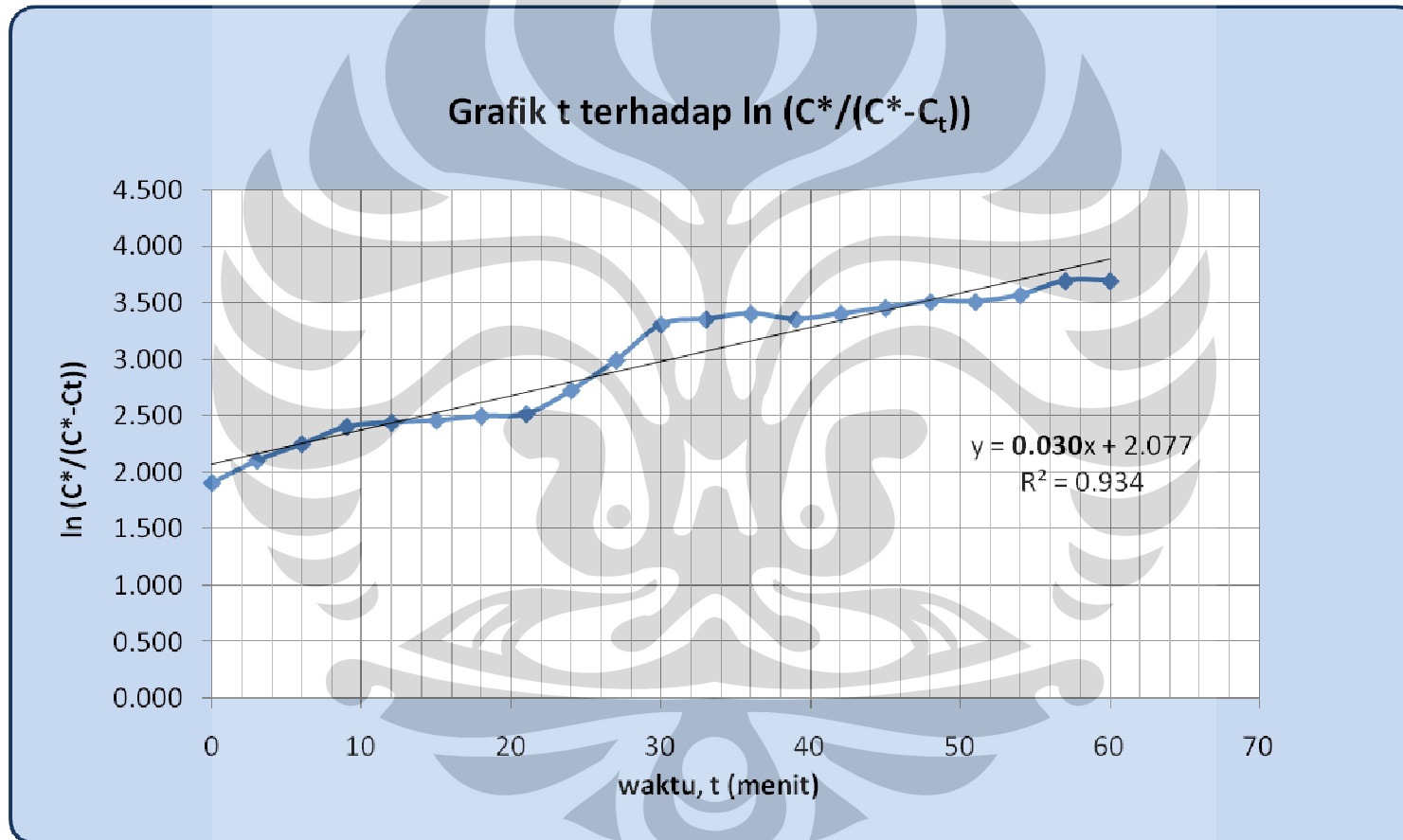
**Gambar B.2.** Grafik penentuan  $k_L a_{O_2}$  pada  $U_G = 7,01 \text{ m/s}$  dan  $U_L = 0,06 \text{ m/s}$

**B.1.2. Pada  $U_G = 7,01$  m/s dan  $U_L = 0,12$  m/s**

**Tabel B.2.** Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa Oksigen–Air ( $k_L a_{O_2}$ ) dengan injektor mazzei

t (menit)	C O <sub>2</sub> (mg/L)	T (°C)	P (atm)	Cp	% Saturation	C* O <sub>2</sub> (mg/L)	X (t)	Y [ $\ln (C^*/(C^*-C_t))$ ]
0	6.4	29.0	0.977	7.511	85.204	7.511	0	1.911
3	6.6	29.0	0.977	7.511	87.867	7.511	3	2.109
6	6.7	29.2	0.977	7.485	89.511	7.485	6	2.255
9	6.8	29.3	0.977	7.472	91.006	7.472	9	2.409
12	6.8	29.5	0.977	7.446	91.324	7.446	12	2.445
15	6.8	29.6	0.977	7.433	91.483	7.433	15	2.463
18	6.8	29.8	0.977	7.407	91.802	7.407	18	2.501
21	6.8	29.9	0.977	7.394	91.961	7.394	21	2.521
24	6.9	30.0	0.977	7.382	93.475	7.382	24	2.730
27	7.0	30.1	0.977	7.369	94.994	7.369	27	2.994
30	7.1	30.1	0.977	7.369	96.351	7.369	30	3.311
33	7.1	30.2	0.977	7.356	96.517	7.356	33	3.357
36	7.1	30.3	0.977	7.344	96.684	7.344	36	3.406
39	7.1	30.2	0.977	7.356	96.517	7.356	39	3.357
42	7.1	30.3	0.977	7.344	96.684	7.344	42	3.406
45	7.1	30.4	0.977	7.331	96.851	7.331	45	3.458
48	7.1	30.5	0.977	7.318	97.018	7.318	48	3.512
51	7.1	30.5	0.977	7.318	97.018	7.318	51	3.512
54	7.1	30.6	0.977	7.306	97.184	7.306	54	3.570
57	7.1	30.8	0.977	7.281	97.518	7.281	57	3.696
60	7.1	30.8	0.977	7.281	97.518	7.281	60	3.696

Dilakukan pemlotan terhadap  $t$  dengan  $\ln(C^*/(C^*-C_t))$  sehingga diperoleh grafik seperti pada Gambar B.3. berikut dan diperoleh nilai  $k_L a_{O_2}$  yang merupakan gradient dari grafik, yaitu sebesar  $0,030 \text{ menit}^{-1}$ .



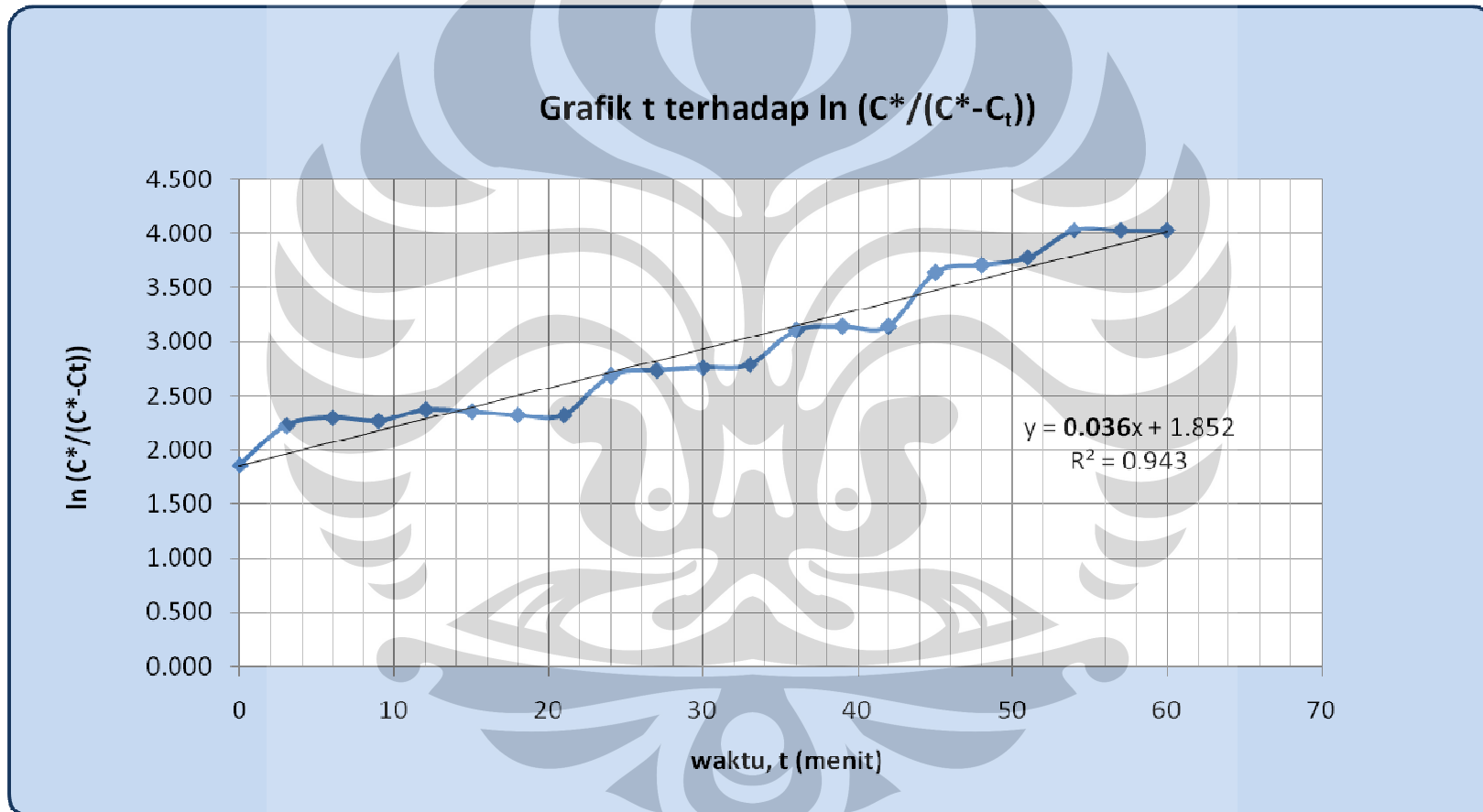
**Gambar B.3.** Grafik penentuan  $k_L a_{O_2}$  pada  $U_G = 7,01 \text{ m/s}$  dan  $U_L = 0,12 \text{ m/s}$

**B.1.3. Pada  $U_G = 7,01$  m/s dan  $U_L = 0,19$  m/s**

**Tabel B.3.** Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa Oksigen–Air ( $k_L a_{O_2}$ ) dengan injektor mazzei

t (menit)	C O <sub>2</sub> (mg/L)	T (°C)	P (atm)	Cp	% Saturation	C* O <sub>2</sub> (mg/L)	X (t)	Y [ $\ln (C^*/(C^*-C_t))$ ]
0	6.4	28.5	0.977	7.578	84.458	7.578	0	1.862
3	6.7	29.0	0.977	7.511	89.198	7.511	3	2.225
6	6.7	29.5	0.977	7.446	89.981	7.446	6	2.301
9	6.7	29.3	0.977	7.472	89.668	7.472	9	2.270
12	6.8	29.1	0.977	7.498	90.688	7.498	12	2.374
15	6.8	29.0	0.977	7.511	90.529	7.511	15	2.357
18	6.8	28.8	0.977	7.538	90.212	7.538	18	2.324
21	6.8	28.8	0.977	7.538	90.212	7.538	21	2.324
24	7.0	29.0	0.977	7.511	93.192	7.511	24	2.687
27	7.0	29.2	0.977	7.485	93.519	7.485	27	2.736
30	7.0	29.3	0.977	7.472	93.683	7.472	30	2.762
33	7.0	29.4	0.977	7.459	93.846	7.459	33	2.788
36	7.1	29.6	0.977	7.433	95.519	7.433	36	3.105
39	7.1	29.7	0.977	7.420	95.685	7.420	39	3.143
42	7.1	29.7	0.977	7.420	95.685	7.420	42	3.143
45	7.2	29.9	0.977	7.394	97.370	7.394	45	3.638
48	7.2	30.0	0.977	7.382	97.539	7.382	48	3.705
51	7.2	30.1	0.977	7.369	97.708	7.369	51	3.776
54	7.2	30.4	0.977	7.331	98.215	7.331	54	4.026
57	7.2	30.4	0.977	7.331	98.215	7.331	57	4.026
60	7.2	30.4	0.977	7.331	98.215	7.331	60	4.026

Dilakukan pemlotan terhadap  $t$  dengan  $\ln (C^*/(C^*-C_t))$  sehingga diperoleh grafik seperti pada Gambar B.4. berikut dan diperoleh nilai  $k_L a_{O_2}$  yang merupakan gradient dari grafik, yaitu sebesar  $0,036 \text{ menit}^{-1}$ .



**Gambar B.4.** Grafik penentuan  $k_L a_{O_2}$  pada  $U_G = 7,01 \text{ m/s}$  dan  $U_L = 0,19 \text{ m/s}$

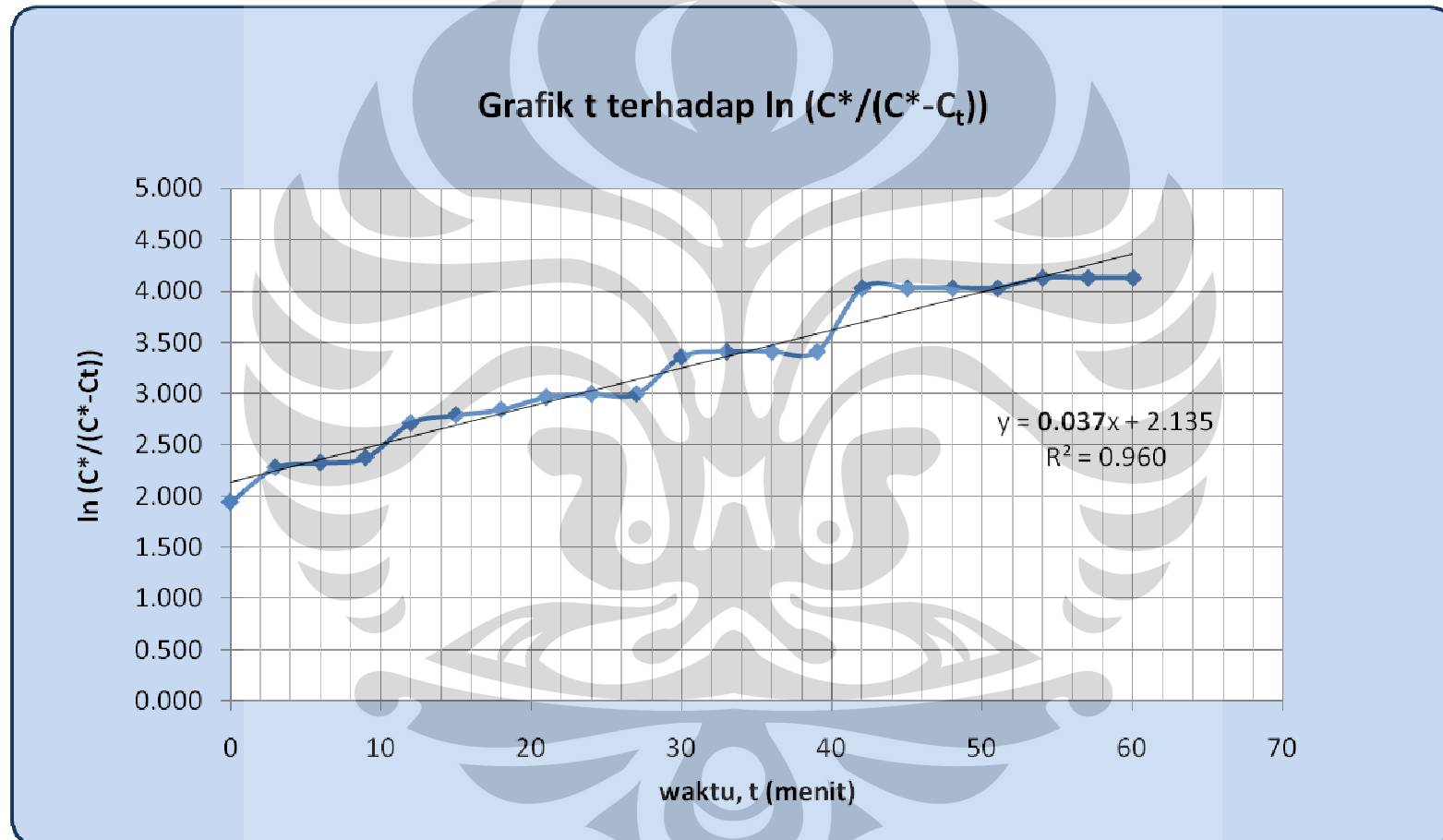


**B.1.4. Pada  $U_G = 7,01$  m/s dan  $U_L = 0,25$  m/s**

**Tabel B.4.** Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa Oksigen–Air ( $k_L \alpha_{O_2}$ ) dengan injektor mazzei

t (menit)	C O <sub>2</sub> (mg/L)	T (°C)	P (atm)	Cp	% Saturation	C* O <sub>2</sub> (mg/L)	X (t)	Y [ $\ln (C^*/(C^*-C_t))$ ]
0	6.5	28.4	0.977	7.591	85.626	7.591	0	1.940
3	6.8	28.5	0.977	7.578	89.736	7.578	3	2.277
6	6.8	28.8	0.977	7.538	90.212	7.538	6	2.324
9	6.8	29.1	0.977	7.498	90.688	7.498	9	2.374
12	7.0	29.1	0.977	7.498	93.355	7.498	12	2.711
15	7.0	29.4	0.977	7.459	93.846	7.459	15	2.788
18	7.0	29.6	0.977	7.433	94.174	7.433	18	2.843
21	7.0	30.0	0.977	7.382	94.830	7.382	21	2.962
24	7.0	30.1	0.977	7.369	94.994	7.369	24	2.994
27	7.0	30.1	0.977	7.369	94.994	7.369	27	2.994
30	7.1	30.2	0.977	7.356	96.517	7.356	30	3.357
33	7.1	30.3	0.977	7.344	96.684	7.344	33	3.406
36	7.1	30.3	0.977	7.344	96.684	7.344	36	3.406
39	7.1	30.3	0.977	7.344	96.684	7.344	39	3.406
42	7.2	30.4	0.977	7.331	98.215	7.331	42	4.026
45	7.2	30.4	0.977	7.331	98.215	7.331	45	4.026
48	7.2	30.4	0.977	7.331	98.215	7.331	48	4.026
51	7.2	30.4	0.977	7.331	98.215	7.331	51	4.026
54	7.2	30.5	0.977	7.318	98.384	7.318	54	4.125
57	7.2	30.5	0.977	7.318	98.384	7.318	57	4.125
60	7.2	30.5	0.977	7.318	98.384	7.318	60	4.125

Dilakukan pemlotan terhadap  $t$  dengan  $\ln (C^*/(C^*-C_t))$  sehingga diperoleh grafik seperti pada Gambar B.4. berikut dan diperoleh nilai  $k_L a_{O_2}$  yang merupakan gradient dari grafik, yaitu sebesar  $0,037 \text{ menit}^{-1}$ .



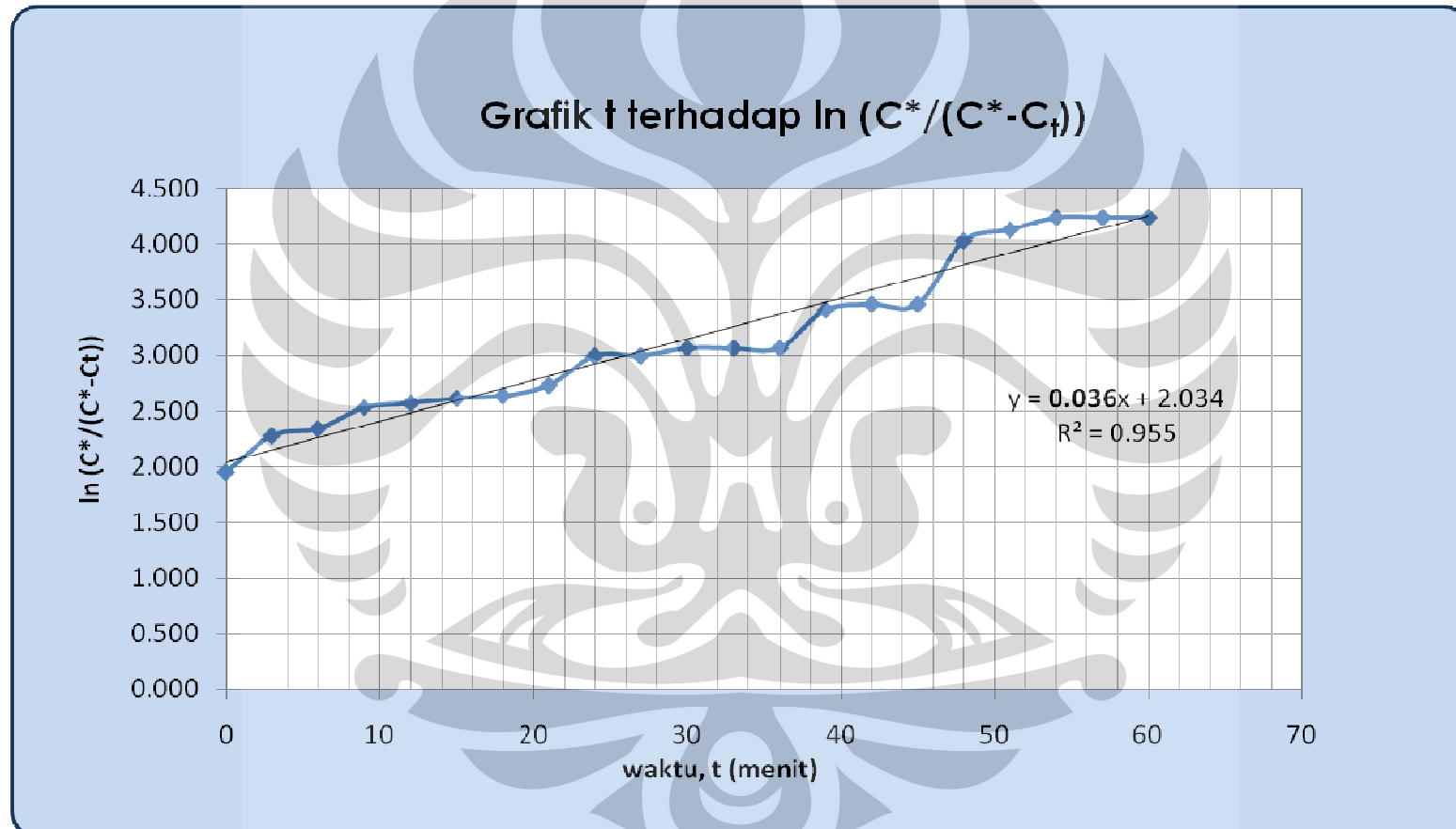
**Gambar B.5.** Grafik penentuan  $k_L a_{O_2}$  pada  $U_G = 7,01 \text{ m/s}$  dan  $U_L = 0,25 \text{ m/s}$

**B.1.5. Pada  $U_G = 7,01$  m/s dan  $U_L = 0,31$  m/s**

**Tabel B.5.** Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa Oksigen–Air ( $k_L a_{O_2}$ ) dengan injektor mazzei

t (menit)	C O <sub>2</sub> (mg/L)	T (°C)	P (atm)	Cp	% Saturation	C* O <sub>2</sub> (mg/L)	X (t)	Y [ $\ln (C^*/(C^*-C_0))$ ]
0	6.5	28.5	0.977	7.578	85.777	7.578	0	1.950
3	6.8	28.5	0.977	7.578	89.736	7.578	3	2.277
6	6.8	28.9	0.977	7.525	90.371	7.525	6	2.340
9	6.9	29.1	0.977	7.498	92.022	7.498	9	2.528
12	6.9	29.3	0.977	7.472	92.344	7.472	12	2.570
15	6.9	29.5	0.977	7.446	92.667	7.446	15	2.613
18	6.9	29.6	0.977	7.433	92.828	7.433	18	2.635
21	6.9	30.0	0.977	7.382	93.475	7.382	21	2.730
24	7.0	30.1	0.977	7.369	94.994	7.369	24	2.994
27	7.0	30.1	0.977	7.369	94.994	7.369	27	2.994
30	7.0	30.3	0.977	7.344	95.322	7.344	30	3.062
33	7.0	30.3	0.977	7.344	95.322	7.344	33	3.062
36	7.0	30.3	0.977	7.344	95.322	7.344	36	3.062
39	7.1	30.3	0.977	7.344	96.684	7.344	39	3.406
42	7.1	30.4	0.977	7.331	96.851	7.331	42	3.458
45	7.1	30.4	0.977	7.331	96.851	7.331	45	3.458
48	7.2	30.4	0.977	7.331	98.215	7.331	48	4.026
51	7.2	30.5	0.977	7.318	98.384	7.318	51	4.125
54	7.2	30.6	0.977	7.306	98.553	7.306	54	4.236
57	7.2	30.6	0.977	7.306	98.553	7.306	57	4.236
60	7.2	30.6	0.977	7.306	98.553	7.306	60	4.236

Dilakukan pemlotan terhadap  $t$  dengan  $\ln(C^*/(C^*-C_t))$  sehingga diperoleh grafik seperti pada Gambar B.5. berikut dan diperoleh nilai  $k_L a_{O_2}$  yang merupakan gradient dari grafik, yaitu sebesar  $0,036 \text{ menit}^{-1}$ .



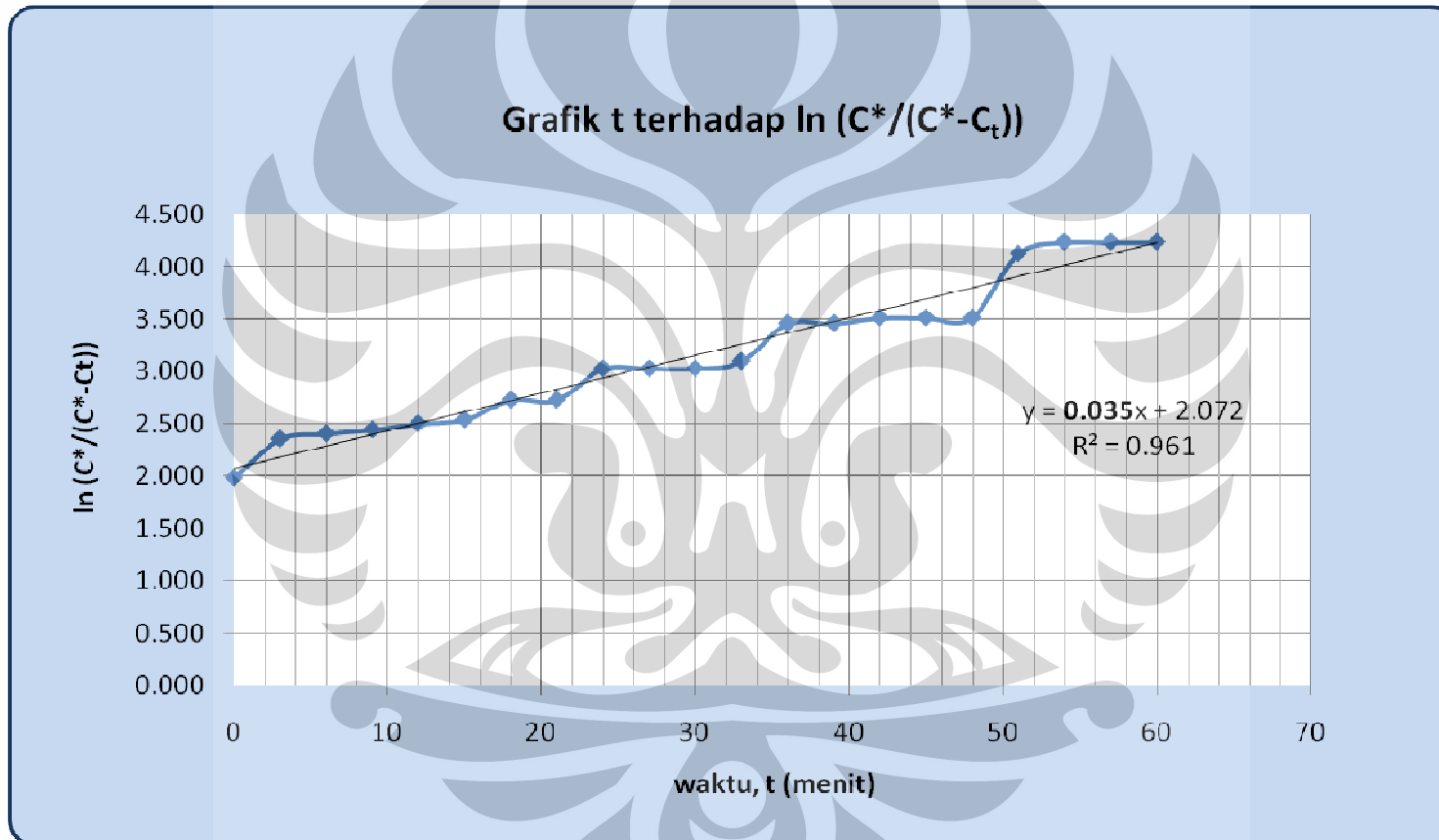
**Gambar B.6.** Grafik penentuan  $k_L a_{O_2}$  pada  $U_G = 7,01 \text{ m/s}$  dan  $U_L = 0,31 \text{ m/s}$

**B.1.6. Pada  $U_G = 7,01$  m/s dan  $U_L = 0,37$  m/s**

**Tabel B.6.** Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa Oksigen–Air ( $k_L a_{O_2}$ ) dengan injektor mazzei

t (menit)	C O <sub>2</sub> (mg/L)	T (°C)	P (atm)	Cp	% Saturation	C* O <sub>2</sub> (mg/L)	X (t)	Y [ $\ln (C^*/(C^*-C_t))$ ]
0	6.5	28.8	0.977	7.538	86.232	7.538	0	1.983
3	6.8	29.0	0.977	7.511	90.529	7.511	3	2.357
6	6.8	29.3	0.977	7.472	91.006	7.472	6	2.409
9	6.8	29.5	0.977	7.446	91.324	7.446	9	2.445
12	6.8	29.8	0.977	7.407	91.802	7.407	12	2.501
15	6.8	30.0	0.977	7.382	92.120	7.382	15	2.541
18	6.9	30.0	0.977	7.382	93.475	7.382	18	2.730
21	6.9	30.0	0.977	7.382	93.475	7.382	21	2.730
24	7.0	30.2	0.977	7.356	95.158	7.356	24	3.028
27	7.0	30.2	0.977	7.356	95.158	7.356	27	3.028
30	7.0	30.2	0.977	7.356	95.158	7.356	30	3.028
33	7.0	30.4	0.977	7.331	95.487	7.331	33	3.098
36	7.1	30.4	0.977	7.331	96.851	7.331	36	3.458
39	7.1	30.4	0.977	7.331	96.851	7.331	39	3.458
42	7.1	30.5	0.977	7.318	97.018	7.318	42	3.512
45	7.1	30.5	0.977	7.318	97.018	7.318	45	3.512
48	7.1	30.5	0.977	7.318	97.018	7.318	48	3.512
51	7.2	30.5	0.977	7.318	98.384	7.318	51	4.125
54	7.2	30.6	0.977	7.306	98.553	7.306	54	4.236
57	7.2	30.6	0.977	7.306	98.553	7.306	57	4.236
60	7.2	30.6	0.977	7.306	98.553	7.306	60	4.236

Dilakukan pemlotan terhadap  $t$  dengan  $\ln(C^*/(C^*-C_t))$  sehingga diperoleh grafik seperti pada Gambar B.7. berikut dan diperoleh nilai  $k_L a_{O_2}$  yang merupakan gradient dari grafik, yaitu sebesar  $0,035 \text{ menit}^{-1}$ .

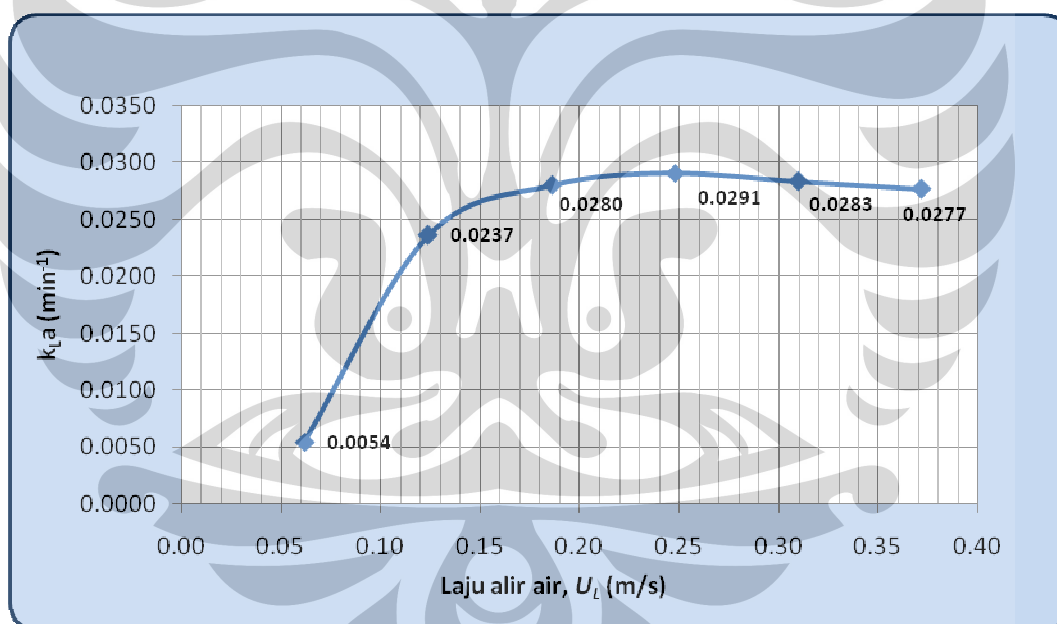


**Gambar B.7.** Grafik penentuan  $k_L a_{O_2}$  pada  $U_G = 7,01 \text{ m/s}$  dan  $U_L = 0,37 \text{ m/s}$

Dari pengolahan data yang dilakukan pada bagian B.1.1. sampai B.1.6. diperoleh harga  $k_L a_{O_2}$  masing-masing dan dikonversi menjadi  $k_L a_{O_3}$  sesuai langkah-langkah pada Metode Penelitian. Harga  $k_L a_{O_3}$  tersebut dapat dilihat pada Tabel B.7. dan Gambar B.8. berikut:

**Tabel B.7.** Harga  $k_L a_{O_2}$  untuk beberapa variasi laju alir air

$U_L$ (m/s)	$U_G$ (m/s)	$k_L a_{O_2}$	$k_L a_{O_3}$ (T=20°C)	T (°C)	$k_L a_{O_3}$
0.06	7.01	0.007	0.0044	29.47	0.0054
0.12	7.01	0.030	0.0187	30.00	0.0237
0.19	7.01	0.036	0.0224	29.48	0.0280
0.25	7.01	0.037	0.0230	29.87	0.0291
0.31	7.01	0.036	0.0224	29.92	0.0283
0.37	7.01	0.035	0.0218	30.10	0.0277



**Gambar B.8.** Grafik hubungan laju alir air ( $U_L$ ) dengan  $k_L a$  pada  $U_G = 7,01$  m/s

## B.2. Variasi Laju Alir Udara (dengan Injektor Mazzei)

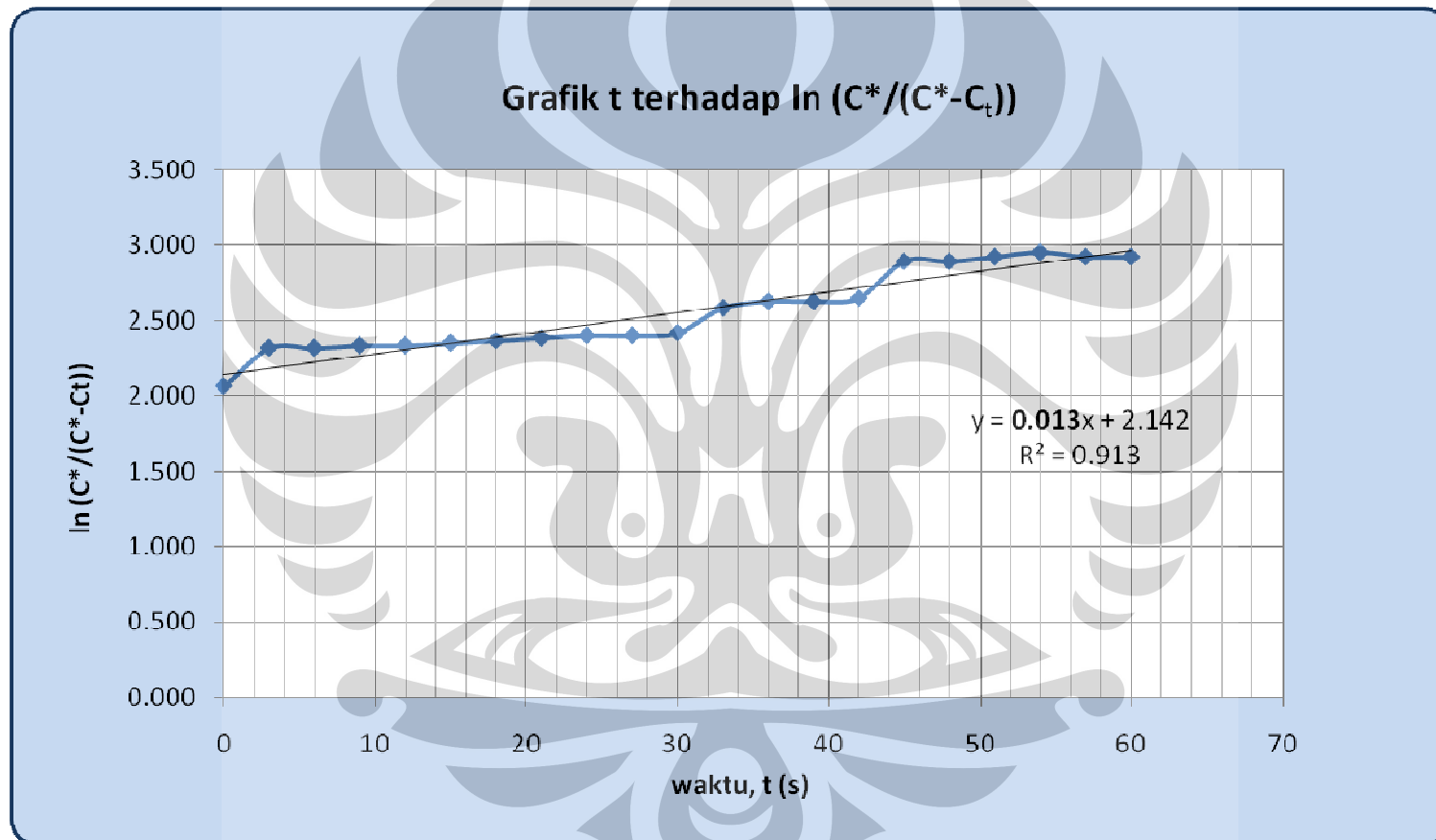
### B.2.1. Pada $U_G = 4,67 \text{ m/s}$ , $U_L = 0,25 \text{ m/s}$

Tabel B.8. Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa Oksigen–Air ( $k_L a_{O_2}$ ) dengan injektor mazzei

t (menit)	C O <sub>2</sub> (mg/L)	T (°C)	P (atm)	Cp	% Saturation	C* O <sub>2</sub> (mg/L)	X (t)	Y [ $\ln (C^*/(C^*-C_t))$ ]
0	6.5	29.5	0.977	7.446	87.295	7.446	0	2.063
3	6.7	29.6	0.977	7.433	90.138	7.433	3	2.316
6	6.7	29.6	0.977	7.433	90.138	7.433	6	2.316
9	6.7	29.7	0.977	7.420	90.295	7.420	9	2.332
12	6.7	29.7	0.977	7.420	90.295	7.420	12	2.332
15	6.7	29.8	0.977	7.407	90.452	7.407	15	2.349
18	6.7	29.9	0.977	7.394	90.609	7.394	18	2.365
21	6.7	30.0	0.977	7.382	90.766	7.382	21	2.382
24	6.7	30.1	0.977	7.369	90.923	7.369	24	2.399
27	6.7	30.1	0.977	7.369	90.923	7.369	27	2.399
30	6.7	30.2	0.977	7.356	91.080	7.356	30	2.417
33	6.8	30.2	0.977	7.356	92.439	7.356	33	2.582
36	6.8	30.4	0.977	7.331	92.758	7.331	36	2.625
39	6.8	30.4	0.977	7.331	92.758	7.331	39	2.625
42	6.8	30.5	0.977	7.318	92.918	7.318	42	2.648
45	6.9	30.6	0.977	7.306	94.447	7.306	45	2.891
48	6.9	30.6	0.977	7.306	94.447	7.306	48	2.891
51	6.9	30.7	0.977	7.293	94.609	7.293	51	2.920
54	6.9	30.8	0.977	7.281	94.771	7.281	54	2.951
57	6.9	30.7	0.977	7.293	94.609	7.293	57	2.920
60	6.9	30.7	0.977	7.293	94.609	7.293	60	2.920



Dilakukan pemlotan terhadap  $t$  dengan  $\ln(C^*/(C^*-C_t))$  sehingga diperoleh grafik seperti pada Gambar B.9. berikut dan diperoleh nilai  $k_L a_{O_2}$  yang merupakan gradient dari grafik, yaitu sebesar  $0,013 \text{ menit}^{-1}$ .



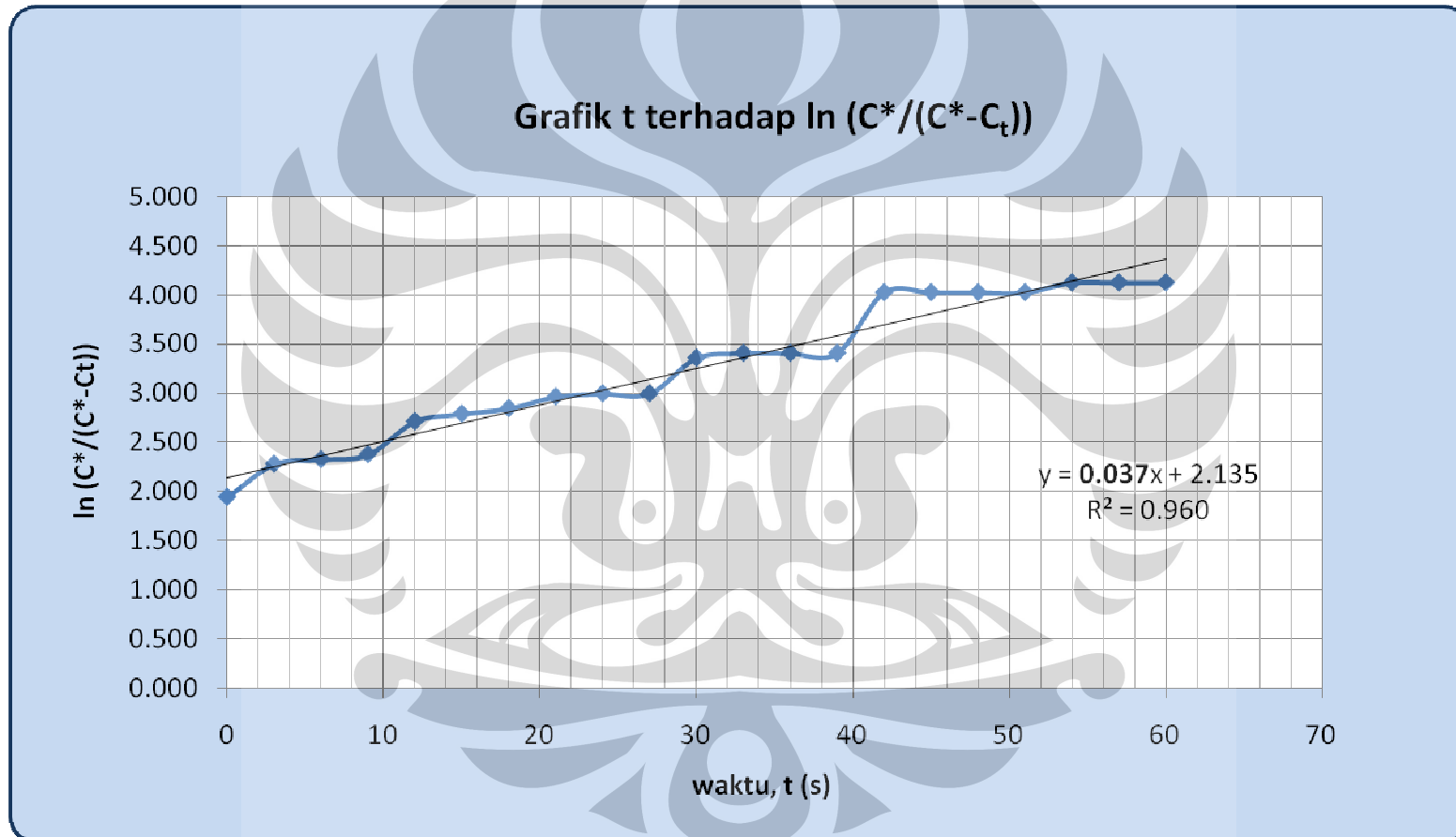
**Gambar B.9.** Grafik penentuan  $k_L a_{O_2}$  pada  $U_G = 4,67 \text{ m/s}$ ,  $U_L = 0,25 \text{ m/s}$

**B.2.2. Pada  $U_G = 7,01$  m/s dan  $U_L = 0,25$  m/s**

**Tabel B.9.** Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa Oksigen–Air ( $k_L a_{O_2}$ ) dengan injektor mazzei

t (menit)	C O <sub>2</sub> (mg/L)	T (°C)	P (atm)	C <sub>p</sub>	% Saturation	C* O <sub>2</sub> (mg/L)	X (t)	Y [ $\ln (C^*/(C^*-C))$ ]
0	6.5	28.4	0.977	7.591	85.626	7.591	0	1.940
3	6.8	28.5	0.977	7.578	89.736	7.578	3	2.277
6	6.8	28.8	0.977	7.538	90.212	7.538	6	2.324
9	6.8	29.1	0.977	7.498	90.688	7.498	9	2.374
12	7.0	29.1	0.977	7.498	93.355	7.498	12	2.711
15	7.0	29.4	0.977	7.459	93.846	7.459	15	2.788
18	7.0	29.6	0.977	7.433	94.174	7.433	18	2.843
21	7.0	30.0	0.977	7.382	94.830	7.382	21	2.962
24	7.0	30.1	0.977	7.369	94.994	7.369	24	2.994
27	7.0	30.1	0.977	7.369	94.994	7.369	27	2.994
30	7.1	30.2	0.977	7.356	96.517	7.356	30	3.357
33	7.1	30.3	0.977	7.344	96.684	7.344	33	3.406
36	7.1	30.3	0.977	7.344	96.684	7.344	36	3.406
39	7.1	30.3	0.977	7.344	96.684	7.344	39	3.406
42	7.2	30.4	0.977	7.331	98.215	7.331	42	4.026
45	7.2	30.4	0.977	7.331	98.215	7.331	45	4.026
48	7.2	30.4	0.977	7.331	98.215	7.331	48	4.026
51	7.2	30.4	0.977	7.331	98.215	7.331	51	4.026
54	7.2	30.5	0.977	7.318	98.384	7.318	54	4.125
57	7.2	30.5	0.977	7.318	98.384	7.318	57	4.125
60	7.2	30.5	0.977	7.318	98.384	7.318	60	4.125

Dilakukan pemlotan terhadap  $t$  dengan  $\ln (C^*/(C^*-C_t))$  sehingga diperoleh grafik seperti pada Gambar B.10. berikut dan diperoleh nilai  $k_L a_{i,O_2}$  yang merupakan gradient dari grafik, yaitu sebesar  $0,037 \text{ menit}^{-1}$ .



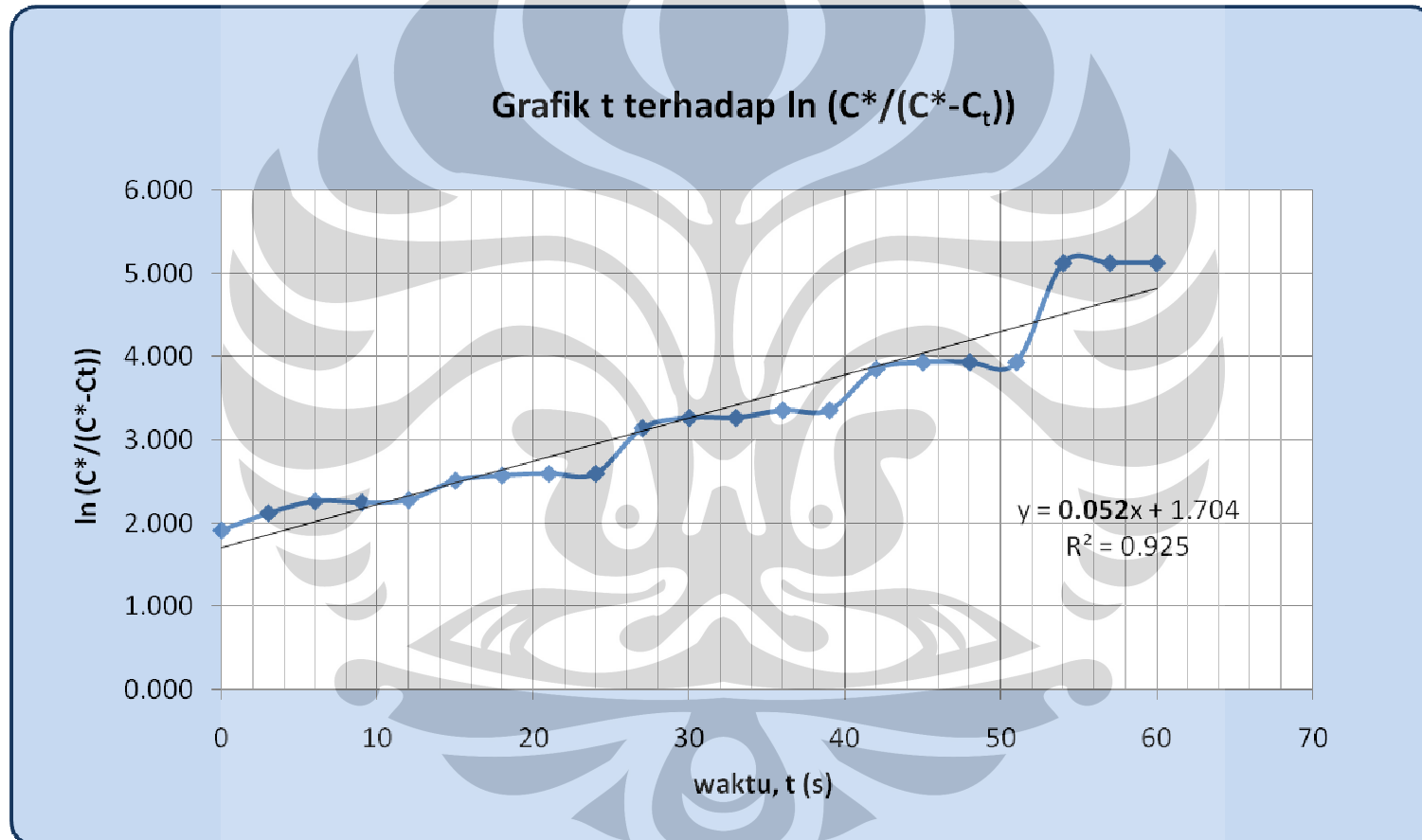
**Gambar B.10.** Grafik penentuan  $k_L a_{i,O_2}$  pada  $U_G = 7,01 \text{ m/s}$  dan  $U_L = 0,25 \text{ m/s}$

**B.2.3. Pada  $U_G = 9,35$  m/s dan  $U_L = 0,25$  m/s**

**Tabel B.10.** Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa Oksigen–Air ( $k_L a_{O_2}$ ) dengan injektor mazzei

t (menit)	C O <sub>2</sub> (mg/L)	T (°C)	P (atm)	C <sub>p</sub>	% Saturation	C* O <sub>2</sub> (mg/L)	X (t)	Y [ $\ln (C^*/(C^*-C_t))$ ]
0	6.6	27.3	0.977	7.741	85.257	7.741	0	1.914
3	6.8	27.4	0.977	7.727	87.998	7.727	3	2.120
6	6.9	27.6	0.977	7.700	89.612	7.700	6	2.265
9	6.9	27.5	0.977	7.714	89.452	7.714	9	2.249
12	6.9	27.7	0.977	7.686	89.772	7.686	12	2.280
15	7.0	28.2	0.977	7.618	91.887	7.618	15	2.512
18	7.0	28.5	0.977	7.578	92.376	7.578	18	2.574
21	7.0	28.6	0.977	7.564	92.539	7.564	21	2.595
24	7.0	28.6	0.977	7.564	92.539	7.564	24	2.595
27	7.1	29.7	0.977	7.420	95.685	7.420	27	3.143
30	7.1	30.0	0.977	7.382	96.184	7.382	30	3.266
33	7.1	30.0	0.977	7.382	96.184	7.382	33	3.266
36	7.1	30.2	0.977	7.356	96.517	7.356	36	3.357
39	7.1	30.2	0.977	7.356	96.517	7.356	39	3.357
42	7.2	30.2	0.977	7.356	97.877	7.356	42	3.852
45	7.2	30.3	0.977	7.344	98.046	7.344	45	3.935
48	7.2	30.3	0.977	7.344	98.046	7.344	48	3.935
51	7.2	30.3	0.977	7.344	98.046	7.344	51	3.935
54	7.3	30.3	0.977	7.344	99.408	7.344	54	5.129
57	7.3	30.3	0.977	7.344	99.408	7.344	57	5.129
60	7.3	30.3	0.977	7.344	99.408	7.344	60	5.129

Dilakukan pemlotan terhadap  $t$  dengan  $\ln (C^*/(C^*-C_t))$  sehingga diperoleh grafik seperti pada Gambar B.11. berikut dan diperoleh nilai  $k_L a_{O_2}$  yang merupakan gradient dari grafik, yaitu sebesar  $0,052 \text{ menit}^{-1}$ .



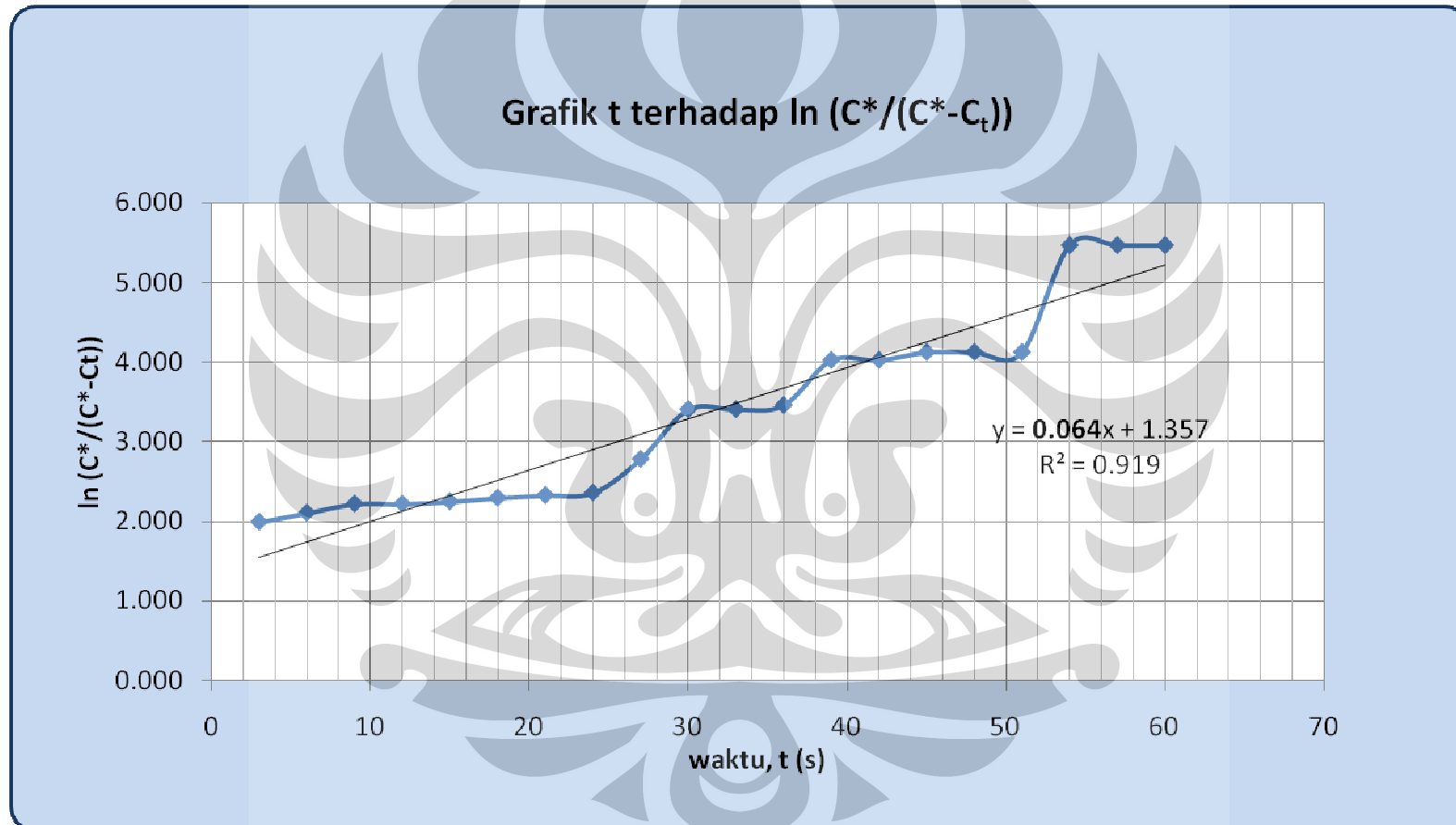
**Gambar B.11.** Grafik penentuan  $k_L a_{O_2}$  pada  $U_G = 9,35 \text{ m/s}$  dan  $U_L = 0,25 \text{ m/s}$

**B.2.4. Pada  $U_G = 11,69$  m/s dan  $U_L = 0,25$  m/s**

**Tabel B.11.** Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa Oksigen–Air ( $k_L a_{O_2}$ ) dengan injektor mazzei

t (menit)	C O <sub>2</sub> (mg/L)	T (°C)	P (atm)	Cp	% Saturation	C* O <sub>2</sub> (mg/L)	X (t)	Y [ln (C*/(C*-C <sub>i</sub> ))]
0	6.5	28.0	0.977	7.645	85.021	7.645	0	1.899
3	6.6	28.0	0.977	7.645	86.329	7.645	3	1.990
6	6.7	28.1	0.977	7.632	87.793	7.632	6	2.103
9	6.8	28.1	0.977	7.632	89.103	7.632	9	2.217
12	6.8	28.1	0.977	7.632	89.103	7.632	12	2.217
15	6.8	28.3	0.977	7.605	89.420	7.605	15	2.246
18	6.8	28.6	0.977	7.564	89.895	7.564	18	2.292
21	6.8	28.8	0.977	7.538	90.212	7.538	21	2.324
24	6.8	29.0	0.977	7.511	90.529	7.511	24	2.357
27	6.9	30.2	0.977	7.356	93.799	7.356	27	2.780
30	7.1	30.3	0.977	7.344	96.684	7.344	30	3.406
33	7.1	30.3	0.977	7.344	96.684	7.344	33	3.406
36	7.1	30.4	0.977	7.331	96.851	7.331	36	3.458
39	7.2	30.4	0.977	7.331	98.215	7.331	39	4.026
42	7.2	30.4	0.977	7.331	98.215	7.331	42	4.026
45	7.2	30.5	0.977	7.318	98.384	7.318	45	4.125
48	7.2	30.5	0.977	7.318	98.384	7.318	48	4.125
51	7.2	30.5	0.977	7.318	98.384	7.318	51	4.125
54	7.3	30.4	0.977	7.331	99.579	7.331	54	5.470
57	7.3	30.4	0.977	7.331	99.579	7.331	57	5.470
60	7.3	30.4	0.977	7.331	99.579	7.331	60	5.470

Dilakukan pemlotan terhadap  $t$  dengan  $\ln (C^*/(C^*-C_t))$  sehingga diperoleh grafik seperti pada Gambar B.12. berikut dan diperoleh nilai  $k_L a_{O_2}$  yang merupakan gradient dari grafik, yaitu sebesar  $0,064 \text{ menit}^{-1}$ .

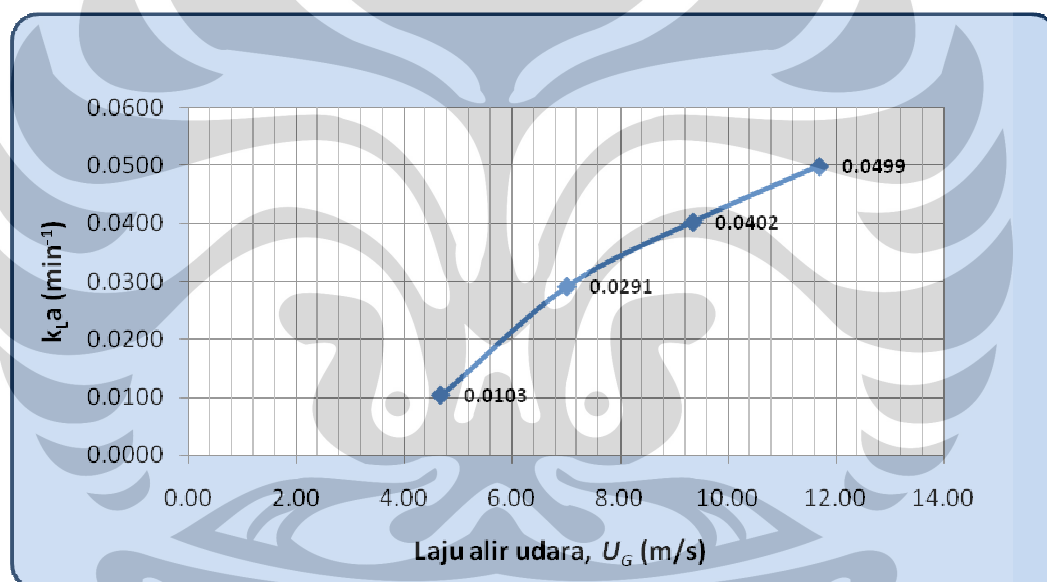


**Gambar B.12.** Grafik penentuan  $k_L a_{O_2}$  pada  $U_G = 11,69 \text{ m/s}$  dan  $U_L = 0,25 \text{ m/s}$

Dari pengolahan data yang dilakukan pada bagian B.2.1. sampai B.2.4. diperoleh harga  $k_L a_{O_2}$  masing-masing dan dikonversi menjadi  $k_L a_{O_3}$  sesuai langkah-langkah pada Metode Penelitian. Harga  $k_L a_{O_3}$  tersebut dapat dilihat pada Tabel B.12. dan Gambar B.13. berikut:

**Tabel B.12.** Harga  $k_L a_{O_2}$  untuk beberapa variasi laju alir air

$U_L$ (m/s)	$U_G$ (m/s)	$k_L a_{O_2}$	$k_L a_{O_3}$ (T=20°C)	T (°C)	$k_L a_{O_3}$
0.25	4.67	0.013	0.0081	30.18	0.0103
0.25	7.01	0.037	0.0230	29.87	0.0291
0.25	9.35	0.052	0.0323	29.21	0.0402
0.25	11.69	0.064	0.0398	29.51	0.0499



**Gambar B.13.** Grafik hubungan laju alir air ( $U_G$ ) dengan  $k_L a$  pada  $U_L = 0,25$  m/s



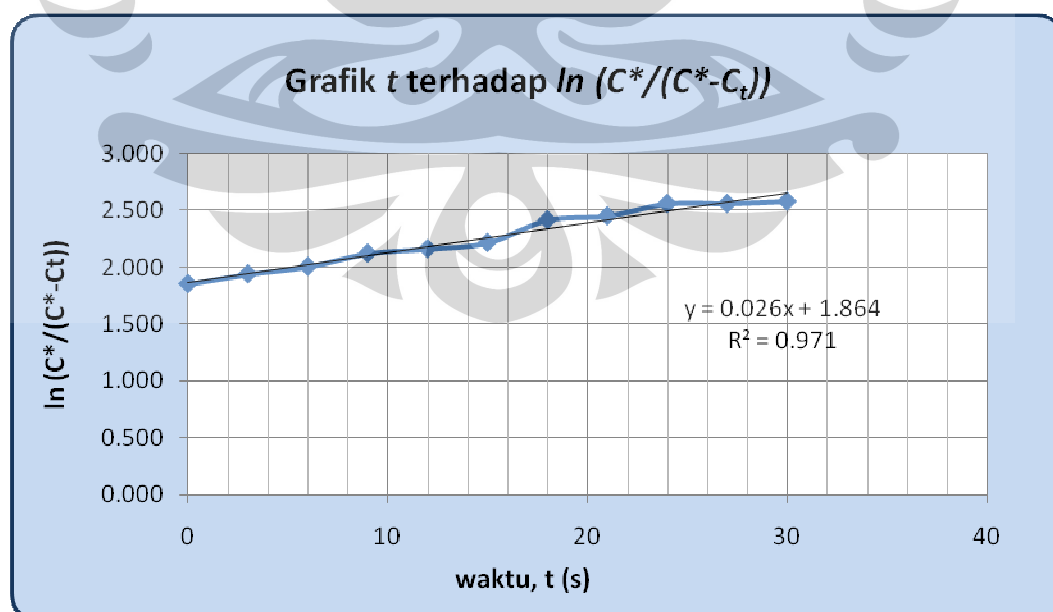
### B.3. Dengan Diffuser Gelembung

Pada  $U_G = 11,69$  m/s dan  $U_L = 0,25$  m/s

**Tabel B.12.** Data dan pengolahan data pada penentuan koefisien perpindahan massa Oksigen–Air ( $k_L a_{O_2}$ ) dengan diffuser gelembung

t (menit)	C O <sub>2</sub> (mg/L)	T (°C)	P (atm)	C <sub>p</sub>	% Saturation	C* O <sub>2</sub> (mg/L)	X (t)	Y [ln (C*/(C*-C <sub>i</sub> ))]
0	6.4	28.4	0.977	7.591	84.309	7.591	0	1.852
3	6.5	28.4	0.977	7.591	85.626	7.591	3	1.940
6	6.5	29.0	0.977	7.511	86.535	7.511	6	2.005
9	6.6	29.1	0.977	7.498	88.021	7.498	9	2.122
12	6.6	29.4	0.977	7.459	88.484	7.459	12	2.161
15	6.6	29.8	0.977	7.407	89.102	7.407	15	2.217
18	6.7	30.2	0.977	7.356	91.080	7.356	18	2.417
21	6.7	30.4	0.977	7.331	91.394	7.331	21	2.453
24	6.8	30.1	0.977	7.369	92.280	7.369	24	2.561
27	6.8	30.1	0.977	7.369	92.280	7.369	27	2.561
30	6.8	30.2	0.977	7.356	92.439	7.356	30	2.582

Dilakukan pemlotan terhadap  $t$  dengan  $\ln (C^*/(C^*-C_i))$  sehingga diperoleh grafik seperti pada Gambar B.13. berikut dan diperoleh nilai  $k_L a_{O_2}$  yang merupakan gradient dari grafik, yaitu sebesar  $0,026$  menit<sup>-1</sup>.



**Gambar B.14.** Grafik penentuan  $k_L a_{O_2}$  pada  $U_G = 11,69$  m/s dan  $U_L = 0,25$  m/s



### C. Pengolahan Data pada Penentuan *Hold-up Gas*

#### C.1. Pengolahan Data pada Variasi Laju Alir Air

Tabel C.1. Pengolahan Data pada Variasi Laju Alir Air

No	Kondisi Operasi	$V_1$ (cm <sup>3</sup> )	$V_2$ (cm <sup>3</sup> )	$V_G$ (cm <sup>3</sup> )	$V_L$ (cm <sup>3</sup> )	$E_G = \frac{V_G}{V_G+V_L}$
1	$U_G = 7.01$ m/s $U_L = 0.06$ m/s	1651.866	1485.491	166.375	1485.491	0.101
2	$U_G = 7.01$ m/s $U_L = 0.12$ m/s	1639.982	1506.882	133.100	1506.882	0.081
3	$U_G = 7.01$ m/s $U_L = 0.19$ m/s	1635.229	1530.650	104.579	1530.650	0.064
4	$U_g = 7.01$ m/s $U_L = 0.25$ m/s	1632.852	1550.853	81.999	1550.853	0.050

Dimana:  $V_1 = V$  air saat *running* (air + gas)

$V_2 = V$  air saat selesai *running* (air )

#### C.2. Pengolahan Data pada Variasi Laju Alir Udara

Tabel C.2. Pengolahan Data pada Variasi Laju Alir Udara

No	Kondisi Operasi	$V_1$ (cm <sup>3</sup> )	$V_2$ (cm <sup>3</sup> )	$V_G$ (cm <sup>3</sup> )	$V_L$ (cm <sup>3</sup> )	$E_G = \frac{V_G}{V_G+V_L}$
1	$U_G = 4.67$ m/s $U_L = 3.39$ m/s	1628.098	1582.939	45.159	1582.939	0.028
2	$U_G = 7.01$ m/s $U_L = 3.39$ m/s	1637.605	1561.548	76.057	1561.548	0.046
3	$U_G = 9.35$ m/s $U_L = 3.39$ m/s	1637.605	1533.027	104.579	1533.027	0.064
4	$U_g = 11.69$ m/s $U_L = 3.39$ m/s	1663.750	1537.780	125.970	1537.780	0.076

Dimana:  $V_1 = V$  air saat *running* (air + gas)

$V_2 = V$  air saat selesai *running* (air )

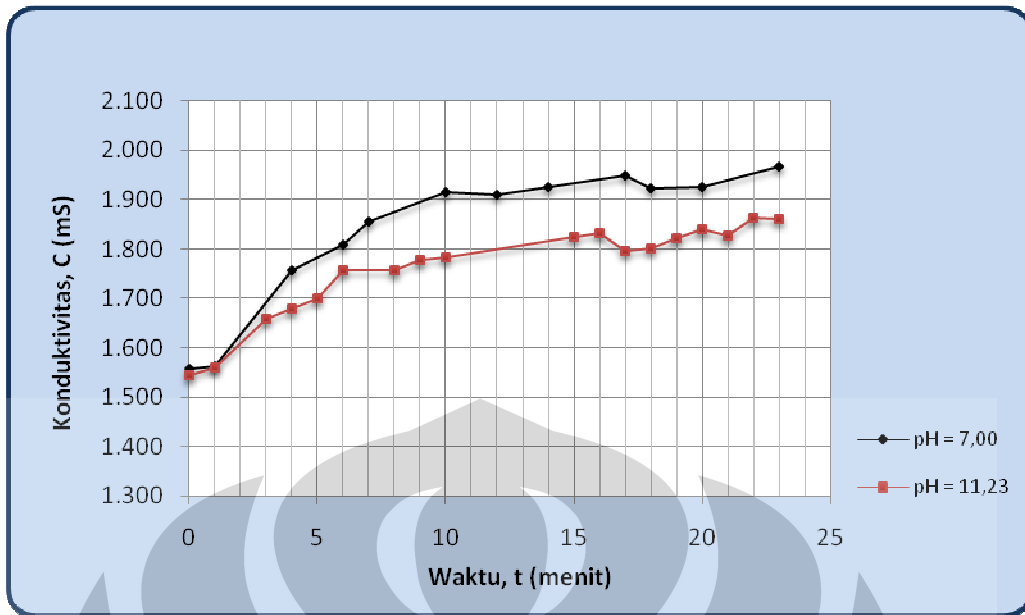


**D. Pengolahan Data pada Dekomposisi Ozon****D.1. Pada pH = 7,  $Q_L = 4$  L/menit,  $Q_G = 600$  L/jam****Tabel D.1.** Data konduktivitas larutan sampel pada waktu tertentu

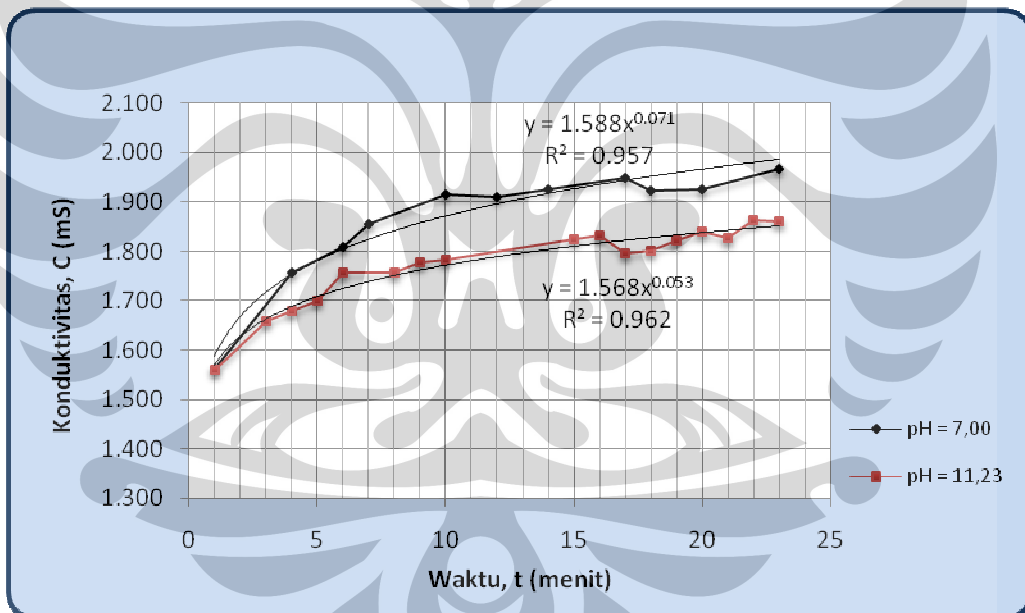
t (menit)	C (mS)
0	1.556
1	1.563
4	1.758
6	1.810
7	1.856
10	1.914
12	1.911
14	1.926
17	1.950
18	1.924
20	1.925
23	1.967

**D.2. Pada pH = 11,23,  $Q_L = 4$  L/menit,  $Q_G = 600$  L/jam****Tabel D.2.** Data konduktivitas larutan sampel pada waktu tertentu

t (menit)	C (mS)
0	1.543
1	1.561
3	1.659
4	1.678
5	1.701
6	1.757
8	1.756
9	1.777
10	1.784
15	1.825
16	1.832
17	1.797
18	1.801
19	1.822
20	1.839
21	1.826
22	1.863
23	1.862



Gambar D.1. Kurva konduktivitas larutan terhadap waktu



Gambar D.2. Persamaan garis yang dibentuk oleh kurva konduktivitas larutan terhadap waktu



**E. Pengolahan data pada uji reaktivitas ozon****E.1. Pada  $Q_G = 400$  L/jam,  $Q_L = 4$  L/menit**

t (min)	Port	V sampel (L)	V $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (ml)	V $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (L)	Dosis $\text{O}_3$ dalam air (mg/L)
10	1	0.025	8.000	0.0080	1.920
	2	0.025	7.500	0.0075	1.800
	3	0.025	7.300	0.0073	1.752
20	1	0.025	9.000	0.0090	2.160
	2	0.025	8.000	0.0080	1.920
	3	0.025	7.700	0.0077	1.848
30	1	0.025	9.300	0.0093	2.232
	2	0.025	8.600	0.0086	2.064
	3	0.025	8.300	0.0083	1.992
40	1	0.025	9.500	0.0095	2.280
	2	0.025	8.900	0.0089	2.136
	3	0.025	9.000	0.0090	2.160
50	1	0.025	9.700	0.0097	2.328
	2	0.025	9.000	0.0090	2.160
	3	0.025	9.000	0.0090	2.160
60	1	0.025	9.700	0.0097	2.328
	2	0.025	9.500	0.0095	2.280
	3	0.025	9.400	0.0094	2.256

**E.2. Pada  $Q_G = 600$  L/jam,  $Q_L = 4$  L/menit**

t (min)	Port	V sampel (L)	V $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (ml)	V $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (L)	Dosis $\text{O}_3$ dalam air (mg/L)
10	1	0.025	7.500	0.0075	1.80000
	2	0.025	7.000	0.0070	1.68000
	3	0.025	7.000	0.0070	1.68000
20	1	0.025	8.100	0.0081	1.94400
	2	0.025	8.100	0.0081	1.94400
	3	0.025	8.000	0.0080	1.92000
30	1	0.025	8.000	0.0080	1.92000
	2	0.025	7.700	0.0077	1.84800
	3	0.025	7.500	0.0075	1.80000
40	1	0.025	9.000	0.0090	2.16000
	2	0.025	8.800	0.0088	2.11200
	3	0.025	8.700	0.0087	2.08800
50	1	0.025	9.500	0.0095	2.28000
	2	0.025	8.500	0.0085	2.04000
	3	0.025	9.500	0.0095	2.28000
60	1	0.025	9.500	0.0095	2.28000
	2	0.025	9.500	0.0095	2.28000
	3	0.025	9.000	0.0090	2.16000

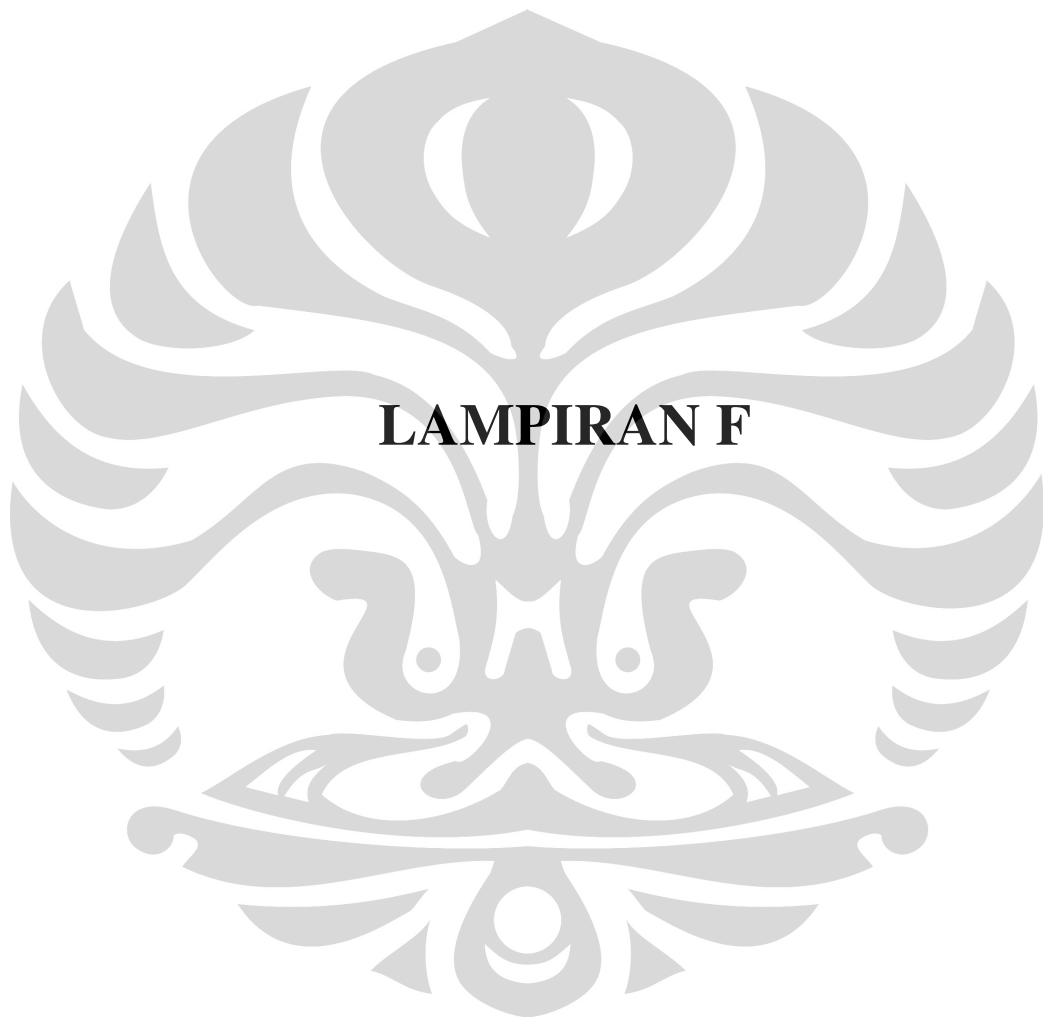


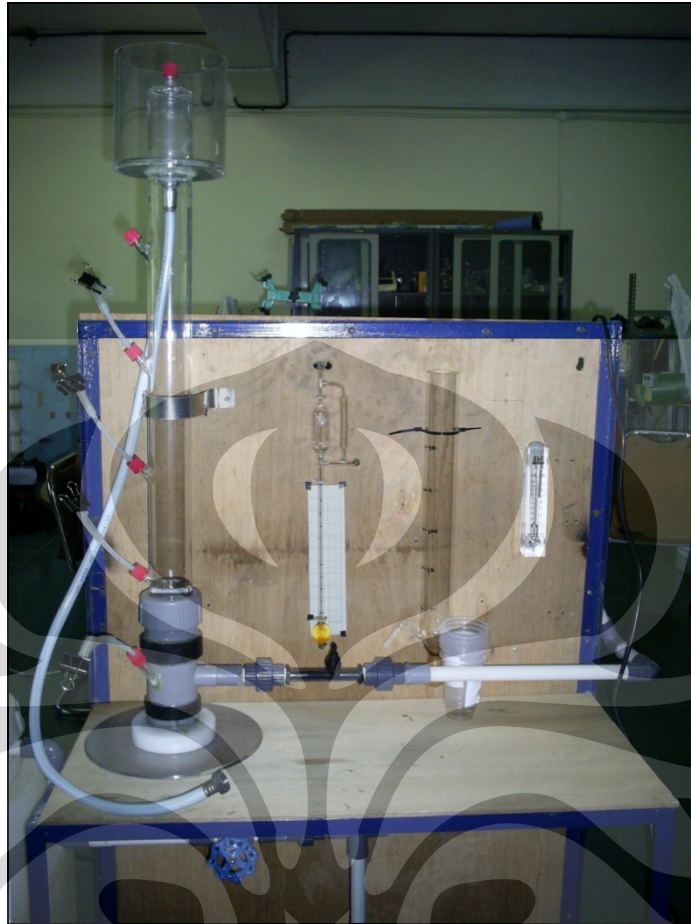
**E.3. Pada  $Q_G = 800$  L/jam,  $Q_L = 4$  L/menit**

t (min)	Port	V sampel (L)	V $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (ml)	V $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (L)	Dosis $\text{O}_3$ dalam air (mg/L)
10	1	0.025	9.800	0.0098	2.352
	2	0.025	9.800	0.0098	2.352
	3	0.025	10.000	0.0100	2.400
20	1	0.025	10.200	0.0102	2.448
	2	0.025	10.000	0.0100	2.400
	3	0.025	10.700	0.0107	2.568
30	1	0.025	10.500	0.0105	2.520
	2	0.025	10.300	0.0103	2.472
	3	0.025	10.500	0.0105	2.520
40	1	0.025	10.600	0.0106	2.544
	2	0.025	10.500	0.0105	2.520
	3	0.025	10.500	0.0105	2.520
50	1	0.025	10.400	0.0104	2.496
	2	0.025	10.500	0.0105	2.520
	3	0.025	9.700	0.0097	2.328
60	1	0.025	10.500	0.0105	2.520
	2	0.025	10.300	0.0103	2.472
	3	0.025	10.300	0.0103	2.472

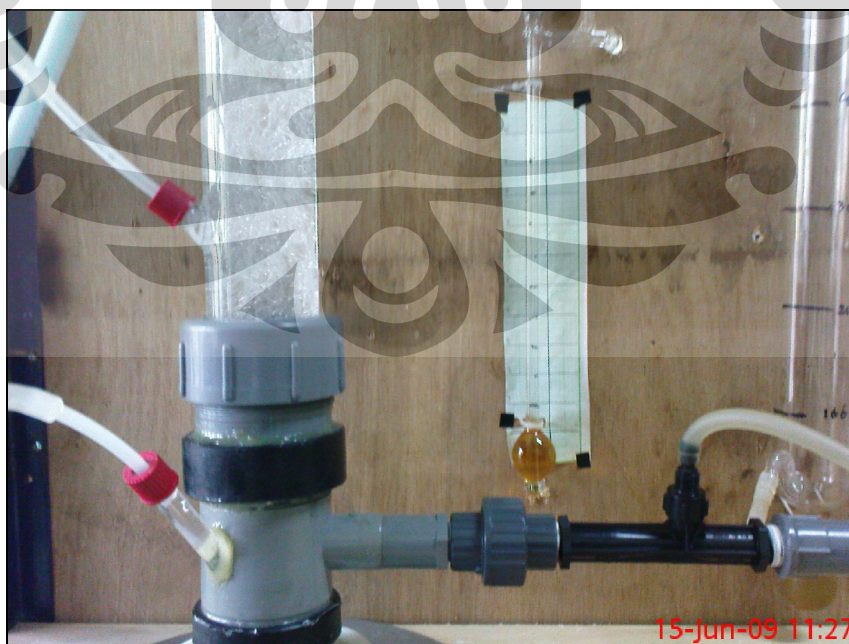
**E.4. Pada  $Q_G = 1000$  L/jam,  $Q_L = 4$  L/menit**

t (min)	Port	V sampel (L)	V $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (ml)	V $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (L)	Dosis $\text{O}_3$ dalam air (gr/L)
10	1	0.025	10.000	0.0100	2.400
	2	0.025	9.800	0.0098	2.352
	3	0.025	10.000	0.0100	2.400
20	1	0.025	10.200	0.0102	2.448
	2	0.025	10.000	0.0100	2.400
	3	0.025	10.300	0.0103	2.472
30	1	0.025	10.200	0.0102	2.448
	2	0.025	10.100	0.0101	2.424
	3	0.025	10.000	0.0100	2.400
40	1	0.025	10.300	0.0103	2.472
	2	0.025	10.100	0.0101	2.424
	3	0.025	10.400	0.0104	2.496
50	1	0.025	10.500	0.0105	2.520
	2	0.025	10.400	0.0104	2.496
	3	0.025	10.500	0.0105	2.520
60	1	0.025	10.600	0.0106	2.544
	2	0.025	10.500	0.0105	2.520
	3	0.025	10.500	0.0105	2.520





Gambar F.1. Skema alat penelitian



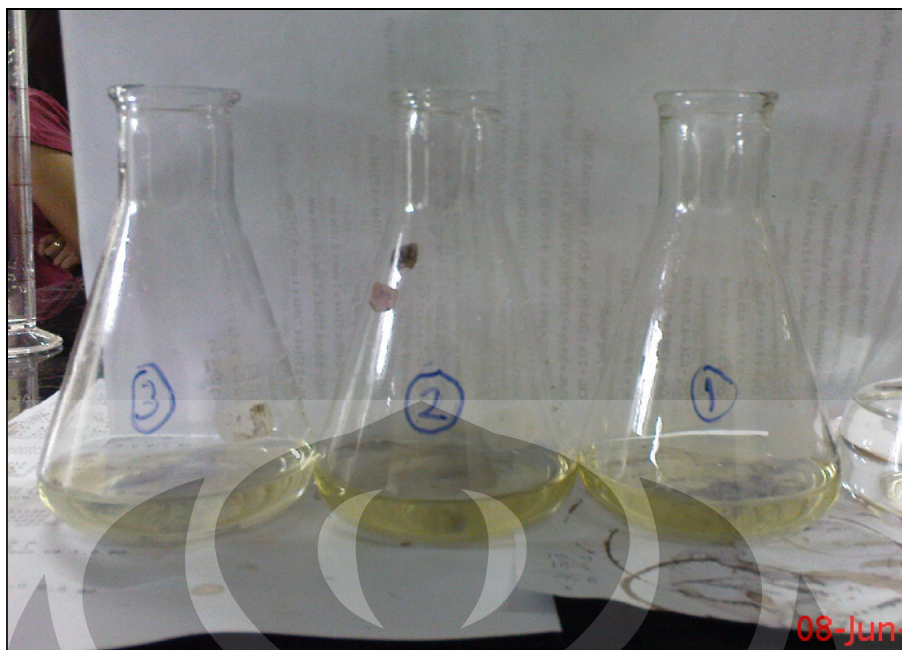
Gambar F.2. Injektor Mazzei dan Kolom Gelembung



**Gambar F.3.** Pengambilan sampel



**Gambar F.4.** Pengukuran DO pada sampel



**Gambar F.5.** Sampel sebelum dititrasi



**Gambar F.6.** Sampel setelah dititrasi