



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN DAN UJI KINERJA  
OZONATOR KOAKSIAL TIPE ALIRAN *TRIPLE PASS*  
UNTUK PENGOLAHAN AIR**

**TESIS**

**ARYANI ADAMI  
0806477365**

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

**Universitas Indonesia**

Rancang bangun..., Aryani Adami, FT UI, 2011.



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**RANCANG BANGUN DAN UJI KINERJA  
OZONATOR KOAKSIAL TIPE ALIRAN *TRIPLE PASS*  
UNTUK PENGOLAHAN AIR**

**TESIS**

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

**ARYANI ADAMI  
0806477365**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA  
KEKHUSUSAN PERANCANGAN PRODUK DAN REAKSI KIMIA  
DEPOK  
JANUARI 2011**

**Universitas Indonesia**

Rancang bangun..., Aryani Adami, FT UI, 2011.

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama** : Aryani Adami  
**NPM** : 0806477365  
**Tanda Tangan** :   
**Tanggal** : 7 Januari 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh:

Nama : Aryani Adami  
NPM : 0806477365  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul Tesis : Rancang-Bangun dan Uji Kinerja Ozonator Koaksial Tipe Aliran *Triple Pass* untuk Pengolahan Air

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing	: Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA	(.....)
Penguji	: Ir. Amien Rahardjo, MT	(.....)
Penguji	: Ir. Sutrasno Kartohardjono, MSc. PhD.	(.....)
Penguji	: Dr. Ir. Nelson Saksono, MT.	(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 7 Januari 2011

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena atas rahmat dan petunjuk-Nya, penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Program Studi Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan hingga penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Bapak Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA dan Ibu Ir. Eva Fathul Karamah, MT. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan tesis ini;
- (2) Ir. Mahmud Sudibandriyo, MSc., PhD., selaku pembimbing akademik penulis;
- (3) Seluruh pengajar dan civitas DTK FTUI yang telah memberikan bekal ilmu dan membantu penulis menyelesaikan tesis ini;
- (4) Keluarga penulis, mama, bapak, dan saudara-saudara penulis (Arman, Erma, Atha, K'Idun, Iman, Heni, dan Ravi) yang telah memberikan bantuan dukungan moral dan material;
- (5) Sahabatku Anik yang telah memberikan dorongan, semangat, dan nasehat kepada penulis untuk memulai dan menyelesaikan S2 ini, serta;
- (6) Sahabat seperjuangan di S2 Teknik Kimia UI angkatan 2008 & 2009, Adindas, MP4Pers, MPers, dan teman kos penulis, yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan S2 ini.

Semoga Allah SWT membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Akhir kata, semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 7 Januari 2011

Penulis

**Universitas Indonesia**

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

---

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

Nama : Aryani Adami  
NPM : 0806477365  
Program Studi : Magister Teknik Nimia  
Departemen : Teknik Kimia  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Tesis

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 dan Uji Kinerja Ozonator Koaksial Tipe Aliran *Triple Pass* untuk Pengolahan Air**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 7 Januari 2011

Yang menyatakan



(Aryani Adami)

## ABSTRAK

Nama : Aryani Adami  
Program Studi : Teknik Kimia  
Judul : Rancang Bangun dan Uji Kinerja Ozonator Koaksial Tipe Aliran *Triple Pass* untuk Pengolahan Air

Penelitian ini difokuskan pada proses pengolahan air tambak udang, yaitu proses disinfeksi dengan menggunakan teknologi ozon. Proses disinfeksi tersebut terkendala pada kebutuhan energi yang besar, biaya produksi yang mahal, dan waktu paruh ozon yang rendah. Penelitian ini akan merancang-bangun ozonator dengan biaya instalasi yang murah, konsumsi energi yang minimal, pemeliharaan yang mudah dan produktivitas ozon yang tinggi. Ozonator menggunakan metode CD (*corona discharge*), dengan pemasangan elektrode dan media dielektrik secara koaksial. Tipe aliran ozonator dalam ozonator adalah triple pass yaitu selain sebagai umpan, aliran gas juga digunakan sebagai media pendingin. Ada dua jenis ozonator yang dibuat dengan variasi besar diameter ozonator berdasarkan jumlah CD-*chamber* di dalamnya yaitu (1) ozonator kecil dengan satu CD-*chamber* dan (2) ozonator besar dengan lima CD-*chamber* yang dipasang paralel. Dengan menggunakan udara sebagai gas umpan, ozonator kecil menghasilkan ozon maksimum pada laju alir udara 600 L/jam dan tegangan elektrode 10,91 kV dengan produksi ozon sebesar 0,30 g/jam dan konsumsi energi per satuan massa ozon sebesar 0,046 kWh. Sedangkan ozonator besar menghasilkan ozon maksimum pada laju alir udara 800 L/jam, tegangan elektrode 10,91 kV dengan produksi ozon sebesar 1,59 g/jam dan konsumsi energi per satuan massa ozon sebesar 0,027 kWh. Produktivitas ozonator akan lebih baik lagi ketika menggunakan oksigen murni sebagai gas umpan.

Kata kunci : air, tambak, udang, ozon, ozonator, *triple pass*, *corona discharge*

## ABSTRACT

Name : Aryani Adami  
Study Program : Chemical Engineering  
Title : Construction and Performance Test of Triple Pass Flow  
Coaxial Ozonator for Water Treatment

The present study was focused on disinfection of shrimp pond water treatment by using ozone technology. This disinfection process is constrained to the large energy needs, expensive cost production, and the short half time. This research will design and construct the ozone generator with low production cost, low energy consumption, easy maintenance, and highly ozone production. Ozonator is using corona discharge (CD) method, with coaxial installation of electrode and dielectric media. Ozonator has a triple pass flow system where gas feed are also used as cooling medium. There are two types of ozonator were made : (1) small ozonator with one CD-chamber inside and (2) big ozonator with five parallel CD-chamber inside. By using air as a gas feed, maximum productivity small ozonator is 0,30 gram/hour with 0,046 kWh energy consumption per unit mass of ozone at air flow rate on 600 liters/hour and electrode voltage 10,91 kV. Maximum productivity of big ozonator is 1,59 grams/hour with 0,027 kWh energy consumption per unit mass of ozone at air flow rate on 800 Liters/hour and electrode voltage 10,91 kV. Ozonator productivity will be better when using pure oxygen as the feed gas.

Key words: water, pond, shrimp, ozone, ozonator, triple pass, corona discharge

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS</b> .....	ii
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	iv
<b>HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH</b> .....	v
<b>ABSTRAK</b> .....	vi
<b>ABSTRACK</b> .....	vii
<b>DAFTAR ISI</b> .....	viii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xv
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xvi
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang Masalah .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	4
1.3. Tujuan Penelitian .....	4
1.4. Batasan Masalah .....	5
1.5. Sistematika Penulisan .....	5
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>6</b>
2.1. Pencemaran Perairan Tambak Udang .....	6
2.1.1. Penyakit yang Disebabkan oleh Virus .....	8
2.1.2. Penyakit yang Disebabkan oleh Bakteri .....	8
2.1.3. Penyakit yang Disebabkan oleh Parasit .....	8
2.1.4. Penyakit yang Disebabkan oleh Jamur .....	9
2.2. Ozon .....	9

2.2.1. Sifat Fisika dan Kimia Ozon .....	10
2.2.2. Manfaat Ozon .....	11
2.2.3. Pembentukan Ozon .....	13
2.2.3.1. Secara Alamiah .....	13
2.2.3.2. Pelepasan Korona ( <i>Corona Discharge</i> ) .....	14
2.2.3.3. Elektrolisis .....	16
2.1.3.4. Radiasi Ultraviolet .....	17
2.3. Oksigen .....	18
2.4. Ozonator .....	20
2.4.1. Rancang Bangun dan Konstruksi Ozonator .....	21
2.4.2. Uji Produktivitas Ozonator .....	29
2.4.3. Konsumsi Energi Ozonator .....	30
<b>BAB 3. METODE PENELITIAN .....</b>	<b>32</b>
3.1. Rancangan Penelitian .....	32
3.2. Peralatan dan Bahan .....	33
3.2.1. Bahan Penelitian .....	33
3.2.1.1. Bahan untuk Pembuatan Ozonator .....	33
3.2.1.2. Bahan untuk Pengujian Produktivitas Ozonator .....	33
3.2.2. Peralatan Penelitian .....	34
3.2.2.1. Peralatan Pembuatan Ozonator .....	34
3.2.2.2. Peralatan Pengujian Produktivitas Ozonator .....	43
3.3. Diagram Alir Penelitian .....	43
3.4. Prosedur Penelitian .....	44
3.4.1. Perancangan dan Konstruksi Ozonator .....	44
3.4.2. Perakitan Ozonator .....	47
3.4.3. Pengujian Produktivitas Ozonator .....	51
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>53</b>
4.1. Spesifikasi Rancang Bangun .....	53

4.2. Ozonator Hasil Rancang Bangun .....	54
4.3. Data Percobaan .....	56
4.4. Pengujian Kinerja Produktivitas Ozonator .....	56
4.4.1. Pengaruh Kapasitas Daya Terhadap Produktivitas Ozonator ....	57
4.4.2. Pengaruh Laju Alir Umpan Terhadap Produktivitas Ozonator ..	59
4.4.3. Pengaruh Jumlah Rangkaian Elektode Terhadap Produktivitas Ozonator .....	61
4.4.4. Pengaruh Produktivitas Ozonator Terhadap Konsumsi Energi ...	62
4.4.5. Pengaruh Jenis Gas Umpan terhadap Produktivitas Ozonator ...	64
4.4.6. Perbandingan Produktivitas Ozonator Generasi 5 dengan Ozonator Generasi 2 dan Ozonator Generasi 4 .....	66
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>75</b>
5.1. Kesimpulan .....	75
5.2. Saran .....	75
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>77</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>83</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Hubungan interaksi tiga komponen penyebab penyakit dalam ekosistem perairan tambak udang .....	7
Gambar 2.2.	Struktur ozon .....	11
Gambar 2.3.	Skema proses ozonasi pada pengolahan air .....	12
Gambar 2.4.	Proses pembentukan ozon secara alami .....	13
Gambar 2.5.	Skema pembentukan ozon dengan metode <i>corona discharge</i> .....	15
Gambar 2.6.	Skema pembentukan ozon dengan metode elektrolisis .....	16
Gambar 2.7.	Skema pembentukan ozon dengan sinar ultraviolet .....	17
Gambar 2.8.	Skema melintang ozonator jenis lima CD- <i>chamber</i> koaksial yang dipasang paralel .....	25
Gambar 2.9.	Rangkaian arus listrik .....	30
Gambar 3.1.	Pipa akrilik sebagai selubung luar ( <i>shell</i> ) ozonator .....	35
Gambar 3.2.	Elektode tegangan tinggi dari bahan SS-304 .....	36
Gambar 3.3.	Media dielektrik .....	36
Gambar 3.4.	Elektode massa .....	37
Gambar 3.5.	Penyekat dari bahan akrilik (a) ozonator 1 tabung dan (b) ozonator 5 tabung .....	37
Gambar 3.6.	Tutup ozonator .....	38
Gambar 3.7.	<i>Nipple</i> .....	38
Gambar 3.8.	Selang dari bahan <i>silicone</i> .....	39
Gambar 3.9.	Kabel tegangan listrik (220 VAC).....	39
Gambar 3.10.	Kabel tegangan tinggi (di atas 1 kV).....	40
Gambar 3.11.	Mur dan baut .....	40
Gambar 3.12.	Pengatur tegangan ozonator, jenis <i>Slide-Transformer</i> .....	41

Gambar 3.13. Trafo tegangan tinggi, jenis NST ( <i>Neon sign transformer</i> ) .....	41
Gambar 3.14. Voltmeter .....	42
Gambar 3.15. Amperemeter AC/DC.....	42
Gambar 3.16. Diagram alir penelitian .....	44
Gambar 3.17. Skema aliran gas <i>triple pass</i> menjadi ozon dalam ozonator .....	46
Gambar 3.18. Diagram alir proses perakitan ozonator .....	50
Gambar 3.19. Skema rangkaian alat pengujian produktivitas ozonator .....	52
Gambar 4.1. Ozonator hasil rancang bangun (a) ozonator kecil, dan (b) ozonator besar.....	54
Gambar 4.2. Gambar rangkaian alat pengujian produktivitas ozonator yang terdapat pada bagian depan panel .....	55
Gambar 4.3. Gambar rangkaian alat pengujian produktivitas ozonator yang terdapat pada bagian belakang panel.....	55
Gambar 4.4. Grafik kinerja produktivitas ozonator kecil sebagai fungsi kapasitas daya .....	57
Gambar 4.5. Grafik kinerja produktivitas ozonator besar sebagai fungsi kapasitas daya .....	58
Gambar 4.6. Grafik produktivitas ozonator kecil sebagai fungsi laju alir umpan.....	60
Gambar 4.7. Grafik produktivitas ozonator besar sebagai fungsi laju alir umpan .....	60
Gambar 4.8 Grafik perbandingan produktivitas ozonator kecil dan ozonator besar pada variasi laju alir umpan .....	61
Gambar 4.9. Grafik konsumsi energi ozonator kecil sebagai fungsi produksi ozon ...	63
Gambar 4.10. Grafik konsumsi energi ozonator besar sebagai fungsi produksi ozon ..	63
Gambar 4.11. Grafik produktivitas ozonator besar sebagai fungsi laju alir gas umpan dengan variasi jenis gas umpan .....	64
Gambar 4.12. Grafik produktivitas ozonator besar dengan variasi jenis gas umpan ....	65
Gambar 4.13. Grafik perbandingan produktivitas ozonator generasi 2 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5 .....	67

Gambar 4.14.	Grafik perbandingan produktivitas ozonator pendek generasi 4 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5 pada $Q=800$ L/jam dan $V$ elektrode= $10,91$ kV serta udara kompresor sebagai gas umpan .....	69
Gambar 4.15.	Grafik perbandingan produktivitas ozonator pendek generasi 4 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5 pada $Q=800$ L/jam dan $V$ elektrode= $10,91$ kV serta oksigen murni sebagai gas umpan .....	70
Gambar 4.16.	Grafik perbandingan produktivitas ozonator pendek generasi 4 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5 pada $Q=1.000$ L/jam dan $V$ elektrode= $10,91$ kV serta udara kompresor sebagai gas umpan .....	70
Gambar 4.17.	Grafik perbandingan produktivitas ozonator pendek generasi 4 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5 pada $Q=1.000$ L/jam dan $V$ elektrode= $10,91$ kV serta oksigen murni sebagai gas umpan .....	71
Gambar 4.18.	Grafik perbandingan produktivitas ozonator panjang generasi 4 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5 pada $Q=800$ L/jam dan $V$ elektrode= $7,5$ kV dan udara kompresor sebagai gas umpan .....	71
Gambar 4.19.	Grafik perbandingan produktivitas ozonator panjang generasi 4 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5 pada $Q=800$ L/jam dan $V$ elektrode= $7,5$ kV serta oksigen murni sebagai gas umpan.....	72
Gambar 4.20.	Grafik perbandingan produktivitas ozonator panjang generasi 4 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5 pada $Q=1.000$ L/jam dan $V$ elektrode= $7,5$ kV dan udara sebagai umpan .....	72
Gambar 4.21.	Grafik perbandingan produktivitas ozonator panjang generasi 4 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5 pada $Q=1.000$	

L/jam dan V elektrode=7,5 kV dan oksigen murni sebagai gas  
umpan..... 73



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Sifat fisika ozon .....	10
Tabel 2.2.	Sifat fisik oksigen .....	18



## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Cara Perhitungan Produksi Ozon, Persentase Konversi Oksigen Menjadi Ozon, Konsumsi Daya, dan Tegangan Elektrode
- Lampiran 2. Tabel Hasil Perhitungan



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang Masalah

Air merupakan sumber kehidupan bagi makhluk hidup. Kebutuhan air bersih terus meningkat sementara persediaannya terus berkurang akibat adanya pencemaran yang disebabkan oleh aktivitas manusia. Pencemaran air yang terjadi mulai dari air laut hingga air tanah menyebabkan kualitas air menjadi turun sehingga air tidak dapat berfungsi sesuai peruntukannya. Hal ini juga terjadi pada perairan tambak di Provinsi Lampung. Pencemaran perairan tambak menyebabkan kegagalan produksi usaha budidaya udang di Provinsi Lampung sepanjang tahun 2009 yang lalu. Kondisi memprihatinkan ini merupakan interaksi beberapa faktor penyebab. Penyakit yang disebabkan oleh infeksi mikroorganisme merupakan puncak permasalahan utama. (Direktorat Kesehatan Ikan dan Lingkungan, 2003).

Ditengarai bahwa sejak tahun 2009, seluruh tambak udang di Kabupaten Lampung Selatan, Kabupaten Pesawaran, dan daerah-daerah pesisir pantai telah terserang empat jenis virus yaitu *White Spot Syndrome Virus* (WSSV), *Infectious Myo Necrotic Virus* (IMNV), *Taura Syndrome Virus* (TSV) dan *Infectious Hypodermal and Haemopoietic Necrosis Virus* (IHHNV). Virus-virus ini sebenarnya telah potensial terbawa oleh indukan udang yang diimpor (“tambak pesawaran”, 2009). Pada perairan tambak yang bersih dan sehat, virus tidak akan muncul dan mewabah. Namun akibat penurunan kualitas perairan Teluk Lampung dan pengadaan kualitas indukan benur yang tidak sehat menyebabkan produktivitas tambak udang di Provinsi Lampung semakin menurun.

Salah satu strategi penanggulangan yang masih terus dikaji adalah melalui peningkatan status kesehatan udang dan meminimalisir sumber penyakit baik secara fisikal, kemikal, biologis, maupun ekologis. Dalam penelitian ini dikembangkan wacana proses disinfeksi air tambak dengan menggunakan teknologi ozon. Penggunaan teknologi ozon untuk pengolahan air telah sangat berkembang dengan baik sejak tahun 1980-an di Eropa, Amerika Serikat, dan Jepang. Ozon merupakan oksidator kuat sehingga menjadikan ozon efektif digunakan untuk membunuh virus, bakteri, lumut, dan jamur. Bahkan ozon dapat

menginaktivasi beberapa mikroorganisme yang sulit diinaktivasi oleh disinfektan lainnya (Von Gunten, 2003). Berdasarkan hasil studi dan pengujian di lapangan, proses ozonasi menunjukkan hasil yang sangat memuaskan dalam proses inaktivasi bakteri dan virus pencemar air (Bismo, 1999). Ozon juga telah digunakan untuk mensterilkan air yang akan digunakan untuk pengembangbiakan ikan salmon di Amerika bagian barat (Summerfelt, 1997).

Ozon dengan beberapa keunggulan yang dimiliki namun pemanfaatannya masih sangat sedikit yang disebabkan oleh besarnya biaya investasi peralatan ozonator. Selain itu, ozon tidak bisa disimpan ataupun ditransportasikan secara khusus karena waktu paruh keberadaan ozon yang sangat singkat, yaitu sekitar 4 – 6 menit, yang menyebabkan ozon dengan cepat akan terdekomposisi kembali menjadi molekul oksigen. Oleh karena itu ozon harus diproduksi *in situ* yaitu dekat dengan instalasi pemanfaatannya (Bismo, 1999).

Beberapa penelitian telah dikembangkan di lingkungan Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia untuk mendapatkan ozonator dengan biaya yang ekonomis dan produksi ozon yang optimal. Hingga saat ini telah berhasil dirancang-bangun 4 (empat) generasi ozonator. Ozonator generasi 1 (satu) merupakan ozonator elektrode koaksial yang dirancang untuk pengendalian senyawa fenolik. Ozonator generasi 2 (dua) dirancang-bangun oleh Rini Ramadhani Fitria, mahasiswa S1 Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia. Ozonator ini menggunakan tipe aliran *single pass* yang dirancang menyusun elektrode dan media dielektrik secara koaksial. Dari hasil pengujian produktivitas ozon, diperoleh kondisi optimum ozonator tersebut adalah pada laju alir gas umpan 400 L/jam (Bismo, 1998). Ozonator generasi 3 (tiga) merupakan hasil rancang bangun Prof.Dr.Ir. Setijo Bismo, DEA. Ozonator dirancang untuk dapat menggunakan dua macam konfigurasi elektrode koaksial yaitu elektrode *single pass* dan elektrode *double pass*. Dari hasil pengujian, diperoleh kesimpulan bahwa produksi ozon dengan menggunakan konfigurasi elektrode jenis *double pass* selalu memberikan hasil yang lebih besar, hampir sekitar 2 kali, bila dibandingkan dengan menggunakan konfigurasi elektrode *single pass* (Bismo, 2004). Pada tahun 2009, Adi Lukmanto, mahasiswa S1 Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, membuat ozonator generasi 4 (empat) yaitu ozonator *shell*

*and tube* aliran *single pass*. Ozonator terdiri atas lima rangkaian pipa elektrode koaksial yang dipasang paralel. Dari hasil pengujian produktivitas ozon yang dihasilkan, diperoleh kondisi optimum ozonator tersebut adalah pada laju alir gas umpan 1.000 L/jam (Lukmanto, 2009).

Dalam penelitian ini akan dilakukan rancang-bangun dan uji kinerja ozonator generasi kelima dengan konfigurasi baru yaitu bentuk tipe aliran *triple pass*. Akan dibuat 2 ozonator dengan variasi besar diameter ozonator berdasarkan jumlah CD-chamber di dalamnya yaitu (1) ozonator kecil dengan satu CD-chamber dan (2) ozonator besar dengan lima CD-chamber. Dari kedua ozonator tersebut, akan dibandingkan produktivitas ozon yang dihasilkan pada berbagai laju alir gas umpan, jenis gas umpan, dan besar energi yang dikonsumsi, hingga diperoleh kondisi operasi yang menghasilkan produksi ozon maksimal dan faktor-faktor yang mempengaruhi produktivitas kedua ozonator tersebut. Ozonator yang dirancang-bangun kemudian dibandingkan dengan beberapa ozonator generasi terdahulu. Perbandingan dibatasi hanya kepada dua generasi ozonator terdahulu yaitu ozonator generasi 2 (dua) dan ozonator generasi 4 (empat). Diharapkan dengan dilakukannya penelitian ini akan diperoleh ozonator dengan biaya instalasi yang lebih murah, konsumsi energi yang lebih minimum, lebih mudah pemeliharannya dan produksi ozon yang dihasilkan lebih maksimal. Prototipe ozonator hasil rancangan ini selanjutnya akan dirangkaikan dalam suatu sistem pengolahan air tambak udang non-kimia secara intensif yang akan diujicoba pada tahun kedua penelitian ini.

Penelitian ini akan dilakukan selama 2 (dua) tahun. Pada tahun pertama, kegiatan penelitian akan difokuskan pada kegiatan rancang-bangun ozonator dengan konfigurasi-konfigurasi 1 (satu), 5 (lima), dan 7 (tujuh) CD-chamber (*Corona Discharge Chamber*), yang semuanya menggunakan catu daya listrik dari PLN yang dinaikkan tegangannya sampai sekitar 15 kilo-Volt (KV) menggunakan trafo tegangan tinggi (HVTR). Pada tahun pertama ini juga akan dilakukan uji kinerja dari ozonator-ozonator hasil rancangan, baik menggunakan catu daya PLN maupun menggunakan tenaga surya (*sel photovoltaic*) sebagai hasil pengembangannya. Oksigen (O<sub>2</sub>) umpan ozonator akan digunakan dari berbagai sumber sebagai variabel pengujiannya, yaitu : (a). udara kering

(menggunakan silika gel) yang dikompresi, (b). oksigen medis, (c). oksigenator adsorpsi (proses pengayaan oksigen dengan teknik *Pressure Swing Adsorption*), dan (d). oksigenator membran (proses pengayaan oksigen dengan menggunakan membran *Reverse Osmosis*).

Pada tahun kedua penelitian, akan dilakukan penelitian lanjutan tentang uji kinerja sistem pengolahan air tambak udang non-kimia secara intensif menggunakan prototipe ozonator dan umpan gas oksigen yang terbaik, sebagai hasil dari penelitian pada tahun pertama. Sangat diharapkan, seluruh penelitian tentang uji kinerja peralatan (ozonator dan sistem pengolahan air tambak udang non-kimia secara intensif) akan bekerjasama dengan melibatkan narasumber dari BBPBL Provinsi Lampung dan juga para peneliti terkait dari Kementerian Kelautan dan Perikanan.

## **1.2. Perumusan Masalah**

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

1. Bagaimana melakukan perancangan alat ozonator dengan biaya instalasi yang murah, konsumsi energi yang minimum, pemeliharaannya yang mudah dan produksi ozon yang tinggi.
2. Bagaimana kinerja ozonator yang dirancang tersebut dan produksi ozon yang dihasilkan?
3. Faktor-faktor apa sajakah yang mempengaruhi produktivitas ozonator?

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Tujuan penelitian ini adalah untuk :

1. Perancangan suatu prototipe ozonator unggulan yang ekonomis, mudah dioperasikan, dan mudah dalam perawatannya.
2. Menguji kinerja ozonator hasil perancangan dan mengetahui produksi ozon yang dihasilkan.
3. Mendapatkan kondisi operasi optimum ozonator hasil perancangan dan menentukan faktor-faktor yang mempengaruhi produktivitas ozonator.
4. Membandingkan ozonator hasil perancangan dengan ozonator hasil rancang-bangun sebelumnya di lingkungan DTK FTUI.

#### 1.4. Batasan Masalah

Dalam penelitian ini dilakukan beberapa pembatasan sebagai berikut :

1. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Intensifikasi Proses Departemen Teknik Kimia UI, Depok.
2. Ozonator adalah hasil rancangan Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA.
3. Ozonator yang akan dirancang adalah ozonator jenis *corona discharge* dengan rangkaian pipa elektode koaksial.
4. Ozonator menggunakan listrik PLN sebagai sumber listrik yang diubah menjadi listrik tegangan tinggi oleh transformator tegangan tinggi.
5. Variasi yang dilakukan adalah variasi jumlah *CD-chamber* pada ozonator, variasi tegangan masukan, variasi laju alir umpan, dan variasi jenis gas umpan.

#### 1.5. Sistematika Penulisan

Susunan penulisan akan mengacu pada sistematika sebagai berikut :

- **BAB 1. PENDAHULUAN**  
Berisi latar belakang sebagai dasar penelitian dilakukan, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.
- **BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA**  
Berisi landasan teori umum yang digunakan untuk menjelaskan masalah yang dibahas.
- **BAB 3. METODE PENELITIAN**  
Berisi tentang metode penelitian serta langkah-langkah yang dilakukan dalam menjalankan penelitian untuk mencapai tujuan.
- **BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN**  
Berisi tentang proses rancang-bangun alat, data hasil percobaan, pembahasan percobaan dan faktor-faktor yang mempengaruhi hasil percobaan yang diperoleh.
- **BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN**  
Berisi tentang kesimpulan mengenai percobaan yang telah dilakukan dan saran terhadap penelitian yang akan dilakukan sebagai tindak lanjut dari percobaan ini.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

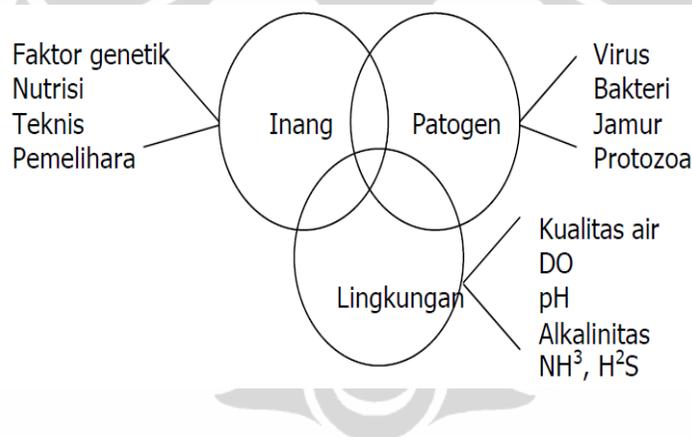
#### **2.1. Pencemaran Perairan Tambak Udang**

Kegiatan budidaya udang adalah intervensi dalam proses pemeliharaan udang untuk meningkatkan produksi, seperti penebaran yang teratur, pemberian pakan, perlindungan terhadap pemangsa, serta pencegahan terhadap serangan penyakit dan sebagainya. Kegiatan budidaya dapat dilaksanakan di lingkungan air payau, air tawar, dan air laut. Tambak merupakan salah satu jenis habitat yang digunakan sebagai tempat kegiatan budidaya air payau yang berlokasi di daerah pesisir. Secara umum tambak dikaitkan langsung dengan pemeliharaan udang yang merupakan produk perikanan yang memiliki nilai ekonomis tinggi berorientasi ekspor (Irianto, 2003). Budidaya udang di Indonesia dimulai pada awal tahun 1980-an dan mencapai puncak produksi pada tahun 1985 – 1995. Sehingga pada kurun waktu tersebut, udang merupakan penghasil devisa terbesar bagi Indonesia pada produk perikanan (“Budidaya udang”, 2010).

Selain menjanjikan keuntungan yang menggiurkan, usaha budidaya udang juga menghadapi beberapa kendala yang dapat menurunkan produksi bahkan menggagalkan panen. Sejak beberapa tahun terakhir usaha budidaya udang mengalami kelesuan akibat kegagalan produksi yang sering terjadi. Hal ini juga dialami oleh para petambak udang di daerah Lampung yang merupakan lumbung udang di Indonesia. Kondisi memprihatinkan yang menimpa para petambak udang tersebut merupakan interaksi beberapa faktor penyebab menurunnya produktivitas tambak, antara lain: (1) desain tata letak yang tidak memenuhi persyaratan teknis, (2) kehadiran patogen yang belum bisa ditanggulangi, (3) luasan hamparan tambak yang kurang memperhitungkan kemampuan daerah penyangga, (4) penerapan padat tebar yang tidak sesuai dengan daya dukung lahan, (5) konservasi lahan mangrove menjadi areal pertambakan yang dilakukan kurang bijaksana sehingga menghilangkan keberadaan lajur hijau, (6) pengelolaan budidaya udang yang tidak berwawasan lingkungan, dan (7) sumber cemaran baik internal maupun eksternal. Namun, kesimpulan sementara mengindikasikan bahwa

masalah penyakit yang disebabkan oleh infeksi mikroorganisme merupakan puncak permasalahan utama yang dihadapi oleh petambak udang (Direktorat Kesehatan Ikan dan Lingkungan, 2003).

Pada kondisi perairan yang masih baik, mikroorganisme tersebut sebenarnya telah potensial terbawa oleh indukan udang. Efek patogenitas masing-masing mikroorganisme tergantung pada jenis dan ukuran udang serta kondisi perairan tambak. Efek patogenitas akan meningkat apabila lingkungan tambak buruk, kepadatan populasi udang yang tinggi, dan manajemen pakan yang tidak tepat (Direktorat Bina Sumber Hayati, 1990). Penyakit pada udang akan timbul dan mewabah berdasarkan hubungan interaksi antara tiga komponen dalam ekosistem perairan tambak yaitu inang (udang) yang lemah, patogen yang ganas, dan kualitas lingkungan yang buruk. Hubungan interaksi ketiga komponen tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut ini:



**Gambar 2.1.** Hubungan interaksi tiga komponen penyebab penyakit dalam ekosistem perairan tambak  
(Sumber : Noni Herlina, 2004)

Penurunan kualitas lingkungan akibat penumpukan bahan organik dan sebagai dampak dari kegiatan intensifikasi tambak menyebabkan udang stres dan akhirnya rentan terhadap penyakit. Penyakit timbul pada udang disebabkan oleh patogen penyebab penyakit yaitu virus, bakteri, protozoa, dan lain-lain.

### 2.1.1. Penyakit yang Disebabkan oleh Virus

Virus adalah mikroorganisme yang sangat kecil, lebih kecil daripada inti sel itu sendiri. Virus hanya dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop elektron dan biasanya berada di dalam sel (*intra cellular*). Hingga saat ini, di Indonesia telah dilaporkan terdapat 8 jenis virus yang menginfeksi udang yaitu: *Monodon Baculo Virus* (MBV), *Infectious Hematophytic Hypodermal Necrosis Virus* (IHHNV), *Hepatopancreatic Parvo-like Virus* (HPV), *Infectious Myo Necrosis Virus* (MNV), *Type C Baculovirus* (TCBV), *Yellow Head Baculo Virus* (YHBV), *White Spot Syndrome Virus* (WSSV) atau sindrom bintik putih dan *Taura Syndrome Virus* (TSV) (“petunjuk pengendalian, 2003”). Dari kedelapan jenis virus tersebut, yang paling berbahaya dan banyak menimbulkan kerugian adalah virus WSSV, TSV, MNV, dan IHHNV karena keempat virus ini bisa menyebabkan kematian pada udang (Unyang, 2006).

### 2.1.2. Penyakit yang Disebabkan oleh Bakteri

Mikroorganisme jenis bakteri yang menyerang udang telah banyaak dilaporkan, termasuk genus *Vibrio*, *Aeromonas*, dan *Pseudomonas*. Beberapa bakteri nonpatogen menjadi patogen dalam kondisi air yang buruk. Anderson (1988) mengelompokkan penyakit yang berasal dari bakteri ini berdasarkan pengaruh patogenitasnya, yaitu menyebabkan nekrosis dan septikemia. Bakteri nekrosis ditunjukkan dengan gejala udang berwarna kecoklatan pada ujung alat tambahan (antena, pleopod, dan lain-lain), disertai dengan usus yang kosong karena tidak ada nafsu makan. Sedangkan bakteri septikemia dapat didiagnosa dengan menemukan sel-sel bakteri yang aktif dalam sistem darah udang penderita (Unyang, 2006).

### 2.1.3. Penyakit yang Disebabkan oleh Parasit

Seperti halnya pada hewan, beberapa parasit juga menyerang pada udang. Parasit tersebut tidak menimbulkan angka kematian yang tinggi pada udang, tetapi dalam segi ekonomi, serangan parasit dapat merugikan. Kerugian dapat berupa penurunan berat badan udang, penurunan kualitas, kepekaan terhadap infeksi virus atau bakteri, dan beberapa parasit dapat menyebabkan kemandulan. Secara

garis besar infeksi parasit dikelompokkan dalam dua jenis parasit yaitu parasit cacing dan parasit isopod (Unyang, 2006).

#### 2.1.4. Penyakit yang Disebabkan oleh Jamur

Penyakit pada udang yang disebabkan oleh jamur pada periode larva maupun post larva dapat menyebabkan kematian. Larva udang yang terserang jamur dapat mati dalam waktu 24 jam. Jamur *Phycomycete* yang termasuk dalam genera *Legenedium* dan *Sirolopidum* menyerang larva udang.

Spora jamur ini sangat kecil (9,1 – 12,5  $\mu\text{m}$ ) dan bila berenang dalam kolam sangat sulit diketahui, sehingga pencegahan sulit dilakukan. Diduga penyebaran spora ini terjadi pada waktu pemberian pakan dan sekali terjadi infeksi, larva udang akan cepat menderita karena larva udang tidak mempunyai daya tahan terhadap infeksi *hype* dari jamur yang tumbuh dengan cepat. Bila terjadi nekrosis pada jaringan udang, maka akan memudahkan timbulnya infeksi sekunder oleh bakteri (Unyang, 2006).

## 2.2. Ozon

Ozon dengan rumus kimia  $\text{O}_3$ , ditemukan oleh Christian Friedrich Schönbein pada tahun 1840 dan pertama kali digunakan secara komersial pada tahun 1907 pada pengolahan air kota di Nice. Nama ozon diambil dari kata *ozein* yang berarti bau dalam bahasa Yunani kuno (“Ozone, 2010”).

Ozon dapat membahayakan sistem pernafasan makhluk hidup karena potensial reduksinya yang tinggi. Dampak dari ozon terutama menyerang paru-paru dan dengan paparan yang lebih lama lagi, ozon dapat mempengaruhi sel-sel darah dan serum protein, bahkan dapat membahayakan mata dan sistem saraf (“Ozone troposfer, 2010”). Oleh sebab itu, *Occupational Safety and Health Administration (OHS)* telah menetapkan batas paparan maksimal untuk manusia terhadap ozon yaitu 0,06 ppm dalam periode 8 jam, lima hari seminggu dan 0,30 ppm dalam 15 menit (“Ozone”, 2010).

Secara alamiah ozon dapat terbentuk melalui radiasi ultraviolet pancaran sinar matahari yang menyebabkan penguraian gas oksigen di udara bebas.

Peristiwa ini disebut proses fotolisis. Atom oksigen (O) yang terurai akan saling bertumbukan dengan molekul oksigen (O<sub>2</sub>) yang ada di sekitarnya sehingga terbentuklah ozon (O<sub>3</sub>). Peristiwa ini terjadi pada lapisan atmosfer paling atas (stratosfer) yang sering disebut dengan nama lapisan ozon. Lapisan ozon terjadi di seluruh bagian stratosfer, tetapi lebih rapat pada jarak antara 20 – 30 km di atas tanah. Ozon yang terbentuk secara alamiah ini bermanfaat untuk melindungi bumi dari sinar ultraviolet yang berbahaya. Molekul ozon yang terbentuk bersifat tidak stabil dan akan selalu berusaha melepaskan satu atom oksigen dengan cara oksidasi, sehingga dapat berubah menjadi molekul oksigen (O<sub>2</sub>) yang stabil. Sifat oksidator yang dimiliki ozon ini kemudian dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi antara lain untuk menghilangkan warna, menghilangkan bau, dan menguraikan senyawa organik (Pikatan, 2008).

#### 2.2.1. Sifat Fisika dan Kimia Ozon

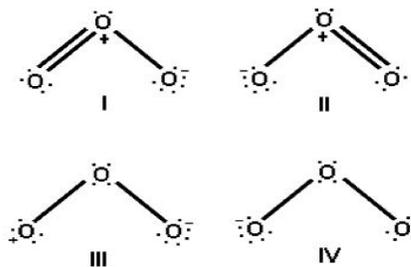
Ozon adalah molekul triatomik, terdiri dari tiga atom oksigen dan merupakan gas yang tidak stabil, yang diproduksi ketika molekul oksigen berdisosiasi menjadi atom oksigen. Pada suhu ruang, ozon merupakan gas berwarna biru dan memiliki bau yang tajam. Ozon bisa dideteksi oleh hidung manusia pada konsentrasi 0,01 – 0,05 ppm. Ozon akan meledak saat konsentrasinya mencapai 240 g/m<sup>3</sup> atau 20% di udara (Metcalf & Eddy, 2003). Sifat fisika ozon diberikan pada Tabel 2.1.

**Tabel 2.1.** Sifat Fisika Ozon

Karakteristik	Nilai
Berat molekul	48 g/mol
Densitas (0°C, 1 atm)	1,666
Volume spesifik (0°C, 1 atm)	0,464 m <sup>3</sup> /kg
Titik didih	-111,9 °C
Titik leleh	-192,5 °C
Temperatur kritis	-12,1 °C
Tekanan kritis	5532,3 kPa

(Sumber : Metcalf & Eddy, 2003)

Tiga atom oksigen pada molekul ozon tersusun pada suatu sudut tumpul dimana atom oksigen pusat terikat dengan dua atom oksigen dengan jarak yang ekuivalen, sudut O – O - O sebesar  $116,78^\circ$  dan panjang ikatannya adalah  $1,278 \text{ \AA}$  (“Ozone, 2010”). Empat struktur ozon ditunjukkan pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2.** Struktur ozon

(Sumber : “Public report”, 2010)

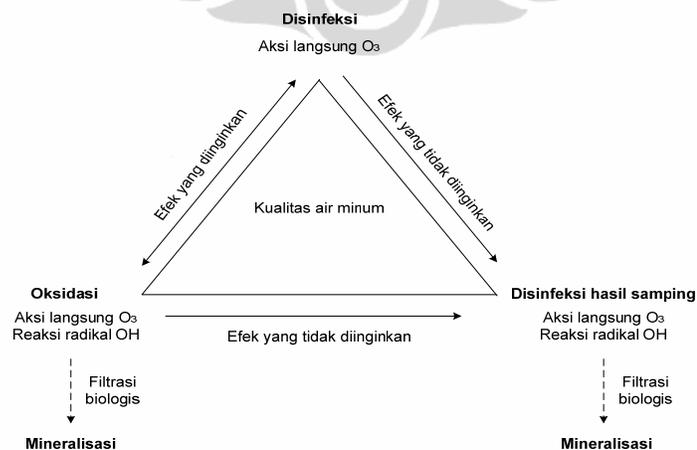
Ozon ditemukan dalam konsentrasi rendah di alam yaitu sekitar  $0,02 - 0,03$  ppm. Di daerah industri konsentrasinya lebih tinggi, dapat mencapai  $0,05$  ppm, karena terjadinya reaksi gas oksigen di udara oleh sinar matahari dengan adanya partikel-partikel asap pabrik (Pikatan, 2008). Ozon mempunyai waktu paruh lebih lama ketika berupa gas dibandingkan dalam larutan yang mengandung air. Ozon merupakan senyawa yang tidak stabil dan pada temperatur ruang akan terdekomposisi dengan cepat menjadi oksigen, dan laju dekomposisinya akan bertambah besar sesuai dengan kenaikan suhu dan PH. Selain itu, kelarutan ozon dalam air juga sebanding dengan waktu kontak yang diperlakukan. Oleh karena itu, ozon harus dibuat dalam ozonator yang jaraknya cukup dekat dengan instalasi pengolahan air minum (*in situ*) (Rice, 1981).

### 2.2.2. Manfaat Ozon

Penggunaan ozon dalam pengolahan air minum telah banyak diaplikasikan di seluruh dunia. Ozon digunakan pada pengolahan air karena ozon dapat merusak racun organik, mengendapkan logam berat dan logam kompleks, merusak sianida dan mengoksida amoniak. Semua potensi pengolahan ini bisa diatasi hanya dengan satu sistem pengolahan yaitu dengan menggunakan ozon (Ball, et al., 1997).

Ozon memiliki dua fungsi utama yaitu oksidator dan disinfektan atau gabungan keduanya. Ozon adalah zat pengoksidasi yang sangat baik. Dalam pengolahan air, ozon sangat efektif dalam menghilangkan rasa dan bau yang disebabkan oleh material organik dan material anorganik yang bisa dioksidasi seperti ion besi, mangan, dan sulfida. Konsentrasi ozon yang dibutuhkan dan waktu reaksi tergantung pada tipe dan konsentrasi polutan dalam air yang bisa dioksidasi (Von Gunten, 2003).

Ozon juga merupakan disinfektan yang paling efisien yang digunakan dalam pengolahan air minum karena dapat menginaktivasi beberapa mikroorganisme, seperti protozoa, yang sulit diinaktivasi oleh disinfektan lainnya. Selain itu, ozon memiliki keistimewaan lain yaitu dapat terdekomposisi menjadi radikal OH ( $\cdot\text{OH}$ ), yang merupakan oksidan yang sangat kuat dalam air. Oleh karena itu, proses ozonasi selalu melibatkan dua hal yaitu radikal OH dan ozon itu sendiri. Selama proses disinfeksi oleh ozon berlangsung, proses oksidasi mungkin terjadi antara kedua oksidan, radikal OH dan ozon. Sehubungan dengan hal tersebut, produk samping yang tidak diinginkan dapat terbentuk dari reaksi antara ozon dan radikal OH dengan komponen dalam air, seperti senyawa organik dan senyawa non organik. Biasanya ozonasi selalu diikuti dengan filtrasi biologi, sehingga sebagian senyawa organik yang telah dioksidasi bisa digunakan untuk dimineralisasikan secara mikrobiologi (Von Gunten, 2003). Gambar 2.3. menunjukkan skema dari efek penggunaan ozon pada pengolahan air.



**Gambar 2.3.** Skema efek penggunaan ozon pada pengolahan air

(Sumber : Von Gunten, 2003)

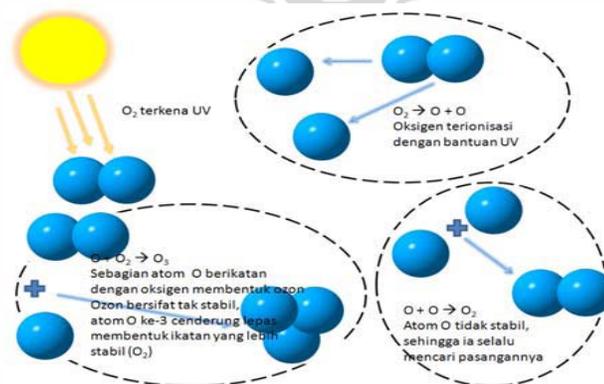
Selain digunakan dalam pengolahan air, ozon juga dapat digunakan untuk sterilisasi bahan makanan mentah, pengawetan bahan makanan, pengelantangan (*bleaching*) pada pabrik tekstil, pulp dan kertas, pengolahan limbah cair dari industri dan hasil pemurnian minyak, mengontrol bau dan warna, pembuatan *ultrapure water* pada industri elektronik, serta *laundry* untuk kepentingan industri atau komersial. Dalam bidang kedokteran ozon digunakan sterilisasi peralatan kedokteran. Ozon juga digunakan untuk memperlancar jalannya aliran darah dan perawatan kulit terbakar (Ali, 2006).

### 2.2.3. Pembentukan Ozon

Ozon terbentuk dari penguraian gas oksigen menjadi atom oksigen yang kemudian akan saling bertumbukan dengan molekul oksigen yang ada di sekitarnya. Ozon dapat terbentuk secara alamiah di alam dan dapat dibuat secara komersial dengan menggunakan metode tertentu.

#### 2.2.3.1. Secara Alamiah

Secara alamiah ozon terbentuk melalui radiasi ultraviolet pancaran sinar matahari yang menyebabkan penguraian gas oksigen di udara bebas menjadi dua buah atom oksigen. Proses ini dikenal dengan nama fotolisis. Atom oksigen yang terurai akan saling bertumbukan dengan molekul oksigen yang ada di sekitarnya sehingga terbentuklah ozon (Sani, 2008). Proses yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 2.4.



**Gambar 2.4.** Proses pembentukan ozon secara alami

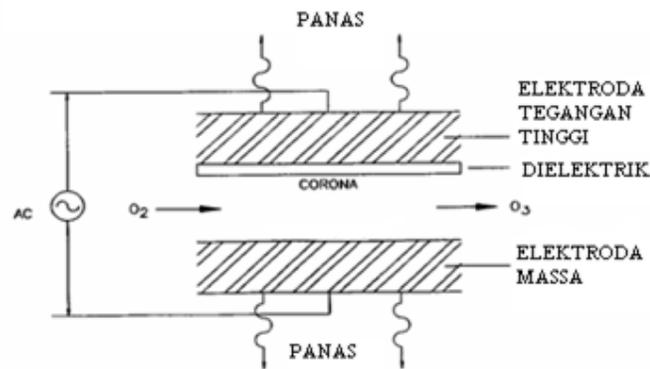
(Sumber : Sani, 2008)

Proses semacam ini terjadi pula pada kabut asap yang banyak terdapat di kota besar atau daerah industri. Gas NO<sub>x</sub> dan hidrokarbon dari asap buangan kendaraan bermotor dan berbagai kegiatan industri merupakan sumber terbentuknya ozon. Pembentukan ozon di udara akan semakin besar ketika ada petir menyambar (Pikatan, 2008).

#### 2.2.3.2. Pelepasan Korona (*corona discharge*)

Korona terjadi akibat peristiwa percepatan ionisasi yang terdapat di antara dua elektrode yang diakibatkan oleh medan listrik yang cukup tinggi. Jika dua buah elektron diberi tegangan yang cukup tinggi, hal ini menyebabkan medan listrik di antara kedua elektrode tersebut cukup tinggi sehingga mampu menggerakkan elektron-elektron yang berada di antara kedua elektrode tersebut. Pergerakan elektron memungkinkan terjadinya benturan elektron dengan molekul bebas. Adanya tumbukan menyebabkan molekul bebas memiliki energi yang cukup untuk melepaskan elektron terluarnya. Peristiwa benturan tersebut akan menghasilkan dua buah elektron yang baru, yaitu elektron yang menumbuk molekul dan elektron yang keluar dari molekul tersebut. Karena kedua elektron tersebut masih berada di bawah tekanan medan listrik menyebabkan kedua elektron tersebut akan bergerak dan menumbuk molekul bebas yang lain (Garniwa, et al., 2006).

Pada proses pembentukan ozon, korona terbentuk akibat ionisasi oksigen. Terdapat dua elektrode dengan besar tegangan berbeda yaitu elektrode tegangan tinggi dan yang lainnya adalah elektrode tegangan rendah. Elektrode-elektrode ini terhubung dengan sumber tegangan tinggi. Kedua elektrode dipisahkan oleh media dielektrik dan disediakan celah pelepasan muatan yang sempit. Skema pembentukan ozon dengan metode *corona discharge* ditunjukkan pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.5.** Skema pembentukan ozon dengan metode *corona discharge*

(Sumber : “Public report”, 2010)

Adanya medan listrik yang tinggi di dalam elektrode menyebabkan terjadinya ionisasi udara yang mengandung oksigen, yang mengalir dalam elektrode. Pergerakan elektron memungkinkan terjadinya benturan elektron dengan molekul oksigen dan akan menghasilkan dua buah atom oksigen (O). Persamaan reaksinya pembentukan ozon dapat dilihat pada Persamaan 2.1.



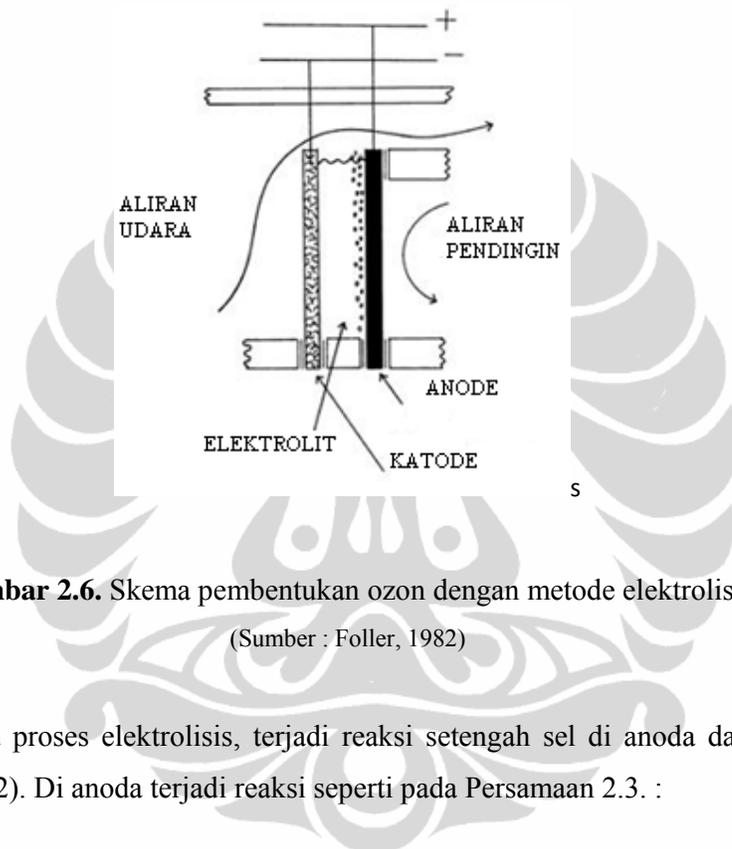
Selanjutnya atom oksigen ini secara alamiah akan bertumbukan kembali dengan molekul oksigen di sekitarnya sehingga terbentuklah ozon. Reaksi yang terjadi dapat dilihat pada Persamaan 2.2.



Metode ini adalah metode pembentukan ozon yang paling banyak digunakan di berbagai kegiatan industri karena memiliki keunggulan antara lain produktivitas ozon yang dihasilkan tinggi, tidak membutuhkan pemeliharaan yang rumit dan mudah diaplikasikan. Kekurangannya adalah jumlah energi yang dikonsumsi cukup besar sedang konsentrasi ozon yang dihasilkan rendah, sehingga teknologi ini dinilai mahal (Pontius, 1990).

### 2.2.3.3. Elektrolisis

Pada metode ini, tegangan dari sumber listrik *direct-current* (DC) mengalir di antara anoda dan katoda dalam sebuah elektrolit yang mengandung air dan larutan anion dengan keelektronegatifan tinggi. Ozon secara kimia akan terbentuk dari air. Proses yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 2.6.



**Gambar 2.6.** Skema pembentukan ozon dengan metode elektrolisis

(Sumber : Foller, 1982)

Pada proses elektrolisis, terjadi reaksi setengah sel di anoda dan katoda (Foller, 1982). Di anoda terjadi reaksi seperti pada Persamaan 2.3. :



Dan pada saat yang bersamaan juga terjadi reaksi seperti pada Persamaan 2.4. :



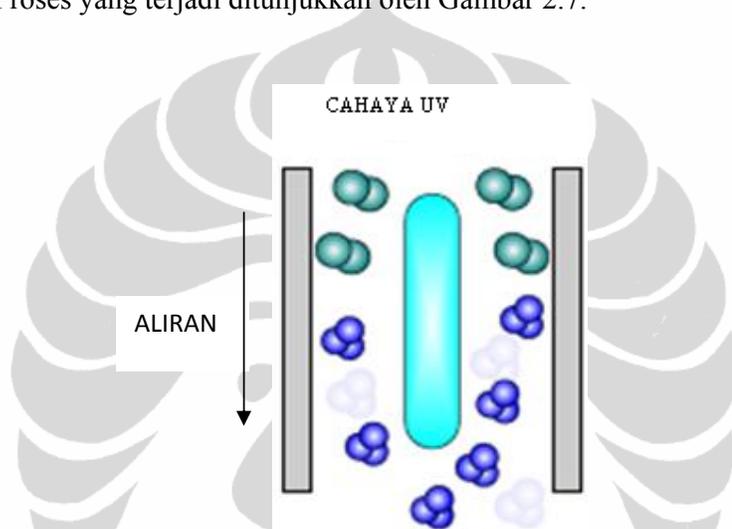
Di katoda terjadi reaksi seperti pada Persamaan 2.5. :



Keuntungan penggunaan metode ini adalah konsentrasi ozon yang dihasilkan lebih besar dari ozon yang dihasilkan dari metode corona discharge yaitu sebesar 15% berat. Kelemahannya, metode ini menggunakan energi yang besar (“Ozone, 2010”).

#### 2.2.3.4. Radiasi Ultraviolet

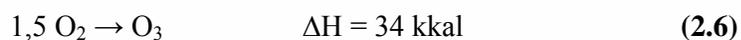
Pembentukan ozon pada metode ini dilakukan dengan menggunakan lampu UV. Proses yang terjadi ditunjukkan oleh Gambar 2.7.



**Gambar 2.7.** Skema pembentukan ozon dengan metode radiasi ultraviolet

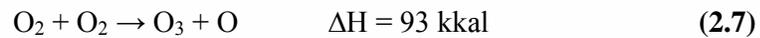
(Sumber : “Ozone production, 2010”)

Metode ini dikembangkan berdasarkan proses pembentukan ozon di lapisan stratosfer. Oksigen akan berubah menjadi ozon setelah dilewatkan pada sinar ultraviolet dari lampu UV. Reaksi endotermis yang terjadi adalah seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 2.6. :



Reaksi pada Persamaan 2.6. berlangsung apabila cahaya yang diserap oleh oksigen berada pada rentang panjang gelombang yang lebih pendek dari 842 nm (Volman, 1963; McNesby, 1964).

Pembentukan ozon juga dapat terjadi melalui reaksi yang ditunjukkan pada Persamaan 2.7. :



Reaksi pada Persamaan 2.7. terjadi apabila cahaya yang diserap oksigen berada pada panjang gelombang 307 nm (Volman, 1963; McNesby, 1964).

Keuntungan penggunaan metode ini adalah tidak menghasilkan senyawa nitrogen-oksida sebagai hasil samping seperti halnya pada metode *corona discharge*, dapat digunakan pada lingkungan udara yang lembab, dan biaya produksi lebih ekonomis karena tidak memerlukan udara kering dan oksigen murni untuk memproduksi ozon. Kelemahan metode ini adalah ozon yang dihasilkan hanya sebesar 0,5% berat dan energi yang dibutuhkan lebih besar 6 – 30 kali dibandingkan energi yang digunakan pada metode *corona discharge* (Langlais, et al., 1991).

### 2.3. Oksigen

Oksigen merupakan unsur gas yang mendukung kehidupan hampir seluruh makhluk hidup di muka bumi. Kandungan oksigen di udara mencapai 21%. Pada suhu dan tekanan atmosferik, oksigen dengan rumus kimia  $\text{O}_2$ , berbentuk gas yang tidak berwarna dan tidak berbau serta mudah larut dalam air. Sifat fisik gas oksigen dapat dilihat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2.** Sifat Fisik Oksigen

Karakteristik	Nilai
Berat molekul	28 g/mol
Densitas (0°C, 1 atm)	1,2505
Volume spesifik (0°C, 1 atm)	0,7 m <sup>3</sup> /kg
Titik didih	-182,95 °C
Titik leleh	-218,79 °C
Temperatur kritis	-118,8 °C
Tekanan kritis	49,7 atm

(Sumber : “Oksigen”, 2010)

Dalam teknologi ozon, oksigen adalah gas umpan yang kemudian dikonversi menjadi ozon di dalam ozonator. Semakin tinggi kadar oksigen dalam gas umpan maka akan semakin banyak ozon yang dihasilkan. Penggunaan oksigen murni sebagai umpan akan meningkatkan produktivitas ozon yang dihasilkan yaitu 2 – 6 % berat dibandingkan jika udara yang digunakan sebagai umpan hanya menghasilkan 1 – 3% berat saja (Summerfelt, 1997). Oleh karena itu, untuk memperoleh produksi ozon yang lebih besar maka kadar oksigen dalam gas umpan ozonator harus ditingkatkan yaitu dengan menggunakan umpan oksigen yang telah diperkaya terlebih dahulu.

Terdapat beberapa teknologi pemisahan udara untuk mendapatkan oksigen dengan kadar yang lebih tinggi. Teknologi yang lazim digunakan antara lain kriogenik, proses adsorpsi, pemisahan dengan menggunakan membran dan metode pemisahan udara dengan magnetisasi.

Kriogenik merupakan salah satu cara yang dilakukan untuk mendapatkan oksigen murni dari udara dalam skala besar. Kriogenik dapat diartikan sebagai sistem yang beroperasi pada temperatur yang sangat rendah. Proses ini diawali dengan menghilangkan pengotor yang terdapat dalam udara. Udara kemudian didinginkan dan dicairkan. Melalui proses distilasi, komponen udara kemudian dipisahkan berdasarkan titik didihnya. Pada proses kriogenik, semua peralatan beroperasi pada suhu yang sangat rendah, sehingga harus terisolasi dengan baik dan diletakkan dalam *cold box* untuk meminimasi perpindahan panas dari luar (“Air separation technology”, 2010).

Proses pengayaan oksigen dengan metode adsorpsi dilakukan berdasarkan prinsip perbedaan kemampuan adsorben dalam menyerap gas oksigen atau nitrogen, serta laju difusi kedua gas tersebut dalam pori adsorben. Beberapa generator oksigen yang beredar di pasaran menggunakan proses ini. Kelebihan proses ini adalah konsumsi energi yang lebih rendah dari proses kriogenik, kemurnian produksi yang tinggi meskipun tidak sebaik proses kriogenik, serta kapasitas produksi yang lebih fleksibel dibandingkan dengan proses kriogenik. Adapun kelemahan proses ini adalah biaya investasi yang cukup tinggi terutama untuk biaya investasi kolom adsorpsi.

Proses pengayaan oksigen dengan menggunakan membran masih tergolong baru jika dibandingkan dengan proses pemisahan gas lainnya. Prinsip kerja pemisahan oksigen dari udara dengan menggunakan membran adalah perbedaan laju permeasi komponen udara yaitu kecepatan komponen udara menembus lapisan membran. Proses ini dapat terjadi karena adanya perbedaan tekanan pada kedua sisi membran sehingga molekul gas pada sisi membran yang bertekanan tinggi akan bergerak menuju permukaan membran. Proses ini lebih sederhana dan ekonomis jika dibandingkan dengan proses kriogenik dan adsorpsi akan tetapi kemurnian oksigen yang dihasilkan tidak terlalu tinggi dan adanya pengotor pada udara dapat menyebabkan terjadinya *fouling* pada membran sehingga kinerja membran akan menurun (Mulder, 1991).

Proses pemisahan udara dengan magnetisasi biasanya digunakan untuk keperluan industri dan rumah tangga yang tidak membutuhkan kadar oksigen yang tinggi, seperti proses pembakaran, pembuatan baja, pengelasan, dan proses *air conditioning*. Prinsip teknologi ini berdasarkan sifat kemagnetan dari oksigen yang bersifat paramagnetik, dan nitrogen yang bersifat diamagnetik. Apabila udara dilewatkan pada daerah yang termagnetisasi, maka oksigen akan tertarik dan nitrogen akan tertolak sehingga kedua unsur ini akan terpisahkan. Kelebihan metode ini adalah prosesnya sederhana dan biayanya ekonomis sehingga mudah diterapkan. Akan tetapi metode ini juga memiliki kelemahan yaitu kadar oksigen yang dihasilkan relatif sangat rendah dibandingkan dengan teknologi pemisahan oksigen dari udara yang biasa digunakan dalam industri.

#### **2.4. Ozonator**

Ozon tidak dapat disimpan dan ditransportasikan seperti gas industri lainnya karena ozon akan terdekomposisi dengan cepat menjadi molekul oksigen kembali. Ozon pernah disimpan dengan cara melarutkannya dalam oksigen cair, tetapi pada konsentrasi ozon di atas 70% terjadi ledakan spontan (Ball, et al., 1997). Oleh karena itu, ozon harus diproduksi secara *in situ* atau dekat dengan instalasi pemanfaatannya, sehingga bisa langsung digunakan tanpa harus disimpan atau ditransportasikan terlebih dahulu.

Generator ozon yang banyak diproduksi secara komersial adalah generator ozon yang menggunakan metode *corona discharge*. Metode ini memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan metode yang lain yaitu produksi ozon yang dihasilkan tinggi, pemeliharaannya mudah, dan mudah diaplikasikan.

Terdapat dua elektrode dengan besar tegangan yang berbeda yaitu elektrode tegangan tinggi dan elektrode massa yang dipisahkan oleh media dielektrik dan *discharge gap* yaitu celah sempit untuk pelepasan muatan dan mengalirnya oksigen. Pada kedua elektrode tersebut dialirkan tegangan tinggi *alternating current* (AC). Korona terjadi akibat peristiwa percepatan ionisasi oksigen yang terdapat di antara elektrode massa dan elektrode tegangan tinggi yang diakibatkan oleh medan listrik yang cukup tinggi. Pelepasan korona yang terputus-putus, yang berlangsung di antara dua elektrode akan menyebabkan elektron-elektron bertabrakan dengan molekul oksigen sehingga terbentuk ozon.

#### 2.4.1. Rancang Bangun dan Konstruksi Ozonator

Pembuatan ozonator dengan menggunakan metode *corona discharge* diawali oleh rancangan Werner von Siemens. Ozonator yang dibuat menggunakan gelas berbentuk tabung yang di dalamnya terdapat elektrode yang terbuat dari aluminium sementara diluar tabung gelas dialiri elektrode cair. Desain ozonator ini kemudian diaplikasikan di Eropa (Vosmaer, 1916). Semenjak itu, desain ozonator untuk memperoleh produksi ozon yang maksimum terus dikembangkan.

Pada tahun 1965, Van Tuyle membuat desain ozonator yang terdiri atas elektrode luar yang berbentuk tabung terbuat dari logam dan dielektrik berbentuk tabung terbuat dari gelas. Diameter luar tabung gelas dibuat lebih kecil dari diameter dalam tabung logam. Hal ini dilakukan untuk menciptakan ruang tempat mengalirnya gas yang akan dikonversi menjadi ozon. Gelas atau kaca kuarsa merupakan bahan dielektrik yang paling baik, akan tetapi harganya mahal. Elektrode dalam dilubangi seperti kisi atau ayakan dan diletakkan di dalam tabung gelas dielektrik secara konsentrik. Tanpa adanya media dielektrik, pelepasan korona akan mengakibatkan terbentuknya percikan api, yang mungkin juga akan menyebabkan terbentuknya ozon tetapi hanya dalam jumlah kecil. Tabung gelas yang digunakan memiliki ketebalan tidak lebih dari 2,25 mm, pada salah satu

ujungnya dibiarkan terbuka, sementara ujung lainnya dilengkapi dengan alat yang digunakan untuk mengatur agar hanya beberapa persen saja gas umpan yang masuk (30 – 70%). Gas akan mengalir melalui anulus antara permukaan luar tabung logam dan permukaan dalam tabung gelas. Diameter tabung harus dibuat sedemikian rupa sehingga lebar anulus antara tabung logam dan tabung gelas di bawah 2,5 mm (Van Tuyle, 1965).

Pada tahun 1977, Curt William Carlson mendaftarkan paten atas ozonator hasil rancangannya. Ozonator yang dirancang tersebut berbentuk tabung, terdiri atas elektrode dalam dan luar yang terbuat dari jala. Terdapat dua gelas dielektrik berbentuk tabung sebagai media yang akan diselimuti oleh jala. Elektrode luar merupakan jala yang dibuat menyelimuti gelas dielektrik. Begitu juga halnya dengan elektrode dalam, dibuat menyelimuti gelas dielektrik yang lain. Diameter luar gelas dielektrik untuk elektrode dalam lebih kecil daripada diameter dalam gelas dielektrik untuk elektrode luar. Kedua gelas dielektrik yang telah diselimuti jala dipisahkan pengatur jarak berbentuk sekrup. Kedua gelas dielektrik disusun secara koaksial dalam selongsong ozonator berbentuk tabung. Hal penting dalam desain ozonator ini adalah penggunaan jala sebagai elektrode. Jala elektrode berukuran 20 – 80 mesh. Jika digunakan jala berukuran dibawah 20 mesh, peristiwa *electrical discharge* tidak merata di sepanjang elektrode, sehingga aliran arus fluktuatif. Sedangkan apabila digunakan jala dengan ukuran di atas 80 mesh, udara tidak akan mengalir secara merata dalam kisi-kisi jala (Carlson, 1977).

Pada tahun 1979, Tanaka, et al. menciptakan suatu desain ozonator (US Patent No. 4.232.229). Ozonator rancangan Tanaka, et al., terdiri atas sepasang elektrode berbentuk tabung yang dipasang dengan memberikan jarak di antara keduanya, yaitu elektrode massa dan elektrode tegangan tinggi, dan sebuah dielektrik berbentuk tabung yang dipasang di antara elektrode massa dan elektrode tegangan tinggi. Sebuah substrat logam yang dilubangi diletakkan di celah antara elektrode tanah dan dielektrik, dan pengatur jarak pertama diletakkan di antara substrat logam dan dielektrik untuk menjaga agar jarak antara substrat logam dan dielektrik tetap konstan. Pengatur jarak kedua diletakkan di antara substrat logam dan elektrode tanah untuk menjaga agar jarak antar substrat logam dan elektrode massa tetap konstan. Jarak yang seragam ini akan memberikan

pelepasan energi listrik yang seragam. Kelemahan desain ini adalah ozonator yang didesain tidak efisien karena membutuhkan dua pengatur jarak untuk membuat *discharge gap* (Tanaka, 1979).

Pada tahun 1990, Ernst J. Staubach mendaftarkan desain ozonator hasil rancangannya. Ozonator didesain untuk memproduksi ozon secara efisien dengan konsumsi energi listrik yang minimum. Elektrode dalam dan elektrode luar berbentuk tabung terbuat dari logam. Dielektrik juga berbentuk tabung dan terbuat dari gelas. Elektrode dan dielektrik dipasang secara koaksial dalam ozonator. Desain ini untuk memudahkan konstruksi dan penggantian komponen. Selain itu, dengan desain pemasangan ini akan memberikan posisi yang tepat, yaitu jarak antara elektrode luar dan dielektrik serta jarak antara dielektrik dan elektrode dalam akan sama di sepanjang elektrode (Staubach, 1990).

Di lingkungan Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia telah dilakukan beberapa penelitian untuk mendapatkan ozonator dengan biaya yang ekonomis, produksi ozon yang optimal dan konsumsi energi yang minimum. Hingga saat ini telah berhasil dirancang-bangun 4 (empat) generasi ozonator.

Ozonator generasi 1 (satu) merupakan ozonator elektrode koaksial yang dirancang untuk pengendalian senyawa fenolik. Ozonator tersebut adalah hasil rancang-bangun Prof.Dr.Ir. Setijo Bismo, DEA. Hasil-hasil yang terpenting dari ozonator generasi pertama telah disajikan dalam Seminar Nasional VI Kimia dalam Industri dan Lingkungan pada tahun 1997.

Ozonator generasi 2 (dua) dirancang-bangun oleh Rini Ramadhani Fitria, mahasiswa S1 Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia. Ozonator ini menggunakan tipe aliran *single pass* yang dirancang untuk pengolahan limbah industri. Ozonator dirancang dengan menyusun elektrode dan media dielektrik secara koaksial, dihubungkan dengan pembangkit tegangan tinggi, pada frekuensi 50 – 60 Hz, dengan konsumsi energi yang rendah. Ozonator hasil perancangan dapat digunakan pada tekanan atmosferis dan suhu ambien. Dari hasil pengujian produktivitas ozon, diperoleh kondisi optimum ozonator tersebut adalah pada laju alir gas umpan 400 L/jam, menghasilkan ozon sebesar 1,6 g/jam dengan konsumsi energi sebesar 8 – 22 kWh/kg ozon (Bismo, 1998). Hasil-hasil yang terpenting

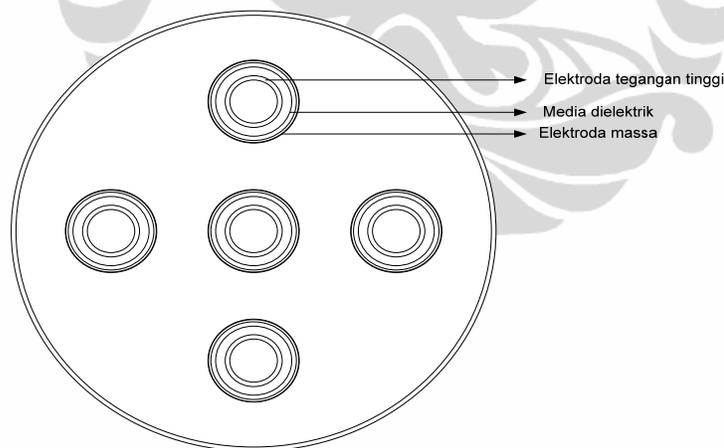
dari ozonator tersebut telah disajikan dalam Seminar Teknik Kimia Soehadi Reksowardjojo pada tahun 1998 (Bismo, 1999) .

Ozonator generasi 3 (tiga) merupakan hasil rekayasa dan rancang bangun Prof.Dr.Ir. Setijo Bismo, DEA. Ozonator dapat bekerja pada tekanan operasi antara 1 – 3 bar, dengan suhu operasi 28 – 30 °C dan dapat beroperasi dengan baik menggunakan energi listrik arus searah, dengan tegangan antara 11 – 14 Volt dan kuat arus sekitar 2 – 3 Ampere. Ozonator dirancang untuk dapat menggunakan dua macam konfigurasi elektrode koaksial yaitu elektrode *single pass* dan elektrode *double pass*. Dari hasil pengujian, diperoleh kesimpulan bahwa produksi ozon dengan menggunakan konfigurasi elektrode jenis *double pass* selalu memberikan hasil yang lebih besar, hampir sekitar 2 kali, bila dibandingkan dengan menggunakan konfigurasi elektrode *single pass*. Fenomena tersebut selaras dengan kaidah waktu tinggal aliran gas umpan di dalam reaktor atau ozonator, yang berarti bahwa panjang lintasan gas yang lebih besar di sepanjang elektrode *double pass* ternyata sangat berpengaruh pada produksi ozon pada kondisi operasi yang sama. Dampak lain dari penggunaan elektrode dengan konfigurasi *double pass* ini adalah fenomena pendinginan elektrode yang lebih baik karena kontak gas yang lebih intensif, sehingga dengan elektrode yang lebih dingin akan dihasilkan ozon yang lebih stabil dan tidak mudah mengurai kembali menjadi oksigen. Efek pendinginan tersebut juga sangat menguntungkan dilihat dari konsumsi energi dan umur pemakaian dielektrik ozonator, yang dibuat dari bahan gelas (kaca) borosilikat, sehingga tidak mudah pecah karena adanya fenomena pemanasan setempat (Bismo, 2004).

Pada tahun 2009, Adi Lukmanto, mahasiswa S1 Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, membuat ozonator generasi 4 (empat) yaitu ozonator *shell and tube* aliran *single pass*. Pengujian dilakukan dengan menggunakan variasi panjang elektrode yaitu ozonator pendek dengan panjang elektrode 16 cm dan ozonator panjang dengan panjang elektrode 27,5 cm. Masing-masing ozonator terdiri atas lima rangkaian pipa elektrode koaksial yang dipasang paralel. Dari hasil pengujian produktivitas ozon yang dihasilkan, diperoleh kondisi optimum kedua ozonator tersebut adalah pada laju alir gas umpan 1.000 L/jam. Ozonator panjang memiliki keunggulan dibandingkan

dengan ozonator pendek. yaitu ozon yang dihasilkan lebih banyak dan daya yang dikonsumsi lebih sedikit. Pada laju alir yang sama, dan tegangan yang sama, ozonator panjang menghasilkan ozon sebanyak 0,408 g/jam dengan konsumsi energi sebesar 11,03 kWh/g ozon sedangkan ozonator pendek hanya menghasilkan ozon sebesar 0,306 g/jam dengan konsumsi energi sebesar 21,39 kWh/g ozon (Lukmanto, 2009).

Dari beberapa desain tersebut di atas, Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA kemudian merancang desain ozonator untuk penelitian ini sebagai ozonator generasi kelima di lingkungan Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia dengan konfigurasi baru yaitu bentuk tipe aliran *triple pass*. Elektrode massa, media dielektrik, dan elektrode tegangan tinggi disusun secara koaksial yaitu berada pada satu sumbu. Akan dibuat 2 ozonator dengan variasi besar diameter ozonator berdasarkan jumlah CD-chamber di dalamnya yaitu (1) ozonator kecil dengan satu CD-chamber dan (2) ozonator besar dengan lima CD-chamber yang dipasang paralel. Skema melintang ozonator besar dapat dilihat pada Gambar 2.8. berikut ini:



**Gambar 2.8.** Skema melintang ozonator besar dengan lima CD-chamber koaksial yang dipasang paralel

Rangkaian terdiri atas elektrode massa yang berbentuk jala atau jaring dengan ukuran 60 mesh yang terbuat dari bahan *stainless steel* 304 yang dililitkan

mengelilingi permukaan gelas berbentuk tabung yang berfungsi sebagai media dielektrik. Elektrode tegangan tinggi yang berbentuk tabung (pipa) terbuat dari bahan *stainless steel* 304 dipasang di dalam tabung gelas. Terdapat *discharge gap* atau celah sempit di antara tabung gelas dan elektrode dalam yang merupakan tempat pelepasan korona dan terjadinya konversi oksigen menjadi ozon. Efisiensi ozonator dioptimalkan dengan mengatur agar *discharge gap* minimum sehingga konversi oksigen menjadi ozon membutuhkan energi minimum. Lebar *discharge gap* diukur dari diameter dalam gelas dielektrik dikurangi diameter luar elektrode tegangan tinggi. Pada rancangan ini, lebar *discharge gap* adalah 1,75 mm.

Selongsong ozonator (*casing*) terbuat dari bahan akrilik yang di dalamnya terdapat elektrode-elektrode yang terbuat dari bahan *stainless steel* 304. Material yang digunakan adalah material yang tahan terhadap ozon. Penggunaan *polyvinyl chloride* (PVC) tidak direkomendasikan untuk material yang akan kontak langsung dengan ozon. *Stainless steel* 304 atau 316 adalah material paling baik yang cocok digunakan pada alat yang akan kontak langsung dengan ozon (Summerfelt, 1997).

Kondisi optimal produksi ozon ditunjukkan pada Persamaan 2.8. (Bismo, 1998):

$$\left( \frac{Y_{ozon}}{A_{el}} \right) = \frac{k_o \cdot \epsilon \cdot f \cdot V_p}{t_{md}} \quad (2.8)$$

dengan :

$\left( \frac{Y_{ozon}}{A_{el}} \right)$  = jumlah ozon per satuan luas permukaan elektrode (kondisi optimal)

$k_o$  = konstanta produktivitas

$f$  = frekuensi arus bolak-balik, [Hertz]

$\epsilon$  = konstanta dielektrik media dielektrik

$V_p$  = tegangan puncak antara 2 elektrode (*discharge gap*), [Volt]

$t_{md}$  = tebal media dielektrik, [m]

Harga tegangan puncak antara 2 elektrode dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (2.9) (Bismo, 1998):

$$V_p = k_v \cdot p \cdot g \quad (2.9)$$

dengan :

$V_p$  = tegangan puncak antara 2 elektrode (*discharge gap*), [Volt]

$k_v$  = konstanta perubahan potensial sebagai akibat tekanan gas

$p$  = tekanan gas di antara dua elektrode, [bar]

$g$  = jarak antara dua elektrode, [m]

Oleh karena itu, untuk memperoleh produksi ozon yang maksimum, diperlukan kondisi sebagai berikut ( Summerfelt, 1997; Van Tuyle, 1965):

- a. Menjaga agar tegangan tetap rendah karena tegangan rendah akan mengurangi resiko kerusakan pada permukaan media dielektrik dan elektrode.
- b. Menggunakan media dielektrik yang tipis dengan konstanta dielektrik yang tinggi. Bahan gelas kuarsa adalah material yang paling baik karena memiliki konstanta dielektrik yang tinggi, namun dalam perancangan ozonator ini digunakan material yang lebih murah yaitu gelas borosilikat karena mudah diperoleh dan harganya murah. Media dielektrik dibuat setipis mungkin tetapi harus tahan terhadap tegangan tinggi.
- c. Menggunakan pendingin untuk menjaga agar suhu dalam generator ozon tetap konstan. Efisiensi generator ozon akan menurun apabila suhu dalam generator ozon meningkat. Hal ini disebabkan karena pada suhu tinggi, ozon akan mengalami dekomposisi menjadi oksigen kembali. Pendingin yang digunakan dapat berupa air atau udara yang akan tersirkulasi dalam generator ozon.
- d. Efisiensi pembentukan ozon juga akan menurun apabila konsentrasi ozon dalam gas yang akan diozonisasi meningkat. Oleh karena itu, konsentrasi ozon yang dihasilkan harus dijaga tetap 3%. Hal ini mengakibatkan banyaknya

jumlah gas umpan yang tidak terkonversi menjadi ozon, sehingga dibutuhkan perangkat alat yang berukuran besar.

- e. Gas umpan harus bebas dari hidrokarbon karena kapasitas ozon yang dihasilkan juga bisa berkurang secara signifikan jika media dielektrik dalam celah tempat terjadinya *corona discharge* terkontaminasi oleh hidrokarbon yang dibawa oleh oksigen sebagai gas umpan. Konsentrasi maksimum hidrokarbon dalam oksigen sebagai gas umpan untuk memproduksi ozon adalah 5 mL/m<sup>3</sup>. Jika tidak, hidrokarbon akan mengalami pembakaran di dalam celah pelepasan korona dan akan membentuk lapisan karbon (deposit karbon) pada permukaan media dielektrik. Lapisan karbon ini akan mengurangi efisiensi ozonator dan konsentrasi ozon yang dihasilkan.
- f. Gas umpan harus bebas dari uap air dan partikel pengotor. Generator ozon mensyaratkan gas umpan yang bebas dari uap air ( suhu *dew point* < -65°C) dan partikel pengotor lainnya karena akan mengurangi produksi ozon yang dihasilkan. Uap air dan pengotor akan menyumbat celah di antara dua elektrode tempat terjadinya *corona discharge* dan akan menyebabkan ozon terdekomposisi. Oleh karena itu, gas umpan harus dilewatkan pada silika gel terlebih dahulu sebelum memasuki ozonator untuk menghilangkan partikel pengotor dan uap air yang terdapat pada gas umpan. Selain itu, penggunaan udara sebagai gas umpan menyebabkan nitrogen yang terdapat di dalam udara sebanyak 79% menyebabkan terbentuknya asam nitrat yang membahayakan ozonator dan akan mempengaruhi produksi ozon yang dihasilkan.
- g. Penggunaan oksigen murni sebagai gas umpan. Ozon bisa diproduksi dengan menggunakan udara atau oksigen murni sebagai umpan. Apabila oksigen murni digunakan sebagai umpan maka akan menghemat energi sampai 50 – 75% dibandingkan dengan menggunakan udara sebagai umpan. Penggunaan oksigen murni sebagai umpan juga akan meningkatkan produktivitas ozon yang dihasilkan sampai dengan 6 % berat dibandingkan jika udara yang digunakan sebagai umpan hanya menghasilkan 1 sampai 3% berat saja.

#### 2.4.2. Uji Produktivitas Ozonator

Uji produktivitas ozon yang dihasilkan dari ozonator hasil rancang-bangun dilakukan dengan menggunakan metode iodometri khusus untuk analisis residu kandungan ozon yang terlarut dalam air, dengan menggunakan indikator amilum. Metode yang digunakan tersebut merupakan pengembangan dari metode iodometri klasik yang dikembangkan pada tahun 1985, dengan parameter residu ion iodida dalam air. Prinsipnya adalah ion iodida ( $I^-$ ) dioksidasi menjadi iodium ( $I_2$ ) oleh ozon dalam larutan buffer kalium iodida (KI). Dalam hal ini, PH larutan asam dibuat menjadi 2 dengan penambahan asam sulfat dan pembebasan iodium dititrasi dengan larutan thio (natrium thiosulfat,  $Na_2S_2O_3$ ). Reaksi ozon dengan kalium iodida yang dimaksud adalah seperti pada Persamaan 2.10. (Day & Underwood, 1996) :



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.

Jumlah mol  $I_2$  ditentukan dengan menitrasi larutan KI yang mengandung ozon dengan natrium thiosulfat ( $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ), setelah terlebih dahulu ditambahkan asam sulfat untuk memberikan suasana asam pada larutan dan amilum sebagai indikator yang mengubah warna larutan menjadi biru. Reaksi yang terjadi seperti pada Persamaan 2.11. berikut :



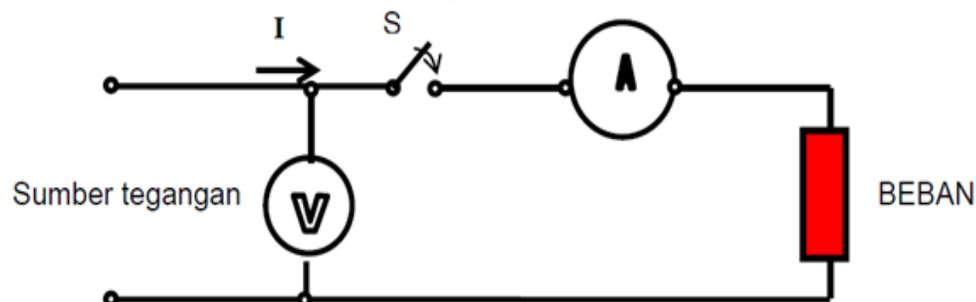
Titration dilakukan sampai jumlah  $I_2$  sebanding secara stoikiometris dengan natrium thiosulfat, yang ditunjukkan dengan perubahan warna dari biru menjadi jernih kembali.

### 2.4.3. Konsumsi Energi Ozonator

Pada suatu rangkaian listrik, arus akan mengalir apabila dipenuhi syarat-syarat sebagai berikut (“Teori dasar, 2010”):

- Adanya sumber tegangan
- Adanya alat penghubung
- Adanya beban

Gambar 2.9. menunjukkan rangkaian arus.



**Gambar 2.9.** Rangkaian arus listrik

(Sumber : “Teori dasar, 2010”)

Pada kondisi sakelar S terbuka, maka arus tidak akan mengalir melalui beban. Apabila sakelar S ditutup, maka arus akan mengalir ke beban R dan amperemeter akan menunjukkan jumlah arus yang mengalir. Suatu rangkaian yang diberi arus dan tegangan akan menghasilkan energi listrik setiap satuan waktu yang disebut daya listrik. Pada rangkaian arus bolak balik (AC), nilai daya listrik, tegangan dan arus akan bervariasi terus menerus sebagai fungsi waktu (“Teori dasar, 2010”). Hubungan nilai-nilai tersebut ditunjukkan pada Persamaan 2.12. berikut ini :

$$P(t) = V(t) \times A(t) \quad (2.12)$$

dengan  $V(t)$  dan  $I(t)$  merupakan tegangan dan arus sesaat sebagai fungsi waktu  $t$ .

Nilai P adalah daya yang secara elektrik bisa diukur. Untuk tenaga listrik nyata yang dikeluarkan oleh arus bolak-balik yang mempunyai sudut fasa  $\varphi^\circ$  dengan tegangan bolak-balik diberikan pada Persamaan 2.13. berikut ini :

$$P = V \cdot A \cdot \cos\varphi \quad (2.13)$$

dengan :

P = daya listrik, [Watt]

V = tegangan, [Volt]

A = kuat arus, [Ampere]

$\cos \varphi$  = faktor kerja = 0,6

Dengan nilai produktivitas ozon yang telah diketahui sebelumnya, maka dapat dihitung besar energi yang dikonsumsi untuk menghasilkan 1 gram ozon dengan menggunakan Persamaan 2.14 berikut :

$$\frac{\text{Energi listrik}}{\text{laju alir massa ozon}} = \frac{(V \cdot A \cdot \cos\varphi) \text{ watt} \cdot \frac{\text{kW}}{1000 \text{ watt}}}{\left(\frac{\text{g}}{\text{hour}}\right)} = \frac{\text{kWh}}{\text{g}} \quad (2.14)$$

Tegangan elektrode dapat dihitung dengan menggunakan perbandingan biasa berdasarkan transformator yang digunakan (masukan 220 V dan keluaran 15.000 V). Perhitungan dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.15 berikut :

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{220}{15.000} \quad (2.15)$$

## BAB 3

### METODE PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan berbagai hal tentang metode penelitian, terutama yang berhubungan dengan rancangan penelitian, peralatan, bahan yang digunakan dalam penelitian, diagram alir penelitian, serta prosedur yang harus dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian.

#### 3.1. Rancangan Penelitian

Dalam penelitian ini akan dilaksanakan beberapa tahapan penelitian, yaitu:

##### 1. Studi Literatur

Pada tahap ini dilakukan studi-studi literatur yang terkait dalam pembuatan ozonator dengan menggunakan metode *corona discharge* dan membuat perbandingan antara desain-desain ozonator yang telah ada.

##### 2. Perancangan Alat

Pada tahap ini dilakukan perancangan alat. Berdasarkan perbandingan desain ozonator yang telah ada, ditentukan faktor apa saja yang mempengaruhi kondisi optimum produktivitas desain ozonator. Kemudian membuat rancangan desain ozonator yang sesuai dengan tujuan yang akan dicapai pada penelitian ini.

##### 3. Persiapan Alat dan Bahan

Menyiapkan alat dan bahan yang diperlukan dalam pembuatan ozonator.

##### 4. Perakitan Ozonator

Ozonator dibuat berdasarkan detail rancangan yang telah dibuat.

## 5. Uji Ozonator

Tahap ini dimulai setelah ozonator selesai dirakit. Tujuan dilakukan tahap ini adalah untuk mengetahui kelayakan ozonator dan memastikan tidak terjadi kebocoran pada ozonator yang telah dibuat.

## 6. Uji Produktivitas Ozonator

Uji produktivitas dilakukan dengan menggunakan metode iodometri. Tahap ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variabel proses terhadap produktivitas ozonator. Variabel proses yang digunakan yaitu:

- Jumlah rangkaian pipa elektrode
- Kapasitas daya
- Laju alir gas umpan
- Jenis gas umpan

## 3.2. Peralatan dan Bahan

### 3.2.1. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas bahan untuk pembuatan ozonator dan bahan untuk pengujian produktivitas ozonator.

#### 3.2.1.1. Bahan untuk pembuatan ozonator

Bahan yang digunakan :

- a. Lem epoksi (Araldite merah dan biru)
- b. Lem silikon

#### 3.2.1.2. Bahan untuk pengujian produktivitas ozonator

Bahan yang digunakan antara lain:

- a. Kalium Iodida (pa), Merck
- b.  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$  (pa), Merck

- c.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (pa), Merck
- d. Indikator amilum
- e. Aquades
- f. Oksigen murni

### 3.2.2. Peralatan Penelitian

Peralatan yang diperlukan dalam penelitian ini terdiri atas peralatan untuk pembuatan ozonator dan peralatan untuk pengujian produktivitas ozonator.

#### 3.2.2.1. Peralatan pembuatan ozonator

Komponen utama dari ozonator ini adalah sebagai berikut :

##### a. Selongsong ozonator (*shell*)

Selongsong yang digunakan terbuat dari bahan *acrylic* dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Ozonator kecil (satu CD-*chamber*)

Panjang : 43 cm

Diameter : 4,53 cm

Tebal : 0,47 cm

- Ozonator besar (lima CD-*chamber*)

Panjang : 43 cm

Diameter : 9,37 cm

Tebal : 0,42 cm

Bentuk alat dapat dilihat pada Gambar 3.1.



**Gambar 3.1.** Pipa akrilik sebagai selubung luar (*shell*) ozonator

b. Elektrode Tegangan Tinggi

Elektrode tegangan tinggi yang digunakan berbentuk pipa kecil yang terbuat dari bahan Stainless Steel AISI-304 (SS-304) dengan salah satu ujungnya disumbat dan ujung lainnya dibiarkan terbuka. Terdapat lubang kecil pada salah satu ujungnya untuk keluaran gas. Spesifikasi elektrode tegangan tinggi adalah sebagai berikut :

- Panjang : 40 cm
- Diameter dalam : 0,78 cm
- Diameter luar : 0,975 cm

Digunakan elektrode dengan spesifikasi yang sama pada kedua tipe ozonator yang akan dibuat. Gambar alat dapat dilihat pada Gambar 3.2.



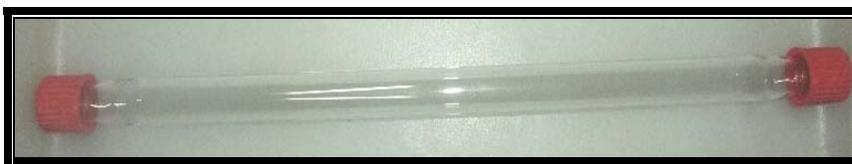
**Gambar 3.2.** Elektrode tegangan tinggi dari bahan SS-304

c. Media Dielektrik (selubung dielektrik)

Media dielektrik yang digunakan berbentuk tubus/pipa selongsong dari bahan gelas borosilikat (DURAN), yang kedua ujungnya dilengkapi dengan tutup-berulir (*screw-cap*) sebagai tempat/penyangga elektrode tegangan tinggi. Kira-kira 3 – 4 cm dari salah satu ujung selubung ini, dibuat dua lubang kecil yang masing-masingnya berdiameter sekitar 3 mm, yang digunakan untuk keluaran gas. Spesifikasi dielektrik adalah sebagai berikut :

- Panjang : 38 cm
- Diameter dalam : 1.15 cm
- Diameter luar : 1,80 cm

Untuk semua ozonator yang dirancang dan digunakan pada penelitian ini, digunakan dielektrik dengan spesifikasi yang sama seperti dapat dilihat pada foto atau gambar 3.3. di bawah ini.

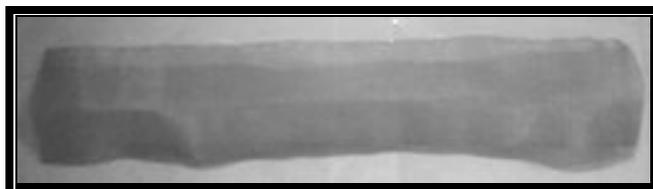


**Gambar 3.3.** Media dielektrik

d. Elektrode Massa

Elektrode massa yang digunakan berbentuk jala dengan diameter sekitar 50 – 60 mesh, yang juga dibuat dari bahan *stainless steel*, yaitu SS-304 juga.

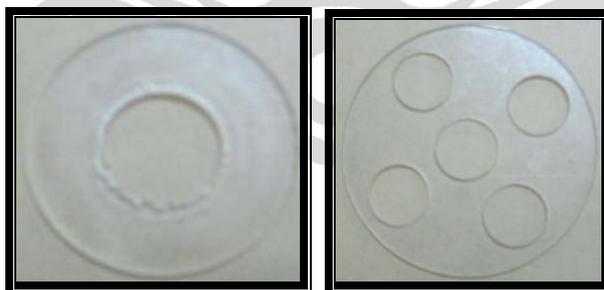
Elektrode ini dibuat sedemikian rupa sehingga dapat menyelimuti media dielektrik (kaca borosilikat). Untuk memperkuat bentuk selongsong dari elektrode massa dan dielektrik digunakan ikatan kawat SS-304 ukuran 0,45 – 0,50 mm . Gambar dari elektrode jala ini dapat dilihat pada Gambar 3.4.



**Gambar 3.4.** Elektrode massa

e. Penyekat

Penyekat yang digunakan terbuat dari bahan akrilik. Penyekat berfungsi untuk mengatur waktu kontak gas di dalam ozonator sehingga reaksi berlangsung optimal. Masing-masing enam penyekat yang dipasang pada tiap ozonator. Gambar alat dapat dilihat pada Gambar 3.5.



**Gambar 3.5.** Penyekat dari bahan akrilik: (a) ozonator 1 CD-chamber dan (b) ozonator 5 CD-chamber

f. Tutup Ozonator

Tutup ozonator yang digunakan terbuat dari bahan teflon. Gambar alat dapat dilihat pada Gambar 3.6.



**Gambar 3.6.** Tutup ozonator

g. *Nipple*

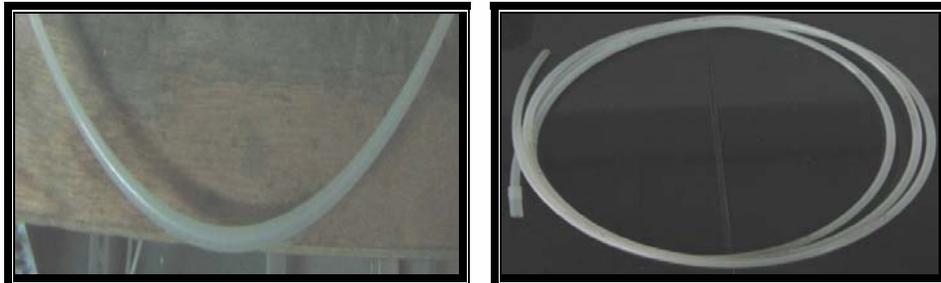
Terdapat dua jenis *nipple* yang digunakan yaitu *nipple* yang terbuat dari plastik yang digunakan pada masukan umpan dan *nipple* yang terbuat dari *stainless steel* 304 yang digunakan pada keluaran produk yang dihasilkan. Keduanya memiliki ukuran ulir yang sama yaitu 0,25 inci. Gambar alat dapat dilihat pada Gambar 3.7.



**Gambar 3.7.** *Nipple*

h. Selang

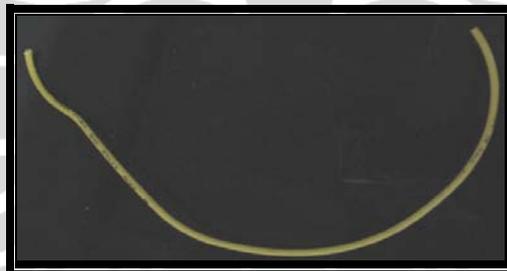
Terdapat dua jenis selang yaitu selang dari bahan silikon dan selang dari bahan *polyurethane*. Gambar alat dapat dilihat pada Gambar 3.8.



**Gambar 3.8.** Selang dari bahan *silicone*

i. Kabel

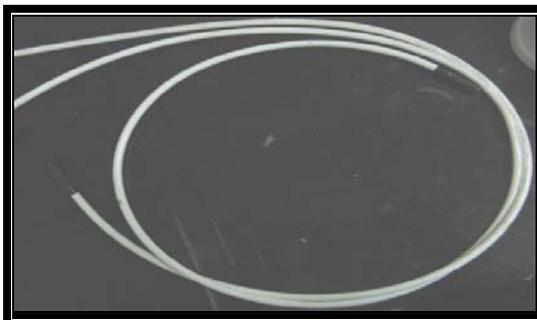
Kabel digunakan untuk menghubungkan arus listrik dari sumber listrik ke voltmeter dan amperemeter. Gambar alat dapat dilihat pada Gambar 3.9.



**Gambar 3.9.** Kabel tegangan listrik (220 VAC)

j. Kabel Tegangan Tinggi

Kabel tegangan tinggi digunakan untuk menghubungkan elektode dalam ozonator dan transformator tegangan tinggi. Gambar alat dapat dilihat pada Gambar 3.10.



**Gambar 3.10.** Kabel tegangan tinggi (di atas 1 kV)

k. Mur dan Baut

Mur dan baut digunakan sebagai kelengkapan komponen. Khusus untuk daerah yang mengalami kontak langsung dengan ozon, digunakan mur dan baut dari bahan *stainless steel* 304. Gambar alat dapat dilihat pada Gambar 3.11.



**Gambar 3.11.** Mur dan baut

l. Regulator tegangan

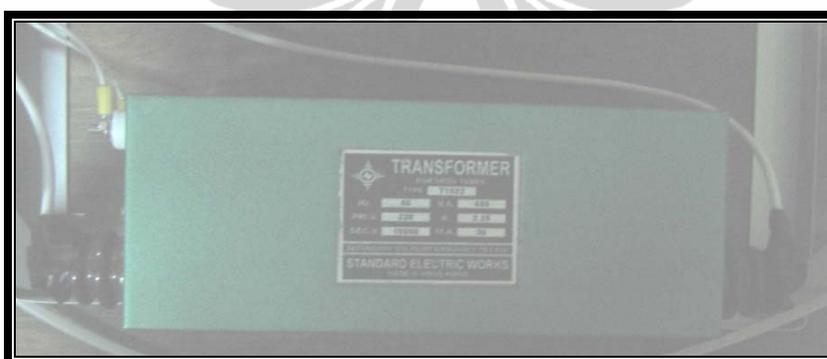
Regulator tegangan berfungsi untuk mengatur tegangan keluaran yang diinginkan agar terjadi pelepasan korona. Spesifikasi alat yang digunakan adalah voltage regulator merek Matsumoto dengan tegangan keluaran antara 0 – 300 V. Gambar alat dapat dilihat pada Gambar 3.12.



**Gambar 3.12.** Pengatur tegangan tegangan ozonator, jenis *Slide-Transformer*

m. Transformator tegangan tinggi

Transformator tegangan tinggi berfungsi untuk menaikkan tegangan sehingga menghasilkan energi yang cukup untuk menghasilkan *corona discharge*. Spesifikasi alat yang dipakai adalah neon sign merek Standard Electric Works Hongkong dengan tegangan masukan 110/220 V dan tegangan keluaran maksimal 15.000 V, frekuensi 50 Hz, daya 450 VA. Gambar alat dapat dilihat pada Gambar 3.13.



**Gambar 3.13.** Trafo tegangan tinggi, jenis NST (*Neon sign transformer*)

n. Voltmeter

Voltmeter digunakan untuk mengukur besar tegangan yang dialirkan ke dalam ozonator. Pemasangan voltmeter dipasang paralel dengan sumber tegangan atau beban karena tahanan dalam voltmeter sangat tinggi. Gambar alat dapat dilihat pada Gambar 3.14.



**Gambar 3.14.** Voltmeter AC

o. Amperemeter

Amperemeter digunakan untuk mengukur besar arus yang mengalir ke dalam rangkaian. Pemasangan alat ukur amperemeter dipasang seri pada rangkaian karena tahanan dalam amperemeter sangat kecil. Gambar alat dapat dilihat pada Gambar 3.15.



**Gambar 3.15.** Amperemeter AC/DC

p. Kawat *stainless steel* AISI-304

Kawat digunakan untuk menguatkan ikatan antara gelas dielektrik dan elektode luar. Selain itu, kawat juga digunakan untuk menghubungkan ozonator dengan sumber listrik.

q. Gunting kawat

Gunting kawat digunakan untuk memotong kawat dan elektode luar sehingga sesuai dengan ukuran yang diinginkan.

r. Plester/penyekat kertas

Penyekat/plester kertas digunakan untuk membantu ikatan elektode luar dan gelas dielektrik sebelum diperkuat dengan kawat.

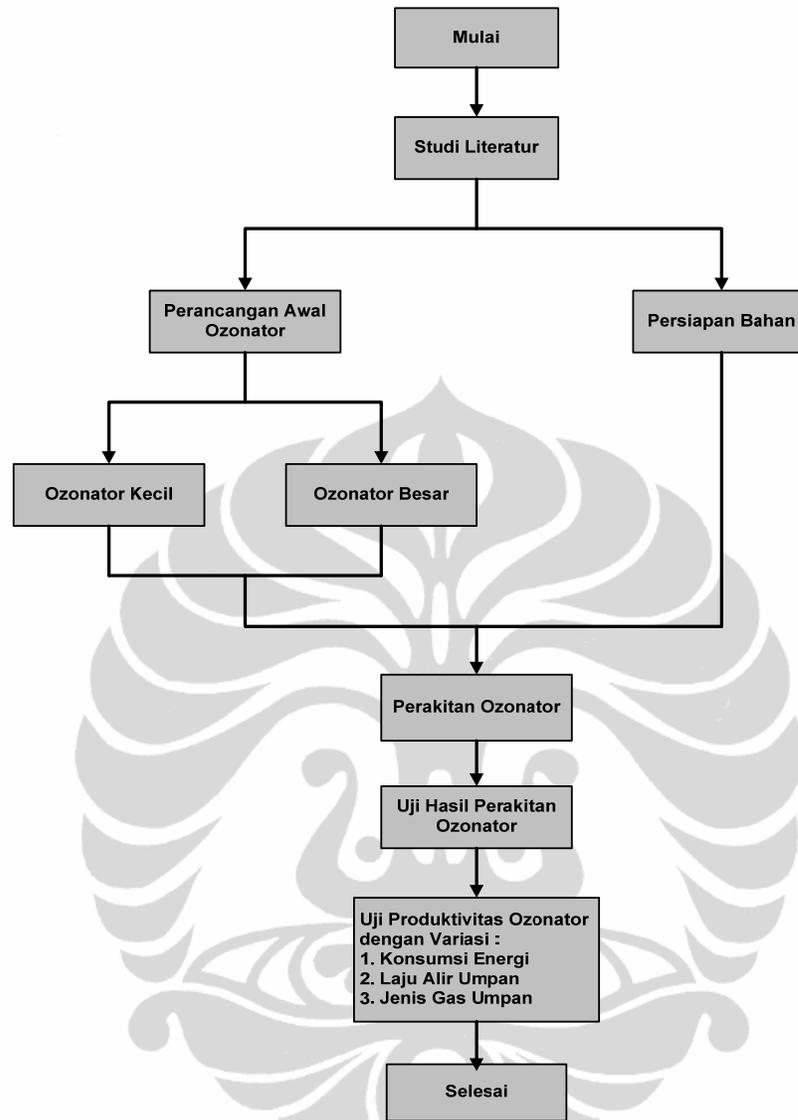
3.2.2.2. Peralatan pengujian produktivitas ozonator

Peralatan yang digunakan untuk pengujian produktivitas ozonator terdiri atas :

- a. Buret 50 cc
- b. Beaker gelas 250 mL, 1000 mL
- c. Statip
- d. Erlenmeyer 500 mL
- e. Botol aquades 250 mL
- f. Stopwatch
- g. Gelas ukur 50 mL
- h. Oksigenator sebagai sumber oksigen

### 3.3. Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada gambar 3.16.



**Gambar 3.16.** Diagram alir penelitian

### 3.4. Prosedur Penelitian

#### 3.4.1. Perancangan dan Konstruksi Ozonator

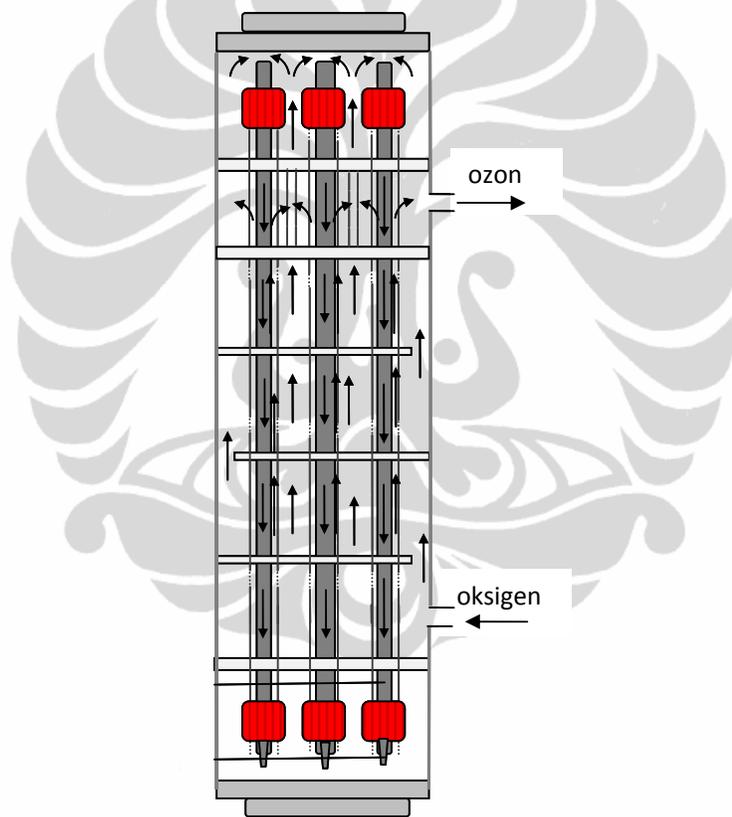
Penelitian ini bertujuan untuk melakukan rancang bangun ozonator dengan biaya instalasi yang murah, konsumsi energi yang minimal/optimal, mudah dan murah pemeliharannya, serta produksi dan atau konversi ozon yang tinggi. Ozonator dalam penelitian ini dirancang berdasarkan metode pembangkitan

plasma ozon secara *dielectric barrier discharge* (DBD) atau yang lebih dikenal sebagai metode *corona discharge* (CD ozonator). Ada dua jenis ozonator yang dibuat dengan variasi besar diameter ozonator berdasarkan jumlah *CD-chamber* di dalamnya yaitu (1) ozonator kecil dengan satu *CD-chamber* dan (2) ozonator besar dengan lima *CD-chamber*.

Ozonator berbentuk tabung dengan pemasangan elektrode massa, media dielektrik, dan elektrode tegangan tinggi yang disusun secara koaksial yaitu berada pada satu sumbu dan searah aliran gas reaktan dan produk. Ozonator tersebut dirancang sedemikian rupa sehingga dapat menggunakan oksigen atau udara sebagai gas reaktan (umpan) dan sekaligus digunakan juga sebagai media pendingin, yang disebut juga *Air-Cooled CD Ozonator*. Aliran gas umpan yang sekaligus berperan sebagai pendingin dalam rangkaian ozonator membentuk pola aliran 3-lewatan (*triple-pass*). Aliran pada lewatan pertama merupakan aliran gas umpan yang melewati sekatan-sekatan pendingin media dielektrik untuk selanjutnya dilewatkan secara berbalik arah menuju ruangan elektrode tegangan tinggi, yang disebut juga sebagai aliran lewatan kedua. Di dalam ruangan elektrode tegangan tinggi inilah terjadi 2 (dua) proses sekaligus, yaitu proses pendinginan elektrode tegangan tinggi oleh gas umpan atau reaktan dan proses pre-plasmanisasi, yaitu proses tahap awal pembentukan ozon melalui tahap plasmanisasi (pemaparan gas umpan dalam medan listrik tegangan tinggi sebelum mengalami reaksi pembentukan ozon). Aliran lewatan ketiga dalam proses ini adalah aliran gas (udara atau oksigen yang telah terpapar medan listrik tegangan tinggi) yang berbalik kembali arahnya untuk menuju ke ruang pembangkitan ozon (*CD-chamber*). Di dalam ruangan *CD-chamber* tersebut terjadilah reaksi pembentukan ozon yang sesungguhnya, yaitu reaksi konversi oksigen menjadi ozon.

Pola atau bentuk aliran *triple-pass* ini membuat panjang lintasan gas umpan/reaktan (sekaligus juga berperan sebagai media pendingin) di sepanjang ruangan reaktor (ozonator) menjadi semakin panjang sehingga diharapkan waktu tinggalnya juga akan semakin besar, dan akibatnya akan diperoleh produksi ozon yang semakin besar pula. Dampak lain dari penggunaan konfigurasi *triple-pass*

adalah fenomena pendinginan elektrode yang lebih baik karena kontak gas yang lebih intensif, sehingga dengan elektrode yang lebih dingin akan dihasilkan ozon yang lebih stabil dan tidak mudah terurai kembali menjadi oksigen. Efek pendinginan tersebut juga sangat menguntungkan dilihat dari konsumsi energi dan umur pemakaian dielektrik ozonator (bahan kaca borosilikat), sehingga tidak mudah pecah karena adanya fenomena pemanasan setempat (*hot spot*). Pada Gambar 3.17. di bawah ini ditunjukkan secara skematis pola-pola aliran gas umpan secara *triple-pass* dalam proses lewatannya menjadi ozon dalam ozonator hasil rancangan.



**Gambar 3.17.** Skematis aliran gas triple pass menjadi ozon dalam ozonator

### 3.4.2. Perakitan ozonator

Tahapan perakitan alat adalah sebagai berikut :

- Persiapan komponen alat

Selongsong ozonator, elektrode massa, elektrode tegangan tinggi, dan kawat dipotong sesuai ukuran yang diinginkan. Penyekat dibuat dan dipersiapkan untuk kedua tipe ozonator yang akan dibuat. Selongsong ozonator dilubangi pada beberapa sentimeter dari ujung atas dan ujung bawah untuk dipasangi *nipple* sebagai tempat masuknya gas umpan dan keluarnya ozon. Selain itu, dibuat juga lubang kecil untuk tempat keluarnya kawat yang akan menghubungkan ozonator dengan sumber listrik tegangan tinggi. Gelas dielektrik dilubangi pada jarak 3 cm dari ujung atas dan elektrode tegangan tinggi dilubangi pada jarak 3 cm dari ujung bawah. Lubang berfungsi sebagai tempat keluar masuknya ozon.

- Pelapisan (penyelimutan) gelas dielektrik oleh elektrode massa

Elektrode massa yang terbuat dari jala *stainless steel* AISI-304 berukuran 60 *mesh* yang dipasang menyelimuti permukaan luar gelas dielektrik. Disisakan 8 cm di bagian atas dan 2 cm di bagian bawah permukaan gelas dielektrik tanpa diselimuti jala. Digunakan plester/penyekat kertas untuk membantu agar supaya gelas dielektrik dapat terselimuti dengan jala untuk sementara.

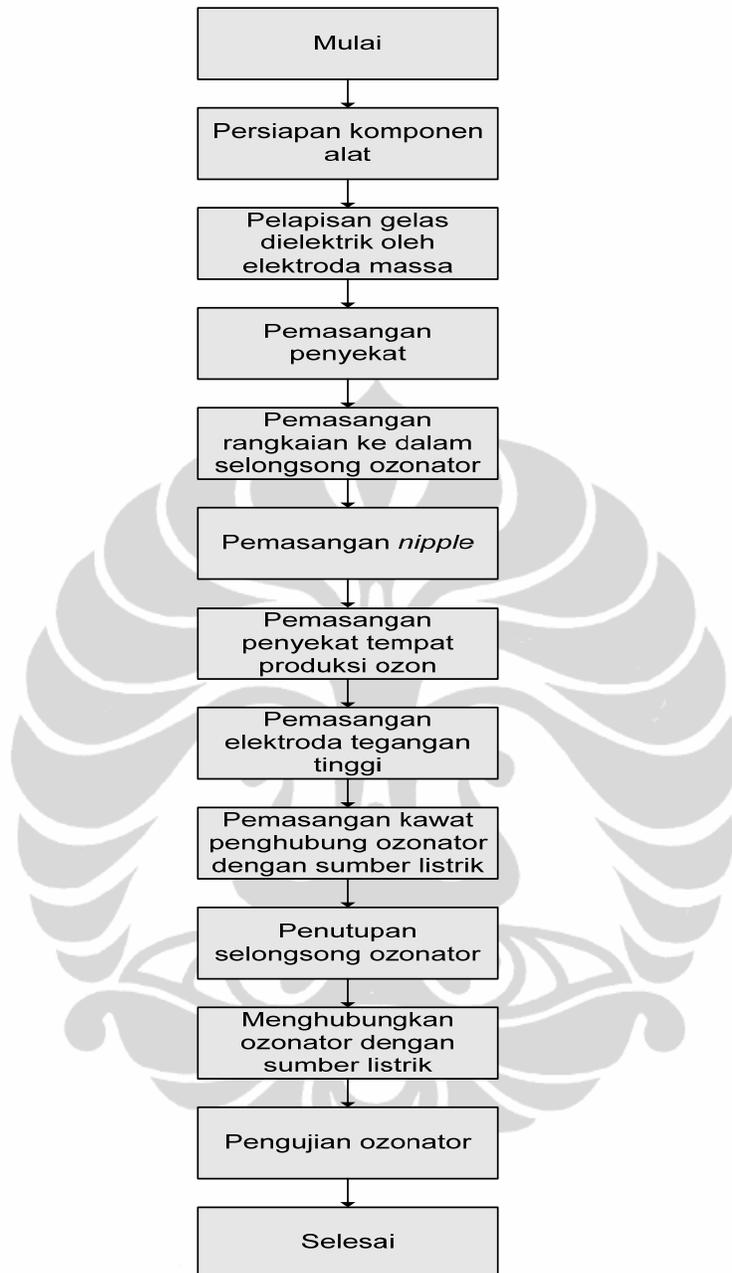
- Pemasangan penyekat

Lima penyekat dipasang pada gelas dielektrik yang telah diselimuti jala elektrode massa. Digunakan lem epoksi untuk menempelkan penyekat pada rangkaian dielektrik dan jala. Empat penyekat dari bawah dipotong beberapa cm di salah satu tepinya, dan dipasang berselang-seling pada gelas dielektrik. Modifikasi pemasangan ini berfungsi untuk mengatur agar supaya sirkulasi gas yang merupakan reaktan dan juga sebagai media pendingin berlangsung dengan merata. Kemudian plester/penyekat kertas digantikan dengan kawat *stainless steel* AISI-304 untuk menguatkan ikatan antara gelas dielektrik dan jala.

- Pemasangan rangkaian ke dalam selongsong ozonator  
Rangkaian yang telah dipasang penyekat kemudian dimasukkan ke dalam selongsong ozonator. Digunakan juga lem epoksi untuk menempelkan rangkaian ke dinding selongsong ozonator (tabung akrilik polikarbonat).
- Pemasangan *nipple*  
Selongsong yang telah diisi rangkaian elektode kemudian dipasang *nipple* pada kedua ujungnya. *Nipple* plastik dipasang pada aliran gas masuk, sedangkan *nipple stainless steel* AISI-316 dipasang pada aliran produk.
- Pemasangan penyekat tempat produksi ozon  
Setelah rangkaian telah tertempel pada selongsong ozonator dengan baik, maka dilakukan pemasangan penyekat tempat produksi ozon. Dua penyekat paling atas membentuk ruang kecil yang terisolasi dengan ruangan-ruangan lainnya yang dalam hal ini berfungsi sebagai tempat keluaran dari ozon produk (dan yang bercampur dengan umpan/reaktan).
- Pemasangan elektrode tegangan tinggi  
Elektrode tegangan tinggi kemudian dimasukkan ke dalam gelas dielektrik, sedemikian rupa sehingga gelas dielektrik dan elektrode tegangan tinggi berada pada satu sumbu. Sebagai pengatur jarak digunakan lembaran silikon yang terdapat pada penutup gelas dielektrik.
- Pemasangan kawat penghubung ozonator dengan sumber listrik  
Terdapat dua kawat yang akan menghubungkan ozonator dengan sumber listrik tegangan tinggi. Satu kawat dililitkan pada elektrode massa, kemudian dikeluarkan melalui saluran/lubang tempat keluarnya kawat pada selongsong ozonator. Satu kawat lainnya dipasang pada elektrode tegangan tinggi. Kawat pada elektrode tegangan tinggi dipasang pada salah satu ujung elektrode yang tertutup, kemudian dikeluarkan melalui lubang tempat keluarnya kawat pada tabung/selongsong ozonator.

- Penutupan selongsong ozonator  
Setelah semua kelengkapan dan rangkaian lainnya terpasang dengan baik dalam selongsong ozonator, maka selongsong kemudian ditutup dengan penutup ozonator. Digunakan lem silikon untuk membuat agar ozonator tertutup rapat. Hal ini dilakukan untuk mencegah kebocoran.
- Menghubungkan ozonator dengan sumber listrik  
Kawat penghubung elektode tegangan tinggi dan elektrode massa dihubungkan ke sumber listrik tegangan tinggi yang berasal dari NST (*Neon-Sign Transformer*). Pada penelitian ini digunakan sumber listrik dari PLN sebesar 220 VAC untuk kemudian dinaikkan tegangannya sampai sekitar 12 – 15 KV melalui NST. Regulator tegangan digunakan untuk mengatur agar tegangan tinggi yang dihasilkan NST dapat sesuai dengan yang diinginkan dalam ruangan CD-Ozonator. Amperemeter dan voltmeter dipasang untuk mengukur tegangan dan nilai arus yang dikonsumsi oleh ozonator.
- Pengujian ozonator  
Ozonator yang telah terhubung dengan sumber listrik tegangan tinggi dari NST kemudian diuji pada variasi tegangan masukan dan laju alir gas umpan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui kondisi rangkaian.

Diagram alir perakitan ozonator dapat dilihat pada Gambar 3.18. berikut ini:



**Gambar 3.18.** Diagram alir proses perakitan ozonator

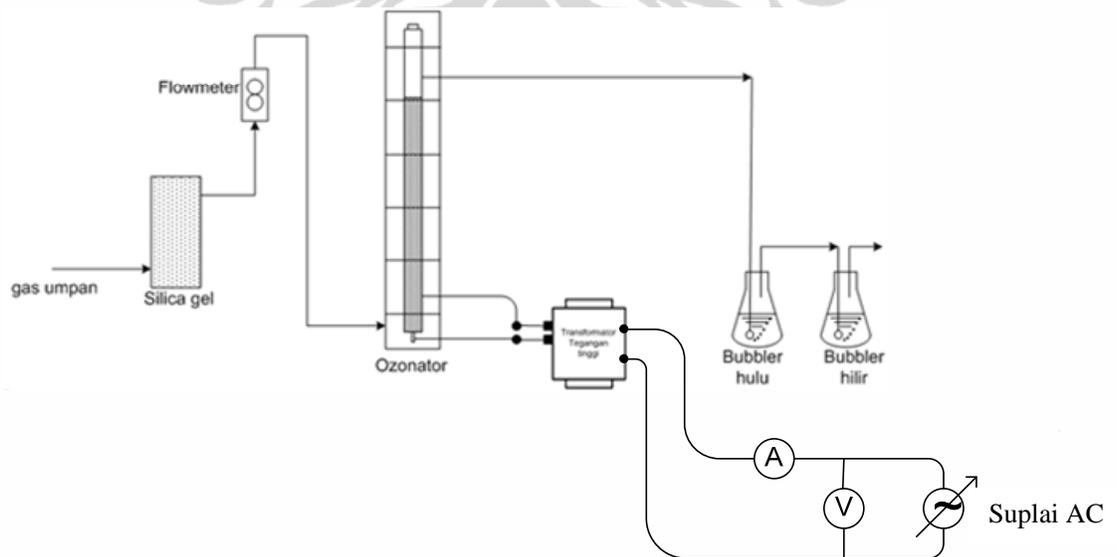
### 3.4.3. Pengujian produktivitas ozonator

Pengujian produktivitas ozonator yang dihasilkan akan diuji dengan menggunakan metode iodometri. Tahap pengujian produktivitas ozonator adalah sebagai berikut:

- Membuat larutan  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$  (0,005 N) dengan melarutkan 0,62 gram  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$  ke dalam 1.000 mL aquades
- Membuat larutan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (2 N) dengan mengencerkan 14 mL  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pekat (18 N) dengan penambahan aquades sedemikian rupa sehingga diperoleh larutan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (2 N) sebanyak 250 mL.
- Menyiapkan indikator larutan amilum 1% dengan melarutkan 1 gr amilum dengan aquades hingga volumenya 100 mL.
- Membuat larutan KI (0,12 N) dengan melarutkan 20 gram KI dengan aquades hingga volumenya 1000 mL.
- Memasukkan larutan KI ke dalam *gas washing bottle (bubbler)* 500 mL yang terdiri dari bagian hulu dan bagian hilir masing-masing sebanyak 200 mL.
- Mengalirkan gas umpan yang sudah mengalami pengeringan dengan *silica gel* terlebih dahulu menuju ozonator dan keluaran ozonator mengalir menuju *bubbler* hulu dan hilir.
- Mengalirkan variasi tegangan-arus (daya) dan laju alir udara sebagai umpan.
- Mencatat nilai tegangan masukan ke transformator yang terbaca pada nilai voltase yang terbaca pada keluaran regulator tegangan dan kuat arus yang terbaca pada amperemeter.
- Mencatat waktu proses yang dibutuhkan sehingga larutan KI pada bagian hilir dapat berubah warna menjadi kuning muda (pucat).
- Mengambil sampel untuk dititrasi dengan larutan  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$  (0,005 N), sekaligus juga penghentian pembentukan ozon, yaitu ketika warna larutan KI pada bagian hilir yang semula bening berubah warna menjadi kuning muda kecoklatan.

- Sebelum dititrasi, ke dalam sampel terlebih dahulu ditambahkan 10 mL larutan  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (2 N) dan indikator amilum sehingga sampel berwarna biru tua yang menandakan adanya  $\text{I}_2$  dalam sampel.
- Melakukan titrasi sampel dengan larutan  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$  (0,005 N) dan menghentikan titrasi ketika sampel yang berwarna biru tua tepat berubah warna menjadi bening.
- Mengulang dan melakukan hal yang sama pada bagian hilir.
- Mencatat volume titrasi pada bagian hulu dan hilir.
- Menghitung konsentrasi ozon yang terlarut pada masing-masing *bubbler*, kemudian dijumlahkan.
- Menghitung produktivitas ozon.

Skema rangkaian pengujian produktivitas alat ozonator hasil rancangan yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 3.19 berikut ini:



**Gambar 3.19.** Skema rangkaian alat pengujian produktivitas ozonator

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil pengujian serta analisis kinerja alat yang telah dirancang-bangun dalam penelitian ini. Pengujian kinerja dilakukan untuk mengetahui apakah alat yang telah dirancang dapat berfungsi dengan baik dan memenuhi tujuan penelitian ini yaitu untuk memperoleh ozonator dengan biaya instalasi yang murah, konsumsi energi yang minimal, pemeliharaan yang mudah dan produktivitas ozon yang tinggi.

#### 4.1. Spesifikasi Rancang Bangun

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan rancang-bangun ozonator dengan biaya instalasi yang murah, konsumsi energi yang minimal, pemeliharaan yang mudah dan produktivitas ozon yang tinggi. Seperti telah diuraikan pada Bab III sebelumnya, ozonator yang dirancang-bangun adalah menggunakan prinsip reaktor plasma non-termal DBD (*dielectric barrier discharge*) atau dikenal juga sebagai metode *corona discharge* untuk pembentukan ozon. Ozonator tersusun atas elektrode massa yang terbuat dari jala *stainless steel* AISI-316 berukuran 60 mesh yang dibuat sedemikian rupa sehingga dapat menyelimuti media dielektrik yang terbuat dari gelas. Elektrode tegangan tinggi merupakan batang *stainless steel* AISI-304 yang dipasang secara koaksial di dalam gelas dielektrik. Konstruksi ini membentuk jarak loncatan plasma bunga api (*discharge gap*) pada ruangan tempat terjadinya reaksi oksigen menjadi ozon. *Discharge gap* terbentuk di dalam ruang di antara gelas dielektrik dan elektrode tegangan tinggi. Produktivitas ozonator dioptimalisasikan, dalam hal ini dipendekkan jaraknya sedemikian rupa sehingga tegangan plasma yang diperlukan untuk proses plasmanisasi menjadi lebih kecil, yaitu dengan mengatur lebar *discharge gap* sebesar 0,175 cm. Keuntungan lain dari optimalisasi jarak *discharge gap*, di antaranya adalah: (a). *discharge gap* yang optimum juga akan mempengaruhi waktu (konversi) terjadinya reaksi oksigen menjadi ozon, (b). tegangan yang optimal akan membuat suhu dielektrik lebih dingin sedemikian rupa sehingga energi yang terbuang dapat

diminimisasi, dan (c). dielektrik yang lebih dingin akan membuat umurnya menjadi lebih panjang sehingga perawatannya akan menjadi lebih murah.

#### 4.2. Ozonator Hasil Rancang Bangun

Gambar 4.1. adalah gambar hasil rancang bangun ozonator yang dibuat pada penelitian ini (a) adalah gambar ozonator kecil dengan satu CD-chamber dan (b) adalah gambar ozonator besar dengan lima CD-chamber yang dipasang paralel.



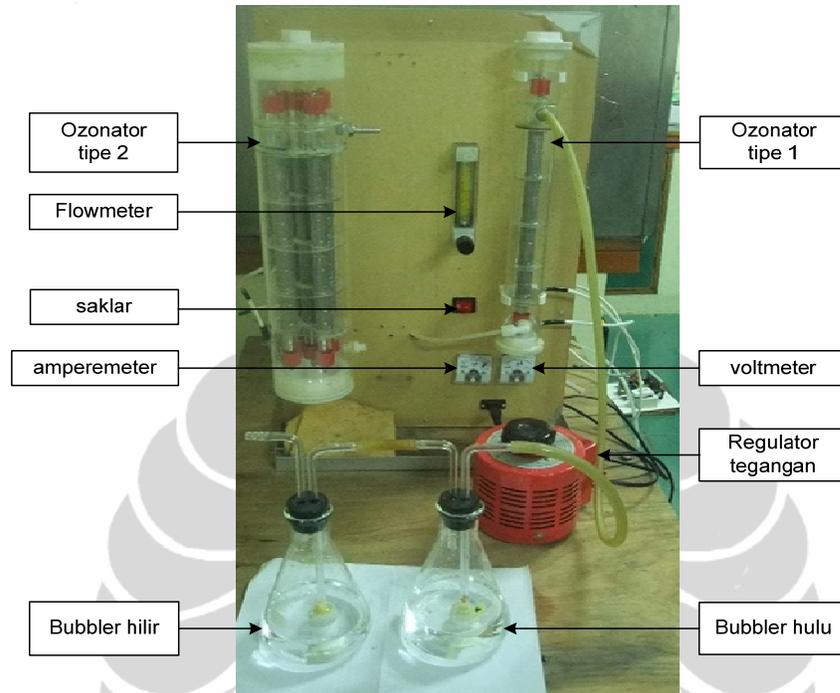
(a)

(b)

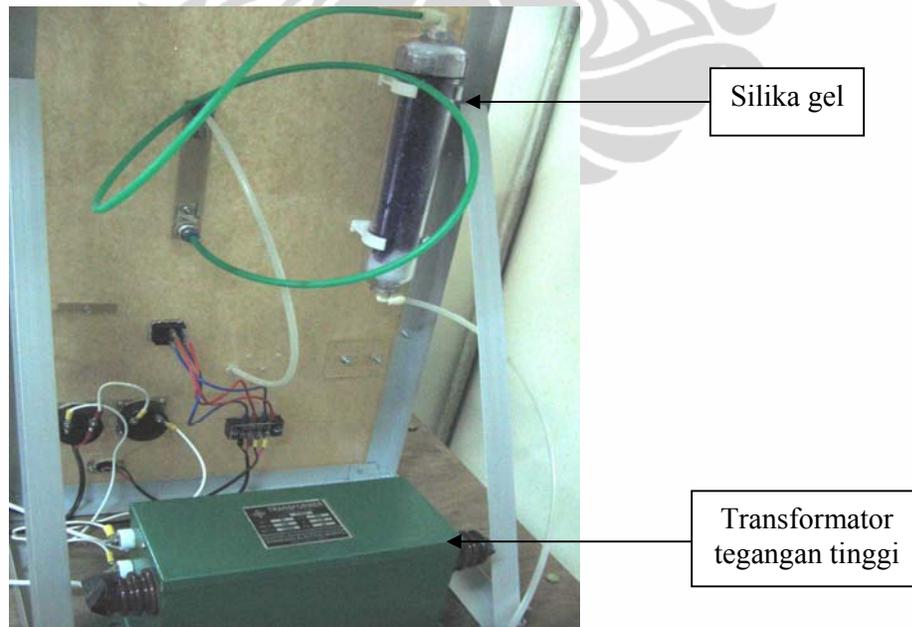
**Gambar 4.1.** Ozonator hasil rancang bangun (a) ozonator kecil, dan (b) ozonator besar

Gambar 4.2. dan Gambar 4.3 berikut ini adalah gambar rangkaian alat pengujian produktivitas ozonator. Gambar 4.2. adalah gambar rangkaian alat yang

terdapat pada bagian depan panel dan Gambar 4.3. adalah gambar rangkaian alat yang terdapat pada bagian belakang panel.



**Gambar 4.2.** Gambar rangkaian alat pengujian produktivitas ozonator yang terdapat pada bagian depan panel



**Gambar 4.3.** Gambar rangkaian alat pengujian produktivitas ozonator yang terdapat pada bagian belakang panel

### 4.3. Data Percobaan

Data yang diambil dalam percobaan ini ada empat yaitu :

- a. Waktu yang dibutuhkan larutan KI pada *bubbler* di bagian hilir untuk berubah warna dari bening menjadi kuning muda, yang menunjukkan adanya sisa ozon dari *bubbler* di bagian hulu yang mengoksidasi larutan KI di dalam *bubbler* bagian hilir.
- b. Jumlah volume larutan  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  yang dibutuhkan sebagai penitrasi larutan KI (baik di bagian hulu maupun di bagian hilir) yang telah teroksidasi oleh ozon. Dengan mengetahui volume larutan  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  yang diperlukan untuk titrasi tersebut, maka akan diketahui banyaknya ozon yang diproduksi.
- c. Nilai arus dalam ampere yang ditunjukkan amperemeter pada setiap percobaan yang menunjukkan besarnya konsumsi energi yang dibutuhkan.
- d. Nilai tegangan dalam Volt AC yang ditunjukkan voltmeter pada setiap percobaan.

Data diperoleh dengan cara melakukan variasi kondisi operasi yaitu variasi laju alir umpan dan variasi tegangan transformator, yang kemudian digunakan untuk pengolahan data produktivitas ozonator.

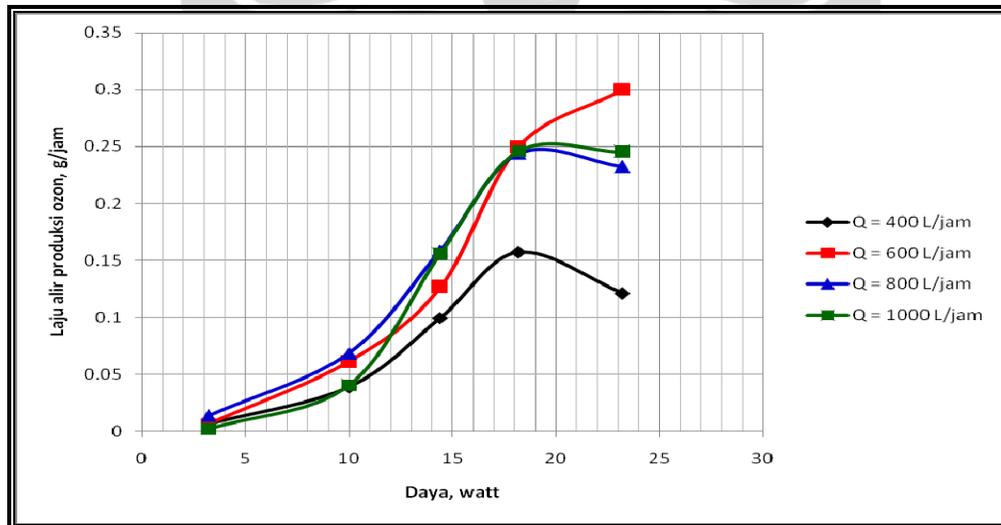
### 4.4. Pengujian Kinerja Produksi Ozonator

Dalam penelitian ini akan dilakukan uji kinerja produksi ozon dari ozonator hasil rancangan pada variasi laju alir gas umpan, variasi tegangan masukan transformator, dan variasi jenis gas umpan. Kedua jenis ukuran ozonator hasil rancang-bangun diuji dengan menggunakan variasi laju alir gas umpan dan variasi tegangan yang sama. Hal ini dilakukan untuk membandingkan kinerja kedua ozonator yang berbeda ukuran dan kapasitas tersebut. Dari hasil uji kinerja tersebut, kemudian ditentukan kondisi optimum kedua ozonator. Selanjutnya

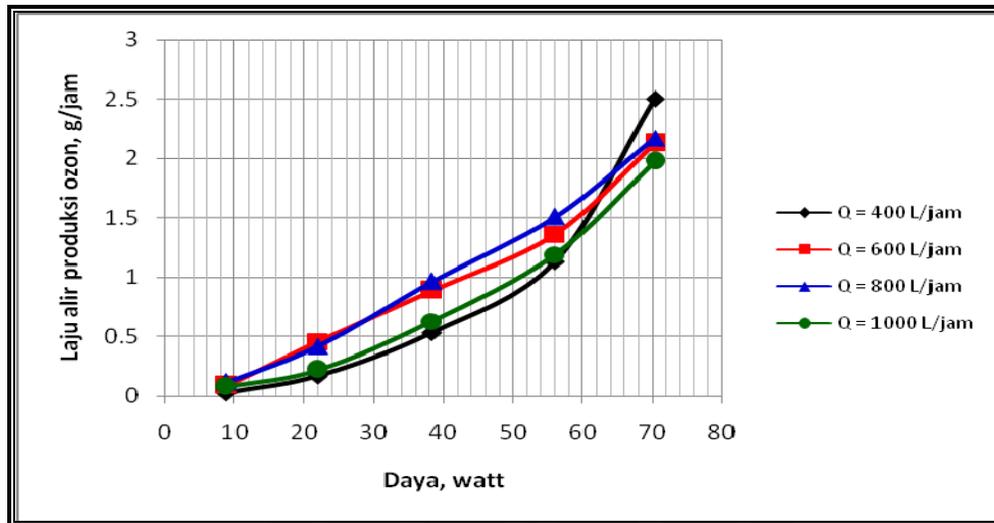
dilakukan uji kinerja produksi ozon pada ozonator besar dengan menggunakan variasi jenis gas umpan yaitu udara kompresor, oksigen murni, oksigen hasil pengayaan dengan proses adsorpsi, dan oksigen hasil pengayaan dengan menggunakan membran RO (reverse osmosis). Seperti yang telah dilakukan pada penelitian-penelitian sebelumnya, produksi ozon ditentukan dengan menggunakan metode titrasi iodometri. Langkah-langkah, contoh perhitungan produktivitas ozonator dan data produktivitas selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 1.

#### 4.4.1. Pengaruh Kapasitas Daya terhadap Produktivitas Ozonator

Gambar 4.4. menunjukkan grafik produktivitas ozonator kecil sebagai fungsi besar kapasitas daya dan Gambar 4.5. menunjukkan grafik produktivitas ozonator besar sebagai fungsi besar kapasitas daya.



**Gambar 4.4.** Grafik kinerja produktivitas ozonator kecil sebagai fungsi besar kapasitas daya



**Gambar 4.5.** Grafik kinerja produktivitas ozonator besar sebagai fungsi besar kapasitas daya

Dari Gambar 4.4. dan Gambar 4.5. di atas dapat dilihat kecenderungannya bahwa semakin besar kapasitas daya yang diberikan pada aliran ozonator, maka produktivitas ozonator akan semakin meningkat. Kapasitas daya yang tinggi menunjukkan bahwa tegangan pada elektrode juga tinggi. Tegangan elektrode yang tinggi akan mengakibatkan medan listrik di antara kedua elektrode meningkat sehingga peristiwa pelepasan korona pada *discharge gap* terjadi lebih cepat yang mengakibatkan molekul oksigen yang mengalir di dalam *discharge gap* akan segera terionisasi menjadi atom-atom dan atau radikal-radikal oksigen. Adanya pengaruh medan listrik yang tinggi mengakibatkan peningkatan laju tumbukan atom oksigen dengan molekul oksigen yang terdapat di dalam *discharge gap* sedemikian rupa sehingga proses plasmanisasi tersebut mengakibatkan semakin besar ozon yang terbentuk. Reaksi pembentukan ozon yang terjadi adalah sebagai berikut :



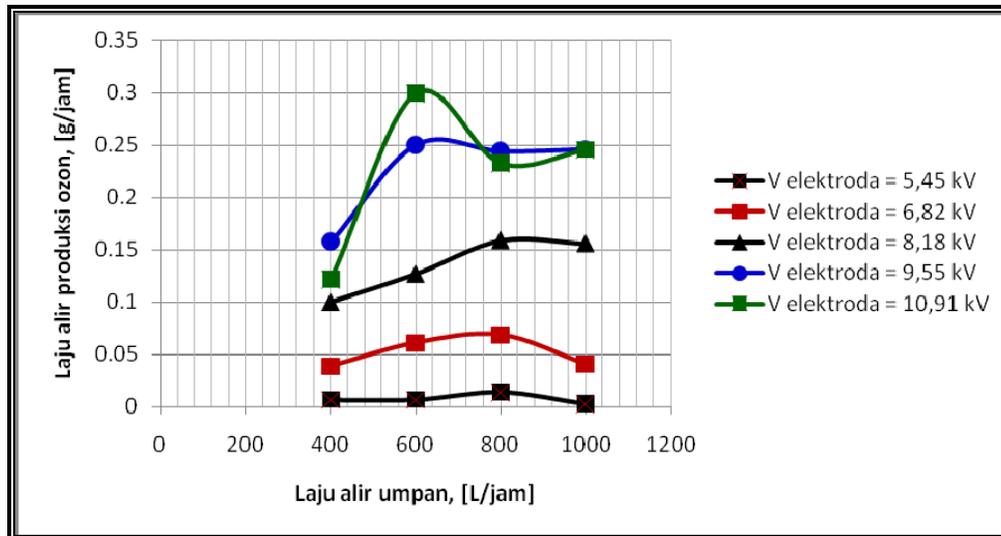
Pada Gambar 4.4. terlihat bahwa pada kapasitas daya sebesar 10,92 Watt, produktivitas ozonator kecil berada pada kondisi puncak dan kemudian mengalami penurunan di titik berikutnya. Fenomena serupa tidak terjadi pada ozonator besar yang menunjukkan kenaikan produksi ozon yang sebanding dengan peningkatan kapasitas daya. Anomali pada ozonator kecil disebabkan oleh terjadinya dekomposisi ozon menjadi oksigen pada suhu tinggi. Selain itu, ruang pembentukan *discharge gap* yang kecil pada ozonator kecil menjadikan proses pendinginan yang terjadi tidak seefisien dengan proses pendinginan pada ozonator besar. Kapasitas daya yang tinggi menunjukkan bahwa arus listrik yang mengalir dalam ozonator juga tinggi. Sebagian arus listrik yang mengalir berubah menjadi energi panas yang menyebabkan suhu dalam ozonator meningkat. Udara yang digunakan sebagai gas umpan dan juga sebagai pendingin tidak dapat memenuhi kebutuhan pendinginan ozonator kecil. Adanya peningkatan suhu dalam ozonator menyebabkan terjadinya dekomposisi ozon menjadi oksigen kembali, sehingga produksi ozon yang dihasilkan akan mengalami penurunan. Reaksi dekomposisi ozon yang terjadi adalah sebagai berikut :



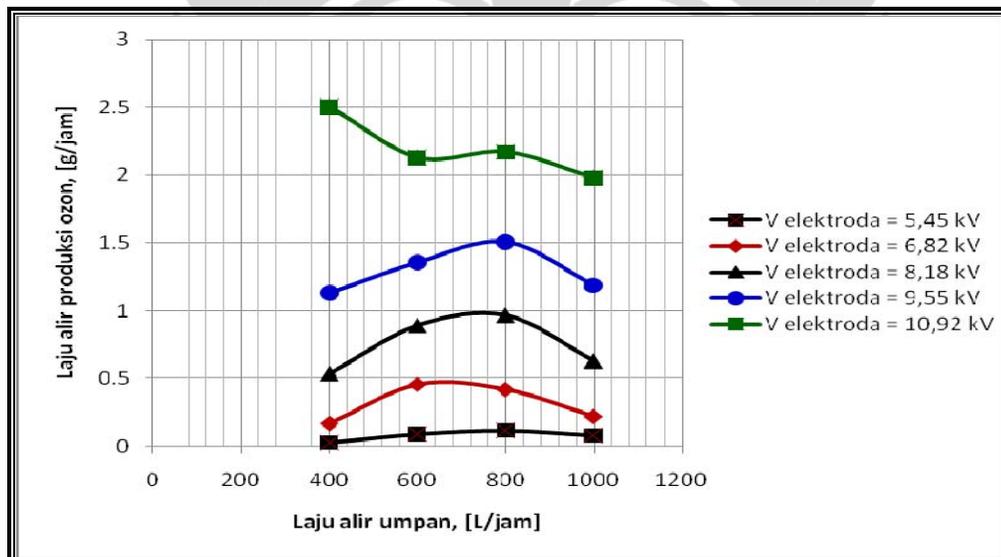
Berdasarkan hasil perhitungan produktivitas ozonator yang ditunjukkan pada Gambar 4.4. dan Gambar 4.5. diketahui bahwa ozonator kecil menghasilkan produksi ozon yang maksimal pada kapasitas daya sebesar 10,92 watt atau pada tegangan elektrode sebesar 9,55 kV, dan kondisi maksimal ozonator besar adalah pada konsumsi daya sebesar 42,24 watt atau pada tegangan elektrode sebesar 10,91 kV.

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

Gambar 4.6. menunjukkan grafik produktivitas ozonator kecil sebagai fungsi laju alir umpan dan pada Gambar 4.7. ditunjukkan grafik produktivitas ozonator besar sebagai fungsi laju alir umpan.



**Gambar 4.6.** Grafik produktivitas ozonator kecil sebagai fungsi laju alir umpan



**Gambar 4.7.** Grafik produktivitas ozonator besar sebagai fungsi laju alir umpan

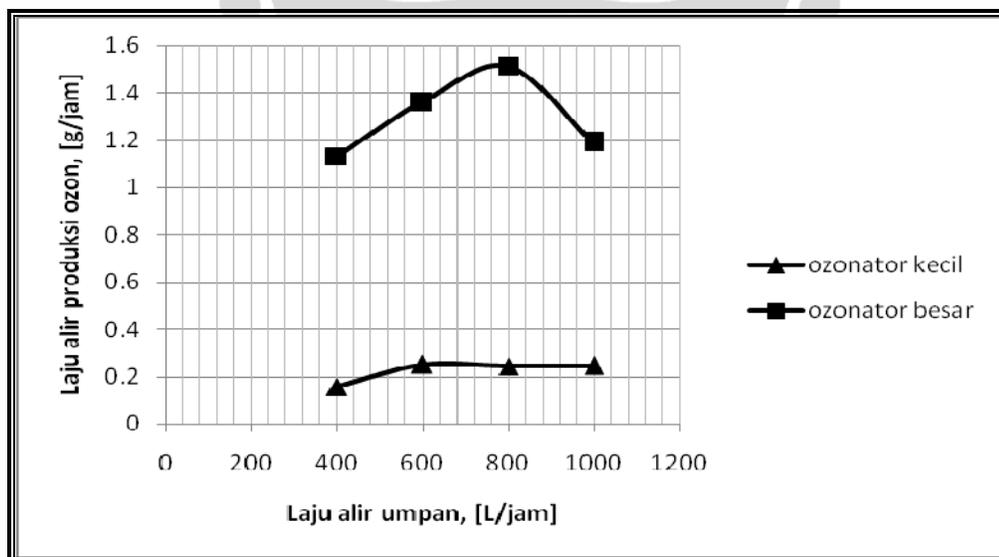
Dari Gambar 4.6. dan Gambar 4.7. di atas, terlihat bahwa produktivitas kedua ozonator mencapai kondisi maksimum pada laju alir 800 L/jam dan kemudian produktivitasnya menurun ketika laju alir diperbesar menjadi 1.000 L/jam. Fenomena tersebut dapat terjadi karena waktu tinggal oksigen di dalam *discharge gap* sebagai tempat terjadinya reaksi plasmanisasi sekaligus sebagai

tempat reaksi pembentukan molekul-molekul ozon menjadi lebih kecil. Laju alir gas umpan yang lebih besar akan menyebabkan aliran gas umpan yang masuk akan mendesak keluar oksigen yang belum bereaksi menjadi ozon di dalam *discharge gap*.

Selain itu, jarak yang dilalui ozon dari sejak oksigen terkonversi menjadi ozon hingga mencapai larutan KI yang berfungsi untuk mengikat ozon, juga menentukan jumlah produksi ozon. Jarak lintasan ozon yang terlalu jauh akan menyebabkan sebagian ozon yang terbentuk akan terdekomposisi kembali menjadi oksigen. Jarak lintasan ozon ini ditunjukkan oleh panjang selang silikon yang dipasang pada lubang keluaran ozon hingga mencapai larutan KI. Oleh karena itu, diambil panjang selang optimum sepanjang 1 meter.

#### 4.4.3. Pengaruh Jumlah Rangkaian Elektrode terhadap Produktivitas Ozonator

Pada Gambar 4.8. di bawah ini disajikan tentang grafik produktivitas ozonator kecil dibandingkan dengan produktivitas ozonator besar. Data yang diambil adalah data pada tegangan elektrode sebesar 9,55 kV, karena pada besar tegangan ini, produksi ozon kedua ozonator belum mengalami fase dekomposisi.

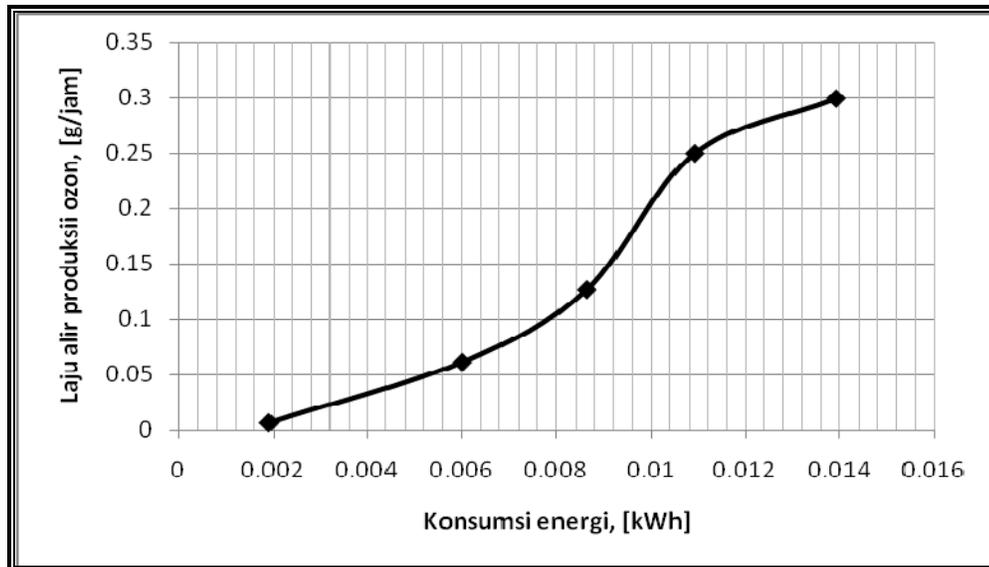


**Gambar 4.8.** Grafik perbandingan produktivitas ozonator kecil dan ozonator besar pada variasi laju alir umpan

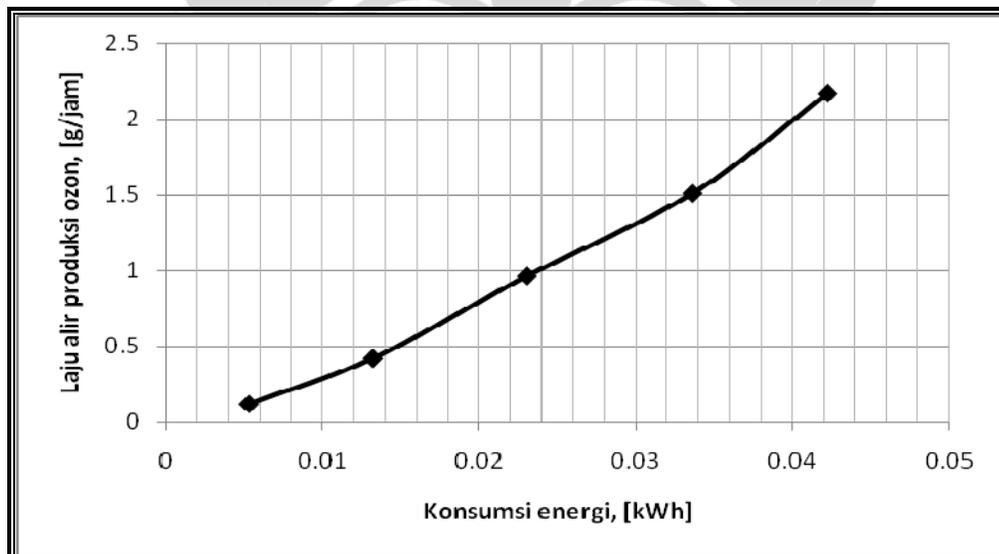
Dari hasil perbandingan yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa ozonator besar dapat menghasilkan ozon lebih banyak dibandingkan dengan ozonator kecil. Apabila diambil nilai rata-rata produksi ozonator besar dibandingkan dengan ozonator kecil, maka diperoleh kesimpulan bahwa ozonator besar dapat memproduksi ozon 6 kali lebih banyak dibanding ozonator kecil. Hal ini disebabkan karena pada ozonator besar terdapat 5 rangkaian elektrode yang merupakan tempat terjadinya reaksi, sehingga volume *discharge gap* sebagai tempat terjadinya reaksi pembentukan ozon lebih besar, pada laju alir yang sama waktu tinggal oksigen dalam *discharge gap* lebih lama, sehingga oksigen yang bereaksi menjadi ozon akan lebih banyak terbentuk. Oleh karena itu, dengan nilai tegangan elektrode dan laju alir yang sama, diperoleh ozon yang lebih banyak di ozonator besar. Selain itu, dari hasil perhitungan diketahui bahwa dengan tegangan masukan yang sama, ozonator besar mengkonsumsi energi lebih kecil untuk menghasilkan 1 gram ozon dibandingkan dengan ozonator kecil.

#### 4.4.4. Pengaruh Produktivitas Ozonator terhadap Konsumsi Energi

Gambar 4.9. menunjukkan grafik konsumsi energi ozonator kecil sebagai fungsi produksi ozon. Data diambil pada laju alir maksimum ozonator kecil yaitu pada  $Q = 600$  L/jam dengan variasi tegangan. Gambar 4.10. menunjukkan grafik konsumsi energi ozonator besar sebagai fungsi produksi ozon. Data diambil pada laju alir maksimum ozonator besar yaitu pada  $Q = 800$  L/jam dengan variasi tegangan.



**Gambar 4.9.** Grafik konsumsi energi ozonator kecil sebagai fungsi produksi ozon



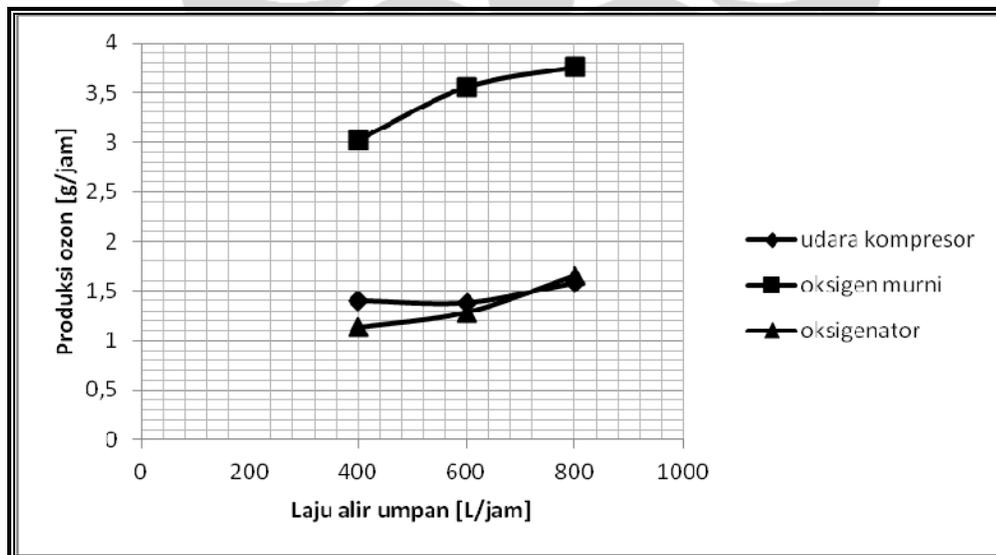
**Gambar 4.10.** Grafik konsumsi energi ozonator besar sebagai fungsi produksi ozon

Dari Gambar 4.9. dan 4.10 di atas terlihat bahwa semakin besar ozon yang dihasilkan maka energi yang dikonsumsi akan semakin meningkat. Ozon terbentuk dari reaksi antara senyawa oksigen dan atom-atom oksigen. Ozon merupakan hasil reaksi antara senyawa oksigen dengan atom oksigen hasil ionisasi. Ionisasi oksigen terjadi akibat peningkatan medan listrik antara elektrode

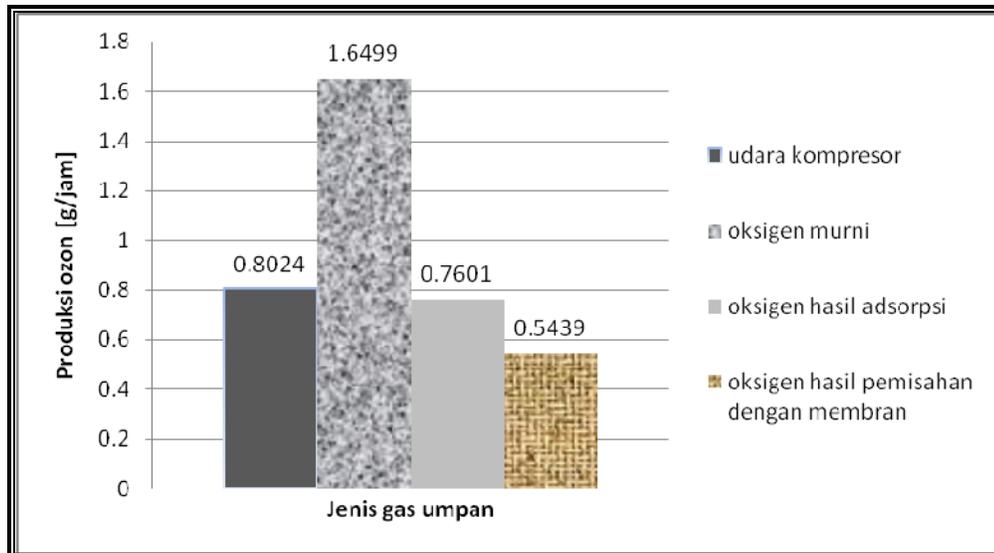
yang menyebabkan terjadi pelepasan korona. Semakin besar oksigen yang akan terionisasi hingga akhirnya bereaksi menjadi ozon, maka semakin besar energi yang dibutuhkan untuk meningkatkan medan listrik antara elektrode. .

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

Gambar 4.11. menunjukkan grafik produktivitas ozonator tipe 2 sebagai fungsi laju alir gas umpan. Pengujian dilakukan pada tegangan elektrode optimum yaitu sebesar 10,91 kV dengan variasi laju alir 400 L/jam, 600 L/jam, dan 800 L/jam. Ada tiga jenis gas umpan yang digunakan yaitu udara yang berasal dari kompresor, oksigen murni, dan oksigen hasil pemisahan oleh oksigenator.



**Gambar 4.11.** Grafik produktivitas ozonator besar sebagai fungsi laju alir gas umpan dengan variasi jenis gas umpan



**Gambar 4.12.** Grafik produktivitas ozonator besar dengan variasi jenis gas umpan

Dari grafik pada Gambar 4.11. di atas dapat dilihat bahwa produktivitas ozonator dengan menggunakan oksigen murni sebagai gas umpan lebih besar dibandingkan dengan produktivitas ozonator jika menggunakan udara sebagai gas umpan. Hal ini diakibatkan oleh semakin tingginya kadar oksigen dalam gas umpan sehingga akan semakin banyak ozon yang dihasilkan. Kadar oksigen dalam udara hanya sebesar 21% volume dan sisanya adalah nitrogen sebesar 79% sedangkan kadar oksigen dalam oksigen murni sebesar 99%. Oleh karena itu, pada kondisi operasi yang sama, produktivitas ozonator lebih besar apabila menggunakan oksigen murni sebagai gas umpan dibandingkan dengan proses yang menggunakan udara sebagai gas umpan.

Selain oksigen murni dan udara, juga digunakan gas umpan oksigen hasil pemisahan melalui proses adsorpsi yang terjadi dalam oksigenator (*oxygen generator*). Seharusnya oksigen yang dihasilkan dari hasil pemisahan oleh oksigenator memiliki kemurnian lebih tinggi dari 21% sehingga diharapkan produktivitas ozonator akan meningkat apabila menggunakan umpan oksigen hasil pemisahan oleh oksigenator. Akan tetapi dari Gambar 4.11. terlihat bahwa produktivitas ozonator ketika menggunakan umpan oksigen hasil pemisahan oksigenator hampir sama dengan produktivitas ozonator ketika menggunakan udara sebagai gas umpan. Hal ini disebabkan karena adanya kerusakan pada alat

oksigenator. Kemampuan adsorben untuk mengadsorpsi nitrogen dalam kolom adsorpsi menurun sehingga kemurnian oksigen yang dihasilkan juga menurun bahkan hampir sama dengan udara yang berasal dari udara umpan kompresor.

Gambar 4.12. menunjukkan grafik produktivitas ozonator tipe 2 variasi jenis gas umpan. Pengujian dilakukan pada tegangan elektrode optimum yaitu sebesar 10,91 kV dan laju alir 100 L/jam. Besar laju alir gas umpan hanya sebesar 100 L/jam karena ketidakmampuan proses membran RO untuk menghasilkan laju alir yang lebih besar pada sisi *permeate*. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh jenis gas umpan terhadap produktivitas ozonator. Ada empat jenis gas umpan yang akan dibandingkan yaitu udara yang berasal dari kompresor, oksigen murni, oksigen hasil pemisahan oleh oksigenator, dan oksigen hasil pemisahan oleh membran RO.

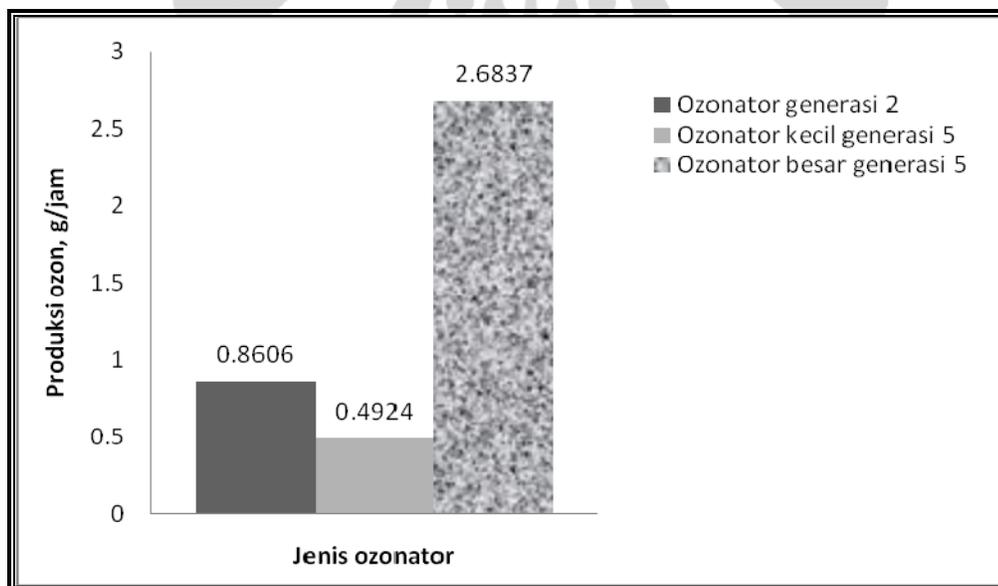
Dari Gambar 4.12. di atas dapat dilihat bahwa produktivitas ozonator lebih tinggi ketika menggunakan oksigen murni sebagai gas umpan dibandingkan dengan menggunakan jenis gas umpan lainnya. Seharusnya produktivitas ozonator yang tinggi juga terjadi apabila menggunakan gas umpan oksigen hasil adsorpsi dan oksigen hasil pengayaan menggunakan membran karena kadar oksigen akan lebih tinggi setelah melalui proses pengayaan oksigen terlebih dahulu baik melalui proses adsorpsi maupun dengan menggunakan membran. Akan tetapi hal ini tidak tercapai karena adanya kerusakan pada alat oksigenator.

#### 4.4.6. Perbandingan Produktivitas Ozonator Generasi 5 dengan Ozonator Generasi 2 dan Ozonator Generasi 4

Ozonator generasi 2 adalah ozonator dengan tipe aliran *single pass* yang dirancang untuk pengolahan limbah industri. Uji kinerja dilakukan oleh Rini Ramadhani Fitria, mahasiswa S1 Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia. Ozonator dirancang dengan menyusun elektrode dan media dielektrik secara koaksial, dihubungkan dengan pembangkit tegangan tinggi, pada frekuensi 50 – 60 Hz, dengan konsumsi energi yang rendah. Ozonator hasil perancangan dapat digunakan pada tekanan atmosferis dan suhu ambien (sekitar 29 °C dan 1

atm). Dari hasil pengujian produktivitas ozon dengan menggunakan oksigen murni sebagai gas umpan, diperoleh kondisi maksimum ozonator tersebut adalah pada laju alir gas umpan 400 L/jam, menghasilkan ozon sebesar 1,6 g/jam dengan konsumsi energi sebesar 0,008 – 0,022 kWh/g ozon .

Dari percobaan yang dilakukan, akan dibandingkan kinerja ozonator generasi 2 dengan kinerja ozonator generasi 5. Perbandingan dilakukan pada kondisi operasi yang sama yaitu pada laju alir umpan sebesar 400 L/jam dan tegangan elektrode sebesar 10,23 kV. Jenis umpan yang digunakan adalah oksigen murni. Pada kondisi tersebut, ozonator generasi 2 dapat menghasilkan ozon sebesar 0,861 g/jam dengan konsumsi energi sebesar 0,005 kWh/gr ozon. Sedangkan untuk ozonator generasi 5, ozonator kecil menghasilkan ozon sebesar 0,492 g/jam dengan konsumsi energi sebesar 0,026 kWh/gr ozon dan ozonator besar menghasilkan ozon sebesar 2,684 g/jam dengan konsumsi energi sebesar 0,013 kWh/g ozon. Grafik perbandingan produktivitas ketiga ozonator tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.13 berikut ini.



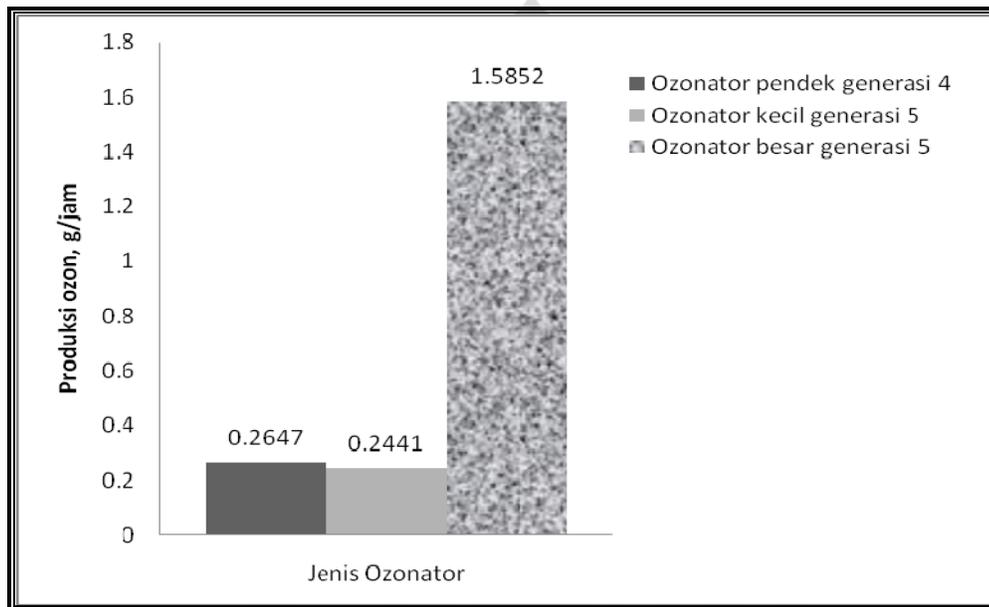
**Gambar 4.13.** Grafik perbandingan produktivitas ozonator generasi 2 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5

Dari grafik dapat dilihat bahwa ozonator kecil generasi 5 menghasilkan ozon yang lebih kecil dibandingkan dengan ozon yang dihasilkan oleh ozonator generasi 2. Hal ini disebabkan oleh volume *discharge gap* pada ozonator kecil lebih kecil dibandingkan ozonator generasi 2, sehingga oksigen yang dapat tertampung di dalamnya lebih kecil dan oksigen yang bereaksi menjadi ozon pun menjadi lebih kecil. Selain itu, besar laju alir pada pengujian perbandingan ini bukan merupakan laju alir optimum ozonator kecil yaitu 600 L/jam sehingga jumlah oksigen yang terkonversi menjadi ozon lebih kecil.

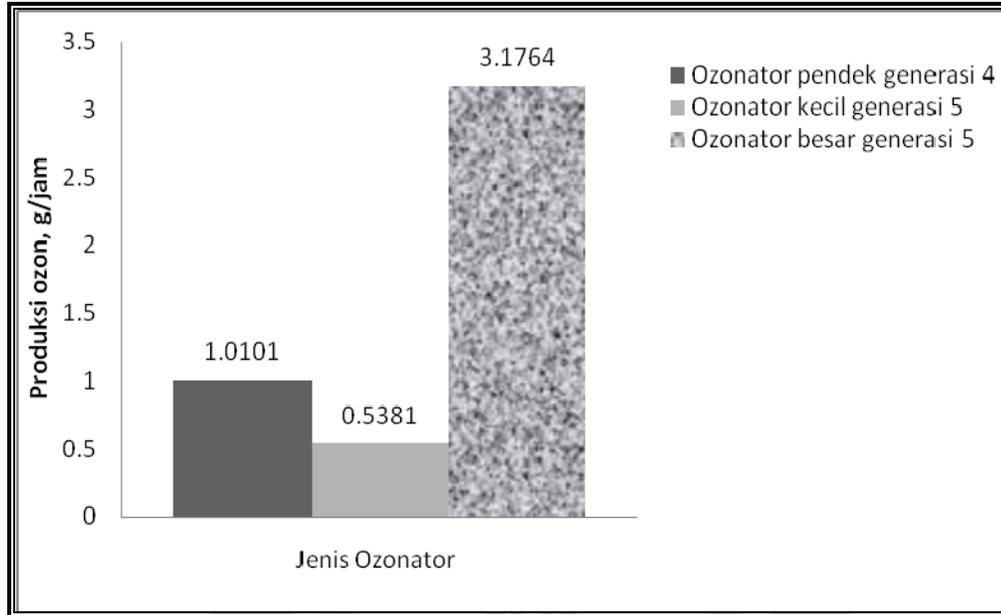
Ozonator besar pada penelitian ini ternyata dapat menghasilkan ozon yang lebih besar dibandingkan dengan ozon yang dihasilkan oleh ozonator generasi 2. Ini menunjukkan bahwa ozonator besar pada penelitian ini memiliki produktivitas yang lebih baik. Ozonator besar memiliki volume *discharge gap* yang lebih besar dengan tipe aliran umpan *triple pass*. Hal ini merupakan kelebihan dari rancangan ini karena dengan volume *discharge gap* yang lebih besar, oksigen yang tertampung di dalamnya semakin besar, sehingga oksigen yang bereaksi menjadi ozon akan menjadi semakin besar. Selain itu, tipe aliran umpan dalam bentuk *triple pass* memiliki keunggulan dibandingkan ozonator tipe aliran *single pass* karena waktu tinggal gas umpan dalam ozonator menjadi lebih lama, sehingga oksigen yang terkonversi menjadi ozon akan semakin banyak.

Pada tahun 2009, Adi Lukmanto, mahasiswa S1 Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia merancang-bangun dua ozonator generasi 4 dengan lima rangkaian pipa elektrode koaksial tipe aliran *single pass* yaitu ozonator pendek dengan panjang elektrode 16 cm dan ozonator panjang dengan panjang elektrode 27,5 cm. Dari hasil pengujian, diperoleh kesimpulan bahwa kondisi operasi maksimum kedua ozonator diperoleh pada laju alir udara umpan 1.000 L/jam. Pada laju alir umpan tersebut, ozonator pendek mencapai kondisi maksimum pada tegangan elektrode sebesar 10,91 kV dengan produksi ozon sebesar 0,306 g/jam dengan konsumsi energi sebesar 21,39 kWh/g ozon, sedangkan ozonator panjang mencapai kondisi maksimum pada tegangan elektrode sebesar 7,5 kV dengan produksi ozon sebesar 0,408 g/jam dan konsumsi energi sebesar 11,03 kWh/g ozon.

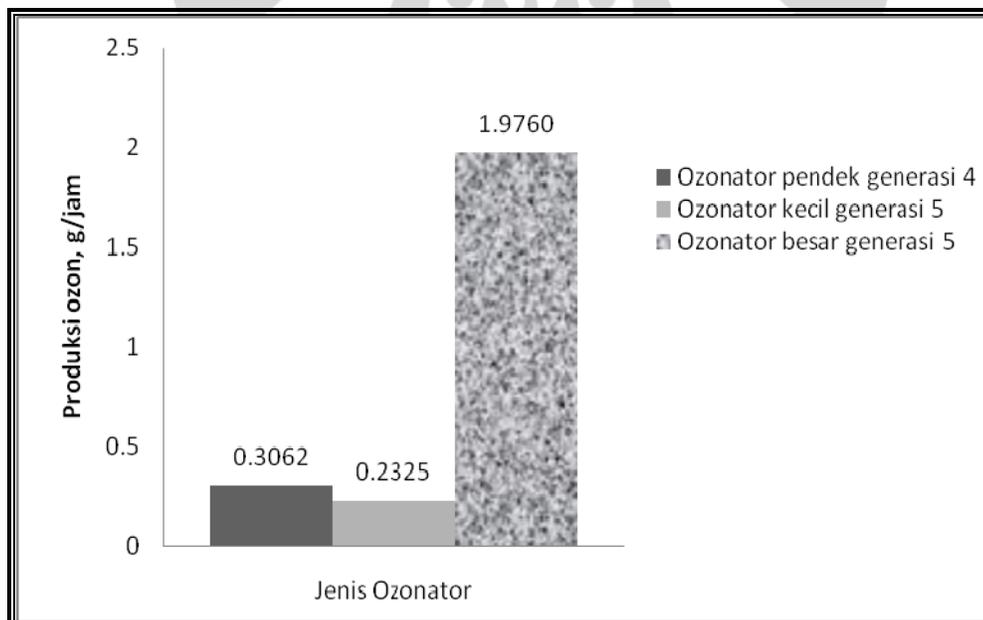
Perbandingan juga dilakukan pada beberapa kondisi operasi dan beberapa jenis gas umpan. Dari data yang diperoleh, akan dibandingkan produktivitas ozonator generasi 5 dengan dua tipe ozonator generasi 4. Data yang diambil adalah data pada kondisi operasi tertentu yang bisa diujikan pada kedua tipe ozonator hasil rancangan pada penelitian ini. Gambar 4.14 sampai dengan Gambar 4.21 menunjukkan grafik perbandingan produktivitas ozonator pada berbagai kondisi operasi dan beberapa jenis gas umpan.



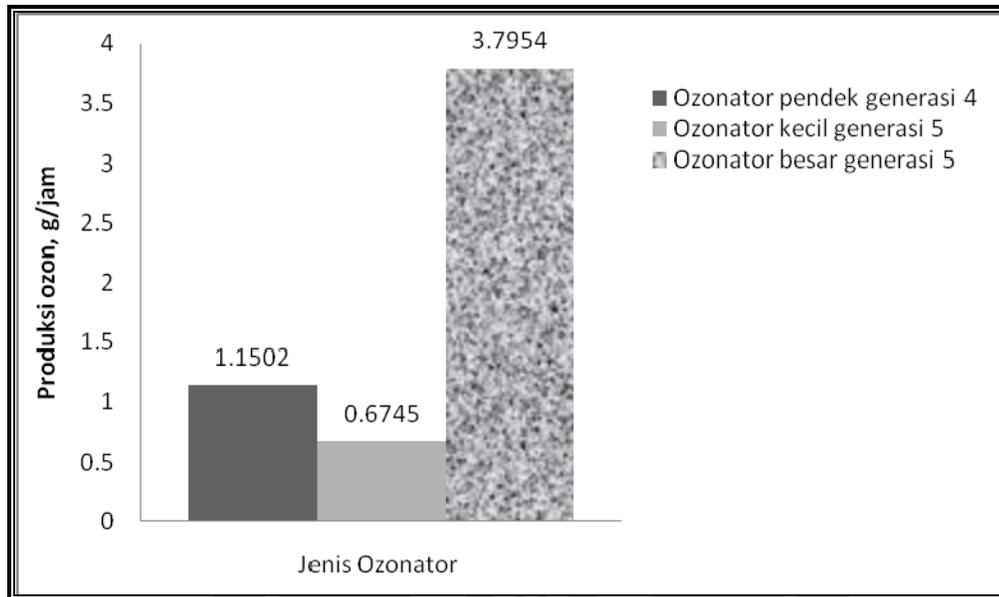
**Gambar 4.14.** Grafik perbandingan produktivitas ozonator pendek generasi 4 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5 pada  $Q=800$  L/jam dan  $V$  elektrode=10,91 kV serta udara kompresor sebagai gas umpan



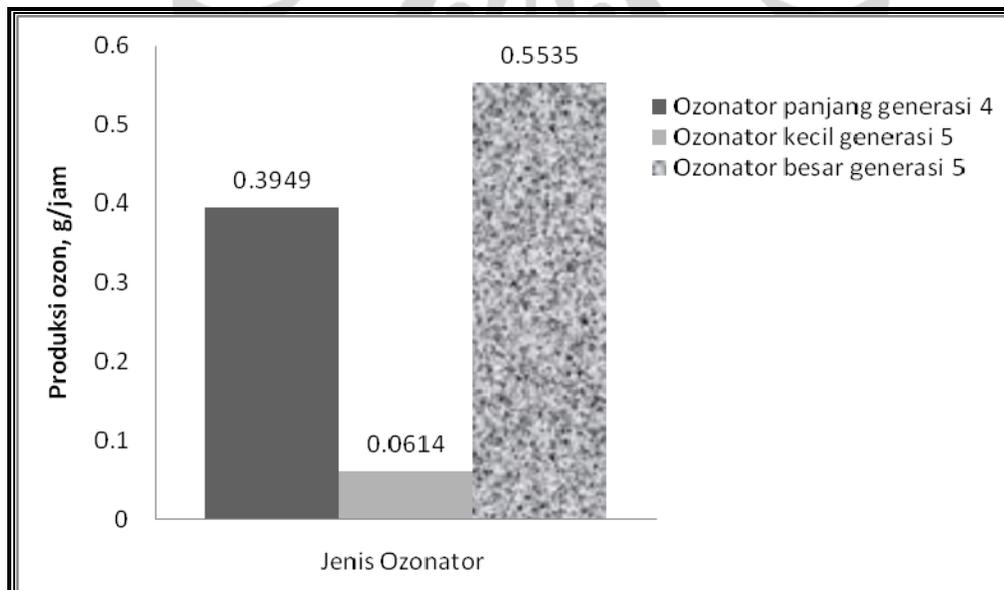
**Gambar 4.15.** Grafik perbandingan produktivitas ozonator pendek generasi 4 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5 pada  $Q=800$  L/jam dan  $V$  elektrode=10,91 kV serta oksigen murni sebagai gas umpan



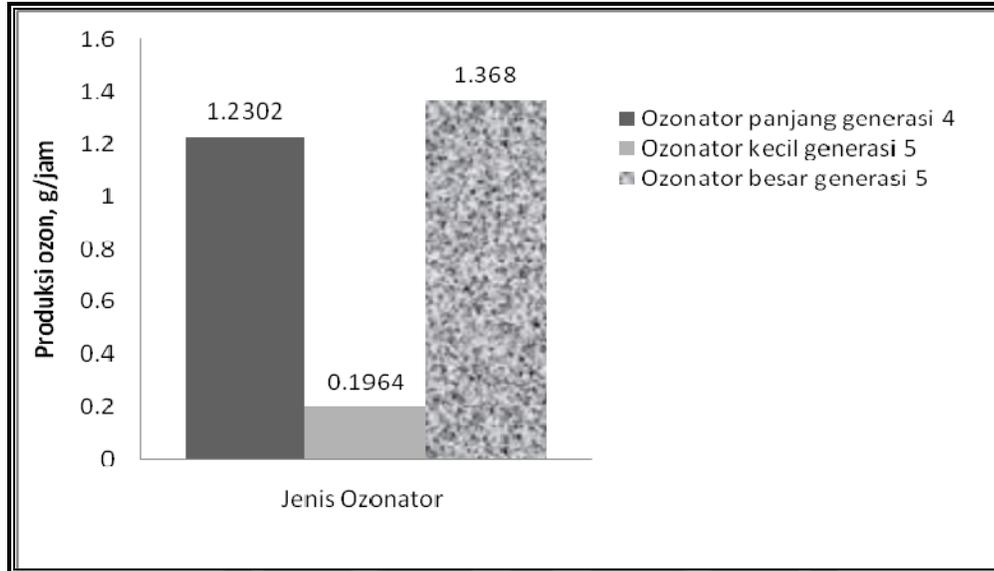
**Gambar 4.16.** Grafik perbandingan produktivitas ozonator pendek generasi 4 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5 pada  $Q=1.000$  L/jam dan  $V$  elektrode=10,91 kV serta udara kompresor sebagai gas umpan



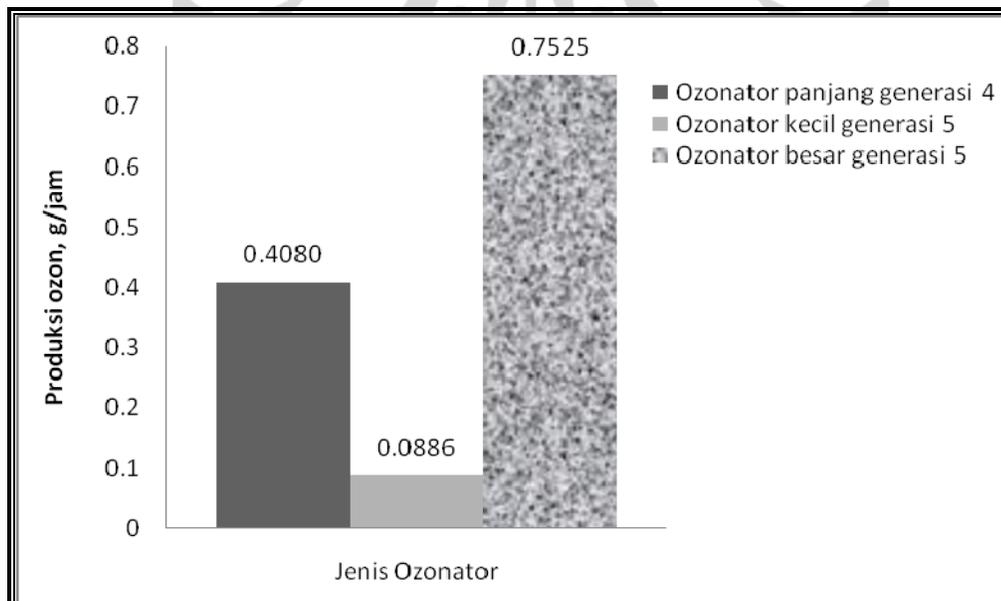
**Gambar 4.17.** Grafik perbandingan produktivitas ozonator pendek generasi 4 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5 pada  $Q=1.000$  L/jam dan  $V$  elektrode=10,91 kV serta oksigen murni sebagai gas umpan



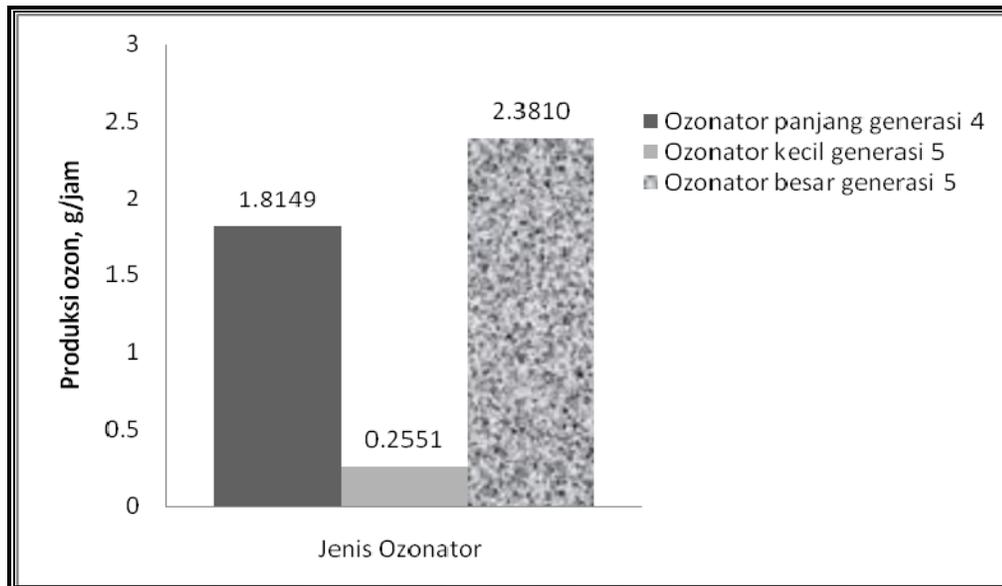
**Gambar 4.18.** Grafik perbandingan produktivitas ozonator panjang generasi 4 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5 pada  $Q=800$  L/jam dan  $V$  elektrode=7,5 kV dan udara kompresor sebagai gas umpan



**Gambar 4.19.** Grafik perbandingan produktivitas ozonator panjang generasi 4 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5 pada  $Q=800$  L/jam dan  $V$  elektrode= $7,5$  kV serta oksigen murni sebagai gas umpan



**Gambar 4.20.** Grafik perbandingan produktivitas ozonator panjang generasi 4 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5 pada  $Q=1.000$  L/jam dan  $V$  elektrode= $7,5$  kV dan udara sebagai umpan



**Gambar 4.21.** Grafik perbandingan produktivitas ozonator panjang generasi 4 dengan ozonator kecil generasi 5 dan ozonator besar generasi 5 pada  $Q=1.000$  L/jam dan  $V$  elektrode=7,5 kV dan oksigen murni sebagai gas umpan

Dari grafik perbandingan tersebut di atas, terlihat bahwa jumlah ozon yang dihasilkan oleh ozonator kecil pada penelitian ini lebih kecil dibandingkan dengan jumlah ozon yang dihasilkan oleh kedua ozonator hasil rancang-bangun yang dilakukan Adi Lukmanto. Hal ini, secara logika geometris tampak jelas karena ozonator tipe 1 hanya memiliki 1 rangkaian elektrode yang merupakan tempat terjadinya reaksi pembentukan ozon, sehingga ozon yang terbentuk lebih sedikit dibandingkan kedua ozonator hasil rancang-bangun Adi Lukmanto yang memiliki 5 rangkaian elektrode pada masing-masing ozonator.

Ozonator besar pada penelitian ini menghasilkan ozon yang lebih besar dibandingkan dengan ozon yang dihasilkan oleh ozonator hasil rancang-bangun Adi Lukmanto, baik ozonator panjang maupun ozonator pendek. Ozonator besar dan ozonator hasil rancang-bangun Adi Lukmanto memiliki jumlah rangkaian pipa elektrode yang sama pada masing-masing ozonator yaitu sebanyak 5 buah. Hal ini menunjukkan bahwa ozonator besar pada penelitian ini memiliki produktivitas yang lebih baik dibandingkan dengan ozonator hasil rancang-bangun Adi Lukmanto. Ozonator dengan tipe aliran *triple pass* memiliki

keunggulan dibandingkan ozonator tipe aliran *single pass* karena waktu tinggal gas umpan dalam ozonator menjadi lebih lama, sehingga oksigen yang terkonversi menjadi ozon akan semakin besar. Selain itu, dengan tipe aliran *triple pass*, fenomena pendinginan elektrode akan lebih baik, sehingga dengan elektrode yang lebih dingin akan dihasilkan ozon yang lebih stabil dan tidak mudah mengurai kembali menjadi oksigen.

Dari grafik juga dapat dilihat bahwa dengan menggunakan oksigen murni sebagai gas umpan, ozon yang dihasilkan akan lebih banyak apabila dibanding dengan menggunakan udara sebagai gas umpan. Kadar oksigen dalam udara hanyalah sebesar 21% volume dan sisanya adalah nitrogen sebesar 79% sedangkan kadar oksigen dalam oksigen murni sebesar 99%. Semakin tinggi kadar oksigen dalam gas umpan berarti bahwa oksigen yang merupakan reaktan dalam gas umpan semakin banyak. Semakin besar konsentrasi oksigen di aliran umpan yang digunakan, maka produk yang dihasilkan pun akan semakin besar, sehingga dengan menggunakan oksigen murni, ozon yang dihasilkan juga akan semakin besar.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Produksi ozon dipengaruhi oleh ukuran ozonator dan jumlah *CD-chamber*, kapasitas daya, laju alir umpan, jenis gas umpan, dan tipe aliran gas umpan dalam *CD-chamber*.

Kondisi operasi maksimum ozonator kecil adalah pada laju alir 600 L/jam dan kapasitas daya sebesar 13,92 Watt. Pada kondisi ini, 0,20 % oksigen terkonversi menjadi ozon dengan laju alir produksi sebesar 0,30 g/jam dan konsumsi energi sebesar 0,046 kWh per satuan massa ozon yang terbentuk.

Kondisi operasi maksimum ozonator besar adalah pada laju alir 800 L/jam dan kapasitas daya sebesar 42,24 Watt. Pada kondisi ini, 0,79 % oksigen terkonversi menjadi ozon dengan laju alir produksi sebesar 0,30 g/jam dan konsumsi energi sebesar 0,027 kWh per satuan massa ozon yang terbentuk.

Semakin besar konsentrasi oksigen di dalam aliran gas umpan yang digunakan, maka produk ozon yang dihasilkan pun akan semakin besar

Jumlah produksi ozonator dengan tipe aliran gas *triple pass* lebih besar dibandingkan dengan produksi ozonator dengan tipe aliran *single pass*.

#### 5.2. Saran

Pengambilan sampel sebaiknya dilakukan tiga kali untuk setiap kondisi operasi supaya ketelitian hasil menjadi lebih baik lagi.

Pengukuran produktivitas ozonator hasil rancangan sebaiknya juga menggunakan DO3meter selain menggunakan metode titrasi iodometri agar diperoleh jumlah produksi ozon yang lebih akurat.

Perlu dilakukan perbaikan pada konstruksi ozonator terutama pada sistem pendingin ozonator agar dapat beroperasi pada tegangan masukan yang lebih tinggi karena pada pengujian produktivitas ozonator dengan tegangan masukan 180 volt terjadi loncatan listrik pada bagian produksi ozon.

Perlu dilakukan perbaikan pada konstruksi oksigenator dan membran RO sehingga diperoleh hasil yang lebih baik lagi jika ozonator menggunakan gas umpan oksigen yang berasal dari oksigenator dan membran RO.



## DAFTAR PUSTAKA

- “62.100 Ha tambak udang terserang virus”. Mei 2010.  
[http://cjfeed.co.id/index.php?option=com\\_content&task=view&id=3060&Itemid=127](http://cjfeed.co.id/index.php?option=com_content&task=view&id=3060&Itemid=127)
- “ Air separation technology”. May, 2010. <http://www.chemsystems.com>
- “Budidaya udang”, May 2010, <http://teknis-budidaya.blogspot.com/2007/10/budidaya-udang.html>
- “ Oksigen”. May 10, 2010. <http://id.wikipedia.org/wiki/oksigen>
- “Ozone”. February 18, 2010. <http://www.en.wikipedia.org/wiki/ozone>
- “Ozone troposfer dan permukaan”. February 18, 2010.  
<http://www.bungarampaiozon.blogspot.com/2009/11/ozon-troposfer-dan-permukaan.html>
- “Ozone production in nature”. February 18, 2010.  
[http://www.ozonesolutions.com/ozone\\_production\\_in\\_nature](http://www.ozonesolutions.com/ozone_production_in_nature)
- “Perairan dan virus sebabkan penurunan produksi udang”. Januari 2010,  
<http://cetak.kompas.com/read/xml/2010/01/21/0426004/perairan.dan.virus.sebabkan.penurunan.produksi.udang>
- “Petambak keringkan lahan untukantisipasi serangan virus”. Mei 2010,  
[http://vibizdaily.com/detail/nasional/2010/05/20/petambak\\_keringkan\\_lahan\\_untuk\\_antisipasi\\_serangan\\_virus](http://vibizdaily.com/detail/nasional/2010/05/20/petambak_keringkan_lahan_untuk_antisipasi_serangan_virus)
- “Public report: Study of the ozone technology”. February 13, 2010  
<http://www.ozonechip.net>

- “Revitalisasi tambak udang tetap berjalan”, 06 May 2010,  
[http://www.cpp.co.id/Entries.aspx?entry\\_id=128](http://www.cpp.co.id/Entries.aspx?entry_id=128)
- “Tambak pesawaran dan lampung selatan terserang empat virus”,  
<http://regional.kompas.com/read/2009/06/12/19191669/tambak.pesawaran.dan.lampung.selatan.terserang.empat.virus>.
- “Teori Dasar Listrik”. *PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban Jawa Bali*.
- “Treatment air untuk tambak udang”. 27 Mei 2010,  
[http://www.ayobelajar.web.id/search/treatment\\_air\\_untuk\\_tambak\\_udang](http://www.ayobelajar.web.id/search/treatment_air_untuk_tambak_udang)
- “Udang pun terserang virus” 27 Mei 2010,  
[http://ekonomi.tvone.co.id/beritaview/34388/2010/03/16/udang\\_pun\\_tersearang\\_virus](http://ekonomi.tvone.co.id/beritaview/34388/2010/03/16/udang_pun_tersearang_virus)
- Ali, F. (2006, Oktober). Ozon, suatu dilema. *Warta Limnologi*, no. 40, Tahun XX, 6 – 8.
- Ball, B.R., et al. (1997). Whole effluent toxicity reduction by ozone. *Environmental Progress*, 16, No. 2, 121 – 124.
- Bismo, S., Kartohardjono, S. & Karamah, E.F. (1998). Prototype of ozone generator for industrial wastewater treatment: Some kinetics and performance aspects. *Summary Result and Evaluation of Cooperation Project Between Faculty of Engineering University of Indonesia and Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) in RUT VI (1998 – 2000) Research Grant Project*.

- Bismo, S. (1999, Juni). Teknologi ozon (I): Kajian prospek penggunaan ozon untuk pengendalian limbah industri. *Jurnal Teknologi*, No. 2 Tahun XIII, 197 – 206.
- Bismo, S. (2004, Maret). Aspek produktivitas ozon bertekanan berdasarkan pola aliran gas umpan yang melewati elektroda koaksial. *Jurnal Teknologi Edisi Khusus No. 1, Tahun XVII*, 46 – 51.
- Carlson, C.W. (1977). Ozone Generator. *United State Patent Office No. 4.035.657*. February 18, 2010. <http://freepatentsonline.com/4035657.pdf>.
- Day, R.A. & Underwood, A.L. (1996). *Analisa Kimia Kualitatif* ( Soedoro, Penerjemah.). Jakarta: Erlangga.
- Direktorat Bina Sumber Hayati. (1990). *Petunjuk pelaksanaan monitoring serangan hama dan penyakit ikan*, Jakarta: Direktorat Jenderal Perikanan Budaya, Departemen Pertanian.
- Direktorat Kesehatan Ikan dan Lingkungan. (2003). *Petunjuk pengendalian penyakit virus bercak putih pada budidaya udang penaid*. Jakarta: Direktorat Jenderal Perikanan Budaya, Departemen Kelautan dan Perikanan.
- Fitri, Rini Ramadhani. (1998). Studi awal kinetikan dan kinerja produksi ozon dalam reaktor aliran sumbat bertegangan tinggi. *Program Sarjana Jurusan Teknik Gas dan Petrokimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia*, Depok.
- Foller, P. C. (1982). Status of research on ozone generation by electrolysis. In Rice, R.G. and Netzer, A. (Ed.) *Handbook of Ozone technology and applications* (vol. 1). Michigan: Ann Arbor Science Publishers.

- Garniwa, I., Sudiarto, B., & Lumban Gaol, E. H. (2006, September). Studi gelombang korona peluahan sebagian dan lepas denyar dalam kubikel simulasi dengan dilapisi bahan isolasi. *Jurnal Teknologi*, Edisi Khusus No. 1 Tahun XX, 24 – 31.
- Herlina, Nonny. (2004). *Pengendalian hama dan penyakit pada pembesaran udang*. Departemen Pendidikan Nasional.
- Irianto Agus. (2003). *Probiotik Untuk Akuakultur*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Langlais, B., et al., (1991). *Ozone in Water Treatment: Application and Engineering*. Lewis Publisher, Ann Arbor, MI.
- Lukmanto, Adi. (2009). Rancang bangun ozonator koaksial *shell and tube* untuk pengolahan air bersih dan air minum. *Program Sarjana Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia*, Depok.
- McNesby, J.R. & Okabe, H. (1964). *Advances in Photochemistry* (vol. III). New York: Interscience Publishers.
- Metcalf & Eddy, Inc. (Tchobanoglous, G., Burton, F.L., & Stensel, H. D.) (2003), *Wastewater Engineering Treatment and Reuse* (4<sup>th</sup> ed.). New York: McGraw Hill.
- Mulder, M. (1991). *Basic principle of membrane technology*. Netherlands : Kluwer Academic Publishers.
- Pikatan, S. (2008). Ozon di atmosfer, erosi pada lapisan ozon mengancam kehidupan di permukaan bumi. *Buletin Ilmiah Universitas Surabaya*, Vol 1 no. 1, 1 – 7

- Pontius, F.W. (1990). *Water Quality and Treatment* (4<sup>th</sup> ed.). New York: McGraw Hill.
- Rice, R.G. & Browning, M.E. (1981). *Ozone treatment of industrial waste water*. Notes Data Corroration, Park Ridyl.
- Rice, R.G. & Netzer, A. (1982). *Handbook of ozone technology and applications* (vol. 1). Michigan: Ann Arbor Science Publishers.
- Staubach, E.J. (1990). Concentric Tube Ozonator. *United State Patent Office No. 4.908.189*. February 18, 2010. <http://freepatentsonline.com/4908189.pdf>.
- Summerfelt, S.T. (1997). Review of ozone process and application as an oxidizing agent in aquaculture. *The Progressive Fish-Culturist*, 59, 94 – 105.
- Tanaka, et al., (1980, November). Ozone Generator. *United State Patent Office No. 4.232.229*. Februari 18, 2010. <http://freepatentsonline.com/4232229.pdf>.
- Unyang, Suhendra. (Oktober – November 2006). Mengenal penyakit udang penaeus, *Warta Oseanografi*, Vol XX No. 4.
- Van Tuyle, R.W., Cincinnati, & Rolfes, R.P. (1965, October 26). Ozone Generator. *United State Patent Office No. 3.214.364*. Februari 18, 2010. <http://freepatentsonline.com/3214354.pdf>.
- Volman, D. H. (1963). *Advances in Photochemistry* (vol. I). New York: Interscience Publishers.
- Von Gunten, U. (2003). Review ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. *Water Research*, 37, 1443 – 1467.

Vosmaer, A. (1916). *Ozone: Its manufactures, properties, and uses*. New York: D. Van Nostrand Co.

Widiyanto. (2007). Pemanfaatan bakteri nitrifikasi dan denitrifikasi untuk bioremediasi senyawa metabolit toksik, <http://www.limnologi.lipi.go.id>





## Lampiran 1. Cara Perhitungan Produksi Ozon, Konsumsi Daya, dan Tegangan Elektrode

### Pengukuran Kadar Ozon dengan Metode Iodometri

Reaksi dengan KI :



Pembebasan iodida menggunakan metode titrasi dengan  $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$



Dari Persamaan reaksi (3), diperoleh hubungan 1 mol  $O_3 \approx 2$  mol  $Na_2S_2O_3$

Prosedur perhitungan :

$$[Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O] = 0,0025 \text{ M} \quad (4)$$

$$mmol \ Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O = (Vol. \ Na_2S_2O_3 \ hulu + Vol. \ Na_2S_2O_3 \ hilir) \times 0,0025 \text{ M} \quad (5)$$

$$mol \ Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O = \frac{(Vol \ Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O \ hulu + Vol. \ Na_2S_2O_3 \ hilir) \times 0,0025 \text{ M}}{1000} \quad (6)$$

$$mol \ O_3 = \frac{1}{2} \times mol \ Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O \quad (7)$$

$$g \ O_3 = mol \ O_3 \times BM \ O_3 = mol \ O_3 \times 48 \quad (8)$$

$$\text{Produktivitas ozon} \left( \frac{g}{jam} \right) = \frac{g \ O_3}{t} \times 3.600 \quad (9)$$

dengan :

BM  $O_3$  = berat molekul  $O_3$  = 48

t = lamanya waktu yang diperlukan oleh larutan KI untuk berubah warna dari bening menjadi kuning muda (detik)

## Contoh Perhitungan Produktivitas Ozon

Mengambil data dari Tabel 1 yaitu pada :

Q umpan = 400 L/jam

Vin = 120 volt

I = 0,12 A

t = 307 detik

Volume Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.5H<sub>2</sub>O hulu = 140,1 mL

Volume Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.5H<sub>2</sub>O hilir = 1,7 mL

### 1. Produktivitas Ozon

$$\text{mol Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = \frac{(\text{Vol. Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O hulu} + \text{Vol. Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O hilir} \times 0,0025 \text{ M})}{1000}$$

$$\text{mol Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = \frac{(140,1 \text{ mL} + 1,7 \text{ mL} \times 0,0025 \text{ M})}{1000}$$

$$\text{mol Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = 3,5450 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

$$\text{mol O}_3 = \frac{1}{2} \times \text{mol Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$$

$$\text{mol O}_3 = \frac{1}{2} \times 2,0285 \times 10^{-3} \text{ mol} = 1,77 \times 10^{-4} \text{ mol}$$

$$\text{g O}_3 = \text{mol O}_3 \times 48$$

$$\text{g O}_3 = 1,77 \times 10^{-4} \text{ mol} \times 48 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 8,5080 \times 10^{-3} \text{ g}$$

$$\text{Produktivitas ozon} \left( \frac{\text{g}}{\text{jam}} \right) = \frac{\text{g O}_3}{t} \times 3.600$$

$$\text{Produktivitas ozon} = \frac{8,5080 \times 10^{-3} \text{ g}}{t} \times 3.600 = 9,9977 \times 10^{-2} \frac{\text{g}}{\text{jam}}$$

## 2. Konversi Oksigen Menjadi Ozon

Laju alir udara = 400 L/jam

Massa udara umpan =  $\rho$  udara x Volume udara

$$\text{Massa udara umpan} = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 400 \frac{\text{L}}{\text{jam}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 0,48 \frac{\text{kg}}{\text{jam}} = 4800 \frac{\text{g}}{\text{jam}}$$

Udara mengandung 21% oksigen dan 79% nitrogen, sehingga massa oksigen dalam 400 L/jam udara umpan dapat dihitung sebagai berikut:

Massa oksigen = 21% x massa udara

$$\text{Massa oksigen} = 21\% \times 4800 \frac{\text{g}}{\text{jam}} = 100,8 \frac{\text{g}}{\text{jam}}$$

Persentase oksigen yang terkonversi menjadi ozon dapat dihitung sebagai berikut:

$$\% \text{konversi} = \frac{\text{massa ozon}}{\text{massa oksigen}} \times 100\%$$

$$\% \text{konversi} = \frac{9,9977 \times 10^{-2}}{100,8} \times 100\% = 0,09898\%$$

## 3. Tegangan Elektrode

Perhitungan dilakukan dengan menggunakan Persamaan 2.15. sebagai berikut :

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{220}{15.000}$$

$$\frac{120}{E_s} = \frac{220}{15.000}$$

$$E_s = 8,181,82 \text{ V}$$

Dengan menggunakan perhitungan yang sama, dapat diperoleh nilai tegangan elektroda untuk variasi tegangan masukan transformator pada ozonator kecil dan ozonator besar sebagai berikut :

**Tabel 1.** Tegangan elektroda untuk variasi tegangan masukan transformator

<b>E masukan transformator (volt)</b>	<b>E elektroda (volt)</b>
120	8.181,82
140	9.545,45
160	10.909,09

#### 4. Kapasitas Daya

Dengan nilai produktivitas ozon yang telah diketahui sebelumnya, maka dapat dihitung besar daya yang dikonsumsi untuk menghasilkan ozon dengan menggunakan Persamaan 2.13. :

$$P = V \times A \times \cos \phi$$

$$P = 120 \times 0,12 \times 0,6$$

$$P = 8,64 \text{ watt}$$

Sedangkan nilai energi yang dikonsumsi ozonator untuk menghasilkan 1 gram ozon dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.14:

$$\frac{kWh}{g} = \frac{(8,64) \times \frac{1}{1000}}{(9,9768 \times 10^{-2})} = 0,08660 \frac{kWh}{g \text{ ozon}}$$

## Lampiran 2. Hasil Perhitungan

**Tabel 1.** Hasil Perhitungan Produktivitas Ozonator Kecil pada Laju Alir 400 L/jam

Vin (volt)	V elektroda (volt)	A (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g)	% konversi
80	5.454,55	0,04	999	27,6	1,0	0,00618	1,92	0,31049	0,00613
100	6.818,18	0,10	467	81,9	1,2	0,03885	6,00	0,15443	0,03854
120	8.181,82	0,12	307	140,1	1,7	0,09977	8,64	0,08660	0,09898
140	9.545,45	0,13	195	138	4,0	0,15729	10,92	0,06942	0,15604
160	10.909,09	0,145	171	93,6	2,3	0,12114	13,92	0,11491	0,12018

**Tabel 2.** Hasil Perhitungan Produktivitas Ozonator Kecil pada Laju Alir 600 L/jam

Vin (volt)	V elektroda (volt)	A (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g)	% konversi
80	5.454,55	0,04	1037	29,2	1,7	0,00644	1,92	0,29831	0,00425
100	6.818,18	0,10	257	70,4	2,3	0,06110	6,00	0,09820	0,04041
120	8.181,82	0,12	167	96,0	2,0	0,12675	8,64	0,06816	0,08383
140	9.545,45	0,13	118	134,4	2,2	0,25005	10,92	0,04367	0,16538
160	10.909,09	0,145	115	156,8	2,7	0,29958	13,92	0,04645	0,19814

**Tabel 3.** Hasil Perhitungan Produktivitas Ozonator Kecil Pada Laju Alir 800 L/jam

Vin (volt)	V elektroda (volt)	A (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g)	% konversi
80	5.454,55	0,04	771	46,4	2,9	0,13812	1,92	0,13901	0,00685
100	6.818,18	0,10	261	80,8	2,0	0,06852	6,00	0,08756	0,03400
120	8.181,82	0,12	155	111,6	2,5	0,15900	8,64	0,05434	0,07887
140	9.545,45	0,13	96	106	2,5	0,24413	10,92	0,04473	0,12109
160	10.909,09	0,145	85	90	1,5	0,23252	13,92	0,05987	0,11534

**Tabel 4.** Hasil Perhitungan Produktivitas Ozonator Kecil pada Laju Alir 1.000 L/jam

Vin (volt)	V elektroda (volt)	A (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)	% konversi
80	5.454,55	0,04	1.435	11,6	2,9	0,00218	1,92	0,87969	0,00087
100	6.818,18	0,10	260	46,4	2,4	0,04054	6,00	0,14800	0,01609
120	8.181,82	0,32	107	73,6	3,6	0,15584	8,64	0,05544	0,06184
140	9.545,45	0,40	67	74,4	1,9	0,24598	10,92	0,04439	0,09761
160	10.909,09	0,44	60	66,4	1,8	0,24552	13,92	0,05670	0,09743

**Tabel 5.** Hasil Perhitungan Produktivitas Ozonator Besar pada Laju Alir 400 L/jam

Vin (volt)	V elektroda (volt)	A (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)	% konversi
80	5.454,55	0,11	277	33,7	2,75	0,02842	5,28	0,18576	0,02820
100	6.818,18	0,22	196	150,8	3,2	0,16971	13,20	0,07778	0,16837
120	8.181,82	0,32	79	192,9	2,3	0,53371	23,04	0,04317	0,52948
140	9.545,45	0,40	58	301,2	2,9	1,13251	33,60	0,02967	1,12352
160	10.909,09	0,44	41	473,1	2,3	2,50455	42,24	0,01687	2,48467ss

**Tabel 6.** Hasil Perhitungan Produktivitas Ozonator Besar pada Laju Alir 600 L/jam

Vin (volt)	V elektroda (volt)	A (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)	% konversi
80	5.454,54	0,11	133	54,6	1,9	0,09176	5,28	0,05754	0,06069
100	6.818,18	0,22	86	180,0	2,0	0,45712	13,20	0,02888	0,30233
120	8.181,82	0,32	56	228,9	1,8	0,88984	23,04	0,02589	0,58852
140	9.545,45	0,40	51	319,2	1,8	1,35953	33,60	0,02471	0,89916
160	10.909,09	0,44	45	441,9	1,5	2,12832	42,24	0,01985	1,40762

**Tabel 7.** Hasil Perhitungan Produktivitas Ozonator Besar pada Laju Alir 800 L/jam

Vin (volt)	V elektroda (volt)	A (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)	% konversi
80	5.454,54	0,11	105	55,2	2,1	0,11787	5,28	0,44793	0,05847
100	6.818,18	0,22	70	133,2	2,8	0,41966	13,20	0,03145	0,20816
120	8.181,81818	0,32	39	172	2,0	0,96369	23,04	0,02391	0,47802
140	9.545,45455	0,40	29	199,2	3,6	1,51051	33,60	0,02224	0,74926
160	10.909,09091	0,44	29	289,2	2,2	2,17043	42,24	0,01946	1,07660

**Tabel 8.** Hasil Perhitungan Produktivitas Ozonator Besar pada Laju Alir 1.000 L/jam

Vin (volt)	V elektroda (volt)	A (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)	% konversi
80	5.454,54	0,11	88	31,2	1,8	0,08100	5,28	0,06519	0,03214
100	6.818,18	0,22	42	40,2	2,7	0,22063	13,20	0,05983	0,08755
120	8.181,82	0,32	21	56,1	4,8	0,62640	23,04	0,03678	0,24857
140	9.545,45	0,40	32	163,8	12,4	1,18935	33,60	0,02825	0,47196
160	10.909,09	0,44	29	262	3,3	1,97603	42,24	0,02138	0,78414

**Tabel 9.** Hasil Perhitungan Produktivitas Ozonator Besar pada Tegangan Elektrode 10.909,09 Volt dengan Gas Umpan Udara Kompresor

Vin (volt)	V elektroda (volt)	A (ampere)	Q (L/jam)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)
160	10.909,09	0,44	400	50	322,8	1,8	1,40227	42,24	0,03012
160	10.909,09	0,44	600	46	291,6	2,3	1,38005	42,24	0,03061
160	10.909,09	0,44	800	36	262,4	1,8	1,5852	42,24	0,02665

**Tabel 10.** Hasil Perhitungan Produktivitas Ozonator Besar Pada Tegangan Elektrode 10,91 kV dengan Gas Umpan Oksigen Murni

Vin (volt)	V elektroda (volt)	A (ampere)	Q (L/jam)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)
160	10.909,09	0,44	400	58	808,8	2,6	3,02177	42,24	0,01398
160	10.909,09	0,44	600	51	836	2,7	3,55214	42,24	0,01189
160	10.909,09	0,44	800	47	814,8	2,5	3,75610	42,24	0,01125

**Tabel 11.** Hasil Perhitungan Produktivitas Ozonator Besar Pada Tegangan Elektrode 10.909,09 Volt dengan Gas Umpan Oksigen dari Oksigenator

Vin (volt)	V (volt)	A (ampere)	Q (L/jam)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)
160	10.909,09	0,44	400	66	346	1,4	1,13695	42,24	0,03715
160	10.909,09	0,44	600	56	330	3	1,28443	42,24	0,03289
160	10.909,09	0,44	800	42	318,4	2,3	1,64931	42,24	0,02561

**Tabel 12.** Hasil Perhitungan Produktivitas Ozonator Besar Pada Tegangan Elektrode 10.909,09 Volt dan Laju Alir 100 L/jam dengan Variasi Jenis Gas Umpan

Jenis gas umpan	V <sub>in</sub> (volt)	V elektroda (volt)	A (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)
Udara kompresor	160	10.909,09	0,44	136	503,2	2	0,80238	42,24	0,05264
Oksigen murni	160	10.909,09	0,44	94	715,2	2,8	1,64987	42,24	0,02560
Oksigen dari oksigenator	160	10.909,09	0,44	126	441,2	2,2	0,76011	42,24	0,05557
Oksigen membran	160	10.909,09	0,44	188	469,6	3,8	0,54391	42,24	0,07766

**Tabel 13.** Perbandingan Produktivitas Ozonator Generasi 2 dengan Ozonator Kecil dan Ozonator Besar Generasi 5 pada Tegangan Elektrode 10.227,27 Volt dan Laju Alir 400 L/jam dengan Oksigen Murni Sebagai Gas Umpan

Jenis Ozonator	V <sub>in</sub> (volt)	V (volt)	A (ampere)	Q (L/jam)	T (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)
Ozonator Generasi 2	150	10.227,27	0,05	400	151	592	7,8	0,86056	4,5	0,00523
Ozonator kecil	150	10.227,27	0,14	400	109	246,4	2,1	0,49244	12,6	0,02559
Ozonator besar	150	10.227,27	0,40	400	77	954,8	1,9	2,68373	36	0,01341

**Tabel 14.** Perbandingan Produktivitas Ozonator Pendek Generasi 4 dengan Ozonator Kecil dan Ozonator Besar Generasi 5 pada Tegangan Elektrode 10.909,09 Volt dan Laju Alir 800 L/jam dengan Udara Kompresor Sebagai Gas Umpan

Jenis Ozonator	V <sub>in</sub> (volt)	V (volt)	A (ampere)	T (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)
Ozonator pendek	160	10.909,09	0,18	173	206,6	5	0,26471	17,28	0,06528
Ozonator kecil	160	10.909,09	0,145	96	106	2,5	0,24413	13,92	0,05702
Ozonator besar	160	10.909,09	0,44	36	262,4	1,8	1,58520	42,24	0,02665

**Tabel 15.** Perbandingan Produktivitas Ozonator Pendek Generasi 4 dengan Ozonator Kecil dan Ozonator Besar Generasi 5 pada Tegangan Elektrode 10.909,09 Volt dan Laju Alir 800 L/jam dengan Oksigen Sebagai Gas Umpan

Jenis Ozonator	V <sub>in</sub> (volt)	V (volt)	A (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)
Ozonator pendek	160	10.909,09	0,18	67	309,5	1,5	1,01017	17,28	0,01711
Ozonator kecil	160	10.909,09	0,145	106	262,4	1,7	0,53817	13,92	0,02587
Ozonator besar	160	10.909,09	0,44	52	761,6	3,1	3,17645	42,24	0,01330

**Tabel 16.** Perbandingan Produktivitas Ozonator Pendek Generasi 4 dengan Ozonator Kecil dan Ozonator Besar Generasi 5 pada Tegangan Elektrode 10.909,09 Volt dan Laju Alir 1.000 L/jam dengan Udara Kompresor Sebagai Gas Umpan

Jenis Ozonator	V <sub>in</sub> (volt)	V (volt)	A (ampere)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)
Ozonator pendek	160	10.909,09	0,18	160	221,2	5,5	0,30628	17,28	0,05642
Ozonator kecil	160	10.909,09	0,145	85	90	1,5	0,23252	13,92	0,05989
Ozonator besar	160	10.909,09	0,44	29	262	3,3	1,97603	42,24	0,02138

**Tabel 17.** Perbandingan Produktivitas Ozonator Pendek Generasi 4 dengan Ozonator Kecil dan Ozonator Besar Generasi 5 pada Tegangan Elektrode 10.909,09 Volt dan Laju Alir 1.000 L/jam dengan Oksigen Murni Sebagai Gas Umpan

Jenis Ozonator	V <sub>in</sub> (volt)	V (volt)	A (ampere)	Q (L/jam)	T (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)
Ozonator pendek	160	10.909,09	0,18	1.000	57	300	3	1,15023	17,28	0,01502
Ozonator kecil	160	10.909,09	0,145	1.000	70	216,4	2,2	0,67454	13,92	0,02064
Ozonator besar	160	10.909,09	0,44	1.000	35	612	3	3,79543	42,24	0,01113

**Tabel 18.** Perbandingan Produktivitas Ozonator Panjang Generasi 4 dengan Ozonator Kecil dan Ozonator Besar Generasi 5 pada Tegangan Elektrode 7.500 Volt dan Laju Alir 800 L/jam dengan Udara Kompresor Sebagai Gas Umpan

Jenis Ozonator	V <sub>in</sub> (volt)	V (volt)	A (ampere)	Q (L/jam)	T (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)
Ozonator panjang	110	7.500	0,22	800	161	290,6	3	0,39490	14,52	0,03677
Ozonator kecil	110	7.500	0,085	800	390	108	3	0,06148	5,61	0,09125
Ozonator besar	110	7.500	0,28	800	97	243,2	5,4	0,55358	18,48	0,03338

**Tabel 19.** Perbandingan Produktivitas Ozonator Panjang Generasi 4 dengan Ozonator Kecil dan Ozonator Besar Generasi 5 pada Tegangan Elektrode 7.500 Volt dan Laju Alir 800 L/jam dengan Oksigen Murni Sebagai Gas Umpan

Jenis Ozonator	V <sub>in</sub> (volt)	V (volt)	A (ampere)	Q (L/jam)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)
Ozonator panjang	110	7.500	0,22	800	107	604,8	2,2	1,23029	14,52	0,01180
Ozonator kecil	110	7.500	0,085	800	148	132	2,6	0,19644	5,61	0,02856
Ozonator besar	110	7.500	0,28	800	75	473,2	1,8	1,36800	18,48	0,01351

**Tabel 20.** Perbandingan Produktivitas Ozonator Panjang Generasi 4 dengan Ozonator Kecil dan Ozonator Besar Generasi 5 pada Tegangan Elektrode 7.500 Volt dan Laju Alir 1.000 L/jam dengan Udara Kompresor Sebagai Gas Umpan

Jenis Ozonator	V <sub>in</sub> (volt)	V (volt)	A (ampere)	Q (L/jam)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)
Ozonator panjang	110	7.500	0,22	1.000	158	295	3,3	0,40801	14,52	0,03559
Ozonator kecil	110	7.500	0,085	1.000	325	129,6	3,7	0,08859	5,61	0,06332
Ozonator besar	110	7.500	0,28	1.000	50	172	2,2	0,75254	18,48	0,02456

**Tabel 21.** Perbandingan Produktivitas Ozonator Panjang Generasi 4 dengan Ozonator Kecil Ozonator Besar Generasi 5 pada Tegangan Elektrode 7.500 Volt dan Laju Alir 1.000 L/jam dengan Oksigen Murni Sebagai Gas Umpan

Jenis Ozonator	V <sub>in</sub> (volt)	V (volt)	A (ampere)	Q (L/jam)	t (detik)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hulu (mL)	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> hilir (mL)	Prod.ozon (g/jam)	P (watt)	Kons.energi (kWh/g ozon)
Ozonator Panjang	110	7.500	0,22	1.000	37	312,3	1,7	1,81493	14,52	0,00800
Ozonator kecil	110	7.500	0,085	1.000	127	146,8	3,2	0,25512	5,61	0,02199
Ozonator besar	110	7.500	0,28	1.000	48	528,4	2,7	2,38995	18,48	0,007732