



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN  
OZONATOR KOAKSIAL *SHELL AND TUBE*  
UNTUK  
PENGOLAHAN AIR BERSIH DAN AIR MINUM**

**SKRIPSI**

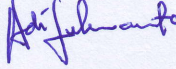
**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**ADI LUKMANTO  
0405060032**

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

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama** : Adi Lukmanto  
**NPM** : 0405060032  
**Tanda Tangan** :   
**Tanggal** : 1 Juli 2009

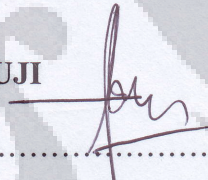
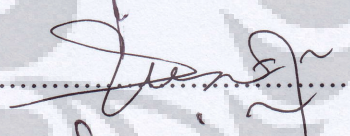
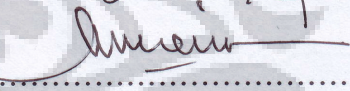


## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Adi Lukmanto  
NPM : 0405060032  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul Skripsi : Rancang Bangun Ozonator Koaksial *Shell and Tube* untuk Pengolahan Air Bersih dan Air Minum

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 : Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA (.....)  
Penguji : Ir. Eva F. Karamah, M.T. (.....)  
Penguji : Ir. Amien Rahardjo, M.T. (.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 1 Juli 2009



## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan ke hadirat Allah swt, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini saya ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir Setijo Bismo, DEA dan Ir. Eva Fathul Karamah, MT, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan serta membantu saya dari segi moral dan material dalam penyusunan skripsi ini;
2. Prof. Dr. Ir. Widodo Wahyu Purwanto, DEA, selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI dan pembimbing akademis saya;
3. Ir. Yuliusman, M.Eng., selaku dosen kordinator mata kuliah skripsi;
4. Orang tua dan kakak saya yang telah memberikan bantuan dukungan moral dan material;
5. Bapak Jajat, Bapak Izal, Bapak Eko, Bapak Taufik, Bapak Heri, dan Mbak Tiwi yang telah banyak membantu dan mendukung saya dalam pelaksanaan penelitian;
6. Rozi, Letti, Andy, Desta, Ita, dan Devi yang telah banyak membantu saya dalam penelitian dan penyelesaian skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap agar skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 1 Juli 2009

Penulis



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

---

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

Nama : Adi Lukmanto  
NPM : 0405060512  
Program Studi : Teknik Kimia  
Departemen : Teknik Kimia  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

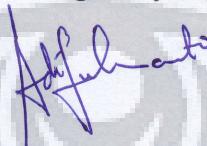
demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

**Rancang Bangun Ozonator Koaksial *Shell and Tube*  
untuk  
Pengolahan Air Bersih dan Air Minum**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 17 Juli 2009  
Yang menyatakan



(Adi Lukmanto)



## ABSTRAK

Nama : Adi Lukmanto  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul : Rancang Bangun Ozonator Koaksial *Shell and Tube* untuk Pengolahan Air Bersih dan Air Minum

Penggunaan teknologi ozon untuk pemurnian air telah cukup berkembang dengan baik sejak tahun 1980 di Eropa, Amerika Serikat, dan Jepang. Penggunaan ozon juga dianggap efisien dalam tahapan proses untuk pemurnian persediaan air domestik dan industri yang teramat penting dari segi ekologis perindustrian besar. Kebanyakan ozonator yang dijual di pasaran merupakan ozonator jenis pelepasan korona. Kendala dengan penggunaan ozonator komersial adalah harganya yang mahal serta umur penggunaan yang singkat atau mudah rusak. Ozonator jenis pipa koaksial ini dirancang mudah dan murah dalam hal pembuatan dan perawatannya serta memiliki produktivitas yang tinggi, yang mampu mendekati produk di pasaran. Ozonator hasil rancang bangun memiliki produktivitas ozon mencapai 0,4 gr/jam dengan umpan udara dan 1,8 gr/jam dengan umpan oksigen.

Kata kunci:

Ozon, pembangkitan ozon, pelepasan korona, pengolahan air

## ABSTRACT

Name : Adi Lukmanto  
Study Program : Chemical Engineering  
Title : Design of Shell and Tube Coaxial Ozonator for Clean and Drinking Water Treatment

It should be noted that the technology for using ozone to purify water is rather well developed since 1980 in Europe, United States, and Japan. Using ozone is also efficient in processing steps to purify domestic and industrial water supplies, which is especially important for improving the ecology of large industrial centers. Most ozonator that sold in the market are corona discharge type. Constraints with commercial ozonators usage are their expensive price and less usage life. Coaxial tube ozonator is designed for ease of construction and maintenance, and also has high productivity, nearly similar with commercial ozonators. Designed ozonator has ozone productivity up to 0,4 gr/hr with air feed and 1,8 gr/hr with oxygen feed.

Keywords:

Ozone, ozone generation, corona discharge, water treatment

## DAFTAR ISI

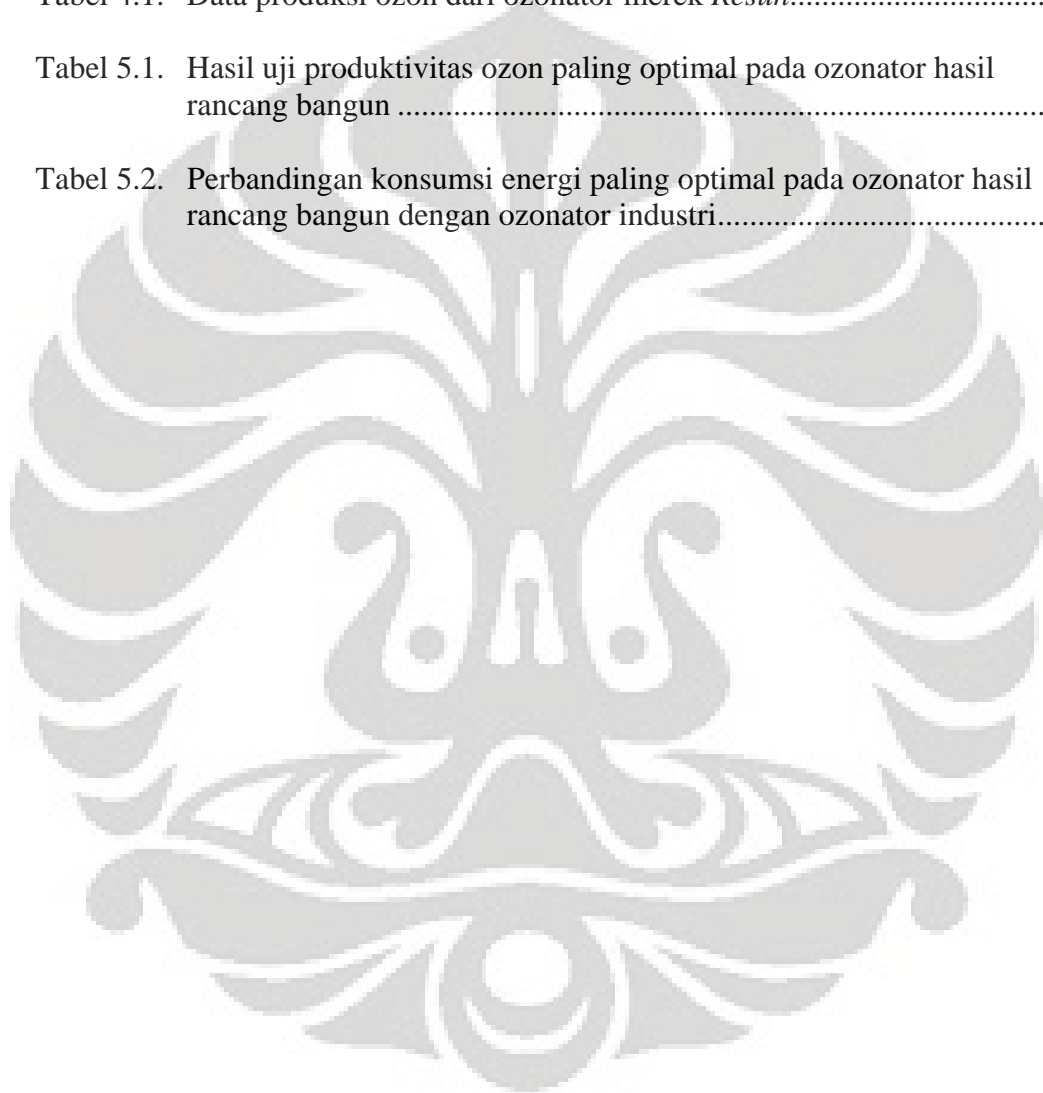
HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK .....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	x
<b>1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	3
1.5. Batasan Masalah.....	3
1.6. Model Operasional Penelitian .....	4
1.7. Sistematika Penulisan.....	4
<b>2. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
2.1. Ozon.....	6
2.1.1. Sifat Fisika dan Kimia Ozon.....	6
2.2. Manfaat Ozon .....	9
2.3. Pembentukan Ozon.....	11
2.3.1. Pelepasan Korona ( <i>Corona Discharge</i> ).....	11
2.3.2. Radiasi Ultraviolet .....	12
2.3.3. Elektrokimia.....	13
2.4. Ozonator .....	14
2.4.1. Perkembangan Ozonator Jenis Pipa Koaksial.....	16
<b>3. METODE PENELITIAN.....</b>	<b>18</b>
3.1. Rancangan Penelitian .....	18
3.2. Deskripsi Peralatan .....	19
3.2.1. Sumber Tegangan Tinggi.....	19
3.2.1.1. Sumber Tegangan Tinggi Menggunakan Transformator <i>Flyback</i> .....	19
3.2.1.2. Sumber Tegangan Tinggi Menggunakan Transformator <i>Neon Sign</i> .....	23
3.2.2. Ozonator.....	25
3.2.2.1. Konstruksi Umum.....	26
3.2.2.2. Kelengkapan Komponen .....	30
3.3. Tahap Percobaan.....	34
3.3.1. Pengukuran Produktivitas Ozon dengan Metode Iodometri.....	34
3.3.1.1. Alat dan Bahan .....	34
3.3.1.2. Prosedur Pengukuran Produksi Ozon .....	35

3.4. Pengambilan dan Pengolahan Data .....	36
3.4.1. Penghitungan Produktivitas Ozon dan Konsumsi Energi.....	36
<b>4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>39</b>
4.1. Penggunaan Sumber Tegangan Tinggi.....	39
4.2. Data Percobaan .....	40
4.3. Pengujian Kinerja Produksi Ozon .....	40
4.3.1. Pengaruh Konsumsi Daya terhadap Produktivitas Ozonator.....	41
4.3.2. Pengaruh Laju Alir Umpan terhadap Produktivitas Ozonator.....	42
4.3.3. Pengaruh Jenis Gas Umpan terhadap Produktivitas Ozonator .....	43
4.3.4. Pengaruh Ukuran Ozonator terhadap Produktivitas Ozonator.....	44
4.3.5. Pengaruh Jenis Fluida Pendingin terhadap Produktivitas Ozonator .....	45
4.3.6. Perbandingan Produksi Ozon dari Ozonator Hasil Rancangan dengan Ozonator Komersial Merek <i>Resun</i> .....	47
4.4. Produktivitas Ozonator Ditinjau dari Sejumlah Parameter .....	48
4.4.1. Produktivitas Ozonator Ditinjau dari Segi Konsumsi Energi.....	48
4.4.2. Produktivitas Ozonator Ditinjau dari Segi Kerapatan Panjang Elektroda.....	50
4.4.3. Produktivitas Ozonator Ditinjau dari Segi Kerapatan Volume <i>Discharge Area</i> .....	52
4.4.4. Produktivitas Ozonator Ditinjau dari Segi Kerapatan Volume Pendingin.....	53
<b>5. KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>56</b>
5.1. Kesimpulan.....	56
5.2. Saran .....	57
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>58</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>60</b>



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Sifat fisika ozon.....	7
Tabel 2.2. Oksidator dan potensial oksidasinya.....	7
Tabel 2.3. Hubungan suhu dan kelarutan ozon dalam air .....	8
Tabel 4.1. Data produksi ozon dari ozonator merek <i>Resun</i> .....	47
Tabel 5.1. Hasil uji produktivitas ozon paling optimal pada ozonator hasil rancang bangun .....	56
Tabel 5.2. Perbandingan konsumsi energi paling optimal pada ozonator hasil rancang bangun dengan ozonator industri.....	57



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Struktur resonansi molekul ozon .....	8
Gambar 2.2.	Diagram sistematik proses disinfeksi dengan menggunakan ozon 10	
Gambar 2.3.	Diagram skematis pembentukan ozon dengan metoda <i>corona discharge</i> .....	11
Gambar 2.4.	Pembentukan ozon dengan sinar ultraviolet.....	12
Gambar 2.5.	Skema generator ozon dengan sel elektrokimia .....	13
Gambar 2.6.	Skema aksial ozonator rancangan Staubach.....	16
Gambar 2.7.	Skema pembentukan ozon pada ozonator rancangan Staubach .....	17
Gambar 3.1.	Skema penelitian .....	18
Gambar 3.2.	Modul aplikasi sumber tegangan tinggi menggunakan transformator <i>flyback</i> .....	20
Gambar 3.3.	Transformator <i>flyback</i> .....	21
Gambar 3.4.	<i>Ballast</i> elektronik dari CFL .....	22
Gambar 3.5.	Regulator tegangan.....	24
Gambar 3.6.	<i>Neon sign transformer</i> .....	25
Gambar 3.7.	Skema ozonator jenis pipa.....	26
Gambar 3.8.	Skema melintang ozonator jenis pipa koaksial .....	27
Gambar 3.9.	Tiga buah ozonator hasil rancangan .....	28
Gambar 3.10.	Skematis aliran dalam ozonator rancangan .....	29
Gambar 3.11.	Selongsong <i>acrylic</i> .....	30
Gambar 3.12.	Selongsong PVC.....	31
Gambar 3.13.	Elektroda tegangan tinggi.....	31
Gambar 3.14.	Dielektrik gelas.....	32
Gambar 3.15.	Elektroda massa.....	32
Gambar 3.16.	Penyekat atas-bawah dan <i>baffle</i> .....	33
Gambar 3.17.	Skematis rangkaian pengukur produktivitas ozon.....	34
Gambar 3.18.	Skematis rangkaian percobaan pengukuran nilai arus dan tegangan .....	37
Gambar 4.1.	Grafik kinerja produktivitas ozonator pendek sebagai fungsi konsumsi daya .....	42
Gambar 4.2.	Grafik kinerja produktivitas ozonator pendek sebagai fungsi laju alir umpan pada $V = 160 \text{ V}$ dan $I = 0,18 \text{ A}$ .....	43
Gambar 4.3.	Grafik perbandingan kinerja produktivitas ozonator pendek sebagai fungsi laju alir umpan pada $V = 160 \text{ V}$ dan $I = 0,18 \text{ A}$ .....	44
Gambar 4.4.	Grafik perbandingan kinerja produktivitas kedua ozonator sebagai fungsi laju alir umpan pada $P = 28,8 \text{ VA}$ (ozonator pendek) dan $P = 24,2 \text{ VA}$ (ozonator panjang) .....	45
Gambar 4.5.	Grafik perbandingan kinerja produktivitas ozonator panjang sebagai fungsi laju alir umpan pada variasi fluida pendingin .....	46
Gambar 4.6.	Grafik perbandingan suhu gas keluaran ozonator panjang sebagai fungsi laju alir umpan udara dan oksigen dengan menggunakan pendingin udara .....	47
Gambar 4.7.	Grafik produksi ozon per satuan energi untuk ozonator pendek dan ozonator panjang pada variasi konsumsi daya.....	49



Gambar 4.8.	Grafik perbandingan produksi ozon per satuan energi ozonator pendek dan panjang pada variasi jenis dan laju alir umpan .....	50
Gambar 4.9.	Grafik perbandingan produksi ozon per satuan panjang elektroda pada ozonator pendek dan panjang pada variasi jenis dan laju alir umpan .....	51
Gambar 4.10.	Grafik perbandingan produksi ozon per satuan volume <i>discharge area</i> pada ozonator pendek dan panjang pada variasi jenis dan laju alir umpan .....	52
Gambar 4.11.	Grafik perbandingan produksi ozon per satuan volume air pendingin pada ozonator pendek dan panjang pada variasi jenis dan laju alir umpan .....	54



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Jumlah air dunia diperkirakan mencapai 1,338 milyar km<sup>3</sup>, dari jumlah itu air bersih hanya 35 juta km<sup>3</sup> atau sekitar 2,6% saja, selebihnya tercemar oleh aktivitas manusia termasuk industri (Keller, 1984). Dikarenakan situasi ekologis di dunia tersebut, pengembangan peralatan yang menggunakan teknologi ramah lingkungan menjadi permasalahan yang sangat penting. Solusi yang ada saat ini untuk pengolahan air atau penanganan limbah cair meliputi proses pemisahan dan disinfeksi. Sehingga penggunaan metode ozonasi dapat menjadi salah satu metode yang efisien dan ekologis untuk digunakan pada berbagai proses industri.

Penggunaan ozon untuk menyisihkan polutan dalam air telah dilakukan sejak 1886 oleh de Meritens di Perancis (Vosmaer, 1916). Beberapa keuntungan dari penggunaan ozon antara lain adalah ozon memiliki potensial oksidasi yang tinggi (2,07 V), sehingga efektif digunakan untuk membunuh bakteri, virus, dan jamur, juga untuk penguraian dan atau penyisihan senyawa-senyawa organik berbahaya, seperti fenol, atrazin, dioksin, dan lain sebagainya.

Proses-proses yang menggunakan ozon kebanyakan untuk perolehan dan pemurnian air; pembersihan *stack gases* pada pusat-pusat pembangkit listrik bertenaga uap dan gas; penyisihan fenol, produk minyak bumi, TEL, mangan, logam berat, dan bahan tahan-oksidasi lainnya dari limbah industri; pemutihan produk selulosa dan tanah liat; dan proses oksidasi dalam metalurgi dan mikrobiologi. Ozonasi air minum dapat menjadikan air bersih atau bebas dari mikroba-mikroba patogen, tak berwarna, tak berbau, dan aman. Proses ini sudah banyak dipakai terutama karena dapat berjalan tanpa membentuk produk-produk samping di air karena ozon yang tak bereaksi berubah menjadi oksigen, yang selanjutnya larut atau teraerasi dalam air. Saat ini penggunaan teknologi ozon untuk pemurnian air telah cukup berkembang. Penggunaan ozon juga dianggap efisien dalam tahapan proses untuk pemurnian persediaan air domestik dan industri yang teramat penting dari segi ekologis perindustrian besar. Kebutuhan



ozon pada tahun 2000 pun diperkirakan lebih dari 60 ton/jam (Stepanyants *et al.*, 1993).

Di Amerika Serikat, sampai saat ini terdapat lebih dari 10.000 paten dikeluarkan yang terkait dengan pembuatan dan aplikasi ozon. Lebih dari seratus hak paten tersebut dikeluarkan terhadap teknik baru pembangkitan ozon. Produksi ozon sebagian besar diperoleh menggunakan salah satu dari tiga metode, yaitu metode pelepasan korona (*corona discharge*), metode elektrokimia, dan metode radiasi ultraviolet (UV). Metode pelepasan korona merupakan metode komersial yang paling banyak digunakan karena produktivitasnya tinggi, walaupun memiliki efisiensi relatif rendah (2 – 10%) dan mengonsumsi listrik dalam jumlah besar. Dua metode lainnya (elektrokimia dan UV) sedikit lebih hemat biaya, namun produktivitasnya rendah. Teknologi ozon menjadi maju saat pengembangan ozonator pelepasan muatan listrik jenis pipa koaksial, yang diperkenalkan oleh von Siemens pada 1857 (von Siemens, 1857). Ozonator jenis ini kemudian menjadi cikal-bakal purwarupa bagi sebagian besar generator ozon jenis pelepasan muatan listrik di zaman modern ini.

Selain itu, penggunaan metode ozonasi juga terkendala karena ozon tidak dapat disimpan serta mudah terdekomposisi, sehingga ozon harus dihasilkan secara *in-situ*. Kebanyakan ozonator yang dijual di pasaran merupakan ozonator jenis pelepasan korona. Kendala dengan penggunaan ozonator komersial adalah harganya yang mahal serta umur penggunaan yang singkat atau mudah rusak. Diharapkan dengan dilakukannya penelitian ini akan dapat diperoleh ozonator jenis pipa koaksial yang mudah dan murah dalam hal pembuatan dan perawatannya serta memiliki produktivitas yang tinggi.

Dalam penelitian ini akan dilakukan rancang-bangun dan uji kinerja ozonator pelepasan korona jenis pipa koaksial yang terdiri dari elektroda logam di bagian dalam dan luar yang di antaranya terdapat dielektrik gelas. Kedua elektroda logam, terbuat dari bahan *stainless steel* ANSI 304, dihubungkan dengan pembangkit tegangan tinggi. Selanjutnya uji kinerja untuk produktivitas ozonator hasil rancangan tersebut, sehingga diperoleh data tentang seberapa besarkah ozonator jenis tersebut dapat memproduksi ozon, yang diharapkan mampu mendekati produk di pasaran.

## **1.2. Perumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana melakukan rancang bangun ozonator jenis pipa koaksial?
2. Bagaimana kinerja dan produktivitas ozonator jenis pipa koaksial yang dirancang bangun?
3. Faktor-faktor apa sajakah yang mempengaruhi produktivitas ozonator?

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Melakukan rancang bangun ozonator jenis pipa koaksial.
2. Menguji kinerja dan produktivitas ozonator jenis pipa koaksial hasil rancang bangun.
3. Menentukan kondisi operasi ozonator hasil rancang bangun yang optimal, yang layak pakai untuk industri.

## **1.4. Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar untuk pengembangan tahapan penelitian berikutnya atau aplikasi lebih lanjut serta menemukan kondisi operasi ozonator yang optimal.

## **1.5. Batasan Penelitian**

Dalam makalah ini, pembahasan dilakukan dengan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Alat yang dibuat, yaitu ozonator/generator ozon jenis pelepasan korona tipe pipa koaksial, sebagai hasil rancangan Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA.
2. Ozonator menggunakan catudaya dari transformator tegangan tinggi (HV-T), dari sumber listrik PLN.
3. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Intensifikasi Proses Departemen Teknik Kimia UI, pada suhu dan tekanan atmosfer.



4. Variasi yang dilakukan adalah variasi tegangan masukan HV-T untuk pembangkit tegangan tinggi, ukuran ozonator, jenis fluida pendingin, jenis gas umpan ozonator, dan laju alir umpan.

### **1.6. Model Operasional Penelitian**

Penelitian dilakukan dengan membuat peralatan ozonator skala laboratorium. Uji kinerja produksi ozonator dilakukan dengan metode iodometri. Parameter-parameter yang akan divariasikan adalah pembangkit tegangan tinggi, ukuran ozonator, jenis gas umpan, dan laju alir umpan.

### **1.7. Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan makalah skripsi ini adalah sebagai berikut:

**BAB 1 : PENDAHULUAN**

Bab ini menjelaskan latar belakang penelitian dan penulisan, rumusan masalah yang dibahas, tujuan dilakukannya penelitian, manfaat penelitian, batasan-batasan masalah, model operasional penelitian, serta sistematika penulisan.

**BAB 2 : TINJAUAN PUSTAKA**

Berisi tinjauan pustaka yang dijadikan dasar penelitian, meliputi teori dasar mengenai ozon, manfaat ozon, pembentukan ozon, serta dasar rancangan ozonator.

**BAB 3 : METODE PENELITIAN**

Membahas mengenai alat yang digunakan dalam penelitian, sejumlah detil rancangan ozonator, serta prosedur penelitian yang dilakukan dalam uji kinerja ozonator hasil rancangan.

**BAB 4 : HASIL DAN PEMBAHASAN**

Berisi tentang data hasil percobaan, pengolahan, serta pembahasan dari percobaan

**BAB 5 : KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisikan kesimpulan dan saran terhadap penelitian yang telah dilaksanakan secara menyeluruh.





## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Ozon

Ozon yang keberadaannya pada bagian atas dan bawah dari lapisan stratosfer melindungi bumi dari radiasi berlebihan oleh ultraviolet, namun pada lapisan troposfer ozon merupakan polutan dan sangat berbahaya bagi makhluk hidup. Karena toksisitasnya, *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA) telah menetapkan paparan batasan maksimum untuk manusia terhadap ozon, yaitu sebanyak 0,06 ppm dalam periode delapan jam, lima hari seminggu, dan untuk dosis maksimum 0,30 ppm dalam 15 menit (Suslow, 2004).

Ketertarikan terhadap ozon sebagai alternatif terhadap klor dan disinfektan kimia lainnya dalam operasi pembersihan dan disinfeksi berdasarkan pada tingginya kemampuan biosida, spektrum antimikroba yang luas, ketiadaan produk samping yang merugikan kesehatan dan kemampuan untuk menghasilkan ozon atas permintaan, *in-situ*, tanpa perlu menyimpannya untuk penggunaan berikutnya.

#### 2.1.1. Sifat Fisika dan Kimia Ozon

Ozon pertama kali ditemukan oleh peneliti Eropa C.F. Schönbein pada tahun 1839. Ozon pertama kali digunakan secara komersial pada tahun 1907 pada pengolahan air kota di Nice dan pada tahun 1910 di St. Petersburg (Kogelschatz, 1988). Sifat fisis ozon murni diberikan pada Tabel 2.1. Ozon merupakan oksidator umum kedua yang paling kuat (Tabel 2.2).

Ozon ( $O_3$ ) adalah bentuk alotropik dari oksigen ( $O_2$ ) yang tidak berwarna (pada suhu kamar) yang dapat mengembun membentuk suatu cairan biru pada suhu  $-112\text{ }^\circ\text{C}$  dan akan membeku pada suhu  $-251,4\text{ }^\circ\text{C}$ . Pada suhu di atas  $100\text{ }^\circ\text{C}$  akan dengan cepat mengalami dekomposisi.

Ozon merupakan gas yang mempunyai bau seperti pedas (*pungent*), tajam (*acrid*), tidak enak, seperti bahan pemutih klor. Bau ini biasanya terdeteksi oleh hidung manusia pada konsentrasi antara 0,01 dan 0,04 ppm (Suslow, 2004).

**Tabel 2.1.** Sifat fisika ozon

<b>Karakteristik</b>	<b>Nilai</b>
Berat molekul	48 gr/mol
Tekanan kritis	5460 kPa
Temperatur kritis	- 12,10 °C
Densitas (0 °C dan 1 atm)	2,143 kg/m <sup>3</sup>
Densitas relatif (di udara)	1,667 kg/m <sup>3</sup>
Energi	142,3 kJ/mol (34,15 kkal/kmol)
Potensial oksidasi	2,07 volt
Waktu paruh dalam larutan cair (20 °C)	20 – 30 menit
Waktu paruh (pada udara kering)	12 jam

**Tabel 2.2.** Oksidator dan potensial oksidasinya

<b>Oksidator</b>	<b>Potensial Oksidasi (mV)</b>
Fluorin	3,06
Ozon	2,07
Permanganat	1,67
Klorin dioksida	1,50
Asam hipokloro	1,49
Gas klorin	1,36

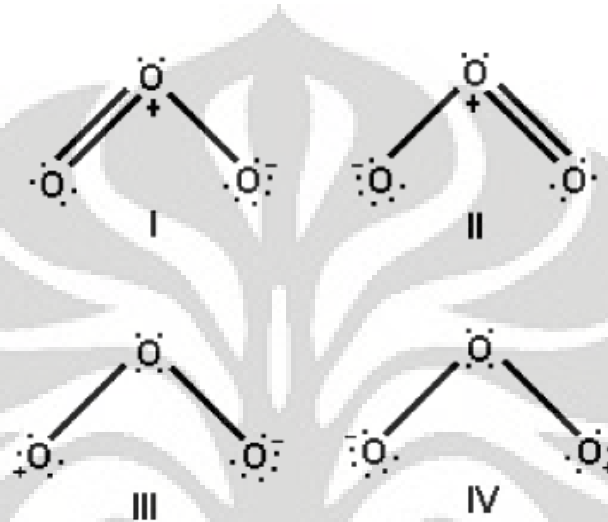
Sumber: Manley dan Niegowski, 1967

Ozon terbentuk dalam stratosfer, kabut dan asap fotokimia dan pada lampu sterilisasi UV, pancaran listrik tegangan tinggi, dan radiasi gamma (Mustafa, 1990). Pada temperatur ruang, ozon terdekomposisi dengan cepat dan, dengan begitu, tidak terakumulasi tanpa pembuatan ozon yang berkesinambungan (Peleg, 1976). Ozon ditemukan dalam konsentrasi rendah di alam. Ozon mempunyai waktu paruh yang lebih lama ketika berupa gas dibandingkan dalam larutan yang mengandung air (Rice, 1986). Ozon dalam air murni cukup cepat terurai menjadi oksigen, dan bahkan lebih cepat dalam larutan tidak murni. Kelarutan ozon dalam air 13 kali daripada oksigen pada 0 °C dan semakin lebih cepat larut dalam air



dingin (Tabel 2.3.). Dekomposisi ozon lebih cepat dalam temperatur air lebih tinggi (Rice, 1986).

Tiga atom oksigen pada molekul ozon tersusun pada suatu sudut tumpul di mana atom oksigen pusat terikat dengan dua atom oksigen dengan jarak yang ekuivalen; sudutnya berkisar  $116^{\circ} 49'$  dan panjang ikatannya adalah  $1,278 \text{ \AA}$ . Empat struktur ozon ditunjukkan pada Gambar (Oehlschlaeger, 1978).



**Gambar 2.1.** Struktur resonansi molekul ozon

Sumber: Oehlschlaeger, 1978

Ozon berbentuk gas pada suhu dan tekanan normal. Seperti halnya oksigen, kelarutan ozon dalam air juga bergantung pada temperatur dan tekanan parsial ozon pada fasa gas disamping adanya pengaruh pH cairan. Kelarutan ozon dan oksigen pada air disajikan pada tabel di bawah ini

**Tabel 2.3.** Hubungan suhu dan kelarutan ozon dalam air

Suhu ( $^{\circ}\text{C}$ )	Kelarutan (L ozon/L air)
0	0,640
15	0,456
27	0,270
40	0,112
60	0,000

Sumber: Mailfert, 1894

Sebagai senyawa yang tidak stabil, ozon mudah terdekomposisi kembali menjadi oksigen, dan laju dekomposisinya akan bertambah besar sesuai dengan kenaikan suhu dan pH. Selain itu, kelarutan ozon pada air juga sebanding dengan waktu kontak yang diperlakukan.

Secara kimiawi, ozon merupakan senyawa yang tidak stabil, sangat reaktif dan mudah sekali terdekomposisi kembali menjadi oksigen setelah terbentuk pada ozonator. Oleh karena itu, ozon harus dibuat dalam ozonator yang jaraknya dekat dengan instalasi pengolahan air minum (*on-site*) (Rice dan Browning, 1981).

Fenomena terurainya ozon dalam air digambarkan melalui persamaan berikut.



Selanjutnya pembahasan lengkap mengenai ozon akan dibahas tersendiri pada sejumlah subbab berikutnya.

## 2.2. Manfaat Ozon

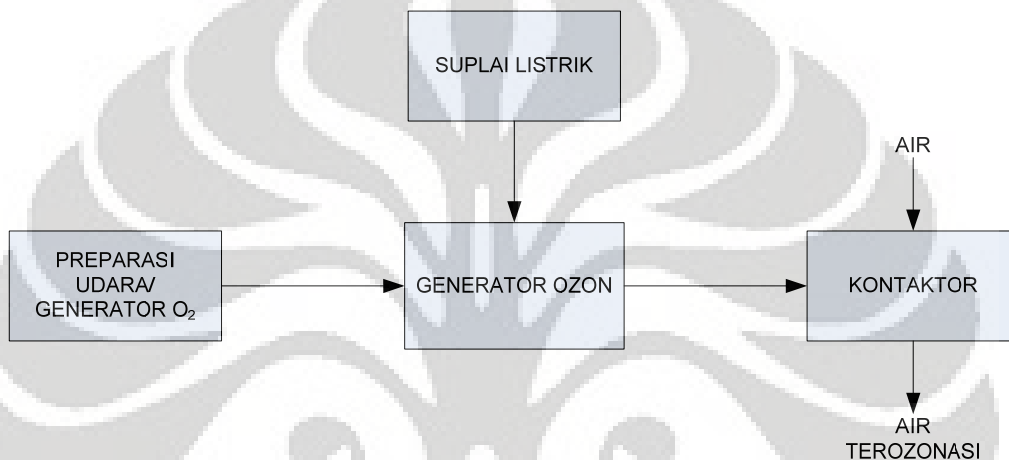
Ozon pertama kali digunakan sebagai germisida pada tahun 1886 di Perancis yang dilakukan oleh de Meritens dengan mendemonstrasikan bahwa ozon terlarut dalam udara dapat mensterilkan air yang tercemar (de la Coux, 1904). Pembangkit Ozon yang pertama digunakan untuk pengolahan air dibangun di Oudshoorn, Belanda pada tahun 1893. Namun, penghasil ozon yang pertama kali digunakan sebagai disinfektan dibangun di Nice, Perancis pada tahun 1906. Di Amerika Serikat, ozon juga digunakan untuk mengontrol rasa dan warna (Cheremisnoff, 2002).

Ozon yang digunakan sebagai disinfektan karena sifatnya yang merupakan oksidan dan virusida yang sangat kuat. Mekanisme disinfeksi dengan menggunakan ozon terdiri atas (Salomon *et al.*, 1999):

- oksidasi langsung/penghancuran dari dinding sel dengan mengeluarkan isi dari sel tersebut

- reaksi dengan radikal dari produk samping dekomposisi ozon
- merusak asam nukleat (purin dan pirimidin)
- memutuskan ikatan karbon-nitrogen sehingga terjadi depolimerisasi.

Ozon yang digunakan sebagai disinfektan biasanya terdiri dari preparasi *feed-gas*, penghasil ozon (*ozone generation*), kontaktor ozon, dan penghancur ozon. Di bawah ini merupakan diagram sistematis dari proses disinfeksi dengan menggunakan ozon (Cheremisinoff, 2002).



**Gambar 2.2.** Diagram sistematis proses disinfeksi dengan menggunakan ozon

Sumber: Cheremisinoff, 2002

Selain untuk mengolah air, ozon juga dapat digunakan sebagai pemutih dalam industri pengolahan gula dan pemutihan bahan linen karena sifatnya yang dapat memutihkan. Ozon juga dapat digunakan untuk mengkonversi campuran minyak-batubara sehingga menghasilkan produk yang cocok untuk digunakan dalam cat, pembuatan minyak pernis dan *oil-cloth*. Ozon juga banyak digunakan dalam industri pengawetan makanan, seperti pengawetan susu, daging, gelatin, casein dan albumin. Ozon juga digunakan untuk mempurifikasi dan menambahkan umur dari minuman beralkohol seperti anggur sehingga anggur yang baru diproduksi akan terasa seperti anggur yang sudah berumur beberapa tahun. Ozon juga berguna untuk mengerasakan makanan (Rice *et al.*, 1981).

Dalam bidang kedokteran gigi, ozon digunakan untuk menjaga agar mulut yang sedang dioperasi tetap steril. Dalam terapi medis, ozon digunakan untuk



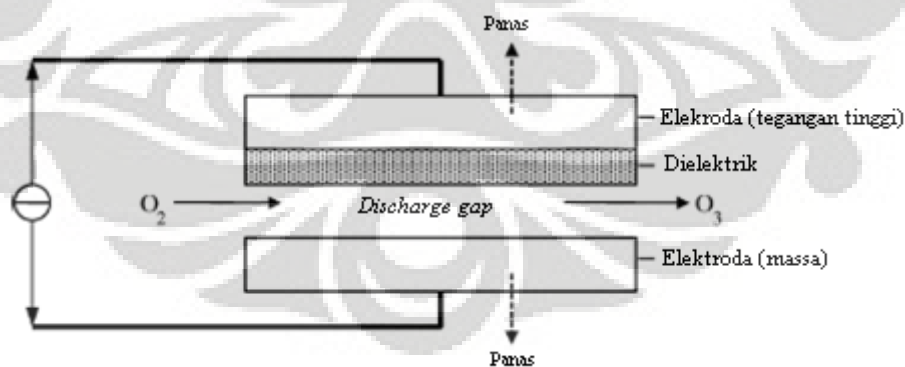
mengobati kanker (menggabungkan ozon dengan terapi radiasi), gangguan peredaran darah, dalam bidang ginekologi, dan dalam terapi oksidasi hematogenik (menginjeksi campuran ozon dan oksigen ke dalam aliran darah). Selain itu, ozon juga dapat digunakan untuk membuat asam azelat dan pelargonat melalui ozonolisis asam oleat (Rice *et al.*, 1981).

### 2.3. Pembentukan Ozon

Subbab ini akan menerangkan pembentukan ozon secara umum (Rice *et al.*, 1981). Dalam rangka untuk menghasilkan ozon, satu molekul oksigen diatomik harus dipisah. Oksigen radikal bebas tadi kemudian bebas untuk bereaksi dengan oksigen diatomik yang lain untuk membentuk molekul ozon triatomik. Bagaimanapun, supaya dapat mematahkan ikatan O–O memerlukan banyak energi. Metoda radiasi ultraviolet (panjang gelombang 188 nm), pelepasan korona (*corona discharge*), dan elektrokimia dapat digunakan untuk menginisiasi pembentukan oksigen radikal bebas, sehingga menghasilkan ozon.

#### 2.3.1. Pelepasan Korona (*Corona Discharge*)

Untuk menghasilkan ozon dalam tingkat komersial, metoda pelepasan korona biasanya digunakan (Gambar 2.3.).



**Gambar 2.3.** Diagram skematis pembentukan ozon dengan metoda *corona discharge*

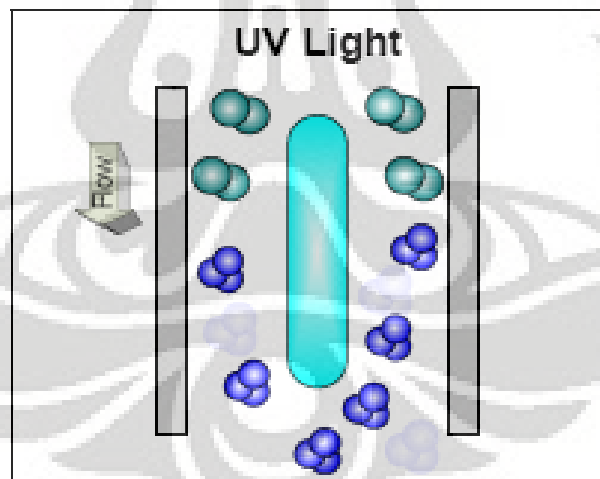
Sumber: Rice *et al.*, 1981

Terdapat dua elektroda dalam pelepasan korona, salah satu di antaranya adalah elektroda tegangan tinggi dan yang lainnya adalah elektroda tegangan

rendah (elektroda *ground*). Keduanya dipisahkan oleh satu media dielektrik keramik dan disediakan celah pelepasan muatan yang sempit (Gambar 2.3.). Ketika elektron mempunyai energi kinetik yang cukup (sekitar 6 – 7 eV) untuk memisahkan molekul oksigen, fraksi tertentu dari tumbukan ini terjadi dan satu molekul ozon dapat terbentuk dari setiap atom oksigen. Jika udara melintasi generator sebagai gas umpan, 1 – 3% ozon dapat dihasilkan, bagaimanapun, menggunakan oksigen murni memungkinkan hasilnya mencapai 6% ozon (Rice *et al.*, 1981). Sebagai akibatnya, konsentrasi ozon tidak dapat ditingkatkan melewati titik di mana laju pembentukan dan pemusnahan adalah sama (Manley dan Niegowski, 1967). Gas ozon tidak bisa disimpan karena ozon secara spontan terurai kembali menjadi atom oksigen (Kogelschatz, 1988).

### 2.3.2. Radiasi Ultraviolet

Pembentukan ozon pada teknologi ini dapat dilakukan dengan menggunakan lampu UV. Pada Gambar 2.4., oksigen berubah menjadi ozon setelah dilewatkan pada sinar ultraviolet dari lampu UV.



**Gambar 2.4.** Pembentukan ozon dengan sinar ultraviolet

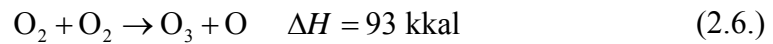
Sumber: Ozone Solutions

Pada teknologi pembentukan ozon dengan sinar ultra violet (UV), reaksi endotermis 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:

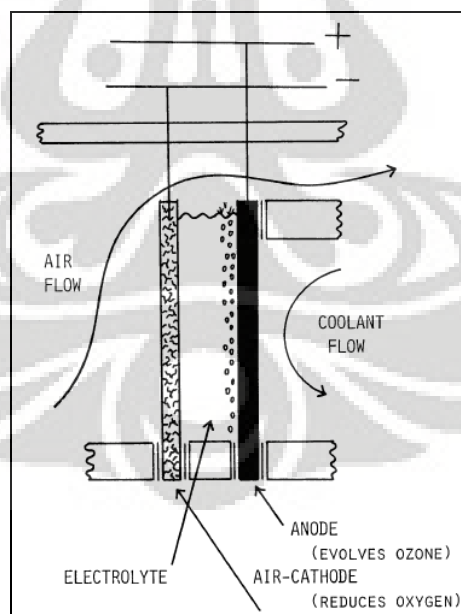


Reaksi tersebut berlangsung apabila cahaya yang diabsorpsi oksigen berada pada panjang gelombang 307 nm (Volman, 1963; McNesby, 1964).

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*.

### 2.3.3. Elektrokimia

Pada metoda 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 oksidasi elektrokimia akan terbentuk dari air.



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

Sumber: Foller, 1975



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

Di anoda:



dan pada saat yang bersamaan juga terjadi reaksi:



Sedangkan untuk di katoda:



#### 2.4. Ozonator

Secara umum ozon dihasilkan dari pemanasan oksigen yang terdapat dalam atmosfer oleh sinar matahari secara terus menerus. Pada industri, ozon dengan gas masukan yang berasal dari udara atau oksigen dapat dihasilkan oleh *voltage electrical discharge* dengan frekuensi arus bolak-balik yang rendah atau tinggi serta dengan energi radiasi yang tinggi. Minimisasi dari kebutuhan akan tenaga listrik merupakan target yang utama dari alat pembangkit ozon (ozonator) pada industri.

Persamaan yang digunakan oleh alat pembangkit ozon ini diusulkan oleh Rice dan Browning (1981):

$$\frac{y_{\text{ozon}}}{A_{el}} = \frac{k_o f V_p}{t_{md}} \quad (2.10.)$$

di mana:

$y_{\text{ozon}}/A_{el}$  = perolehan (*yield*) ozon per satuan luas permukaan elektroda (pada kondisi optimal)

$k_o$  = konstanta produktivitas

$f$  = frekuensi arus bolak-balik, hertz

$V_p$  = tegangan (puncak) antara 2 elektroda (*discharge gap*), volt

$t_{md}$  = ketebalan media dielektrik, m

Selanjutnya, harga tegangan di antara elektroda dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$V_p = k_v p g \quad (2.11.)$$

di mana:

- $k_v$  = konstanta perubahan tegangan akibat perubahan tekanan gas  
 $p$  = tekanan gas di antara 2 elektroda, bar  
 $g$  = lebar/jarak antar elektroda

Jika ozon dihasilkan dari umpan gas masukan yang berasal dari udara lingkungan maka produktivitas pembentukan ozon akan berkurang secara berarti, karena akan terjadi:

1. Pengurangan perolehan (*yield*) ozon per kWh dari pemakaian listrik
2. Pembentukan asam nitrat yang akan menyebabkan timbulnya korosi pada komponen alat pembangkit ozon.

Hal ini berarti bahwa udara yang menjadi umpan harus dikeringkan dan dibersihkan dari beberapa macam pengotor terlebih dahulu. Pada ozonator modern, udara dikeringkan sampai menjadi titik embun (*dew point*), yaitu sekitar  $-40$  sampai  $-60^\circ\text{C}$ .

Parameter-parameter penting yang harus diperhatikan untuk menghasilkan ozon dari ozonator agar pengeluaran akan tenaga listrik tidak terlalu besar (optimal) adalah:

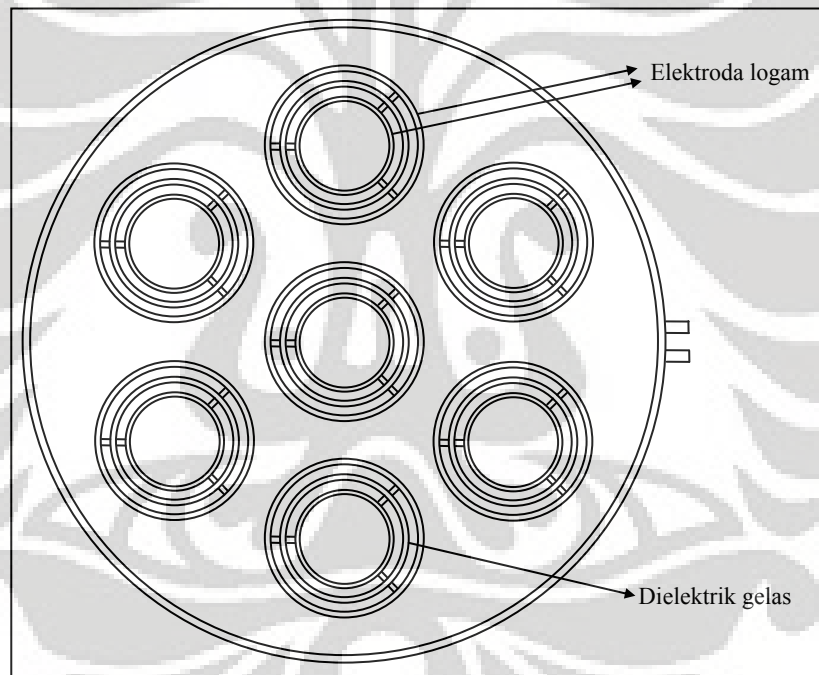
- Laju alir  
Penambahan laju alir dari gas masukan (umpan) akan mengakibatkan kenaikan jumlah ozon yang dihasilkan ozonator per satuan waktu dan per satuan dari listrik yang dibutuhkan
- Suhu  
Suhu yang terlalu tinggi akan mengakibatkan ozon yang dihasilkan dalam ozonator akan mudah terdekomposisi.
- Gas masukan (umpan)  
Penggunaan oksigen sebagai gas masukan lebih baik dibandingkan dengan udara, juga akan mengurangi kebutuhan akan gas kering.

Efisiensi dari alat pembangkit ozon ini semakin lama semakin meningkat, hal ini dapat dilihat ketika pada tahun 1906 ozonator dapat mengonsumsi energi

sebesar 33 kWh/lb O<sub>3</sub>, sedangkan pada tahun 1990 terdapat paten ozonator yang hanya mengonsumsi energi sebesar 10,63 kWh/lb O<sub>3</sub>.

#### 2.4.1. Perkembangan Ozonator Jenis Pipa Koaksial

Rancang bangun ozonator koaksial yang akan dibuat terkait dengan paten yang dibuat oleh Ernst J. Staubach (U.S. Pat. No. 4908189) yang memperlihatkan suatu rancangan ozonator dengan pipa konsentris di mana gas umpan yang mengandung oksigen dikonversi menjadi ozon di anulus dalam dan luar. Pada penemuan tersebut, tiap pipa konsentris dibuat dengan suatu pipa elektroda logam di bagian luar dan pipa elektroda logam bagian dalam yang ditempatkan secara konsentris, seperti tampak pada Gambar 2.6. di bawah ini.



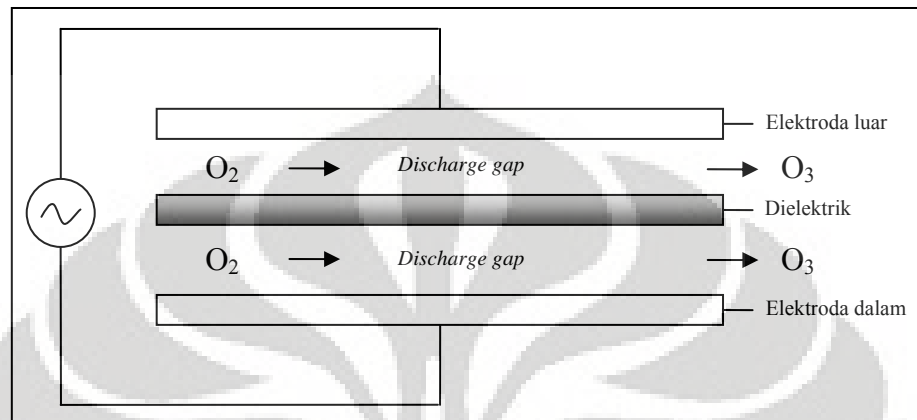
**Gambar 2.6.** Skema aksial ozonator rancangan Staubach

Sumber: Staubach, 1990

Pipa logam bagian dalam disumbat di salah satu ujungnya. Tabung dielektrik kaca juga ditempatkan secara konsentris di antara pipa elektroda bagian dalam dan luar. Seperti terlihat pada Gambar 2.7., konstruksi seperti ini menyediakan *discharge gap* antara dielektrik dan pipa bagian dalam serta antara dielektrik dan pipa bagian luar, di mana terjadi konversi umpan menjadi ozon.



*Discharge gap* dipertahankan pada ukuran 0,5 mm untuk meminimalisasi tegangan yang dibutuhkan. Ketebalan dielektrik pun harus cukup tipis untuk meminimalisasi tegangan namun juga harus cukup tebal untuk mencegah kerusakan saat instalasi atau saat operasi.



**Gambar 2.7.** Skema pembentukan ozon pada ozonator rancangan Staubach

Ozonator purwarupa hasil rancangan Staubach ini mampu menghasilkan ozon hingga 5,19% berat dengan menggunakan umpan oksigen dengan laju alir 78,8 lb/jam.

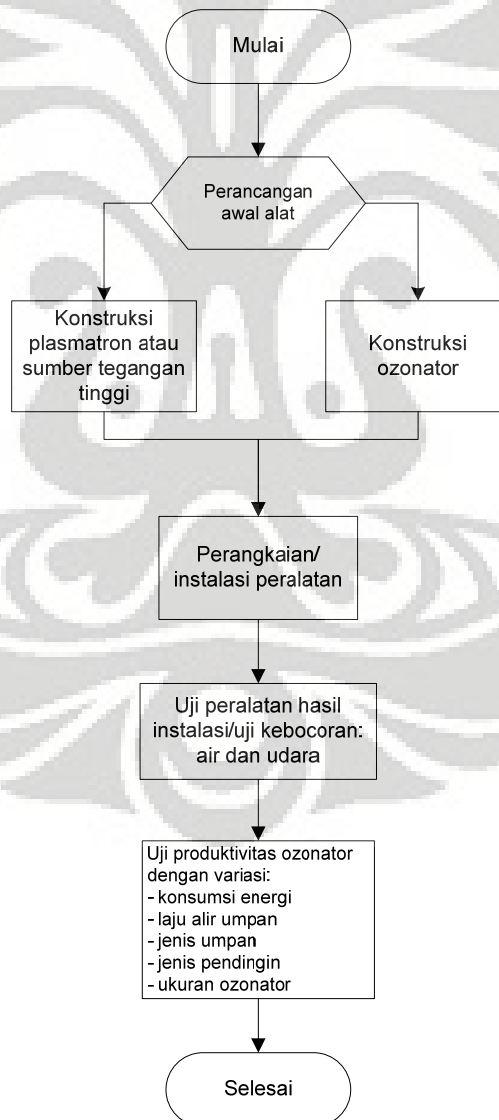
## BAB 3

### METODE PENELITIAN

Sesuai dengan tujuan dari penelitian ini, maka rancangan penelitian ini dititikberatkan pada perancangan alat pembangkit ozon atau ozonator yang memiliki produktivitas yang optimal.

#### 3.1. Rancangan Penelitian

Tahapan-tahapan dalam penelitian ini dapat dirangkum dalam diagram alir sebagai berikut:



**Gambar 3.1.** Skema penelitian

Secara umum, penelitian dapat dibagi menjadi:

- Pembuatan sumber tegangan tinggi atau pembangkit plasma (plasmatron)
- Pembuatan ozonator
- Pengujian produktivitas ozonator yang telah dibuat

### **3.2. Deskripsi Peralatan**

Alat yang dirancang dalam penelitian ini terdiri dari dua komponen utama, yaitu sumber tegangan tinggi atau pembangkit plasma dan ozonator.

#### **3.2.1. Sumber Tegangan Tinggi**

Terdapat dua tipe sumber tegangan tinggi yang dibuat, yang pertama adalah dengan menggunakan transformator *flyback* dan yang kedua adalah menggunakan transformator *neon sign* (HV-T).

##### **3.2.1.1. Sumber Tegangan Tinggi Menggunakan Transformator *Flyback***

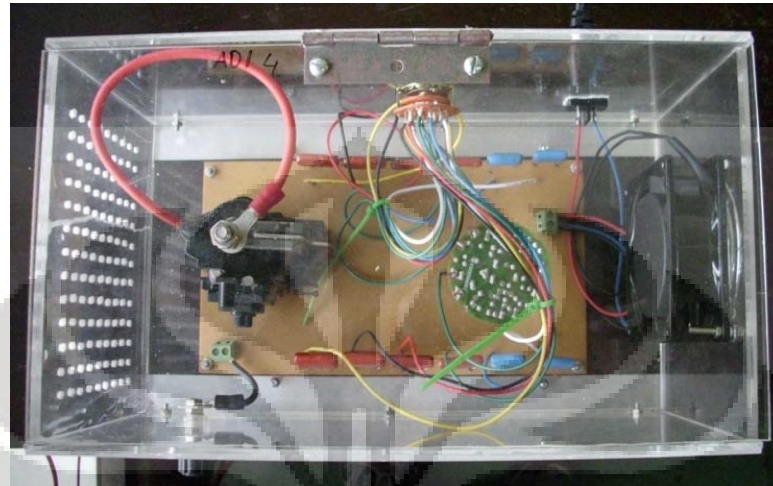
*Flyback transformer* atau *line output transformer* (FBT atau LOPT) merupakan jenis transformator yang digunakan sebagai sumber daya bagi CRT (*Cathode Ray Tube*) yang membangkitkan tegangan tinggi yang dibutuhkan sebagai bagian suplai tampilan CRT atau peralatan lain, seperti lampu plasma. Alat ini membangkitkan tegangan antara beberapa kilovolt untuk tabung osiloskop hingga 20 – 50 kilovolt untuk tabung TV berwarna. FBT tidak seperti transformator biasa yang menggunakan arus bolak-balik pada 50 atau 60 hertz, tetapi beroperasi dengan arus *switch* pada frekuensi yang lebih tinggi, biasanya dalam rentang 17 – 50 kHz.

#### **A. Konstruksi Umum**

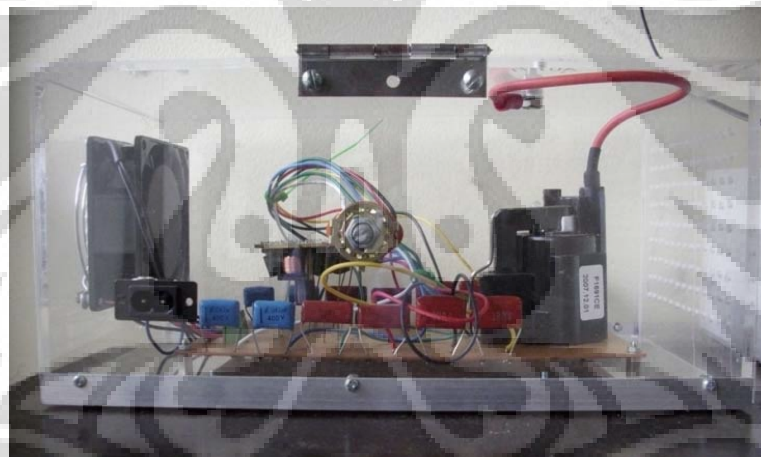
Seperti dapat terlihat pada Gambar 3.2., sumber tegangan tinggi ini memakai rangkaian *ballast* elektronik pada CFL (*Compact Fluorescent Lamp*) dan transformator *flyback*. Pada CFL, *ballast* elektronik ini bekerja dengan menghasilkan arus berfrekuensi tinggi yang diumpankan ke transformator berfrekuensi tinggi dengan ukuran kecil yang menaikkan tegangan dan



menjalankan tabung *fluorescent*. *Ballast* elektronik menghasilkan kurang dari 1000 volt. Namun, penggantian tabung *fluorescent* pada CFL dengan transformator *flyback* akan menghasilkan tegangan yang jauh lebih tinggi.



(a)



(b)

**Gambar 3.2.** Modul aplikasi sumber tegangan tinggi menggunakan transformator *flyback* (a) tampak atas; (b) tampak depan

Modul ini mengambil sumber listrik dari tegangan 220 V AC, lalu arus menuju *ballast* elektronik CFL, kemudian keluaran CFL, yaitu kedua kawat terluar dihubungkan dengan pin primer pada transformator *flyback* dan dibangkitkan tegangannya menjadi ribuan volt. Namun, dalam operasionalnya keluaran tegangan tinggi dari transformator *flyback* harus selalu terhubung dengan pin sekunder pada transformator *flyback* (berperan sebagai *ground* tegangan

tinggi) pada jarak dekat sehingga terjadi *spark* muatan pada keluaran. Jika tidak, maka resonansi pada sirkuit CFL akan menciptakan tegangan yang lebih tinggi daripada kemampuan transistor sehingga akan mengakibatkan kerusakan transistor pada *ballast* elektronik CFL.

## B. Kelengkapan Komponen

Pada penelitian ini, kelengkapan sumber tegangan tinggi menggunakan transformator *flyback* ini memiliki komponen sebagai berikut:

- Transformator *flyback*

Seperti telah disebutkan sebelumnya, transformator *flyback* ini memiliki fungsi untuk menimbulkan atau membangkitkan tegangan tinggi. Spesifikasi transformator yang digunakan adalah dengan nomor seri F1691CE, yang biasa digunakan untuk televisi bermerek *SHARP* (Gambar 3.3.).



**Gambar 3.3.** Transformator *flyback*

- Rangkaian *ballast* elektronik dari CFL

Terdapat dua bagian utama dalam CFL, yaitu tabung berisi gas dan *ballast* magnetis atau elektronik, walaupun sekarang lebih banyak yang menggunakan *ballast* elektronik. *Ballast* elektronik seperti terlihat pada Gambar 3.4. memiliki papan sirkuit kecil dengan dioda, kapasitor, dan biasanya dua transistor *switching* tersambung sebagai inverter resonansi DC ke AC berfrekuensi tinggi. Frekuensi tinggi yang dihasilkan, yang biasanya dimanfaatkan untuk tabung lampu, diganti

dengan transformator *flyback*. *Ballast* elektronik yang digunakan diambil dari CFL *PHILIPS* 23 W.



**Gambar 3.4.** *Ballast* elektronik dari CFL

- Kapasitor

Tipe CFL tertentu seperti yang penulis gunakan memerlukan suatu *sense of filaments* untuk bekerja sebagai pengganti tabung *fluorescent*. Ini mengingat yang dihubungkan hanya dua kawat terluar saja yang dihubungkan dengan pin primer pada transformator *flyback*. Sehingga digunakan kapasitor dan bukannya resistor dikarenakan kapasitor hanya memperbolehkan arus AC saja yang lewat melaluinya, berbeda dengan resistor yang memperbolehkan arus AC maupun DC lewat. Selain itu, kapasitor tidak panas karena penyediaan jalur dengan resistansi yang rendah bagi arus AC. Kapasitor yang digunakan bervariasi, yaitu dengan nilai kapasitansi 47, 330, dan 1.000 nF, serta bekerja pada tegangan maksimal 400 V.

- Kipas pendingin

Dipasang dengan arah aliran angin dari dalam ke luar, berfungsi sebagai pendingin komponen-komponen elektronik pada rangkaian yang mengalami *heat up* pada saat operasi. Kipas pendingin yang digunakan bermerek *SUNON* dengan diameter 8 cm yang bekerja pada tegangan 220 V AC.

- *Rotary switch*

Digunakan untuk pemilihan variasi kapasitor yang digunakan atau dialiri arus pada pasangan kawat keluaran CFL. *Rotary switch* yang digunakan memiliki 12 pin.

- Kabel rangkaian

Berfungsi untuk menghubungkan kapasitor yang akan divariasikan dengan *rotary switch*.

- Terminal 8 dan kabel

Digunakan sebagai penghubung modul dengan sumber listrik 220 V AC.

- Mur-baut dan terminal nanas

Mur-baut yang digunakan berukuran 6 mm *stainless steel* ANSI 304 berfungsi sebagai terminal keluaran tegangan tinggi. Sedangkan terminal nanas terhubung dengan pin sekunder pada transformator *flyback* berperan sebagai *ground port*.

- Kotak *acrylic*

Tempat peletakan rangkaian suplai tegangan tinggi yang dibuat atau wadah modul, dengan pertimbangan keamanan dari kemungkinan tersengat arus listrik dan kepraktisan dalam penggunaan alat. Dibuat dari mika setebal 5 mm, dengan diberi lubang-lubang untuk aliran udara dan terminal.

### **3.2.1.2. Sumber Tegangan Tinggi Menggunakan Transformator *Neon Sign***

Sumber tegangan ini menggunakan *neon sign transformer* (NST) yang umumnya digunakan sebagai sumber daya bagi papan iklan atau *neon sign*. Alat ini mampu mengonversi rentang 120 – 240 V menjadi tegangan tinggi, biasanya rentang 2 – 15 kV pada 30 – 120 mA. NST lama merupakan transformator berinti besi, biasanya disatukan di dalam aspal untuk perlindungan dan isolasi. Inti mempunyai suatu lilitan magnetis yang membatasi arus keluaran, membolehkannya untuk beroperasi dengan tak terbatas pada kondisi hubungan



pendek. NST bisa juga beroperasi dengan tanpa muatan. Jenis inti besi cukup berat, sebagai contoh satu transformator *neon sign* 15 kV, 60 mA dapat mencapai 20 kg.

### A. Konstruksi Umum

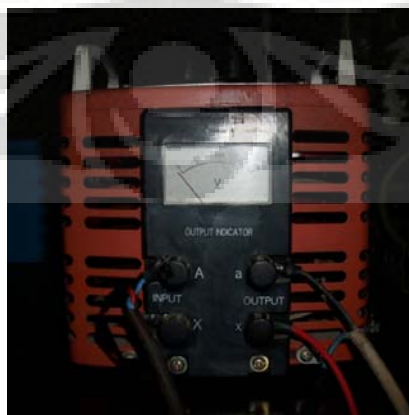
Pada operasionalnya, arus listrik masukan dari PLN akan dinaikkan oleh transformator yang diatur lewat regulator tegangan, sehingga keluarannya menghasilkan tegangan yang tinggi, yang mana nantinya cukup untuk menghasilkan *corona discharge* untuk produksi ozon. Konsumsi daya yang diperlukan dapat diukur dengan menggunakan voltmeter yang terdapat pada regulator tegangan dan amperemeter yang dirangkai pada keluaran regulator tegangan.

### B. Kelengkapan Alat

Kelengkapan sumber tegangan tinggi menggunakan transformator *neon sign* terdiri dari:

- Regulator tegangan

Berfungsi sebagai pengatur tegangan keluaran yang diinginkan agar terbentuk ozon di dalam ozonator dengan cara mengetahui adanya bunyi dengung yang terdengar dari dalam ozonator (menandakan awal pelepasan korona) serta kemudian dari adanya pelepasan korona yang terbentuk di dalam ozonator (belum terbentuk *spark* yang terlampau besar/*arc*) akibat induksi medan elektromagnetis.



**Gambar 3.5.** Regulator tegangan

Seperti tampak pada Gambar 3.5., spesifikasi alat yang dipakai adalah *voltage regulator T06C2-2KVA Kasuga Denki* dengan *output indicator* berentang 0 – 300 V.

- Transformator tegangan tinggi (*neon sign*)

Berfungsi sebagai penaik tegangan (*set-up*) sehingga menghasilkan energi yang cukup atau *corona* untuk menghasilkan oksigen. Dapat terlihat pada Gambar 3.6., transformator yang digunakan bermerek *Standard Electric Works Hongkong* dengan tegangan masukan 110/220 V dan tegangan keluaran maksimal 15.000 V. Alat ini berfrekuensi 50 Hz dan berdaya 450 VA.



**Gambar 3.6.** *Neon sign transformer*

- Kabel tegangan tinggi

Berfungsi sebagai penghubung trafo dengan ozonator. Diperlukan juga kabel untuk penghubung trafo dengan regulator tegangan.

- Amperemeter

Berfungsi untuk pengukuran arus yang keluar dari regulator tegangan, untuk nantinya akan dipergunakan dalam perhitungan konsumsi daya ozonator. Amperemeter yang digunakan jenis panel bermerek *HELES* dengan rentang 0 – 500 mA.

### **3.2.2. Ozonator**

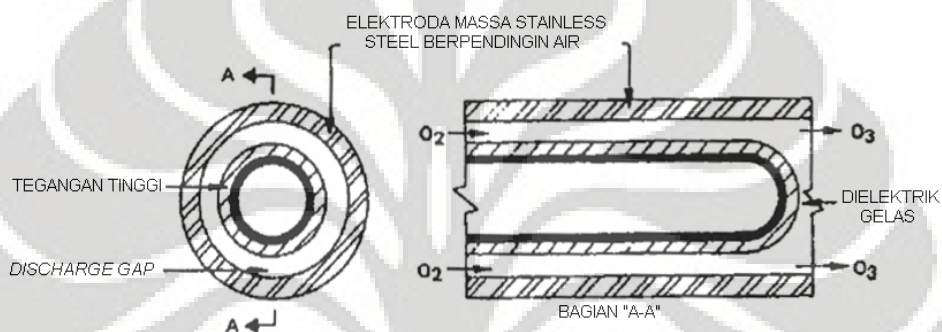
Perancangan alat pembangkit ozon jenis pipa koaksial ini didasarkan pada sejumlah kriteria sebagai berikut:

- Efisien, konsumsi daya listrik minimal, dan produktivitas tinggi

- Mudah dalam hal pembuatan, pengoperasian, dan perawatannya
- Biaya pengoperasian dan perawatan yang murah.

### 3.2.2.1. Konstruksi Umum

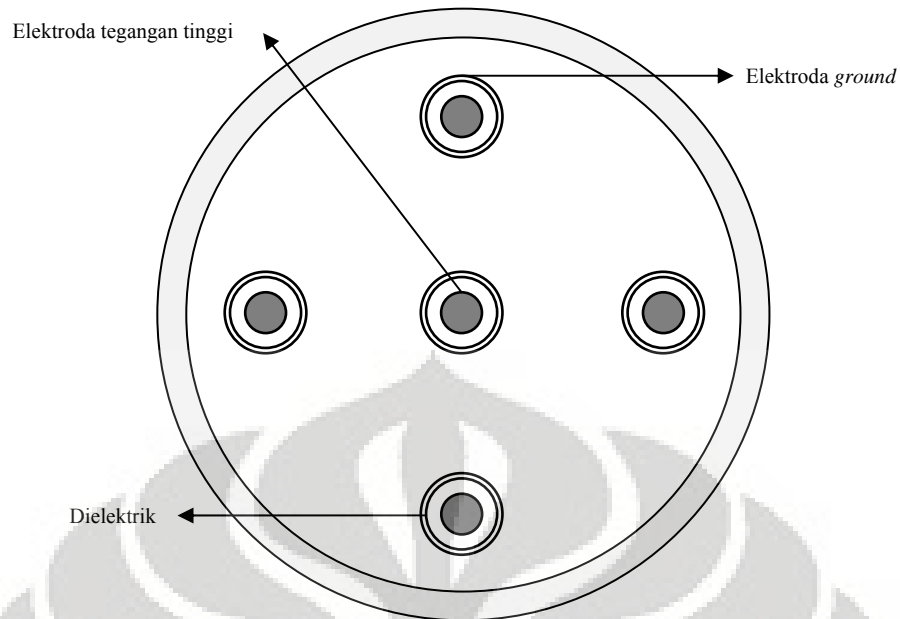
Pembentukan ozon ( $O_3$ ) dari uap udara kompresor maupun dari oksigen berkemurnian tinggi diharapkan terjadi pada ozonator yang dirancang. Ozonator yang dirancang memiliki prinsip dasar seperti ozonator jenis pipa yang tampak skemanya pada Gambar 3.7.



**Gambar 3.7.** Skema ozonator jenis pipa

Sumber: Rice dan Browning, 1981

Dengan dasar pengembangan dari ozonator jenis pipa, maka perlu dirancang ozonator jenis pipa koaksial dengan pertimbangan teoretis untuk menghasilkan ozon secara efisien dengan konsumsi daya listrik minimal. Selanjutnya, perancangan ozonator yang sederhana di mana perakitan pipa koaksial dalam ozonator didesain untuk kemudahan dalam konstruksi dan penggantian komponen-komponennya. Untuk itu, diputuskan pembuatan lima pipa koaksial dalam satu ozonator, dengan konfigurasi satu di pusat/tengah dan empat lainnya di perimeter seperti tampak pada skema melintang ozonator di Gambar 3.8.

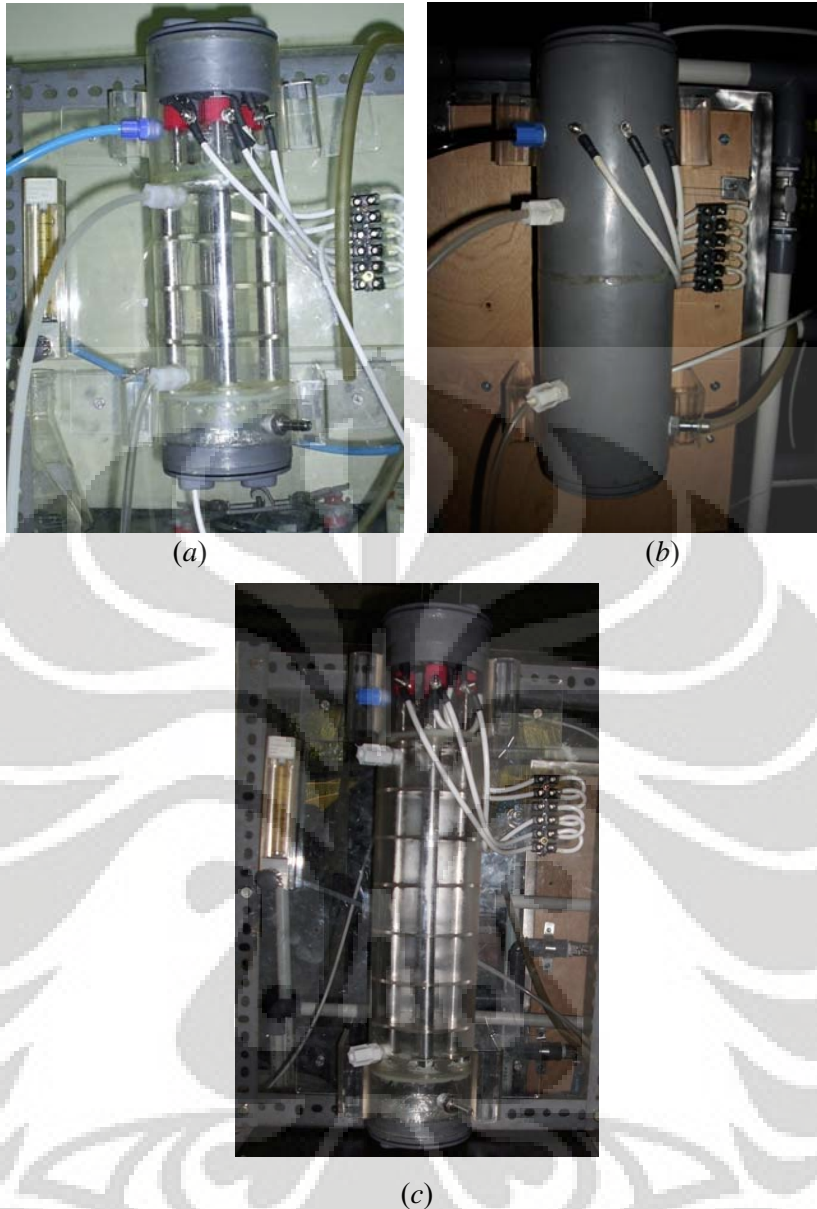


**Gambar 3.8.** Skema melintang ozonator jenis pipa koaksial

Pada tiap-tiap pipa konsentrisnya, gas umpan yang mengandung oksigen dikonversi menjadi ozon pada medan listrik atau *corona discharge gap* antara elektroda bagian dalam dan luar. Di mana *corona discharge* ini merupakan muatan listrik yang tampak seperti cahaya ungu-kebiruan tipis pada permukaan dan berdekatan dengan elektroda ketika gradien tegangan mencapai suatu nilai kritis, disebabkan oleh ionisasi sekeliling gas yang melalui *gap* oleh tegangan tinggi.

Dapat terlihat pula pada Gambar 3.9., elektroda tegangan tinggi dan massa (*ground*) terbuat dari bahan *stainless steel*, sedangkan dielektriknya terbuat dari gelas *Pyrex*. Elektroda ini dihubungkan dengan sumber tegangan tinggi, sedangkan panas akibat medan induksi elektromagnetis yang terjadi di sekeliling elektroda massa didinginkan dengan menggunakan air ataupun udara kompresor yang mengalir secara kontinu. Arus listrik masukan akan dinaikkan oleh transformator tegangan tinggi yang diatur lewat regulator tegangan, sehingga keluarannya menghasilkan tegangan yang tinggi.



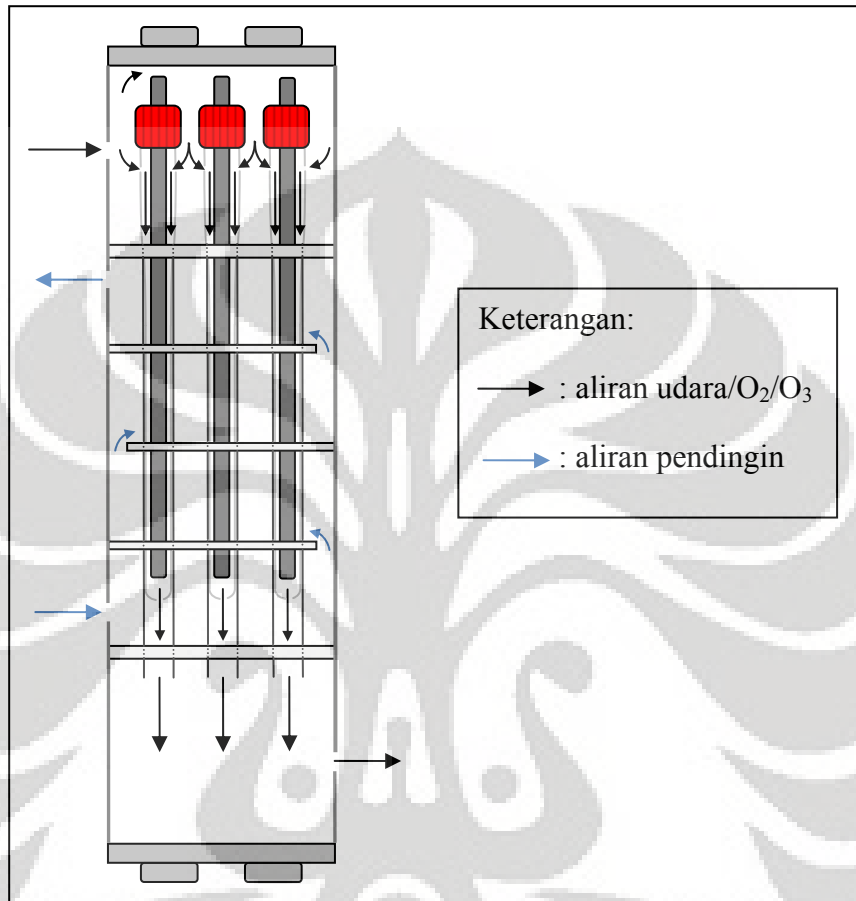


**Gambar 3.9.** Tiga buah ozonator hasil rancangan dengan ukuran pendek dengan selongsong berbahan akrilik (a), berbahan PVC (b), dan ukuran panjang dengan selongsong berbahan akrilik (c)

Selain itu, harus dirancang pula agar *discharge gap* antara elektroda tegangan tinggi dan massa cukup kecil, yaitu sekitar 3 mm serta ketebalan dielektrik gelas yang juga tipis sekitar 1,5 mm agar diperoleh konsumsi daya listrik yang minimal.

Udara yang mengandung oksigen berasal dari kompresor dialirkan dulu menuju filter *silica gel*, lalu menuju ozonator melalui rotameter. Udara masuk ozonator melalui *nipple* selang berwarna biru di bagian atas (Gambar 3.9.). Di

dalam ozonator, campuran gas (udara, oksigen, dan ozon) akan mengalir dari bagian atas ke bawah (di dalam tabung gelas), seperti tampak pada Gambar 3.10. berikut ini.



**Gambar 3.10.** Skematis aliran dalam ozonator rancangan

Sedangkan pendingin berupa air atau dapat pula udara kompresor akan mengalir dari bawah (*nipple* berwarna putih) ke atas agar waktu kontak lebih lama dalam perpindahan panas sehingga suhu ozonator relatif konstan. Selain itu dirancang pula dengan mempergunakan *baffle* karena perpindahan panas akan lebih efektif jika dapat mengondisikan fluida pendingin dalam keadaan turbulen. Ozon, oksigen, dan udara akan keluar melalui *stainless steel nipple* pada bagian bawah.

### 3.2.2.2. Kelengkapan Komponen

Kelengkapan ozonator jenis pipa konsentris yang dirancang terdiri dari:

#### A. Selongsong atau *Shell* Ozonator

Terdapat dua jenis bahan yang digunakan, yaitu *acrylic* dan PVC. Pertimbangan pemilihan bahan *acrylic* dikarenakan untuk memudahkan dalam instalasi dan melihat nantinya jika terdapat kerusakan komponen-komponen di dalamnya. Sedangkan PVC dianggap lebih aman karena ketebalan dan mampu menahan induksi elektromagnetis dari *discharge* tegangan tinggi yang terjadi di dalam ozonator.

Adapun spesifikasi selongsong *acrylic* (Gambar 3.11.) yang digunakan adalah:

- Tinggi (tipe I/pendek) = 31 cm
- Tinggi (tipe II/panjang) = 45 cm
- Ketebalan = 5 mm



**Gambar 3.11.** Selongsong *acrylic*

Sedangkan spesifikasi selongsong PVC (Gambar 3.12.) yang digunakan adalah:

- Tinggi (tipe I) = 15 cm / 6 inci
- Ketebalan = 5 mm



**Gambar 3.12.** Selongsong PVC

Baik diameter *acrylic* maupun konektor PVC memiliki ukuran yang sama, yaitu 9 cm atau 3,5 inci. Untuk selongsong yang terbuat dari konektor pipa PVC ini digunakan 2 buah konektor yang disambung, seperti terlihat pada Gambar 3.9 (b).

#### B. Elektroda Tegangan Tinggi

Elektroda ini terbuat dari bahan *stainless steel* ANSI 304 (Gambar 3.13.) dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Panjang (tipe I/pendek) = 16 cm
- Panjang (tipe II/panjang) = 27,5 cm
- Diameter = 6 mm



**Gambar 3.13.** Elektroda tegangan tinggi

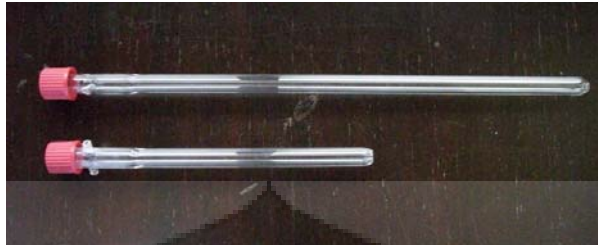
#### C. Dielektrik

Dielektrik terbuat dari gelas jenis *Pyrex* dengan merek *SCHOTT* (Gambar 3.13.), yang memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Panjang (tipe I/pendek) = 17 cm



- Panjang (tipe II/panjang) = 32 cm
- Ketebalan = 1,5 mm
- Diameter luar = 9,5 mm



**Gambar 3.14.** Dielektrik gelas

#### D. Elektroda Massa

Elektroda ini terbuat dari pipa *stainless steel* (Gambar 3.15.) dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Panjang (tipe I/pendek) = 17 cm
- Panjang (tipe II/panjang) = 30,5 cm
- Ketebalan = 0,5 mm
- Diameter = 1,2 mm

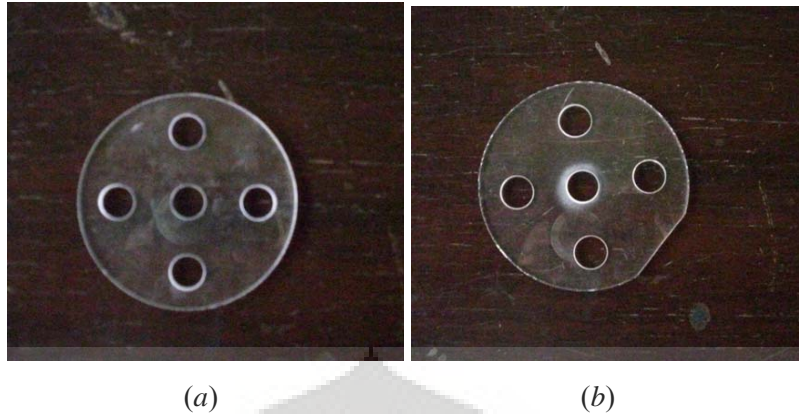


**Gambar 3.15.** Elektroda massa

#### E. *Baffle*/penyekat

Terdapat dua jenis *baffle* yang digunakan yaitu penyekat atas-bawah yang membatasi dengan kontak fluida pendingin serta *baffle* antara yang berperan dalam perpindahan panas dari ozonator ke fluida pendingin. Penyekat atas-bawah ini memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Diameter = 9 cm / 3,5 inci
- Diameter lubang pipa konsentris = 1,2 cm
- Ketebalan = 5 mm



**Gambar 3.16.** Penyekat atas-bawah (a) dan *baffle* (b)

Sedangkan untuk *baffle* memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Diameter = 9 cm / 3,5 inci
- Diameter lubang pipa konsentris = 1,2 cm
- Ketebalan = 3 mm

#### F. Tutup Ozonator

Sebagai tutup ozonator untuk bagian atas dan bawah digunakan tutup “CO” atau tutup pipa biasa untuk pipa ukuran 3 inci.

#### G. *Nipple* dan Selang

*Nipple* yang dipergunakan, yaitu untuk umpan masukan, fluida pendingin, dan keluaran ozon. Semua memiliki ukuran ulir yang sama, yaitu 0,25 inci. Untuk *nipple* umpan masukan menggunakan *nipple* plastik berwarna biru untuk ukuran selang 8 mm dengan bahan selang *polyurethane*. Sedangkan untuk air pendingin menggunakan *nipple* filter biasa untuk ukuran selang 6 mm dengan bahan selang *polyethylene* yang dapat tahan panas. Lalu untuk ozon keluaran menggunakan *stainless steel nipple* dan selang berbahan silikon.

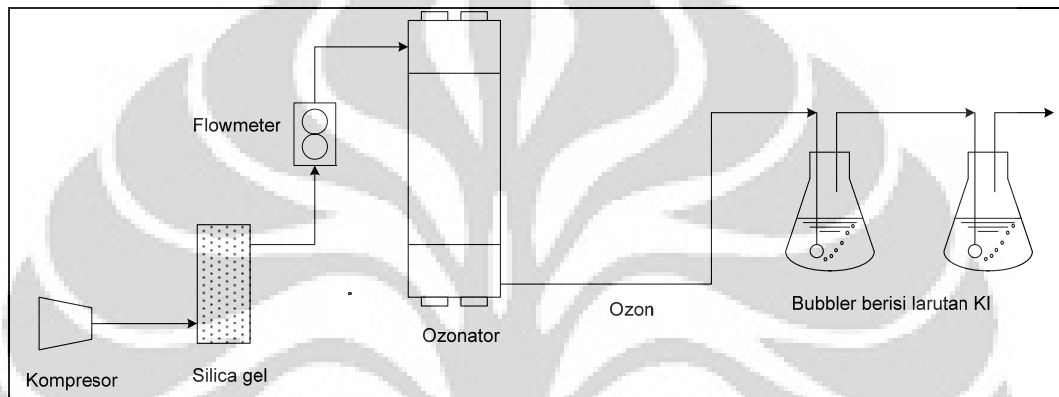
#### H. Kabel Tegangan Tinggi

Berfungsi untuk menghubungkan elektroda tegangan tinggi di dalam ozonator dengan transformator tegangan tinggi. Selain itu juga digunakan pula kawat tembaga untuk menghubungkan elektroda massa dengan transformator.

### 3.3. Tahap Percobaan

#### 3.3.1. Pengukuran Produktivitas Ozon dengan Metode Iodometri

Proses ini dilakukan untuk mengetahui jumlah ozon yang dihasilkan dalam suatu pembangkitan ozon. Metode yang digunakan adalah metode iodometri karena ozon reaktif terhadap larutan KI. Proses ini dilakukan dengan cara mengalirkan ozon ke dalam larutan KI dalam *gas washing bottle (bubbler)* seperti pada gambar di bawah ini



**Gambar 3.17.** Skematis rangkaian percobaan produktivitas ozon

#### 3.3.1.1. Alat dan Bahan

Untuk melakukan pengukuran produktivitas ozon, digunakan beberapa alat dan bahan, antara lain:

##### A. Alat:

- Buret 50 cc
- *Beaker glass* 250 mL, 1000mL
- Statip
- Erlenmeyer 250 mL
- Botol aquades 250 mL
- *Stopwatch*
- Gelas ukur 50 mL
- *Bubbler (gas washing bottle)* 2 buah @ 200 mL

##### B. Bahan:

- KI (pa), Merck

- $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (pa), Merck
- $\text{H}_2\text{SO}_4$  (pa), Merck
- Indikator kanji (amilum)
- Aquades

C. Pembuatan reagen yang dibutuhkan:

- Membuat larutan  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (0,005 N) dibuat dengan jalan melarutkan 0,62 gram  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (serbuk putih) ke dalam 1.000 mL aquades.
- Membuat larutan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (2 N) dengan jalan pengenceran, di mana larutan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pekat (18 N) sebanyak 14 mL diencerkan dengan aquades sehingga didapat larutan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (2 N) sebanyak 250 mL.
- Menyiapkan larutan amilum 1%, yaitu 1 gr padatan *starch* ditambahkan aquades hingga 100 mL.

### 3.3.1.2. Prosedur Pengukuran Produksi Ozon

Pengukuran produksi ozon yang dihasilkan dilakukan untuk mengetahui jumlah ozon yang digunakan nantinya. Langkah percobaannya adalah sebagai berikut:

1. Melarutkan KI (serbuk putih) sebanyak 20 gram dalam aquades sehingga diperoleh larutan KI (0,12 N atau 2%) sebanyak 1.000 mL.
2. Memasukkan larutan KI ke dalam *gas washing bottle (bubbler)* yang terdiri dari bagian hulu dan hilir masing-masing sebanyak 200 mL, kemudian menyalakan ozonator, membuka katup laju alir udara sehingga udara/oksigen akan tersuplai menuju ozonator sehingga keluaran dari ozonator, yaitu campuran ozon/ $\text{O}_2$  akan dilewatkan ke dalam *bubbler*.
3. Mengambil sampel untuk dititrasi ketika warna larutan KI pada bagian hilir yang semula bening berubah menjadi kuning muda.
4. Sebelum dititrasi dengan larutan  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , menambahkan sampel dengan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (2 N) sebanyak 10 mL dan indikator amilum sehingga sampel berwarna biru tua (menandakan adanya  $\text{I}_2$  dalam sampel).



5. Menghentikan proses titrasi sampai larutan yang berwarna biru tua tepat berubah menjadi bening.
6. Perlakuan yang sama terhadap bagian hulu dan hilir.

### **3.4. Pengambilan dan Pengolahan Data**

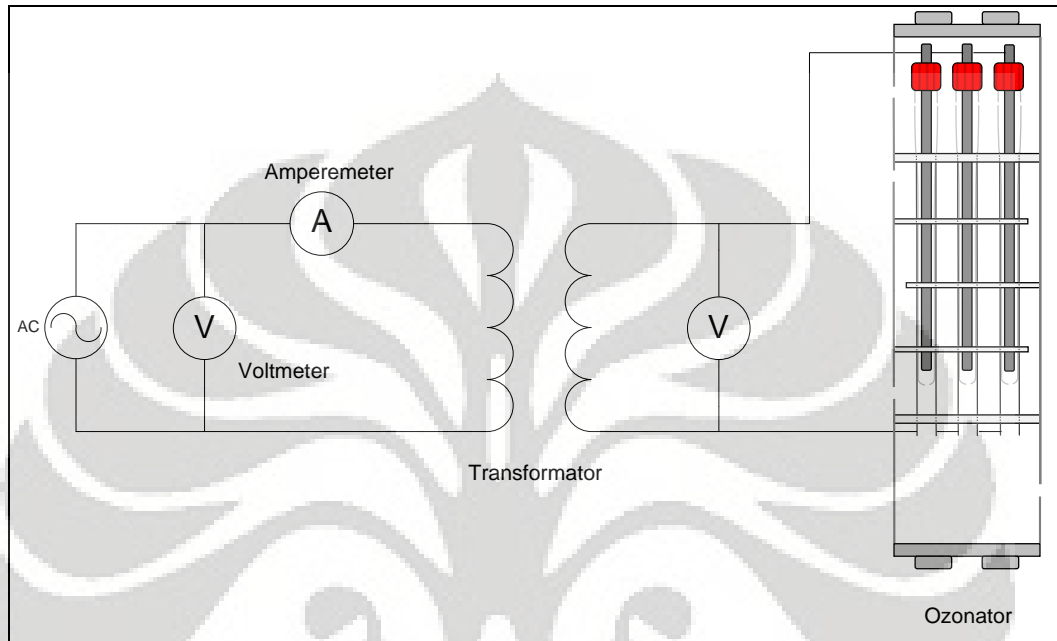
Langkah-langkah yang dilakukan dalam percobaan untuk penentuan produktivitas ozon adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan bahan-bahan yang diperlukan.
2. Membuat larutan yang dibutuhkan:  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (0,005 N), KI (0,12 N), indikator kanji, dan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (2 N).
3. Menyalakan aliran pendingin untuk ozonator (air atau udara kompresor).
4. Mengalirkan umpan udara kompresor yang sudah mengalami penyaringan dan pengeringan dengan *silica gel* atau mengalirkan umpan oksigen murni.
5. Melakukan variasi tegangan-arus (daya) dan laju alir umpan (udara atau oksigen murni).
6. Mencatat nilai tegangan masukan ke transformator (terbaca pada *display* nilai volt keluaran regulator tegangan) dan kuat arus yang terbaca pada amperemeter.
7. Mengalirkan  $\text{O}_3$  ke *bubbler* bagian hulu dan hilir yang mengandung KI.
8. Mencatat waktu yang dibutuhkan hingga larutan KI pada bagian hilir berubah warna menjadi kuning muda.
9. Menambahkan indikator kanji pada larutan KI bagian hulu dan hilir.
10. Menitrasi larutan KI bagian hulu dan hilir dengan  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ .
11. Mencatat volume penitrasi pada bagian hulu dan hilir.
12. Menghitung konsentrasi  $\text{O}_3$  terlarut pada masing-masing *bubbler*, kemudian dijumlahkan.
13. Menghitung produktivitas ozonator.

#### **3.4.1. Penghitungan Produktivitas Ozon dan Konsumsi Energi**

Cara perhitungan produktivitas ozon dari ozonator yang telah dirancang-bangun selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 1 serta penjelasannya terdapat pada Bab 4.

Sedangkan untuk perhitungan konsumsi daya diperoleh dari pembacaan tegangan pada tampilan di regulator tegangan dan arus yang terbaca pada amperemeter. Kemudian, untuk tegangan elektroda tidak diukur secara langsung, tetapi menggunakan cara perbandingan (Lampiran 1).



**Gambar 3.18.** Skematis rangkaian percobaan pengukuran nilai arus dan tegangan

Dapat ditunjukkan bahwa pada rangkaian listrik, daya dapat diekspresikan sebagai:

$$P(t) = V(t) \times I(t) \quad (4.1.)$$

di mana  $V(t)$  dan  $I(t)$  merupakan tegangan dan arus sesaat sebagai fungsi waktu  $t$ . Pada sirkuit arus bolak-balik (AC), nilai-nilai ini bervariasi terus-menerus (sebagai fungsi waktu  $t$ ).

Nilai tersebut pada industri listrik merupakan nilai rata-rata dari daya sesaat pada sebuah siklus AC penuh. Komponen daya ini daya aktif atau daya sebenarnya dan diukur dalam watt (menggunakan simbol W):

$$\text{Real Power (W)} = \text{average} \{P(t)\} = \langle P(t) \rangle \quad (4.2.)$$

Ini merepresentasikan kerja aktual yang dilakukan oleh suatu arus listrik atau energi aktual yang dikonsumsi oleh suatu muatan untuk menciptakan panas, cahaya, atau gerakan.

Sistem listrik biasanya memiliki induktor dan kapasitor, yang merupakan komponen reaktif. Komponen reaktif ideal tidak mendisipasi daya apapun, tetapi mereka menarik arus dan menyebabkan penurunan tegangan, yang menciptakan kesan demikian yang dilakukan. Daya imajiner ini dinamakan daya reaktif. Daya reaktif diukur dengan Volt-Ampere-Reaktif (VAR), yang secara numeris mewakili amplitudo daya reaktif sesaat.

Kombinasi dari daya sebenarnya, daya distorsi dan daya reaktif menghasilkan daya total (nyata), diukur dalam Volt-Ampere (VA):

$$VA = V \times I \quad (4.3.)$$

di mana V dan I merupakan nilai *root mean square* (RMS) dari tegangan dan arus.

Rasio dari daya sebenarnya terhadap daya nyata dinamakan faktor daya (PF) atau terkadang dinamakan  $\cos \varphi$ :

$$PF = \cos \varphi = \frac{W}{VA} \quad (4.4.)$$

Jika kita mengetahui nilai faktor daya ini, maka kita dapat mengubah VA ke watt, di mana  $watt = VA \times PF$ . Jika kita tidak mengetahui nilai faktor daya dari alat yang digunakan, dapat diasumsikan  $PF = 0,6$ .

Dengan nilai produktivitas ozon yang telah kita ketahui sebelumnya dalam satuan gr/jam, maka kita dapat menghitung nilai produksi dari segi konsumsi energi, yaitu dengan satuan gr/kWh:

$$\frac{gr}{kWh} = \frac{gr}{jam} \times \frac{1.000}{VA} \times \frac{1}{0,6} \quad (4.5.)$$

Sedangkan untuk mengetahui nilai energi spesifik atau konsumsi energi per kg ozon yang dihasilkan (kWh/kg) dapat dihitung sebagai berikut:

$$\frac{kWh}{kg} = VA \div \frac{gr}{jam} \times 0,6 \quad (4.6.)$$

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan diuraikan mengenai hasil dari pengujian uji kinerja produktivitas ozonator jenis pipa koaksial (*shell and tube*) yang telah dirancang, yaitu analisis pengaruh variasi kondisi operasi yang telah disebutkan dalam bab sebelumnya terhadap kinerja dan produktivitas ozonator.

#### 4.1. Penggunaan Sumber Tegangan Tinggi

Pada tahap pengujian peralatan hasil instalasi, diketahui bahwa penggunaan sumber tegangan tinggi dengan menggunakan *flyback transformer* (rangkaiannya pembangkit tegangan tinggi elektronik) tidak dapat diteruskan. Hal ini dikarenakan kurang stabilnya tegangan yang diberikan oleh *flyback transformer* dan sering terjadinya tegangan balik (*feedback*) ke arah rangkaian elektronik melalui tegangan elektroda massa, yang mengakibatkan seringnya terjadi kerusakan pada rangkaian *ballast* elektronik CFL. Pada bab sebelumnya telah disebutkan bahwa keluaran tegangan tinggi dari *flyback transformer* haruslah selalu dekat dengan pin sekunder dari *flyback transformer* sehingga terjadi lompatan muatan atau *spark*.

Jika melihat pada konfigurasi ozonator di mana elektroda tegangan tinggi berbentuk silindris serta elektroda *ground* yang berbentuk pipa sehingga diharapkan terjadi muatan *corona* di antara keduanya, maka hal itu akan sulit untuk diaplikasikan. Penggunaan *flyback transformer* ternyata lebih cocok untuk keluaran tegangan/*spark* tunggal daripada digunakan pada ozonator dengan konfigurasi *corona* tegangan tinggi yang menyebar.

Lain halnya dengan penggunaan transformator tegangan tinggi (*neon sign transformer*) yang lebih handal dibandingkan dengan menggunakan *flyback transformer*. Sehingga dengan menggunakan *neon sign transformer* tersebut dapat dilakukan variasi konsumsi daya yang diinginkan pada ozonator hasil rancang bangun.

## 4.2. Data Percobaan

Data atau parameter utama dari percobaan yang diambil dalam pengamatan ini ada 4 (empat), yaitu:

- (a) lamanya waktu yang diperlukan oleh larutan KI untuk berubah warna dari bening menjadi kuning kecokelatan (menunjukkan adanya  $O_3$  yang mengoksidasi KI);
- (b) nilai arus (yang tercantum pada amperemeter) dan
- (c) nilai tegangan (yang tercantum pada tampilan indikator keluaran regulator tegangan) yang sebanding dengan pengukuran konsumsi daya; serta
- (d) banyaknya volume penitiasi ( $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ) pada *bubbler* ozon (bagian hulu dan hilir) untuk mengetahui banyaknya ozon yang diproduksi.

Keseluruhan data diperoleh dengan cara melakukan variasi kondisi operasi utama, yaitu variasi tegangan dan arus listrik yang digunakan untuk ozonator, laju alir umpan (udara atau oksigen), yang kemudian digunakan untuk pengolahan data produktivitas ozonator.

## 4.3. Pengujian Kinerja Produksi Ozon

Dalam penelitian ini dilakukan uji kinerja produksi ozon dari ozonator hasil rancang bangun pada setiap kondisi operasi, yaitu waktu yang diperlukan ozon untuk mengoksidasi larutan KI yang dilakukan dengan jalan mengontakkan ozon dengan larutan KI dalam *bubbler* dengan variasi tegangan *input* transformator dan laju alir gas umpan.

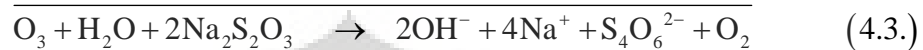
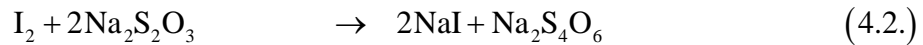
Akibat dari kontak tersebut akan terjadi reaksi oksidasi antara ozon dan KI yang menyebabkan larutan berubah warna menjadi kuning kecokelatan. Warna ini adalah warna dari  $I_2$  yang terbentuk melalui reaksi oksidasi  $I^-$  sebagai berikut:



Dari persamaan di atas dapat dilihat mol  $I_2$  yang terbentuk sebanding dengan mol ozon yang diperlukan untuk mengoksidasi KI, sehingga mol  $I_2$  tersebut dapat dipergunakan untuk menghitung mol ozon yang diproduksi oleh ozonator hasil rancangan. Cara penentuan jumlah mol  $I_2$  yang terbentuk adalah dengan menitrasi larutan dengan natrium tiosulfat ( $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ), setelah terlebih dahulu menambahkan asam sulfat dan amilum. Fungsi dari asam sulfat



adalah untuk meminimalisasi I<sub>2</sub> yang terlepas ke udara, sedangkan fungsi amilum adalah sebagai indikator (campuran I<sub>2</sub> dengan amilum akan menimbulkan warna biru-ungu). Persamaan reaksi titrasi secara lengkap adalah sebagai berikut:



Titrasi dilakukan sampai jumlah I<sub>2</sub> sebanding secara stoikiometris dengan natrium tiosulfat, yang ditunjukkan oleh warna larutan yang menjadi jernih. Dari kedua persamaan reaksi di atas, maka jumlah mol ozon yang terbentuk oleh ozonator akan sama dengan setengah dari jumlah mol natrium tiosulfat yang terpakai, dan produktivitas ozonator dapat dihitung dengan jalan membagi jumlah mol ozon tersebut dengan waktu yang diperlukan untuk mengubah warna larutan KI pada bagian hilir menjadi kuning muda, sehingga dapat diketahui besarnya ozon yang diproduksi ozonator hasil rancangan. Langkah-langkah serta contoh perhitungan produktivitas ozonator dapat dilihat pada Lampiran 1. Data produktivitas selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 2 hingga 5.

#### 4.3.1. Pengaruh Konsumsi Daya terhadap Produktivitas Ozonator

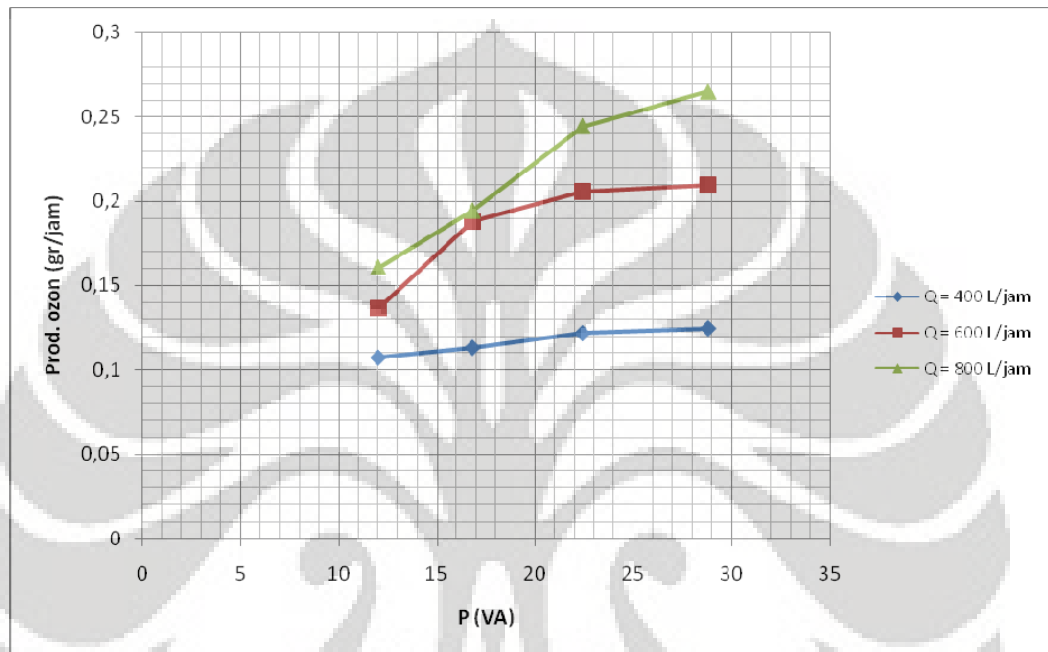
Pada Gambar 4.1. terlihat bahwa dengan adanya kenaikan daya (hasil kali antara tegangan dan arus) maka akan terjadi pula kenaikan produktivitas ozonator. Hal ini disebabkan oleh adanya daya yang lebih tinggi yang dapat semakin mempercepat proses pembentukan ozon yang dihasilkan pada ozonator sehingga waktu yang dibutuhkan oleh ozon untuk bereaksi dengan larutan KI pada *bubbler* pun semakin cepat pula.

Terlihat dari grafik bahwa pada konsumsi daya yang lebih tinggi (pada daya 28,8 VA), kurva kenaikan produktivitas ozon mulai sedikit lebih landai. Hal ini dipercaya oleh adanya dua faktor, yaitu:

1. Daya tinggi akan menghasilkan suhu yang lebih tinggi pula.

Resultan kenaikan pada suhu ozonator mengakibatkan laju perusakan termal ozon meningkat.

2. Daya tinggi juga berarti konsentrasi ozon yang lebih tinggi dan peningkatan pada laju tumbukan ozon dengan elektron-elektron atau ion-ion plasma. Jumlah ozon yang hilang karena panas (tumbukan) kemungkinan sebanding dengan arus muatan dan konsentrasi ozon, sehingga daya yang lebih tinggi akan menghasilkan lebih banyak kehilangan ozon pada proses ini.

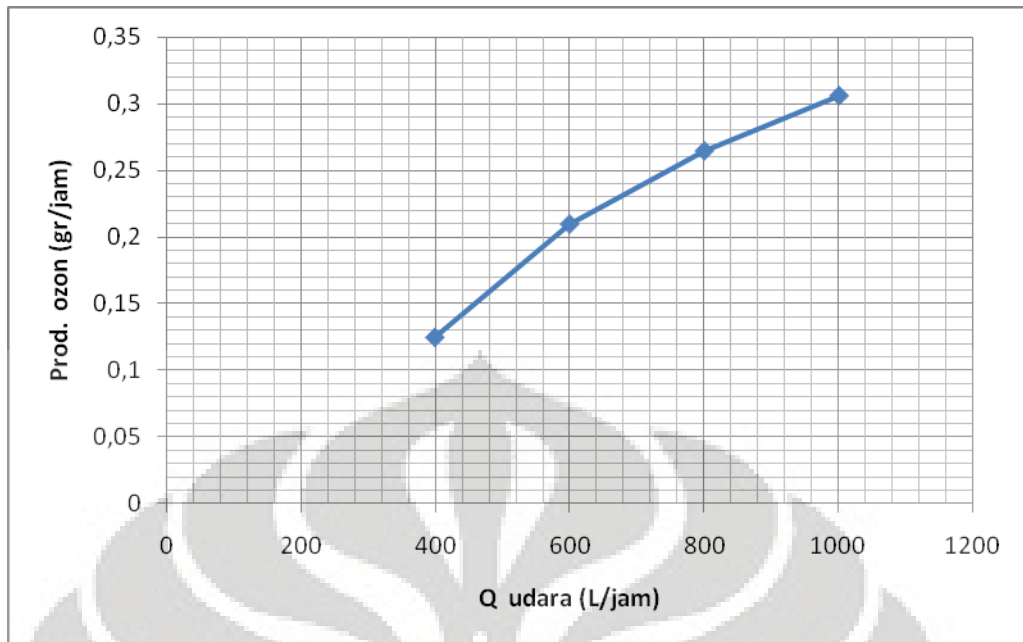


**Gambar 4.1.** Grafik kinerja produktivitas ozonator pendek sebagai fungsi konsumsi daya

#### 4.3.2. Pengaruh Laju Alir Umpan terhadap Produktivitas Ozonator

Pada percobaan pengaruh laju alir umpan udara terhadap kinerja produksi ozon ini dilakukan pada kondisi input tegangan pada transformator sebesar 160 V dengan arus 0,18 A (daya 28,8 VA). Hal ini dikarenakan produksi ozon tertinggi diperoleh pada daya dengan nilai tersebut, sebagaimana telah diuji coba pada percobaan sebelumnya pada daya yang berbeda-beda.

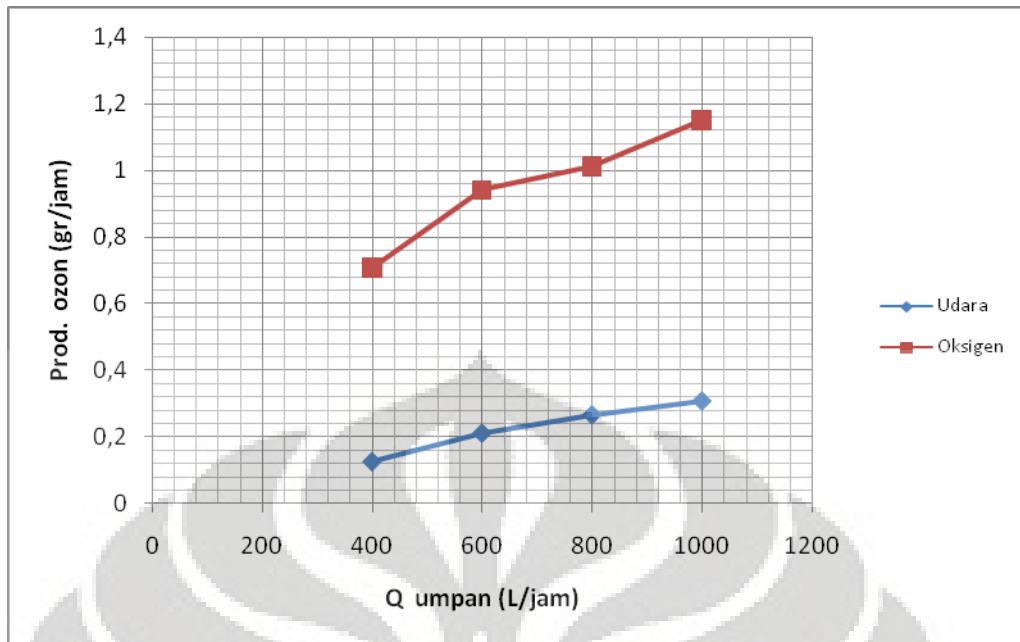
Dari Gambar 4.2. dapat terlihat bahwa dengan adanya kenaikan laju alir umpan udara akan maka semakin besar pula produktivitas ozon yang dihasilkan dari ozonator hasil rancangan. Hal ini disebabkan dengan adanya kenaikan laju alir umpan udara, maka jumlah oksigen dalam udara masukan pun akan semakin banyak pula, sehingga produk ozon yang terbentuk akan semakin bertambah.



**Gambar 4.2.** Grafik kinerja produktivitas ozonator pendek sebagai fungsi laju alir umpan pada  $V = 160$  V dan  $I = 0,18$  A

#### 4.3.3. Pengaruh Jenis Gas Umpan terhadap Produktivitas Ozonator

Seperti dapat dilihat pada Gambar 4.3. diketahui bahwa penggunaan oksigen sebagai gas masukan lebih baik dibandingkan dengan menggunakan udara. Hal ini dikarenakan komposisi oksigen pada udara yang hanya 21%, lebih kecil dibandingkan nitrogen yang sebesar 78%. Keberadaan nitrogen dan uap air pada ozonator sering kali memicu timbulnya senyawa  $\text{NO}_x$  pada *discharge* yang dapat menghancurkan ozon yang mulai terbentuk seperti yang terjadi pada stratosfer bumi. Selain itu, energi spesifik yang diperlukan ( $\text{kWh/kg O}_3$ ) pun lebih besar jika kita menggunakan udara sebagai umpan dibandingkan dengan menggunakan oksigen sebagai umpan (Lampiran 2 – 6).



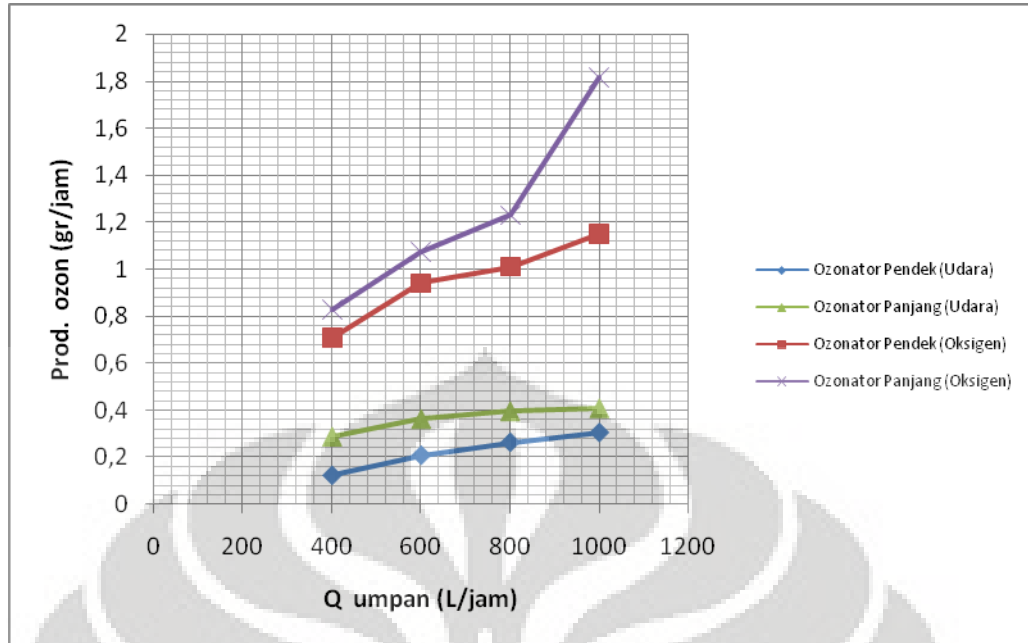
**Gambar 4.3.** Grafik perbandingan kinerja produktivitas ozonator pendek sebagai fungsi laju alir umpan pada  $V = 160$  V dan  $I = 0,18$  A

#### 4.3.4. Pengaruh Ukuran Ozonator terhadap Produktivitas Ozonator

Seperti terlihat pada Gambar 4.4. di bawah dapat diketahui bahwa pengaruh ukuran atau geometri ozonator ternyata sangat berpengaruh terhadap hasil produksi keluaran ozonator. Dalam hal ini, semakin besar laju alir umpan, maka semakin besar pula produksi ozon dari ozonator. Dengan menggunakan umpan udara, peningkatan produktivitas pada ozonator panjang mencapai 1,3 – 2,3 kali ozonator pendek. Sedangkan dengan menggunakan umpan oksigen, peningkatan produktivitas pada ozonator panjang mencapai 1,1 – 1,6 kali ozonator pendek. Hal ini dikarenakan luas permukaan elektroda pada ozonator panjang yang lebih luas dibandingkan dengan ozonator pendek.

Konsumsi daya pada kedua ozonator ternyata tidak dapat disamakan untuk keduanya karena kondisi dimensi ozonator yang berbeda akan mempengaruhi tegangan dan arus yang melalui elektroda pada ozonator. Pada ozonator pendek, konsumsi daya optimal yang dipilih adalah pada 28,8 VA dan untuk ozonator panjang adalah pada konsumsi daya hanya 24,2 VA.

Kecenderungan peningkatan juga terjadi pada variasi daya yang digunakan seperti terlihat pada Lampiran 2 dan 4.

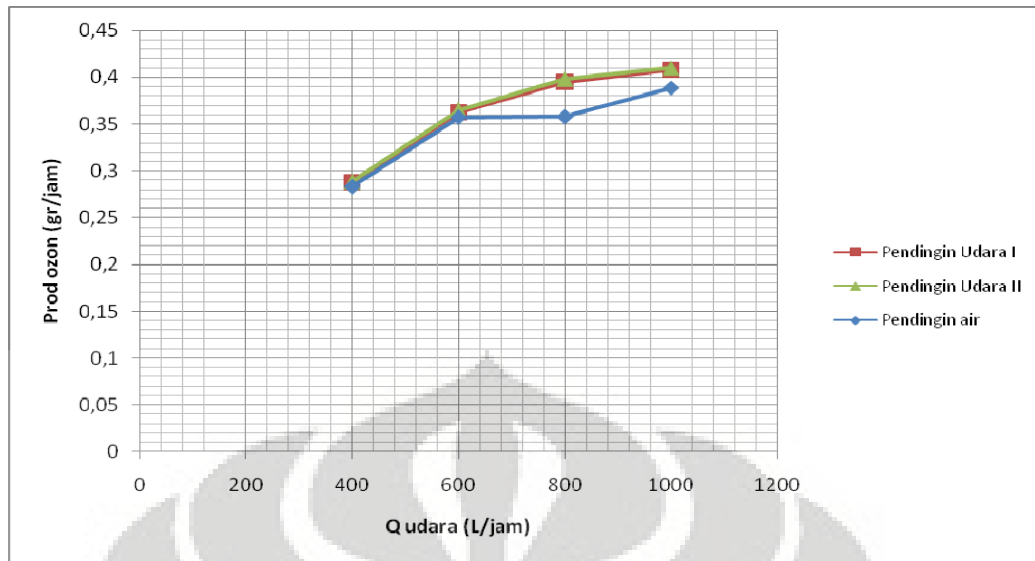


**Gambar 4.4.** Grafik perbandingan kinerja produktivitas kedua ozonator sebagai fungsi laju alir umpan pada  $P = 28,8$  VA (ozonator pendek) dan  $P = 24,2$  VA (ozonator panjang)

#### 4.3.5. Pengaruh Jenis Fluida Pendingin terhadap Produktivitas Ozonator

Untuk percobaan ini hanya dilakukan pada ozonator panjang dengan membuat 3 variasi, yaitu dua variasi dengan pendingin udara dan satu variasi dengan pendingin air. Keterangan aliran pada variasi pendingin udara I dan II serta data variasi fluida pendingin dapat dilihat pada Lampiran 6. Seperti terlihat pada Gambar 4.5. berikut diketahui bahwa tidak terdapat perbedaan yang jauh di antara ketiga variasi fluida pendingin. Ini menunjukkan kepraktisan dalam aplikasi berikutnya, di mana cukup dengan menggunakan pendingin udara dari kompresor saja, sehingga juga akan menghemat biaya untuk pendingin air.

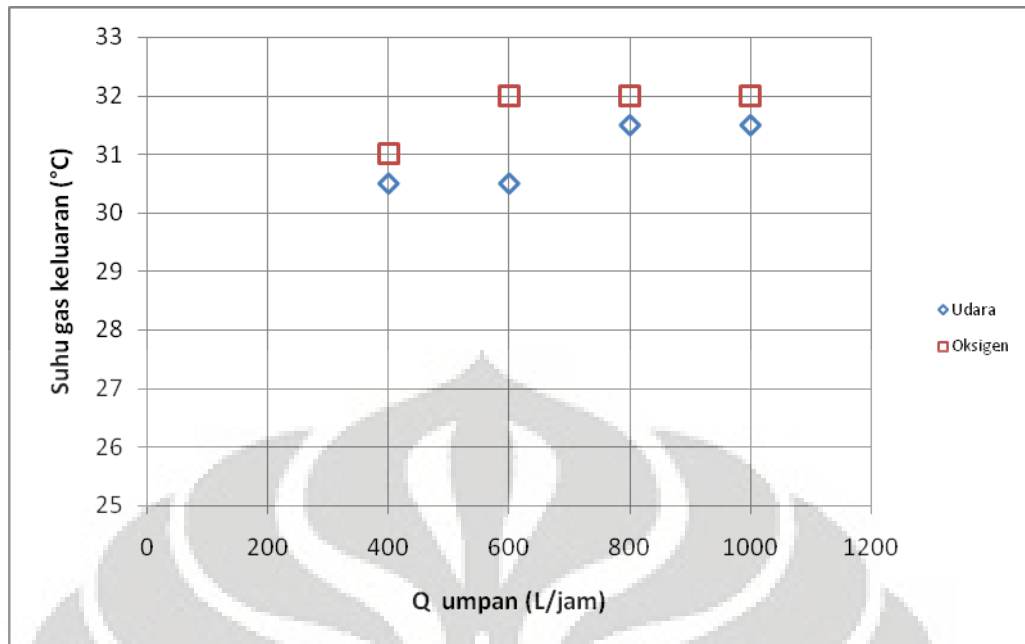




**Gambar 4.5.** Grafik perbandingan kinerja produktivitas ozonator panjang sebagai fungsi laju alir umpan pada variasi fluida pendingin

Selain itu, kita juga harus melihat suhu gas keluaran ozonator, di mana untuk meminimalisasi dekomposisi ozon, harus membatasi suhu keluaran ozonator hingga kurang dari 50 °C (Bellamy *et al.*, 1991). Dapat dilihat pada Lampiran 2 dan 3 bahwa pada penggunaan pendingin air untuk ozonator pendek, dihasilkan gas keluaran dengan suhu berkisar antara 29,5 – 30,5 °C (suhu umpan masukan 29,5 °C).

Kemudian, untuk ozonator panjang, di mana digunakan pendingin udara, dapat dilihat pada Gambar 4.6. dan Lampiran 5 bahwa suhu keluaran ozonator pun masih dalam rentang yang bagus, baik dengan umpan udara maupun oksigen, yaitu pada 30,5 – 32 °C. Untuk variasi fluida pendingin pada ozonator panjang, seperti terlihat pada Lampiran 6, diperoleh hasil suhu gas keluaran yang tidak terlalu berbeda. Sekali lagi, ini membuktikan bahwa penggunaan pendingin udara sudah cukup baik untuk ozonator hasil rancangan.



**Gambar 4.6.** Grafik perbandingan suhu gas keluaran ozonator panjang sebagai fungsi laju alir umpan udara dan oksigen dengan menggunakan pendingin udara

#### 4.3.6. Perbandingan Produksi Ozon dari Ozonator Hasil Rancangan dengan Ozonator Komersial Merek *Resun*

Dengan melihat hasil uji kinerja produktivitas ozon untuk ozonator merek *Resun* tipe RSO 9805 yang mengklaim mampu menghasilkan ozon sebesar 2,8 gr/jam, ternyata hanya mampu menghasilkan ozon sebesar  $\pm 0,08$  gr/jam (melalui uji titrasi iodometri) dengan umpan udara seperti terlihat pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1.** Data produksi ozon dari ozonator merek *Resun*

t (detik)	Vol. $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ hulu (mL)	Vol. $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ hilir (mL)	Prod. ozon (gr/jam)
60	18,8	3,2	0,079
104	35,8	5,3	0,085

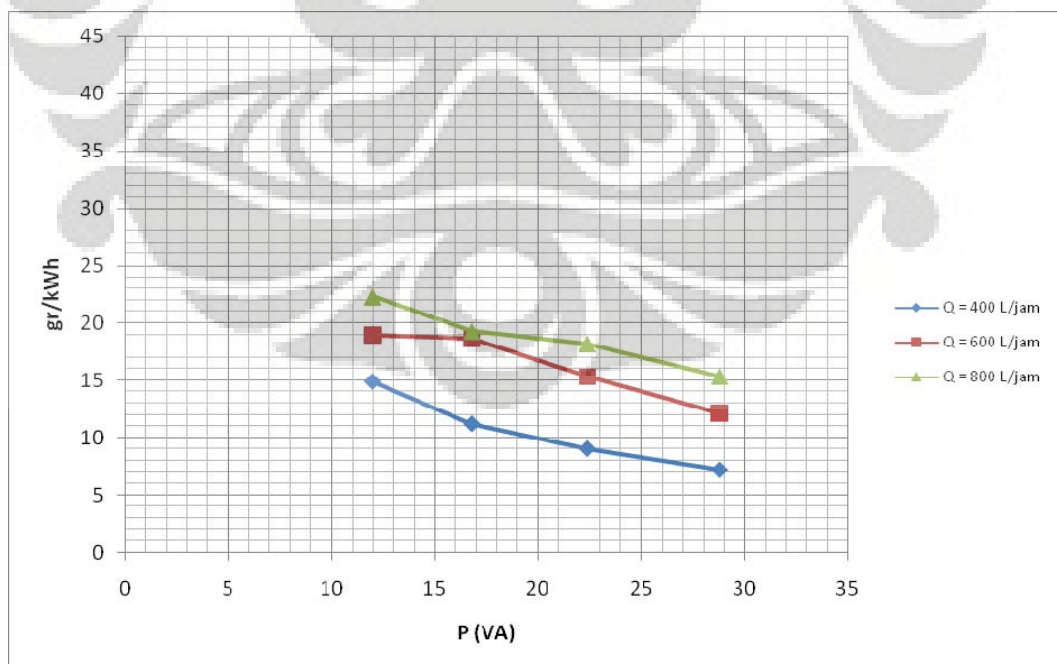
Nilai ini masih jauh jika dibandingkan dengan ozonator hasil rancangan yang mampu menghasilkan ozon hingga 0,3 gr/jam pada ozonator pendek dan 0,4 gr/jam pada ozonator panjang dengan menggunakan umpan udara.

#### 4.4. Produktivitas Ozonator Ditinjau dari Sejumlah Parameter

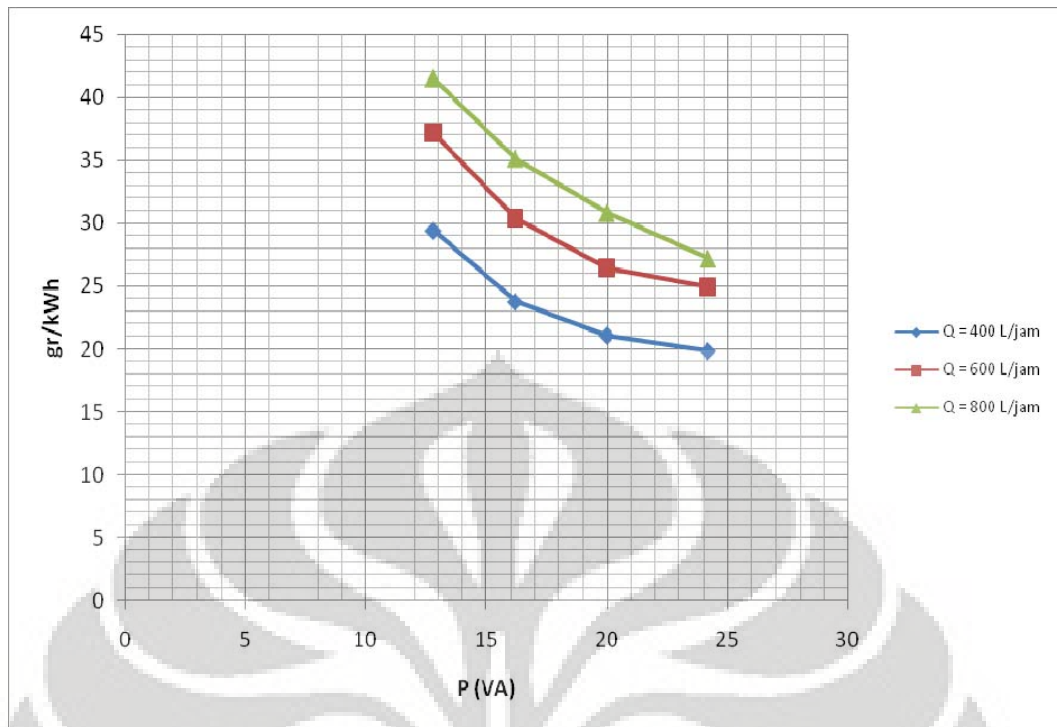
Sesuai dengan latar belakang dilakukannya penelitian ini, yaitu untuk menghasilkan ozonator yang efisien serta dengan tujuan untuk mencari kondisi operasi yang optimal, maka akan dianalisis efisiensi ozonator yang dilihat dari segi konsumsi energi, dimensi ozonator, dan penggunaan pendingin.

##### 4.4.1. Produktivitas Ozonator Ditinjau dari Segi Konsumsi Energi

Untuk penggunaan udara sebagai gas umpan ozonator, terlihat dari Gambar 4.7. bahwa karakteristik terbaik atau optimal, yaitu pada penggunaan ozonator panjang dengan konsumsi daya sebesar 12,8 VA dan laju alir umpan udara sebesar 800 L/jam sehingga dari segi konsumsi energi memiliki nilai produksi sebesar 41,51 gr/kWh atau konsumsi energi sebesar 24,09 kWh/kg (Lampiran 4). Jika dibandingkan dengan ozonator di industri dengan ukuran kapasitas produksi yang jauh lebih besar, yang memiliki energi spesifik atau konsumsi energi sekitar 10 – 13 kWh/kg di Rusia (Smorogin dan Karyagin, 2007) dan di Jepang (dengan umpan udara) sekitar 15 kWh/kg (Magara *et al.*, 1995), ternyata perbandingannya sudah hampir seimbang.



(a)

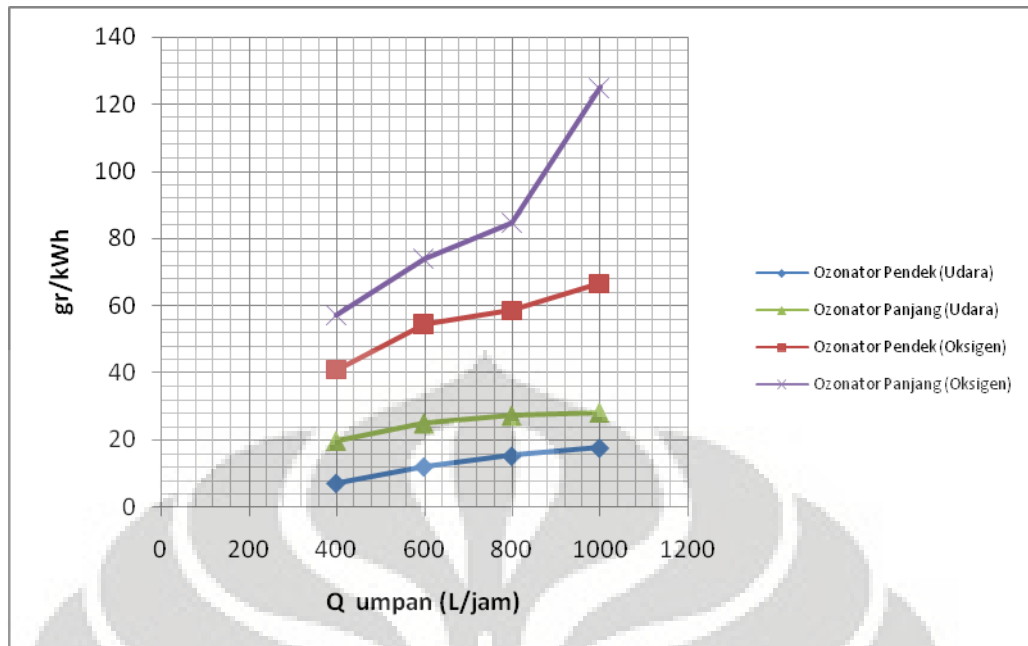


(b)

**Gambar 4.7.** Grafik produksi ozon per satuan energi untuk ozonator pendek (a) dan ozonator panjang (b) pada variasi konsumsi daya

Dari hasil perbandingan ini, maka diperlukan sekali melakukan penyempurnaan-penyempurnaan rancangan ozonator dan kinerjanya dengan lebih seksama lagi. Penyempurnaan tersebut meliputi: pencegahan kebocoran aliran gas umpan, kebocoran lompatan listrik (plasma), kualitas udara masuk (kelembaban udara), tegangan *discharge*, dan sebagainya.

Sedangkan jika dilihat pada Gambar 4.8. dan data pada lampiran 3 dan 5, ternyata nilai produktivitas per konsumsi energi yang terbaik jika digunakan oksigen sebagai umpan ozonator adalah sebesar 124,99 gr/kWh atau konsumsi energi sebesar 8 kWh/kg, yang diperoleh ozonator panjang dengan konsumsi daya sebesar 24,2 VA dan umpan oksigen 1.000 L/jam. Nilai ini sudah lebih baik jika dibandingkan dengan nilai konsumsi energi yang dimiliki ozonator industri seperti disebutkan sebelumnya sekitar 10 – 13 kWh/kg (Smorogin dan Karyagin, 2007), serta sudah sebanding dengan konsumsi energi ozonator dengan umpan oksigen di industri Jepang sekitar 8 kWh/kg (Magara *et al.*, 1995).



**Gambar 4.8.** Grafik perbandingan produksi ozon per satuan energi ozonator pendek dan panjang pada variasi jenis dan laju alir umpan

Sekali lagi, sangat disarankan untuk penyempurnaan ozonator hasil rancangan yang sudah hampir setara dengan ozonator komersial (industri) di Eropa (Rusia) dan Jepang, maka perbaikan-perbaikan konstruksi dari purwarupa ozonator hasil rancangan ini perlu dilakukan lebih seksama lagi. Kami berpendapat, sangat mungkin sekali bahwa ozonator hasil rancangan ini dapat menyamai atau bahkan lebih baik daripada ozonator-ozonator dengan skala yang lebih besar.

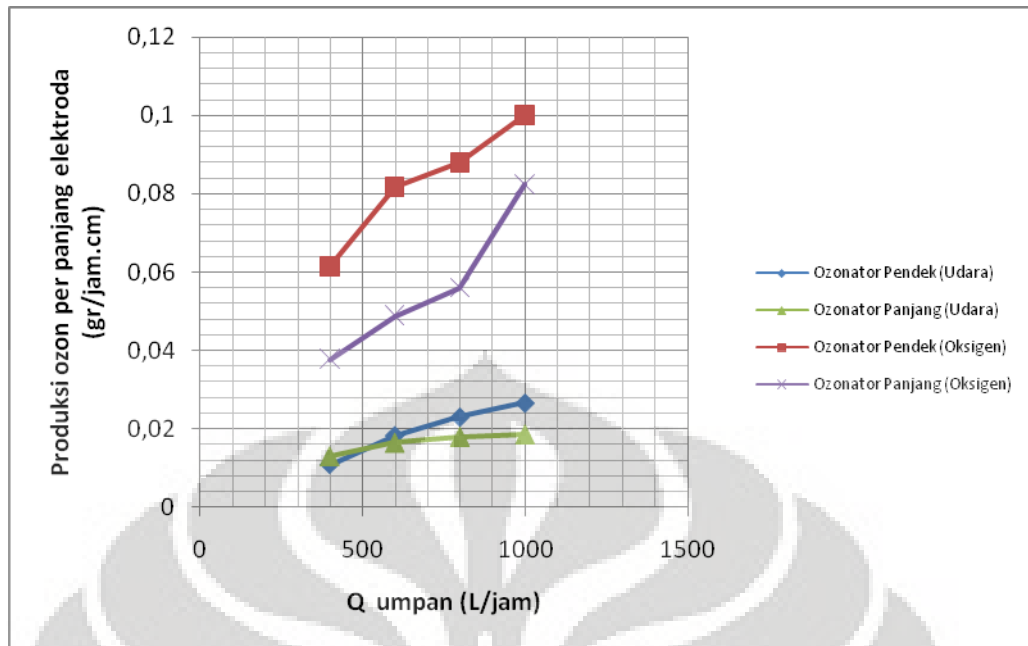
#### 4.4.2. Produktivitas Ozonator Ditinjau dari Segi Kerapatan Panjang Elektroda

Diketahui panjang untuk masing-masing elektroda yang mengalami *discharge* tegangan tinggi adalah:

- Ozonator pendek = 11,5 cm
- Ozonator panjang = 22 cm

Sehingga dengan kondisi demikian dapat diperoleh *yield* ozone per unit panjang elektroda (gr/jam.cm) pada data di Lampiran 3 dan 5. Lalu untuk grafik dapat dilihat pada Gambar 4.9. di bawah ini.





**Gambar 4.9.** Grafik perbandingan produksi ozon per satuan panjang elektroda pada ozonator pendek dan panjang pada variasi jenis dan laju aliran umpan

Dapat terlihat bahwa untuk penggunaan udara sebagai umpan, lebih efisien pada ozonator pendek dengan laju aliran umpan 1.000 L/jam di mana produksi ozon per satuan panjang elektroda mencapai 0,027 gr/jam.cm. Nilai ini lebih besar dibandingkan dengan kondisi optimal untuk ozonator panjang dengan 0,019 gr/jam.cm. Tentunya dengan memperhatikan konsumsi daya pada kedua ozonator yang berbeda pula, yaitu pada ozonator pendek sebesar 28,8 VA dan ozonator panjang sebesar 24,2 VA.

Sedangkan dengan penggunaan oksigen sebagai gas umpan, lebih efisien pada ozonator pendek dengan laju aliran umpan 1.000 L/jam di mana produksi ozon per panjang elektroda mencapai 0,1 gr/jam.cm. Nilai ini juga lebih besar dibandingkan dengan kondisi optimal untuk ozonator panjang dengan nilai 0,08 gr/jam.cm.

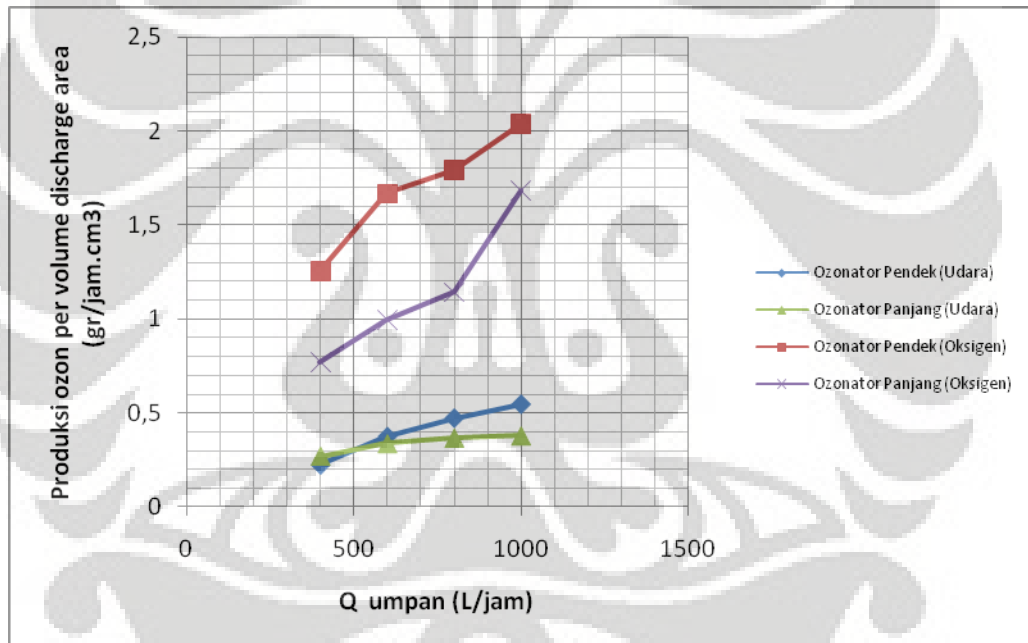
Selain adanya perbedaan daya yang digunakan sebagai masukan trafo tegangan tinggi, masih adanya kebocoran aliran udara pada ozonator hasil rancangan kemungkinan juga menjadi penyebab hasil perbandingan seperti tersebut di atas. Hal ini diharapkan dapat diperbaiki dalam penggunaan ozonator hasil rancangan untuk aplikasi penelitian di masa yang akan datang.

#### 4.4.3. Produktivitas Ozonator Ditinjau dari Segi Kerapatan Volume *Discharge Area*

Diketahui jarak *discharge gap* untuk masing-masing tabung gelas adalah sebesar 0,25 mm dan dengan diameter dalam dielektrik sebesar 6,5 mm serta diameter elektroda sebesar 6 mm. Kemudian untuk panjang masing-masing elektroda yang diketahui sebelumnya, diperoleh volume *discharge area* sebesar:

- Ozonator pendek =  $0,56 \text{ cm}^3$
- Ozonator panjang =  $1,08 \text{ cm}^3$

Sehingga dengan kondisi demikian dapat diperoleh *yield* ozon per unit volume *discharge area* ( $\text{gr/jam.cm}^3$ ) pada data di Lampiran 3 dan 5. Lalu untuk grafik dapat dilihat pada Gambar 4.10. di bawah ini.



**Gambar 4.10.** Grafik perbandingan produksi ozon per satuan volume *discharge area* pada ozonator pendek dan panjang pada variasi jenis dan laju alir umpan

Pada gambar grafik di atas tampak kecenderungan profil yang lebih kurang sama dengan kecenderungan profil pada Gambar 4.9. Dapat terlihat bahwa untuk penggunaan udara sebagai umpan, lebih efisien pada ozonator pendek dengan laju alir umpan 1.000 L/jam di mana produksi ozon per volume *discharge area* mencapai  $0,543 \text{ gr/jam.cm}^3$ . Nilai ini lebih besar dibandingkan dengan kondisi

optimal untuk ozonator panjang dengan besaran  $0,378 \text{ gr/jam.cm}^3$ . Tentunya dengan memperhatikan konsumsi daya pada kedua ozonator yang berbeda pula, yaitu pada ozonator pendek sebesar 28,8 VA dan ozonator panjang sebesar 24,2 VA.

Sedangkan dengan penggunaan oksigen sebagai gas umpan, lebih efisien pada ozonator pendek dengan laju alir umpan  $1.000 \text{ L/jam}$  di mana produksi ozon per volume *discharge area* mencapai  $2,038 \text{ gr/jam.cm}^3$ . Nilai ini juga lebih besar dibandingkan dengan kondisi optimal untuk ozonator panjang dengan nilai  $1,68 \text{ gr/jam.cm}^3$ .

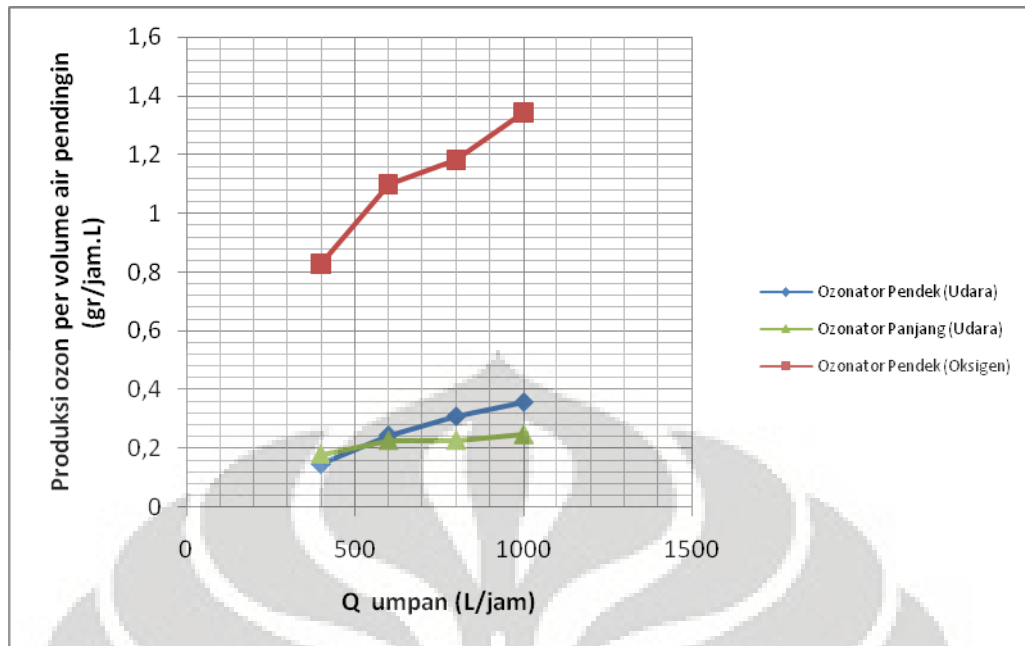
Sama seperti analisis sebelumnya, selain adanya perbedaan daya yang digunakan sebagai masukan trafo tegangan tinggi, masih adanya kebocoran aliran udara pada ozonator hasil rancangan kemungkinan menjadi penyebab hasil perbandingan seperti tersebut di atas.

#### **4.4.4. Produktivitas Ozonator Ditinjau dari Segi Kerapatan Volume Pendingin**

Untuk mengetahui produksi ozon dari ozonator per volume pendingin, perlu dihitung pula volume ruang yang terisi oleh fluida pendingin. Diketahui jarak dari satu *baffle* pembatas bagian atas dan bawah untuk ozonator pendek adalah sepanjang 15,5 cm, sedangkan untuk ozonator panjang sepanjang 28,7 cm. Kemudian, tiap *baffle* penyekat berdiameter 9 cm dan tebal 3 mm. Ozonator pendek memiliki tiga buah *baffle* sedangkan ozonator panjang memiliki enam buah *baffle*. Kemudian terdapat pula pipa-pipa elektroda massa yang berdiameter 1,2 mm. Dengan demikian dapat diperoleh volume pendingin untuk:

- Ozonator pendek =  $855,77 \text{ cm}^3 = 0,856 \text{ L}$
- Ozonator panjang =  $1.576,06 \text{ cm}^3 = 1,576 \text{ L}$

Sehingga dengan kondisi demikian dapat diperoleh *yield* ozon per unit volume pendingin ( $\text{gr/jam.L}$ ) pada data di Lampiran 3 dan 6. Lalu untuk grafik dapat dilihat pada Gambar 4.11. di bawah ini.



**Gambar 4.11.** Grafik perbandingan produksi ozon per satuan volume air pendingin pada ozonator pendek dan panjang pada variasi jenis dan laju alir umpan

Pada gambar grafik di atas tampak kecenderungan profil yang lebih kurang sama dengan kecenderungan profil pada Gambar 4.9. dan Gambar 4.10. seperti di atas. Dapat terlihat bahwa untuk penggunaan udara sebagai umpan, lebih efisien pada ozonator pendek dengan laju alir umpan 1.000 L/jam di mana produksi ozon per satuan volume air pendingin mencapai 0,358 gr/jam.L. Nilai ini lebih besar dibandingkan dengan kondisi optimal untuk ozonator panjang dengan besaran 0,246 gr/jam.L. Tentunya dengan memperhatikan konsumsi daya pada kedua ozonator yang berbeda pula, yaitu pada ozonator pendek sebesar 28,8 VA dan ozonator panjang sebesar 24,2 VA.

Sedangkan dengan penggunaan oksigen sebagai gas umpan, pada ozonator pendek diperoleh efisiensi terbaik dengan laju alir umpan 1.000 L/jam di mana produksi ozon per satuan volume air pendingin mencapai 1,344 gr/jam.L. Untuk ozonator panjang, dapat kita bandingkan dengan memisalkan data yang diperoleh untuk ozonator panjang yang menggunakan pendingin udara pada kondisi optimal, yaitu pada laju alir umpan 1.000 L/jam (Lampiran 5) sama dengan jika menggunakan pendingin air. Maka akan diperoleh nilai efisiensi 1,152 gr/jam.L,

yang masih sedikit lebih kecil jika dibandingkan dengan kondisi optimal untuk ozonator pendek seperti yang telah disebutkan di atas.

Sama seperti analisis sebelumnya, selain adanya perbedaan daya yang digunakan sebagai masukan trafo tegangan tinggi, masih adanya kebocoran aliran udara pada ozonator hasil rancangan kemungkinan menjadi penyebab hasil perbandingan seperti tersebut di atas.





## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Ozonator hasil rancang memiliki produktivitas  $\pm 5$  kali lebih besar jika dibandingkan dengan ozonator komersial merek *Resun* tipe RSO 9805, dengan menggunakan metode uji titrasi iodometri.
2. Sumber tegangan tinggi yang digunakan adalah HV-T atau NST (*neon sign transformer*) yang lebih handal dalam penggunaan. Transformator tegangan tinggi menggunakan masukan tegangan yang bersumber dari listrik PLN
3. Ozonator hasil rancangan merupakan jenis pipa koaksial di mana tiap-tiap pipa koaksial terdiri atas elektroda tegangan tinggi (batang *stainless steel* ANSI 304), dielektrik gelas, dan elektroda massa (pipa *stainless steel*). Ozonator juga berlaku seperti alat penukar kalor *shell and tube*, sehingga fungsi pendinginan ozonator dapat beroperasi dengan optimal.
4. Ozonator yang dirancang-bangun dapat menggunakan umpan udara atau oksigen, serta dapat menggunakan pendingin air maupun udara.
5. Ozonator pipa koaksial hasil rancang bangun memiliki produktivitas ozon paling optimal, yaitu pada laju alir umpan 1.000 L/jam, dengan nilai produktivitas sebagai berikut:

**Tabel 5.1.** Hasil uji produktivitas ozon paling optimal pada ozonator hasil rancang bangun

Keterangan	Ozonator Pendek	Ozonator Panjang
Prod. (Umpan Udara)	0,306 gr/jam	0,408 gr/jam
Prod. (Umpan Oksigen)	1,150 gr/jam	1,815 gr/jam
Konsumsi Daya	28,8 VA	24,2 VA
Tegangan Elektroda	10.909,09 V	7.500 V

6. Nilai produksi ozon per satuan energi pada ozonator hasil rancang bangun ini sudah hampir mendekati dan bahkan menyamai nilai konsumsi energi yang dimiliki ozonator industri seperti tampak pada tabel berikut:

**Tabel 5.2.** Perbandingan konsumsi energi paling optimal pada ozonator hasil rancang bangun dengan ozonator industri

Jenis Umpan	Ozonator Panjang	Ozonator Industri di Rusia <sup>1</sup>	Ozonator Industri di Jepang <sup>2</sup>
Udara	24,09 kWh/kg	10 – 13 kWh/kg	15 kWh/kg
Oksigen	8 kWh/kg	10 – 13 kWh/kg	8 kWh/kg

Sumber: <sup>1</sup> Smorogin dan Karyagin, 2007

<sup>2</sup> Magara *et al.*, 1995

7. Produksi ozon pada ozonator dipengaruhi oleh:

- konsumsi daya
- laju alir umpan
- jenis gas umpan
- ukuran atau geometri ozonator

## 5.2. Saran

Saran terkait dengan hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan perbaikan pada ozonator hasil rancang bangun, yang meliputi: pencegahan kebocoran aliran gas umpan, kebocoran lompatan listrik, kualitas udara masuk, tegangan masukan trafo, serta kabel *input* tegangan tinggi ke elektroda ozonator.
2. Pengukuran produktivitas ozon pada ozonator hasil rancangan sebaiknya juga menggunakan ozonmeter untuk mengonfirmasi hasil pengukuran dengan metode uji iodometri serta agar diperoleh hasil yang lebih akurat.

## DAFTAR REFERENSI

- Bellamy, William D., et al. (1991). Engineering Aspects. In Bruno Langlais, David A. Reckhow, dan Deborah R. Brink (Ed.). *Ozone in Water Treatment: Application and Engineering*. Boca Raton: Lewis Publishers.
- Cheremisinoff, Nicholas P. (2002). *Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies*. Boston: Butterworth-Heinemann.
- de la Coux, H. (1904). *l'Ozone et ses Applications Industrielles*. Paris: Vve. Ch. Dunod.
- Foller, Peter C. (1982). Status of Research on Ozone Generation by Electrolysis. In R.G. Rice dan A. Netzer (Ed.). *Handbook of Ozone Technology and Applications* (vol. 1). Michigan: Ann Arbor Science Publishers.
- Keller, Reiner. (1984). *Applied Geography and Development*.
- Kogelschatz, U. (1988). Advanced Ozone Generation. In S. Stucki (Ed.). *Process Technologies for Water Treatment*. New York: Plenum Publishers.
- Magara, Y., Itoh, M., dan Morioka, T. (1995). Application of Ozone to Water Treatment and Power Consumption of Ozone Generating Systems. *Progress in Nuclear Energy*, 29, 175 – 182.
- Mailfert, H. (1894). Sur la Solubilité de l'Ozone. *Comptes Rendus*, 119, 951.
- Manley, T.C. dan Niegowski, S.J. (1967). Ozone. In *Encyclopedia of Chemical Technology* (2nd ed.) (vol. 14, pp. 410 – 432). New York: Wiley.
- McNesby, J.R. dan Okabe, H. (1964). Vacuum Ultraviolet Photochemistry. In *Advances in Photochemistry* (vol. III, pp. 157). New York: Interscience Publishers.
- Mustafa, M.G. (1990). Biochemical Basis of Ozone Toxicity. *Free Radical Biology and Medicine*, 9, 245 – 265.
- Myers, Anthony G., et al. *Ozone and Water Treatment*. 2 Mei 2008. <http://www.ozoneapplications.com>
- Oehlschlaeger, H.F. (1978). Reactions of Ozone with Organic Compounds. In R.G. Rice dan J.A. Cotruvo (Ed.). *Ozone/Chlorine Dioxide Oxidation Products of Organic Material*. Cleveland: Ozone Press International.

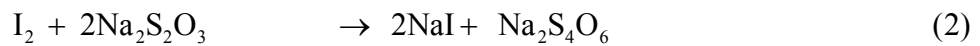
- Ozone Solutions. *Ozone Production in Nature*. 3 Maret 2009.  
[http://www.ozonesolutions.com/ozone\\_production\\_in\\_nature.html](http://www.ozonesolutions.com/ozone_production_in_nature.html)
- Peleg, M. (1976). Review paper: The Chemistry of Ozone in The Treatment of Water. *Water Research*, 10, 361 – 365.
- Rice, R.G. (1986). Application of Ozone in Water and Waste Water Treatment. In R.G. Rice, dan M.J. Browning (Ed.). *Analytical Aspects of Ozone Treatment of Water and Waste Water*. Syracuse: The Institute.
- Rice, R.G. (1999). Ozone in The United States of America-State of The Art. *Ozone. Sci.Eng.*, 21(2), 99 – 118.
- Rice, R.G. dan Browning, M.E. (1981). *Ozone Treatment of Industrial Waste Water*. Pork Ridyl.
- Rice, R.G., et al. (1981). Uses of Ozone in Drinking Water Treatment. *Journal of the American Water Works Association*, 73(1), 44 – 57.
- Salomon, Clement. (1998). *Ozone Disinfection*. West Virginia: National Small House Clearinghouse.
- Smorodin, A.I. dan Karyagin, I.V. (2007). State of The Art and Development Prospects for Ozonator Design. *Khimicheskoe i Neftgazovoe Mashinostroenie*, 8, 3 – 8.
- Staubach, Ernst J. (1990). Concentric Tube Ozonator. Patented in U.S. on the Mar. 13, 1990, no. 4908189.
- Stepanyants, B.G., Vereshchagin, I.P., dan Sokolova M.V. (1993) Status and Perspectives in Ozonator Design Development. *Khimicheskoe i Neftyanoe Mashinostroenie*, 4, 1 – 2.
- Suslow, T.V. (2004). *Ozone Applicatios for Postharvest Disinfection of Edible Horticultural Crops*. ANR Publication 8133.
- Volman, D.H. (1963). Photochemical Gas Phase Reactions. In *Advances in Photochemistry* (vol. I, pp. 43). New York: Interscience Publishers.
- von Siemens, W. (1857). Über die electrostatische Induktion und die Verzögerung des Stroms in Flaschendrähnen. *Poggendorff's Ann.*, 102, 120.
- Vosmaer, A. (1916). *Ozone: Its Manufacture, Properties, and Uses*. New York: D. Van Nostrand Co.

## Pengukuran Kadar Ozon dengan Metode Iodometri

Reaksi ozon dengan KI :



Pembebasan iodium menggunakan metode titrasi dengan  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ :



Sehingga dari reaksi di atas diperoleh hubungan, yaitu  $1 \text{ mol O}_3 \approx 2 \text{ mol Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

Prosedur perhitungan :

$$[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}] = 0,0025 \text{ M}$$

- $\text{mmol Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = (\text{Vol. Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ hulu} + \text{Vol. Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ hilir}) \times 0,0025 \text{ M}$
- $\text{mol Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = \frac{(\text{Vol. Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ hulu} + \text{Vol. Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ hilir}) \times 0,0025}{1000}$
- $\text{mol O}_3 = \frac{1}{2} \times \text{mol Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
- $\text{gram O}_3 = \text{mol} \times 48$
- $\text{produktivitas ozon} = \frac{\text{gr O}_3}{t} \times 3.600$

di mana:

- $t$  = lamanya waktu yang diperlukan oleh larutan KI untuk berubah warna dari bening menjadi kuning kecokelatan (detik)
- produktivitas ozon memiliki satuan gr/jam

### Contoh Perhitungan Produktivitas Ozon

Mengambil contoh data seperti dapat dilihat pada Lampiran 2, yaitu pada:

- $Q \text{ umpan} = 400 \text{ L/jam}$
- $t = 210 \text{ detik}$
- $V = 100 \text{ V}$
- $\text{Vol. Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ hulu} = 100,4 \text{ mL}$
- $I = 0,12 \text{ A}$
- $\text{Vol. Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ hilir} = 3,7 \text{ mL}$



### 1. Produktivitas Ozon

- mol  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$   $= \frac{(\text{Vol. Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ hulu} + \text{Vol. Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ hilir}) \times 0,0025}{1000}$   
 $= \frac{(100,4 + 3,7) \times 0,0025}{1000} = 2,6025 \times 10^{-4}$
- mol  $\text{O}_3$   $= \frac{1}{2} \times \text{mol Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = \frac{1}{2} \times 2,6025 \times 10^{-4}$   
 $= 1,30125 \times 10^{-4}$
- gram  $\text{O}_3$   $= \text{mol} \times 48 = 1,30125 \times 10^{-4} \times 48$   
 $= 0,006246$
- produktivitas ozon  $= \frac{\text{gr O}_3}{\text{t}} \times 3.600 = \frac{0,006246}{210} \times 3.600$   
 $= 0,107 \text{ gr/jam}$

### 2. Produktivitas Ozonator Ditinjau dari Segi Konsumsi Daya

Dengan nilai produktivitas ozon yang telah kita ketahui sebelumnya dalam satuan gr/jam, maka kita dapat menghitung nilai produksi dari segi konsumsi daya, yaitu dengan satuan gr/kWh:

$$\frac{\text{gr}}{\text{kWh}} = \frac{\text{gr}}{\text{jam}} \times \frac{1.000}{\text{VA}} \times \frac{1}{0,6} = 0,107 \times \frac{1.000}{100 \times 0,12} \times \frac{10}{6} = 14,87 \text{ gr/kWh}$$

Sedangkan untuk mengetahui nilai energi spesifik atau konsumsi daya per kg ozon yang dihasilkan (kWh/kg) dapat dihitung sebagai berikut:

$$\frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = \text{VA} \div \frac{\text{gr}}{\text{jam}} \times 0,6 = \frac{12}{0,107} \times 0,6 = 67,2 \text{ kWh/kg}$$

### 3. Tegangan Elektroda

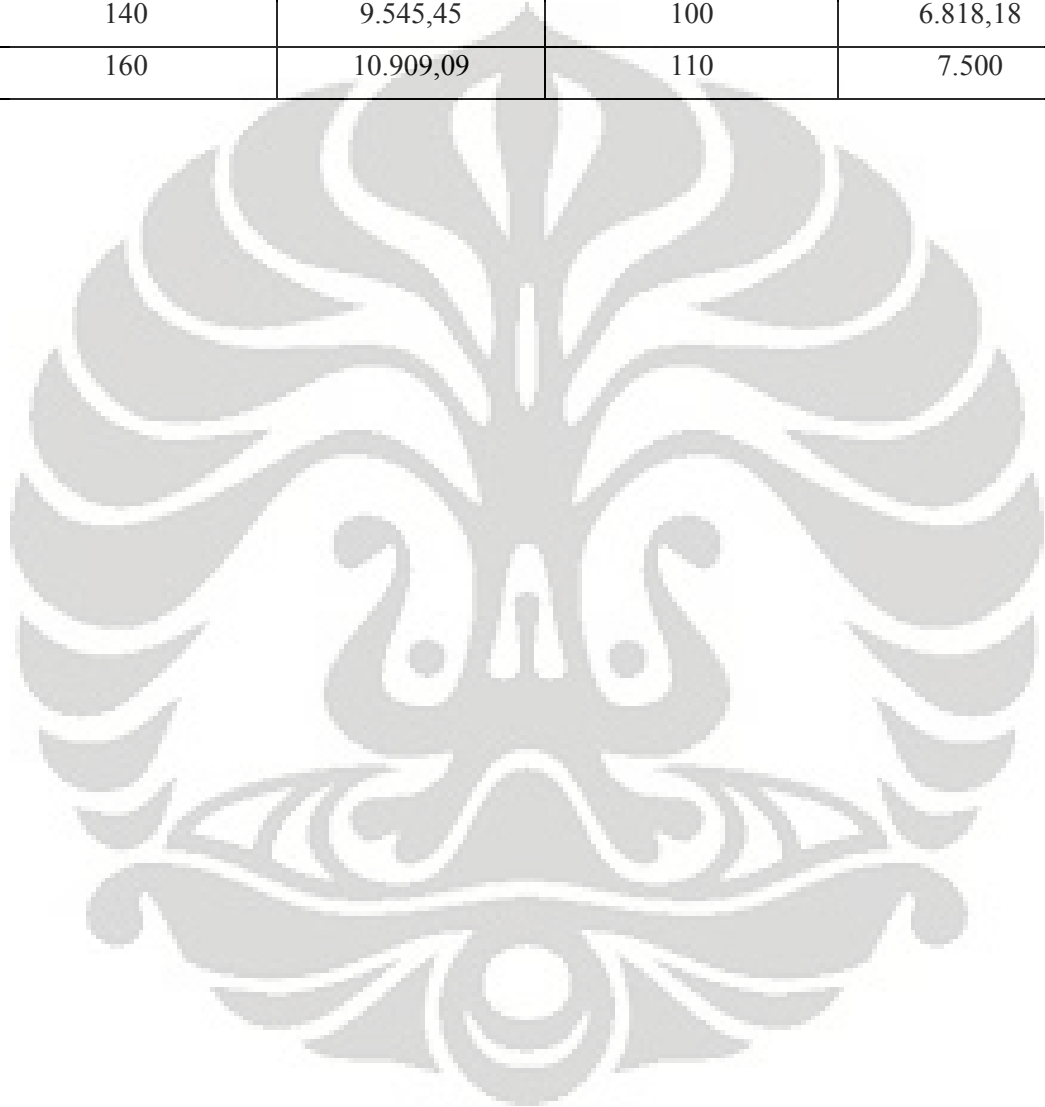
Dalam contoh ini, digunakan perhitungan berdasarkan transformator yang digunakan (masukan 220 V dan keluaran 15.000 V), di mana menggunakan perbandingan biasa sebagai berikut:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{220}{15.000} \Rightarrow \frac{110}{V_s} = \frac{220}{15.000} \Rightarrow V_s = 7.500 \text{ volt}$$

Dengan menggunakan perhitungan yang sama, dapat diperoleh untuk variasi tegangan masukan transformator lainnya pada ozonator pendek dan panjang sebagai berikut:

**Tabel 1.** Tegangan elektroda untuk ozonator pendek dan panjang untuk variasi tegangan masukan transformator

<b>Ozonator Pendek</b>		<b>Ozonator Panjang</b>	
<b>V Masukan Trafo (volt)</b>	<b>V Elektroda (volt)</b>	<b>V Masukan Trafo (volt)</b>	<b>V Elektroda (volt)</b>
100	6.818,18	80	5.454,55
120	8.181,82	90	6.136,36
140	9.545,45	100	6.818,18
160	10.909,09	110	7.500



### 1. Variasi Konsumsi Energi

Q = 400 L/jam

V (volt)	I (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir	Prod ozon (gr/jam)	P (VA)	Kons. energi (kWh/kg)	Produksi per energi (gr/kWh)	Produksi per panjang (gr/jam.cm)	Produksi per volume (gr/jam.cm <sup>3</sup> )	Produksi per vol.pendingin (gr/jam.L)	Suhu gas keluaran (°C)
100	0,12	210	100,4	3,7	0,10707027	12	67,24555725	14,87087089	0,009310458	0,189671099	0,125115733	29,5
120	0,14	205	103,5	3,7	0,112947959	16,8	89,24464021	11,2051547	0,009821562	0,200083212	0,131984039	29,5
140	0,16	200,47	109,1	3,7	0,121533827	22,4	110,5864953	9,042695469	0,010568159	0,215292765	0,142016955	30
160	0,18	195	108,7	3,6	0,124389181	28,8	138,9188337	7,198447997	0,010816451	0,220350921	0,145353547	30,5

Q = 600 L/jam

V (volt)	I (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir	Prod ozon (gr/jam)	P (VA)	Kons. energi (kWh/kg)	Produksi per energi (gr/kWh)	Produksi per panjang (gr/jam.cm)	Produksi per volume (gr/jam.cm <sup>3</sup> )	Produksi per vol.pendingin (gr/jam.L)	Suhu gas keluaran (°C)
100	0,12	200,11	122,4	4	0,136431843	12	52,77360348	18,94886712	0,011863639	0,24168406	0,159425861	29,5
120	0,14	194,29	165,2	4,1	0,188210555	16,8	53,55703891	18,67168201	0,016366135	0,333408168	0,219931278	29,5
140	0,16	190,41	177,3	4,1	0,205771392	22,4	65,31520198	15,31037139	0,017893164	0,364516554	0,240451792	30,5
160	0,18	178,56	169,1	4,2	0,209629235	28,8	82,43125043	12,13132149	0,018228629	0,371350584	0,244959831	30,5

(lanjutan)

Q = 800 L/jam

V (volt)	I (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir	Prod ozon (gr/jam)	P (VA)	Kons. energi (kWh/kg)	Produksi per energi (gr/kWh)	Produksi per panjang (gr/jam.cm)	Produksi per volume (gr/jam.cm <sup>3</sup> )	Produksi per vol.pendingin (gr/jam.L)	Suhu gas keluaran (°C)
100	0,12	184,63	132,5	4,7	0,160505274	12	44,85833914	22,29239912	0,01395698	0,284329268	0,187556591	29,5
120	0,14	180,75	157,8	4,7	0,194183589	16,8	51,90963892	19,26424496	0,016885529	0,343989182	0,226910999	29,5
140	0,16	176,78	195,1	4,8	0,24424019	22,4	55,02779863	18,17263319	0,021238277	0,432662634	0,285404064	30,5
160	0,18	172,66	206,6	5	0,264704541	28,8	65,28033081	15,31854982	0,023017786	0,468914489	0,309317446	30,5

## 2. Variasi Laju Alir Gas Umpan

### Udara

Q (L/jam)	V (volt)	I (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir	Prod ozon (gr/jam)	P (VA)	Kons. energi (kWh/kg)	Produksi per energi (gr/kWh)	Produksi per panjang (gr/jam.cm)	Produksi per volume (gr/jam.cm <sup>3</sup> )	Produksi per vol. pendingin (gr/jam.L)	Suhu gas keluaran (°C)
400	160	0,18	195	108,7	3,6	0,124389181	28,8	138,9188337	7,198447997	0,010816451	0,220350921	0,145353547	30,5
600	160	0,18	178,56	169,1	4,2	0,209629235	28,8	82,43125043	12,13132149	0,018228629	0,371350584	0,244959831	30,5
800	160	0,18	172,66	206,6	5	0,264704541	28,8	65,28033081	15,31854982	0,023017786	0,468914489	0,309317446	30,5
1000	160	0,18	159,88	221,2	5,5	0,306263221	28,8	56,42205407	17,72356601	0,026631584	0,542534183	0,357880363	30,5

### Oksigen

Q (L/jam)	V (volt)	I (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir	Prod ozon (gr/jam)	P (VA)	Kons. energi (kWh/kg)	Produksi per energi (gr/kWh)	Produksi per panjang (gr/jam.cm)	Produksi per volume (gr/jam.cm <sup>3</sup> )	Produksi per vol. pendingin (gr/jam.L)	Suhu gas keluaran (°C)
400	160	0,18	121,19	394,4	2,2	0,706843696	28,8	24,44670596	40,90530649	0,061464669	1,25214796	0,825974069	30,5
600	160	0,18	111,78	482	4,7	0,940447824	28,8	18,37422509	54,42406387	0,081778072	1,665969195	1,098949485	30,5
800	160	0,18	66,5	309,5	1,5	1,010127532	28,8	17,10675083	58,45645442	0,087837177	1,78940427	1,180372907	30,5
1000	160	0,18	56,9	300	3	1,150185337	28,8	15,0236657	66,56165147	0,100016116	2,03751159	1,344035844	30,5

Sekaligus membandingkan umpan yang berbeda, yaitu udara dengan oksigen.



### 1. Variasi Konsumsi Energi

Q = 400 L/jam

V (volt)	I (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir	Prod ozon (gr/jam)	P (VA)	Kons. energi (kWh/kg)	Produksi per energi (gr/kWh)	Produksi per panjang (gr/jam.cm)	Produksi per volume (gr/jam.cm <sup>3</sup> )	Suhu gas keluaran (°C)
80	0,16	296,88	308,7	1,8	0,225900987	12,8	33,99719545	29,41419098	0,010268227	0,209182596	29,5
90	0,18	293,1	311	2,2	0,230804036	16,2	42,11364823	23,74527124	0,010491093	0,213722783	29,5
100	0,2	281,72	327,8	1,9	0,252777685	20	47,47254489	21,06480709	0,011489895	0,234070214	30,5
110	0,22	277,09	367,3	2	0,287869677	24,2	50,43949114	19,8257353	0,013084985	0,266565132	30,5

Q = 600 L/jam

V (volt)	I (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir	Prod ozon (gr/jam)	P (VA)	Kons. energi (kWh/kg)	Produksi per energi (gr/kWh)	Produksi per panjang (gr/jam.cm)	Produksi per volume (gr/jam.cm <sup>3</sup> )	Suhu gas keluaran (°C)
80	0,16	191,53	251	2,3	0,285651064	12,8	26,88594922	37,19414895	0,012984139	0,264510713	30
90	0,18	188,5	256,2	2	0,29585734	16,2	32,85367198	30,43799794	0,013448061	0,273961647	30
100	0,2	177,5	258,7	2,6	0,317964414	20	37,74007239	26,49703449	0,014452928	0,29443263	30,5
110	0,22	164,38	273,1	2,6	0,362264064	24,2	40,08125963	24,9493157	0,016466548	0,335453769	30,5

Q = 800 L/jam

V (volt)	I (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir	Prod ozon (gr/jam)	P (VA)	Kons. energi (kWh/kg)	Produksi per energi (gr/kWh)	Produksi per panjang (gr/jam.cm)	Produksi per volume (gr/jam.cm <sup>3</sup> )	Suhu gas keluaran (°C)
80	0,16	188,34	275	3	0,318815696	12,8	24,08915274	41,51246043	0,014491623	0,29522091	30,5
90	0,18	179,18	280,4	3	0,341623532	16,2	28,45237254	35,14645391	0,015528342	0,316340793	30,5
100	0,2	168,49	285,8	2,8	0,369964166	20	32,43557377	30,83034717	0,016816553	0,342584005	30,5
110	0,22	160,59	290,6	3	0,394888983	24,2	36,76982801	27,19621098	0,017949499	0,365664196	31,5

## 2. Variasi Laju Alir Gas Umpan

### Udara

Q (L/jam)	V (volt)	I (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir	Prod ozon (gr/jam)	P (VA)	Kons. energi (kWh/kg)	Produksi per energi (gr/kWh)	Produksi per panjang (gr/jam.cm)	Produksi per volume (gr/jam.cm <sup>3</sup> )	Suhu gas keluaran (°C)
400	110	0,22	277,09	367,3	2	0,287869677	24,2	50,43949114	19,8257353	0,013084985	0,266565132	30,5
600	110	0,22	164,38	273,1	2,6	0,362264064	24,2	40,08125963	24,9493157	0,016466548	0,335453769	30,5
800	110	0,22	160,59	290,6	3	0,394888983	24,2	36,76982801	27,19621098	0,017949499	0,365664196	31,5
1000	110	0,22	157,92	295	3,3	0,407993818	24,2	35,58877452	28,09874781	0,018545174	0,377799173	31,5

### Oksigen

Q (L/jam)	V (volt)	I (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir	Prod ozon (gr/jam)	P (VA)	Kons. energi (kWh/kg)	Produksi per energi (gr/kWh)	Produksi per panjang (gr/jam.cm)	Produksi per volume (gr/jam.cm <sup>3</sup> )	Suhu gas keluaran (°C)
400	110	0,22	159,52	610	2	0,828654982	24,2	17,52237096	57,06990237	0,037666136	0,767328213	31
600	110	0,22	130,47	647,1	1,9	1,074413605	24,2	13,5143486	73,99542737	0,048836982	0,994898829	32
800	110	0,22	106,57	604,8	2,2	1,230243814	24,2	11,80253851	84,72753543	0,055920173	1,139196418	32
1000	110	0,22	37,37	312,3	1,7	1,814863704	24,2	8,000600801	124,9906132	0,082493805	1,68054999	32

Sekaligus membandingkan umpan yang berbeda, yaitu udara dengan oksigen.

## Pendingin Udara I

Kompresor-pendingin ozonator-silica gel-umpan ozonator

Q (L/jam)	V (volt)	I (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir	Prod ozon (gr/jam)	P (VA)	Kons. energi (kWh/kg)	Produksi per energi (gr/kWh)	Produksi per panjang (gr/jam.cm)	Produksi per volume (gr/jam.cm <sup>3</sup> )	Suhu gas keluaran (°C)
400	110	0,22	277,09	367,3	2	0,287869677	24,2	50,43949114	19,8257353	0,013084985	0,266565132	30,5
600	110	0,22	164,38	273,1	2,6	0,362264064	24,2	40,08125963	24,9493157	0,016466548	0,335453769	30,5
800	110	0,22	160,59	290,6	3	0,394888983	24,2	36,76982801	27,19621098	0,017949499	0,365664196	31,5
1000	110	0,22	157,92	295	3,3	0,407993818	24,2	35,58877452	28,09874781	0,018545174	0,377799173	31,5

## Pendingin Udara II

Kompresor-silica gel-pendingin ozonator-umpan ozonator

Q (L/jam)	V (volt)	I (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir	Prod ozon (gr/jam)	P (VA)	Kons. energi (kWh/kg)	Produksi per energi (gr/kWh)	Produksi per panjang (gr/jam.cm)	Produksi per volume (gr/jam.cm <sup>3</sup> )	Suhu gas keluaran (°C)
400	110	0,22	263,13	350	2	0,288941393	24,2	50,2524053	19,5240275	0,012885858	0,262508547	30,5
600	110	0,22	154,96	260	2	0,365190228	24,2	39,76009999	24,59782171	0,016234562	0,330727788	30,5
800	110	0,22	146,73	268,4	2	0,398038641	24,2	36,47887042	24,6408976	0,016262992	0,331306961	30,5
1000	110	0,22	136,75	257,8	2	0,410345123	24,2	35,38484844	26,74786223	0,017653589	0,359635963	30,5

(lanjutan)

**Pendingin air**

Q (L/jam)	V (volt)	I (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir	Prod ozon (gr/jam)	P (VA)	Kons. energi (kWh/kg)	Produksi per energi (gr/kWh)	Produksi per panjang (gr/jam.cm)	Produksi per volume (gr/jam.cm <sup>3</sup> )	Produksi per vol. pendingin (gr/jam.L)	Suhu gas keluaran (°C)
400	110	0,22	275,81	360	2	0,283488879	24,2	51,21894035	19,5240275	0,012885858	0,262508547	0,179872054	30
600	110	0,22	161,77	265,5	2	0,357160371	24,2	40,65400635	24,59782171	0,016234562	0,330727788	0,22661619	30,5
800	110	0,22	152,13	250	2	0,357785833	24,2	40,5829372	24,6408976	0,016262992	0,331306961	0,227013042	30,5
1000	110	0,22	144,54	257,9	2	0,38837896	24,2	37,38616535	26,74786223	0,017653589	0,359635963	0,246424204	30,5