



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN DAN UJI KINERJA REAKTOR
HIBRIDA OZON-PLASMA DINGIN UNTUK PENGOLAHAN
LIMBAH FENOLIK CAIR**

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Master Teknik

TESIS

VENY LUVITA

1006755481

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Veny Luvita

NPM : 1006755481

Tanda Tangan: 

Tanggal : 15 Juni 2012

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Veny Luvita
NPM : 1006755481
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Tesis : Rancang Bangun dan Uji Kinerja Reaktor Hibrida Ozon-Plasma Dingin Terhadap Pengolahan Limbah Fenolik Cair

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 : Prof. Ir. Sutrasno Kartoraharjo, M.Sc.Ph.D.

()

Penguji : Dr. Ir. Nelson Saksono, MT.

()

Penguji : Ir. Amien Raharjo, MT.

()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 15 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, penulis dapat menyelesaikan tesis dengan judul “ Rancang Bangun dan Uji Kinerja Plasma Dingin untuk Pengolahan Limbah Fenolik Cair”. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Master Teknik Jurusan Teknik Kimia pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

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

- (1) Prof. Dr. Setijo Bismo, DEA., selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- (2) Prof. Sutrasno Kartohardjono, selaku dosen pembimbing akademik selama masa perkuliahan dan Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI serta Dr.Ir. Nelson Saksono,MT. Dan Ir. Amien Rahardjo, MT. yang telah memberikan banyak masukan;
- (3) Mas Budi Susanto suami tercinta, anak-anakku tersayang Almer Fatih Ravedito dan Sahira Bilqis Rivadito, Ummi Nur Aini dan Ibu Mudjiyem, mbak Eni dan keluarga, adikku Viky, Vina, Tika dan Dewi sekeluarga, yang telah memberikan bantuan dukungan doa;
- (4) Dr. Anto Tri sugiarto, M.Eng. dan karyawan LIPI serta RISTEK yang telah membantu dalam penyelesaian kuliah S2 ini serta Dr.Yayat Ruyat dan Ibu Kustinah (PT.Pindad) yang telah memberikan fasilitas dan masukannya;
- (5) Tiwi, Mang Ijal, Kang Jajat, Mas Heri dan Mas Taufik atas bantuannya pada saat penulis melakukan penelitian;
- (6) Vika, Ika, Wiwi, Cristin, Fatimah, Ria, Adi dan Migel selaku rekan penelitian satu bimbingan;
- (7) Teman-teman di riset grup Teknologi Intensifikasi Proses yang telah membantu selama penelitian ini berlangsung;
- (8) Sahabat - sahabat di S2 Teknik Kimia UI angkatan 2009 dan 2010 (Ika, Wulan, Savitri, Muryanto, mas Oka, mas Eko, Alfa, Taufan, Denny, Aida, Bowo, Bayu, Irsham) yang telah banyak meluangkan waktu bersama menyelesaikan kuliah ini;
- (9) Semua pihak yang telah membantu penyusunan proposal tesis ini secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis menyadari bahwa dalam proposal tesis ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun sehingga dapat menyempurnakan proposal tesis ini dan melaksanakan perbaikan di masa yang akan datang. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi para pembaca dan bagi dunia pendidikan dan ilmu pengetahuan.

Depok, 15 Juni 2012
Penulis

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

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

Nama : Veny Luvita
NPM : 1006755481
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Tesis

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

**Rancang Bangun dan Uji Kinerja Reaktor Hibrida Ozon-Plasma Dingin
untuk Pengolahan Limbah Fenolik Cair**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tesis 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 : 15 Juni 2012
Yang menyatakan



(Veny Luvita)

ABSTRAK

Nama : Veny Luvita
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Tesis : Rancang Bangun dan Uji Kinerja Reaktor Hibrida Ozon-Plasma
Dingin untuk Pengolahan Limbah Fenolik Cair

Penelitian tentang degradasi senyawa fenol dengan menggunakan metode oksidasi kimiawi dalam reaktor plasma yang dilakukan dalam penelitian ini dibagi atas 2 (dua) bagian pekerjaan utama, yaitu rancang bangun suatu reaktor plasma yang disebut Reaktor Hibrida Ozon-Plasma (RHOP) dan, yang kedua adalah uji kinerja terhadap reaktor tersebut untuk limbah senyawa fenolik sintesis dan non-sintesis. Reaktor RHOP belum dapat dipublikasikan karena masih dalam pengajuan paten, sehingga masih diperlukan kajian yang lebih komprehensif. Prinsip kerja RHOP tersebut adalah kombinasi atau hibrida reaksi ozonasi dalam medan plasma cair yang berada di ruang reaksi RHOP. Gas ozon sebagai pereaksi dihasilkan oleh ozonator standar jenis Reson RSO-9805 buatan Hongkong yang diumpankan ke dalam RHOP dengan cara mencampurkannya dengan umpan fasa cair dalam injektor, sedemikian rupa sehingga campuran dua fasa ini dapat bereaksi secara lebih intensif di dalam RHOP. Campuran dua fasa tadi dimaksudkan juga untuk mengintensifkan radikal hidroksil bila fasa cair dalam kondisi basa dan secara kontinu terpapar dalam plasma. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sirkulasi kontinu selama 2 jam pada konsentrasi awal *p*-klorofenol 50 ppm dengan volume 2 liter diperoleh tingkat penyisihan 83,98 %. Dengan kondisi operasi yang sama diperoleh persen degradasi limbah tekstil katun 88,58 %, limbah tekstil batik 34,51 %, limbah bahan peledak Natrium Pikramat 72,64 % dan limbah DDNP 47,74 %. Dengan adanya hasil yang baik pada uji kinerja dari beberapa limbah dengan konsentrasi tinggi tersebut, maka diharapkan ke depannya akan dapat diaplikasikan dalam industri meskipun masih akan banyak mengalami penyempurnaan.

Kata kunci : Reaktor hibrida, Plasma, Ozon, Fenol.

ABSTRACT

*Name : Veny Luvita
Study Program : Chemical Engineering
Title : Design and performance test of ozone-plasma hybrid reactor for processing liquid waste phenolic compounds.*

Research on the degradation of phenolic compounds using the methods of chemical oxidation in the plasma reactor is conducted in this study is divided into two parts of the main job, that is a plasma reactor design called Ozone-Plasma Hybrid Reactor (RHOP) and the second is a performance test of the reactor for the synthetic of phenolic compound and non-synthetic waste. RHOP can not be published because it is still in the filing of the patent, so it still required a more comprehensive study. RHOP principle is a combining ozonation reaction and plasma reaction that happening in the same field at RHOP chamber. Ozone as the reactants gas is produced by a standard ozonator type Resun RSO 9805 made in Hong Kong. RHOP fed into the feed by mixing with the liquid phase in the injector, such that the two phase mixture can react more intensively in the RHOP. Two phase mixture was injected also to intensify when the hydroxyl radicals in the liquid phase under alkaline conditions and is continuously exposed to the plasma. The result showed that the continuous circulation for two hour at p-chlorophenols initial concentrations of 50 mg/L by volume of 2 liters obtained by the elimination of 83.98%. Operating conditions were obtained percent degradation of phenol for waste allowance of 88.58% of cotton textiles, batik textile waste at 34.51%, sodium pikramat waste explosives at 72.64% and waste DDNP at 47.74%. Given the good results on the performance test of some of these wastes with high concentrations, it is expected that the future will be applied in the industry although it will still have a lot of improvements.

Key words: Hybrid Reactor, Plasma, Ozone, Phenols

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
1. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Sistematika Penelitian.....	4
2. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Pendahuluan.....	5
2.2. Senyawa Fenolik dalam Limbah Cair.....	6
2.3. Senyawa Fenolik dalam Limbah Tekstil.....	8
2.4. Limbah Bahan Peledak.....	9
2.5. Teknik Ozonasi.....	12
2.6. Ozonasi dalam <i>Advanced Oxidation Processes</i> (AOPs).....	14
2.7. Teknologi Plasma dalam Ozonasi.....	18
2.8. Aplikasi Teknologi Plasma.....	22
2.9. Reaktor Hibrida Ozon-Plasma.....	23
3. METODE PENELITIAN	
3.1. Pendahuluan.....	25
3.2. Rancangan Penelitian.....	25
3.3. Peralatan dan Bahan.....	27
3.3.1. Peralatan.....	27
3.3.2. Bahan.....	36
3.4. Prosedur Penelitian.....	36
3.4.1. Variabel Penelitian.....	36
3.4.2. Prosedur Pengolahan Limbah.....	37
3.4.2.1. Persiapan Sampel.....	37

3.4.2.2. Penyisihan Fenol dengan RHOP.....	37
3.5. Analisis Hasil Penelitian.....	37
3.5.1. Analisis Pembentukan Radikal OH [•]	38
3.5.1.1. Peralatan.....	38
3.5.1.2. Bahan Analisis Konsentrasi H ₂ O ₂	38
3.5.1.3. Penentuan Konsentrasi H ₂ O ₂	38
3.5.2. Analisis Limbah Senyawa Fenol.....	38
3.5.2.1. Peralatan.....	38
3.5.2.2. Bahan Analisis Limbah Senyawa Fenol.....	39
3.5.2.3. Prosedur Analisis Limbah Senyawa Fenol.....	39
3.5.2.3.1. Membuat Larutan Uji.....	39
3.5.2.3.2. Membuat Kurva Kalibrasi.....	40
3.5.2.3.3. Prosedur Analisis Limbah Fenol.....	40
4. HASIL PERCOBAAN DAN PEMBAHASAN	
4.1. Pendahuluan.....	42
4.2. Pengukuran Produktivitas Ozon Terlarut pada RHOP dalam Fasa Cair.....	42
4.3. Pengukuran Produktivitas Ozonator Reson RSO-9805.....	44
4.4. Penyisihan p-klorofenol dalam RHOP.....	44
4.5. Penyisihan Senyawa Fenol dalam Limbah Tekstil.....	48
4.6. Penyisihan Senyawa Fenol dalam Limbah Bahan Peledak.....	52
4.7. Karakteristik RHOP.....	55
4.8. Mekanisme Reaksi dalam RHOP.....	56
4.9. Pengaruh Tegangan terhadap Penurunan Parameter.....	57
4.10. Pengaruh Sirkulasi terhadap Penurunan Parameter.....	58
4.11. Perhitungan Energi.....	58
5. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Kesimpulan.....	60
5.2. Saran.....	60
DAFTAR PUSTAKA.....	62
LAMPIRAN.....	65

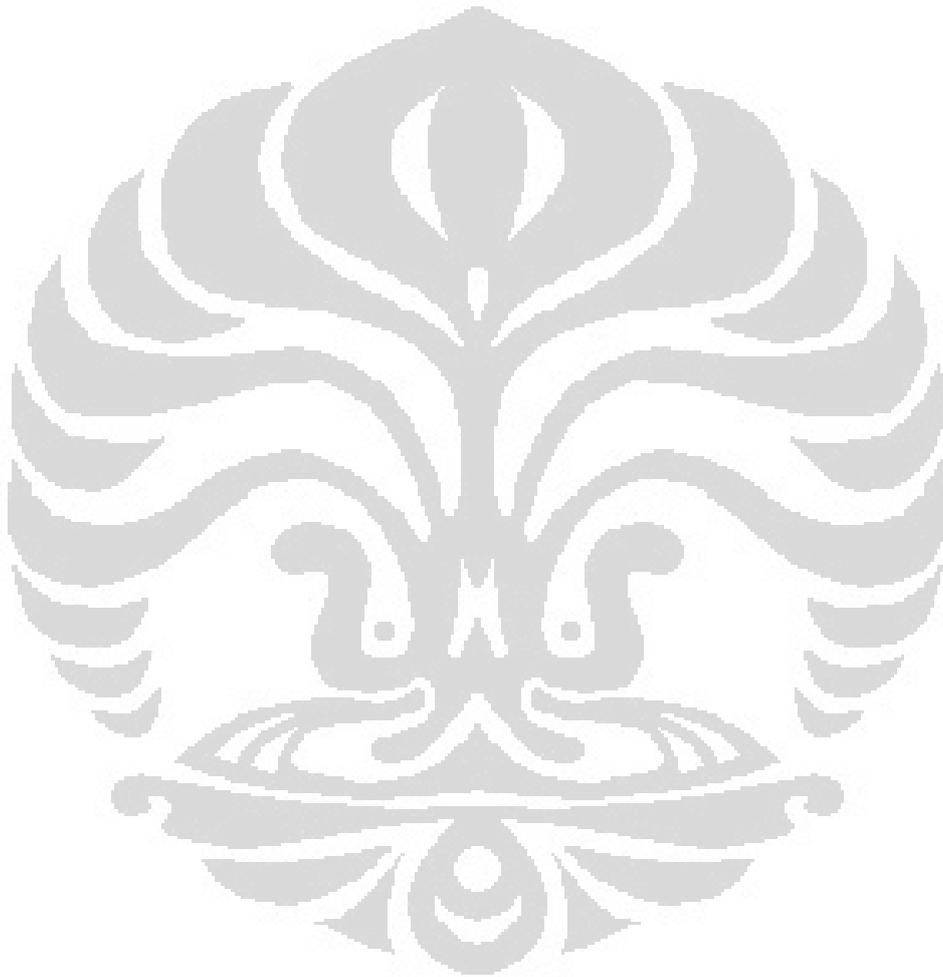
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Struktur molekul fenol.....	6
Gambar 2.2.	Struktur detonator listrik.....	10
Gambar 2.3.	Reaksi pembuatan asam pikrat dari fenol.....	10
Gambar 2.4.	Reaksi pembuatan natrium pikramat dari asam pikrat.....	11
Gambar 2.5.	Reaksi pembuatan DDNP dari natrium pikramat.....	11
Gambar 2.6.	Skema reaksi ozonasi fenol.....	14
Gambar 2.7.	Proses terbentuknya spesi katif oleh plasma.....	16
Gambar 2.8.	Perbandingan fase padat, cair, gas dan plasma.....	18
Gambar 2.9.	Kilat yang merupakan plasma alami.....	19
Gambar 2.10.	Contoh plasma buatan.....	19
Gambar 2.11.	Spektrum gelombang elektromagnetik.....	22
Gambar 3.1.	Diagram alir penelitian.....	26
Gambar 3.2.	Media dielektrik.....	27
Gambar 3.3.	Elektroda tegangan tinggi.....	28
Gambar 3.4.	Kawat kasa SS-316.....	28
Gambar 3.5.	Transformator tegangan tinggi.....	29
Gambar 3.6.	Pompa.....	29
Gambar 3.7.	Voltmeter.....	30
Gambar 3.8.	Amperemeter.....	30
Gambar 3.9.	Flowmeter gas.....	31
Gambar 3.10.	Flowmeter liquida.....	31
Gambar 3.11.	Regulator tegangan.....	32
Gambar 3.12.	Selang.....	32
Gambar 3.13.	<i>Nipple</i>	33
Gambar 3.14.	<i>Elbow</i>	33
Gambar 3.15.	Tangki penampungan.....	33
Gambar 3.16.	Mur dan baut.....	34
Gambar 3.17.	<i>Stopwatch</i>	34
Gambar 3.18.	Injektor – <i>Mixer</i>	35
Gambar 3.19.	Ozonator Reson RSO-9805.....	35

Gambar 3.20. Skema sistem RHOP.....	36
Gambar 4.1. Degradasi konsentrasi limbah <i>p</i> -klorofenol pada proses penyisihan dalam RHOP.....	46
Gambar 4.2. Persen degradasi limbah <i>p</i> -klorofenol pada proses penyisihan dalam RHOP.....	46
Gambar 4.3. Nilai COD <i>p</i> -klorofenol pada proses penyisihan dalam RHOP.....	47
Gambar 4.4. Perbandingan degradasi konsentrasi limbah tekstil pada proses penyisihan dalam RHOP.....	49
Gambar 4.5. Perbandingan persen degradasi konsentrasi limbah tekstil pada proses penyisihan dalam RHOP.....	49
Gambar 4.6. Perbandingan nilai COD limbah tekstil pada proses penyisihan dalam RHOP.....	51
Gambar 4.7. Perbandingan degradasi konsentrasi limbah bahan peledak pada proses penyisihan dalam RHOP.....	53
Gambar 4.8. Perbandingan % degradasi konsentrasi limbah bahan peledak pada proses penyisihan dalam RHOP.....	53
Gambar 4.9. Perbandingan nilai COD limbah bahan peledak pada proses penyisihan dalam RHOP.....	54

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Konsentrasi beberapa limbah fenolik pada industri.....	8
Tabel 2.2. Perkiraan kandungan dan jumlah limbah untuk produksi DDNP.....	12
Tabel 2.3. Potensial oksidasi.....	13
Tabel 4.1. Perhitungan energi dan biaya listrik.....	59



DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A. Pengukuran Produktivitas Ozon dalam RHOP.....	65
LAMPIRAN B. Penyisihan Fenol dalam RHOP.....	69
LAMPIRAN C. Hasil Perhitungan Energi.....	79
LAMPIRAN D. Aturan Baku Mutu Limbah Cair.....	80



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan sektor industri selalu membawa peningkatan konsekuensi timbulnya limbah, khususnya limbah cair sebagai *output* dari kegiatan tersebut. Menurut Lembaga Perlindungan Lingkungan Hidup di Amerika Serikat, US EPA (*United Nation Environmental Protection Agency*) terdapat 12 jenis limbah senyawa fenolik termasuk dalam kategori limbah yang sangat berbahaya, antara lain 2-p-klorofenol, 2-klorofenol, 2,4-dimetilfenol, 2-metil-p-klorofenol, 2,4-dinitrofenol, 2-nitrofenol, 4-nitrofenol, 3-metil-p-klorofenol, pentaklorofenol, fenol dan 2,4,6-triklorofenol.

Munculnya beragam industri yang banyak menggunakan bahan sintesis, mengakibatkan permasalahan dalam pengolahan limbahnya. Pengolahan secara kimia, fisika maupun biologi telah banyak digunakan. Namun, karena semakin kompleksnya bahan kimia yang digunakan dalam proses produksi, mengakibatkan permasalahan dalam pengolahan limbah. Selain itu sebuah pengolahan limbah juga harus mempunyai efisiensi pengolahan yang tinggi.

Pengolahan limbah pada umumnya dilakukan dengan menggunakan rangkaian metode pengolahan secara kimia, fisika dan biologi. Penggunaan metode secara konvensional tersebut, biasanya ditetapkan dengan melihat karakteristik dan komposisi dari limbah cair yang akan diolah, sehingga pengolahan limbah tersebut membutuhkan peralatan dan infrastruktur yang tidak fleksibel. Hal lain yang diperhatikan adalah penggunaan bahan-bahan kimia yang relatif mahal dan terkadang akan menghasilkan senyawa-senyawa baru, sehingga biaya pengolahan secara konvensional perlu diperbaiki.

Limbah yang mengandung senyawa fenolik merupakan limbah organik yang tidak dapat didegradasi secara hayati dan yang mana harus diolah terlebih dahulu sebelum dibuang ke lingkungan karena fenol dan senyawa turunannya bersifat racun pada konsentrasi tinggi. Salah satu cara untuk mengurangi konsentrasi fenol dalam limbah adalah dengan melakukan pengolahan secara

kimiawi dengan metode oksidasi cepat dan intensif menggunakan oksidator kuat yang berupa ozon.

Berdasarkan beberapa faktor di atas, maka telah banyak dilakukan penelitian-penelitian untuk mengembangkan proses pengolahan limbah, di antaranya dengan menggunakan *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) (Sugiarto, 2004). Penelitian tentang penguraian bahan organik dengan menggunakan tegangan tinggi berupa *pulsed discharge* pada permukaan air dengan variasi jarak antara elektroda jarum dan permukaan air, dan komposisi gas yang ada di udara sekitar. Dari hasil penelitian tersebut didapatkan bahwa plasma di atas permukaan air dapat dipergunakan untuk menghilangkan bahan pencemar dalam air (Sato *et al.*, 2004).

Peneliti-peneliti lain, seperti Zhang *et al.* (2007) menyebutkan bahwa pengolahan 2,4-dinitrofenol menggunakan non-termal plasma memiliki efisiensi degradasi sebesar 83%. Reaktor hibrida pernah dirancang untuk penelitian tentang optimalisasi degradasi alga (Sun Bing *et al.*, 2011). Sedangkan dekomposisi benzena memiliki efisiensi yang lebih tinggi dengan menggunakan reaktor plasma hibrida daripada menggunakan absorber biasa (Ogata *et al.*, 2001).

Universitas Indonesia telah melakukan penelitian untuk mengembangkan proses pengolahan limbah senyawa fenolik. Dengan semakin tinggi pH dan semakin lama waktu pemaparan, maka akan semakin besar senyawa fenol yang didegradasi (Irawati Cipto, 2005). Sedangkan perbandingan pengolahan limbah sintetik fenol dan *p*-klorofenol, dimana dibutuhkan energi yang lebih besar dalam mendegradasi senyawa tersebut (Tirta Ayu, 2001). Pengolahan senyawa fenol dan *p*-klorofenol dengan menggunakan teknik ozonasi dalam kolom injeksi ozon berganda mempunyai efisiensi sampai dengan 99% dengan waktu yang relatif singkat dan pada pH tinggi (Pryhanto, 2000). Penelitian lain yaitu dengan produktivitas ozon sebesar 1,7745 ppm yang digunakan dalam kolom sistem injeksi berganda, akan diperoleh efisiensi sampai dengan 99 % (Kurniawan, 2000).

Penelitian ini merupakan pengembangan lebih lanjut dari penelitian-penelitian yang ada di Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia, dimana sebelumnya telah dikembangkan beberapa desain reaktor plasma dan aplikasi

penggunaannya. Pada penelitian ini dirancang suatu jenis reaktor baru yang mana dalam reaktor tersebut terbentuknya gas ozon dan lecutan plasma terjadi bersama sehingga disebut reaktor hibrida.

Pengolahan dengan menggunakan teknologi ini diharapkan dapat menghasilkan limbah dengan komposisi aman dibuang ke lingkungan sesuai dengan standar Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup tentang baku mutu limbah cair bagi industri yaitu konsentrasi senyawa fenolik 0,5 mg/L.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka perumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana sistem pengolah limbah menggunakan Reaktor Hibrida Ozon-Plasma dingin dapat menguraikan (degradasi) berbagai jenis limbah cair senyawa fenolik pada kondisi basa dengan radikal hidroksil ?
2. Bagaimana pengaruh waktu dalam sistem pengolahan berbagai jenis limbah senyawa fenolik dalam Reaktor Hibrida Ozon-Plasma ?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperoleh data penurunan nilai COD (*Chemical Oxygen Demand*) dan persen degradasi limbah senyawa fenolik cair dalam RHOP (Reaktor Hibrida Ozon-Plasma).

1.4. Batasan Masalah

Pada penelitian ini yang akan menjadi batasan masalah adalah sebagai berikut :

1. Reaktor yang digunakan sesuai dengan desain yang dijelaskan pada Bab 3.
2. Ozonator yang digunakan Resun jenis RSO-9805 buatan Hong Kong.
3. Proses pengolahan berlangsung secara semi-kontinyu.
4. Limbah yang diolah adalah limbah cair senyawa fenol sintesis dengan konsentrasi 50 ppm yaitu *p*-klorofenol, limbah fenolik dalam limbah tekstil, dan limbah fenolik dalam limbah pabrik bahan peledak.
5. Laju alir limbah 1,2 L/menit dan laju alir gas 10 L/menit.
6. Kondisi pH limbah antara 6,2 – 11.

1.5. Sistematika Penulisan

Susunan penulisan akan mengacu pada sistematika sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Berisi latar belakang sebagai dasar penelitian dilakukan, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisi landasan teori umum yang digunakan untuk menjelaskan masalah yang akan dibahas yang berhubungan dengan uji kinerja Reaktor Hibrida Ozon-Plasma pada pengolahan limbah cair senyawa fenol.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Berisi tentang metode penelitian, alat dan prosedur yang dilakukan dalam menjalankan penelitian untuk mencapai tujuan yang diinginkan.

BAB IV HASIL PERCOBAAN DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil percobaan, pengolahan data serta analisis hasil penelitian.

BAB V KESIMPULAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan hasil penelitian yang telah dilakukan secara menyeluruh.

DAFTAR PUSTAKA

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pendahuluan

Pengolahan limbah cair umumnya dilakukan dengan menggunakan rangkaian metode sebagai berikut :

- **Pengolahan Fisika**

Pengolahan limbah secara fisika yaitu pengolahan dengan menggunakan parameter fisik saja, di antaranya filtrasi, flokulasi, *mixing*, sedimentasi

- **Pengolahan Kimia**

Pengolahan limbah secara kimia menggunakan penambahan zat-zat kimia maupun proses-proses kimia, sehingga terjadi perubahan material di dalamnya. Proses pengolahan limbah secara kimia meliputi adsorpsi, absorpsi, dan desinfeksi.

- **Pengolahan Biologi**

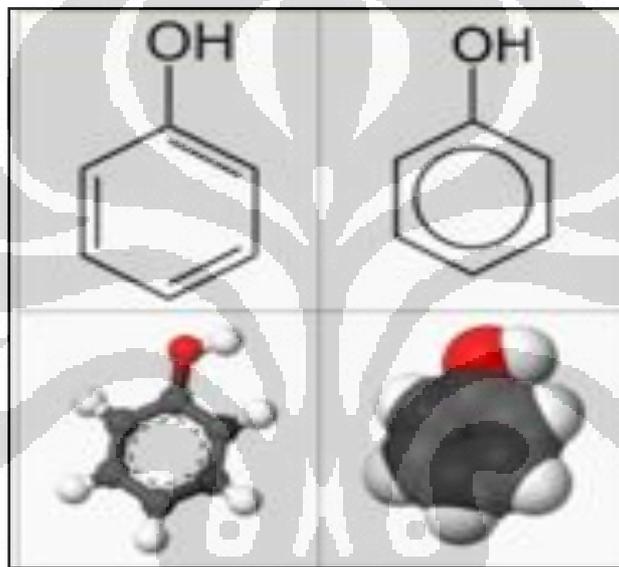
Pengolahan secara biologi merupakan metode pengolahan dengan menggunakan mikroorganisme sebagai bahan bakunya dengan tujuan untuk menghilangkan zat-zat organik yang dapat dibiodegradasi maupun untuk menghilangkan zat-zat tertentu dalam limbah.

Penggunaan metode secara konvensional seperti di atas, biasanya ditetapkan dengan melihat karakteristik dan komposisi dari limbah cair yang akan diolah, sehingga pengolahan limbah tersebut membutuhkan peralatan dan infrastruktur yang tidak fleksibel. Hal lain yang diperhatikan adalah penggunaan bahan-bahan kimia yang relatif mahal dan terkadang akan menghasilkan senyawa-senyawa baru, sehingga biaya pengolahan secara konvensional perlu diperbaiki.

Reaktor-reaktor plasma dingin, seperti juga Reaktor Hibrida Ozon-Plasma (RHOP), saat ini belum banyak diaplikasikan untuk proses pengolahan limbah cair. RHOP yang dirancang berfungsi untuk membantu memperpanjang keberadaan (*life time*) gas ozon di dalam larutan, sehingga proses degradasi limbah diharapkan dapat terjadi lebih efektif. RHOP merupakan kombinasi atau hibrida reaksi ozonasi dalam medan plasma cair yang berada di reaktor.

2.2. Senyawa Fenolik dalam Limbah Cair

Fenol merupakan senyawa fenolik dasar, yaitu senyawa alkohol aromatik yang dapat berupa padatan kristal putih dengan bau yang khas. Fenol diklasifikasikan ke dalam senyawa yang bersifat toksik, korosif, karsinogenik dan mutagenik. Senyawa fenol terdapat dalam limbah industri obat-obatan, industri plastik, industri batu bara, industri kimia, industri bahan peledak, industri tekstil dan pengilangan minyak. Senyawa fenol murni memiliki rumus molekul C_6H_5OH dan memiliki nama lain seperti asam karbolat, asam fenilik, benzofenol, monohidroksi benzena dan dengan struktur molekul sebagai berikut:



Gambar 2.1 Struktur molekul fenol (Vitiligo S.I., 2011)

Fenol dan turunannya merupakan senyawa-senyawa yang berbahaya bagi lingkungan. Keberadaan fenol yang berlebihan di lingkungan menyebabkan dampak negatif bagi keberlangsungan hidup makhluk hidup. Senyawa fenol jarang dijumpai dalam keadaan murni, pada umumnya bergabung dengan senyawa-senyawa turunannya seperti pentaklorofenol (PCP), 2,4,6-triklorofenol (TCP), nitrofenol, dan juga dinitrofenol (DNP). Senyawa fenol memiliki toksisitas yang tinggi terhadap biota akuatik di perairan dengan tingkat toksisitas yang berbeda-beda terhadap berbagai jenis biota akuatik. Toksisitas ini sangat dipengaruhi oleh faktor fisika dan kimia air itu sendiri. Pada keadaan temperatur yang tinggi dan kelarutan oksigen dalam air rendah, maka toksisitas terhadap biota akuatik akan bertambah tinggi. Jika pH air tinggi, maka laju degradasi senyawa ini akan menjadi rendah pula. Hal ini dikarenakan pada pH

rendah aktivitas mikroorganisme akan terhambat dan di samping itu oksigen tidak dapat larut pada pH air yang rendah, sehingga akan mengurangi persediaan oksigen yang diperlukan mikroorganisme untuk menguraikan senyawa fenol dalam air.

Fenol merupakan satu dari paling banyak polutan yang menghasilkan limbah cair pada proses pengolahan industri kimia seperti industri petrokimia, industri cat, industri tekstil, industri pestisida, dan lain sebagainya (La Brega *et al.* dalam Alnaizy and Akgerman, 2000).

Produk dari oksidasi fenol sebelum teroksidasi sempurna di sebut sebagai produk intermediet. Produk tersebut akan terurai lagi dengan memperpanjang waktu oksidasi. Oksidasi fenol menghasilkan 4 kelompok produk yakni senyawa aromatik, senyawa alifatik, asam organik, dan senyawa karbonil. Kelompok aromatik meliputi cetachol, hydroquinon, *p*-benzoquinon, dan resorcinol. Kelompok senyawa alifatik meliputi *muconic acid*, *fumaric acid*, *maleinal dehyde* dan *muconaldehyde*. Sedangkan bentuk asam organik meliputi asam oksalik, asam formik, dan asam maleik.

Fenol dalam konsentrasi tinggi dapat menyebabkan kematian jika tertelan, terhisap atau terserap oleh kulit. Senyawa ini dapat mempengaruhi sistem syaraf pusat dan menyebabkan kerusakan pada hati dan ginjal. Fenol akan menyebabkan iritasi pada kulit tetapi mempunyai efek anestesi lokal, sehingga rasa sakit tak terasa pada saat awal bersentuhan. Area kontak biasanya menjadi putih dan dapat menjadi luka bakar.

Selain itu fenol dapat menyebabkan penyakit yang bersifat akut maupun kronis. Gejala akut ditandai dengan kulit terkelupas, gangguan pada kornea mata, gangguan fungsi pencernaan, gangguan ginjal dan liver. Gejala kronis ditandai dengan sakit kepala, nafsu makan berkurang, sulit tidur dan penurunan berat badan. Oleh karena itu, pengolahan limbah fenol sangat diperhatikan untuk menghindari bahaya tersebut. Fenol memiliki ambang batas di lingkungan sebesar 0,5 mg/L – 1 mg/L sesuai KEP-51/MENLH/10/1995.

Tabel 2.1. Konsentrasi beberapa limbah fenolik pada industri (Pryhanto, 2000)

Nama Senyawa	Konsentrasi ($\mu\text{g/L}$)	Sumber
Fenol	0,03-20 200-3016000 3200 38000-1240000 10-300	Saluran air yang telah diolah Kilang minyak Gasifikasi batubara Pabrik kokas Industri kimia
2,p-klorofenol	51-330 <0,1	Industri kimia Industri pengawetan kayu dan sampah
2,6-Diklorofenol	220 2,4 1,2-5,6	Industri kimia Industri pengawetan kayu Sari (<i>leachate</i>) sampah
2,4,5-Triklorofenol	<0,005 0,5-2400 <0,05	Saluran air yang telah diolah Industri kimia Industri pengawetan kayu
2,4,6-Triklorofenol	<0,05-1 <0,05-3120 0,5-1 0,4-1 25-115	Saluran air yang telah diolah Industri kimia Industri pengawetan kayu Sari (<i>leachate</i>) sampah <i>Effluent</i> industri <i>pulp</i>
2,3,4,6-Tetraklorofenol	0,6-28 1,2-8270 0,3-116 0,2-0,8	Saluran air yang telah diolah Industri kimia Industri pengawetan kayu Sari (<i>leachate</i>) sampah <i>Effluent</i> industri <i>pulp</i>
Pentaklorofenol	0,5-4,7 0,25-1,3 0,05-2760 5400000 0,6-42	Saluran air yang telah diolah Saluran air yang telah diolah Industri pengawetan kayu Industri kimia Sari (<i>leachate</i>) sampah

2.3. Senyawa Fenolik dalam Limbah Tekstil

Setiap produk yang berasal dari serat alam seperti wool dan kapas, atau dari serat sintesis yang berasal dari petrokimia, atau hasil modifikasi *pulp* kayu seperti poliester, nilon, rayon dan asetat dapat di sebut sebagai tekstil. Industri tekstil adalah industri yang mengubah serat baik serat alam maupun serat sintesis menjadi kain tenunan ataupun benang tenunan. Industri tekstil dapat dibagi menjadi 3 (tiga), yaitu industri pemintalan, industri pertenunan dan perajutan, serta industri penyempurnaan atau pencelupan . Industri tekstil merupakan salah satu industri yang sangat berkembang di Indonesia, dan menempati posisi kedua penghasil devisa negara terbesar pada sektor non-migas setelah industri kayu lapis.

Dalam proses pengolahannya, industri tekstil mengolah tekstil dalam larutan kimia dengan air sebagai mediumnya, sehingga diperlukan air dalam jumlah besar.

Jumlah air yang dibutuhkan adalah sekitar 100 – 250 m³/ton produk (PT. Sucofindo, 1999). Limbah cair merupakan limbah yang paling banyak dihasilkan dalam industri tekstil dan paling berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan yang dihasilkan dari proses *sizing*, *desizing*, *scouring*, *merserisasi*, *bleaching*, *dyeing*, *printing*, dan *finishing* (PT. Sucofindo, 1999).

Efluen akhir limbah cair industri tekstil pasti menunjukkan intensitas warna tinggi, dengan komposisi tiap warna yang berbeda, sehingga tidak ada teknologi kimia yang bisa diaplikasikan untuk menghilangkan seluruh warna tersebut. Hal ini tentu saja membawa masalah dalam pengolahan limbah cair industri tekstil (Sugiarto, 2002).

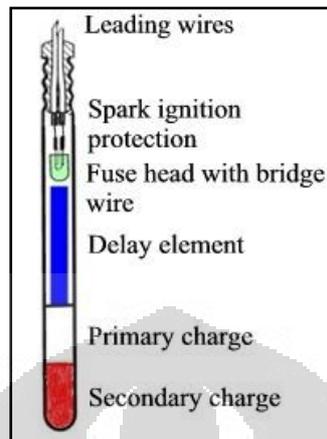
Air limbah tekstil mengandung substansi yang berpengaruh besar pada kadar BOD, COD, TSS, dan kandungan logam berat. Dengan penggunaan berbagai macam zat kimia serta suhu yang tinggi, air buangan industri tekstil bersifat alkali, berwarna, berbusa, berbau, panas, dengan tingkat BOD tinggi. Tingkat pencemaran yang ditimbulkan bergantung kepada macam bahan yang dikerjakan dan proses pengerjaannya. Pewarna yang digunakan meskipun dalam jumlah sedikit selalu menimbulkan masalah limbah cair yang serius. Selain masalah estetika, juga masalah kandungan bahan kimia berbahaya seperti fenol dan kromium.

Air yang tercemar limbah industri tekstil dapat menyebabkan masalah kesehatan bagi masyarakat sekitar juga berpengaruh serius tak hanya pada air tanah dan air permukaan sekitar industri, tetapi juga dampak jangka panjang pada sistem ekologi air. Limbah industri tekstil juga biasa mengandung fenol yang memiliki efek kumulatif, sehingga berpotensi pada rantai makanan. Dengan adanya penggunaan pewarna dan bahan kimia, limbah menjadi berwarna hitam dan turbiditas (kekeruhan) badan air penerima meningkat. Hal ini menyebabkan terhambatnya proses fotosintesis, dan menyebabkan penurunan kualitas habitat. Baku mutu limbah cair di Indonesia diatur oleh Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No.51/MENLH/10/1995 tentang Baku Mutu Limbah Cair bagi Kegiatan Industri.

2.4. Limbah Bahan Peledak

Bahan peledak primer (*primary charge*) pada detonator listrik digunakan bahan peledak bernama DDNP (Diazo Di-Nitro Phenol). Kondisi sekarang, pengadaan DDNP belum mandiri, karena masih tergantung pada pengadaan dari luar negeri. Di sebabkan

DDNP termasuk bahan peledak berbahaya, karena memiliki sensitivitas tinggi, maka sedikit kapal yang bersedia mengangkut produk ini.

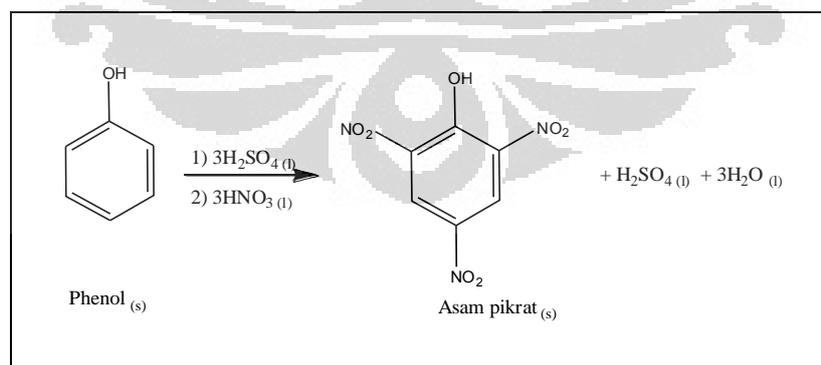


Gambar 2.2. Struktur detonator listrik

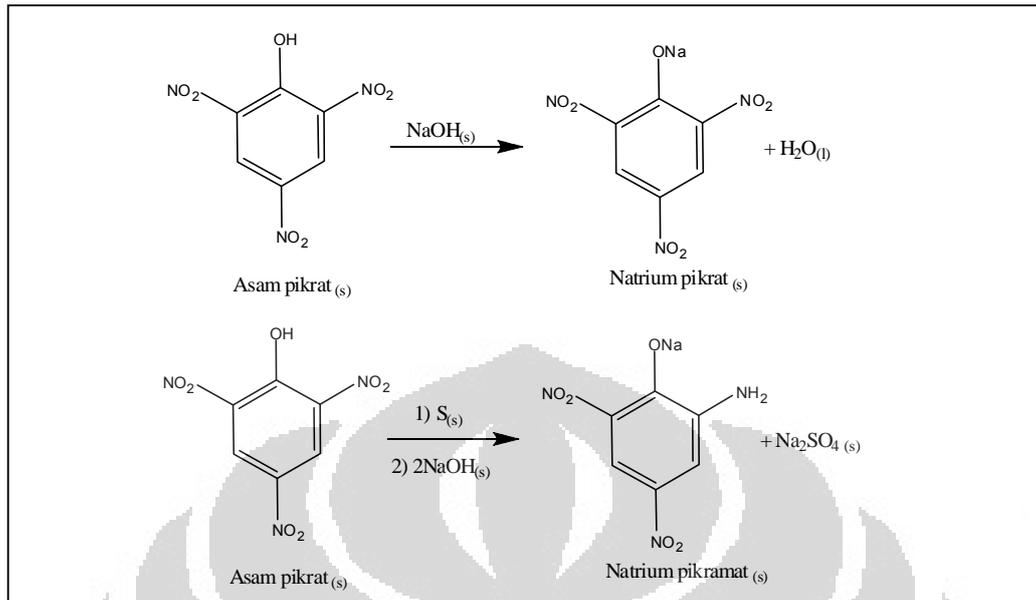
Untuk meningkatkan kemandirian, telah dilakukan kegiatan pengembangan produk DDNP di salah satu Badan Usaha Milik Negara (BUMN) bekerjasama dengan salah satu perguruan tinggi negeri di dalam negeri. Pengembangan produk DDNP telah berhasil dilakukan, namun belum dilakukan kajian khusus mengenai pengolahan limbah masing-masing proses.

Untuk menghilangkan ketergantungan dari luar negeri, maka DDNP dibuat dari bahan dasar fenol yang merupakan bahan baku yang digunakan untuk keperluan farmasi atau keperluan komersial lainnya. DDNP dibuat melalui 3 tahapan proses sbb:

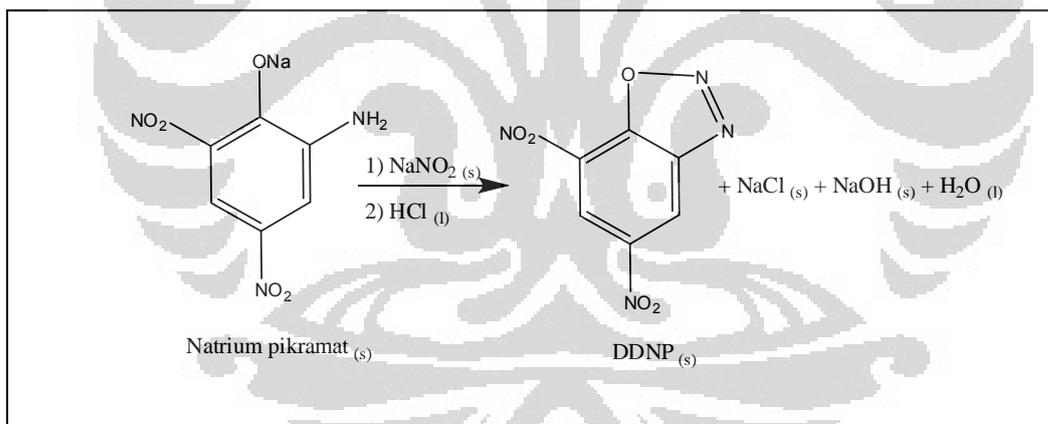
1) Fenol \rightarrow Asam Pikrat



Gambar 2.3. Reaksi pembuatan Asam Pikrat dari Fenol

2) Asam Pikrat \rightarrow Natrium Pikramat

Gambar 2.4. Reaksi pembuatan Natrium Pikramat dari Asam Pikrat

3) Natrium Pikramat \rightarrow DDNP

Gambar 2.5. Reaksi pembuatan DDNP dari Natrium Pikramat

Dari uraian tentang reaksi-reaksi degradasi senyawa fenolik seperti di atas, maka ketiga jenis proses pengolahan limbah tersebut layak untuk ditangani. Untuk menghasilkan 2,5 kg DDNP setiap harinya, berdasarkan perhitungan neraca massa dan memperhatikan rendemen reaksi, maka perkiraan kandungan limbah cair dan padat, serta jumlahnya pada masing-masing proses reaksi adalah seperti pada Tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2.2. Perkiraan kandungan dan jumlah limbah untuk produksi DDNP 2,5 kg (PT.Pindad, 2010)

No	Proses reaksi	Rendemen (η)	Kandungan limbah	Massa keluar (kg)
1	Phenol \rightarrow Asam Pikrat (8,9 kg)	60%	Phenol	2,4
			H ₂ SO ₄	13,8
			H ₂ O	75,8
			Total limbah	92,0
2	Asam Pikrat \rightarrow Natrium Pikramat (5,2 kg)	80%	Asam pikrat	1,3
			Natrium pikrat	2,5
			Na ₂ SO ₄	3,3
			NaOH	5,7
			S	6,7
			H ₂ O	387,2
			Total limbah	406,7
3	Natrium Pikramat \rightarrow DDNP (2,5 kg)	60%	Asam pikramat	1,9
			NaNO ₂	0,7
			HCl	0,2
			NaCl	0,7
			H ₂ O	41,317
			Total limbah	46,513

2.5. Teknik Ozonasi

Ozon merupakan salah satu oksidator kuat di mana digunakan pertama kali oleh de Meritens (1886) di Perancis untuk menghilangkan polutan dalam air hingga akhirnya sampai saat ini telah meluas pemakaiannya dalam berbagai bidang di antaranya bidang teknologi dan sains kimia, bioteknologi, lingkungan industri, makanan, pengalengan, kertas, tekstil, dan kedokteran. Beberapa kemampuan dari ozon adalah sebagai desinfektan bakteri, menonaktifkan virus, membunuh lumut dan alga, menghilangkan warna, bau dan rasa, menghilangkan limbah organik (fenol, detergen, pestisida) dan limbah non-organik (sianida, sulfida, nitrat dan lainnya).

Ozon merupakan alotrof dari oksigen dengan wujud gas pada suhu kamar. Ozon di atmosfer terdapat di dua lapisan berbeda yaitu di lapisan stratosfer, 15-40 km dari permukaan bumi yang berfungsi untuk melindungi makhluk hidup dari penyinaran oleh sinar ultraviolet dan di lapisan troposfer, 0-15 km dari permukaan bumi (berupa *human-made air pollutant*) bersifat racun dan menjadi salah satu gas rumah kaca (Soemarwoto dalam Pryhanto, 2000).

Ozon dapat terbentuk secara alamiah di lapisan stratosfer dari molekul oksigen melalui reaksi fotokimia yaitu reaksi kimia yang menggunakan cahaya sebagai sumber

energinya. Ozon sangat ampuh digunakan sebagai proses oksidasi selain sifatnya yang bersih dan relatif aman. Proses ozonasi atau pengolahan yang menggunakan bahan baku ozon cenderung mahal tetapi lebih ekonomis dan kompetitif jika dibandingkan proses pengolahan limbah cair, sedangkan pengeluaran terbesar adalah untuk tenaga listrik.

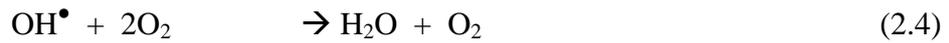
Ozon termasuk gas yang tidak dapat disimpan dan dapat mengalami kondensasi pada suhu -112°C menjadi zat cair warna biru. Zat cair ini akan membeku pada suhu $-251,4^{\circ}\text{C}$. Ozon pada suhu di atas 100°C akan dengan cepat mengalami dekomposisi. Senyawa ozon merupakan senyawa yang tidak stabil, hal ini dikarenakan senyawa ini sangatlah cepat terdekomposisi kembali menjadi oksigen. Sebagai senyawa yang tidak stabil, laju reaksi dekomposisinya bertambah besar sesuai dengan kondisi suhu dan derajat keasamannya. Dekomposisi ozon terkatalisis dengan adanya ion hidrokksida (OH^-), radikal-radikal hasil dekomposisi ozon, produk-produk dekomposisi ozon, produk-produk dekomposisi senyawa organik terlarut dan dengan adanya beberapa senyawaan lainnya seperti padatan alkalis, logam-logam transisi, oksida-oksida logam dan karbon (Eckenfelder, 1989).

Tabel 2.3. Potensial Oksidasi (Clements, 1997)

No	Spesi aktif	Potensial oksidasi
1	Flor	3,03
2	Radikal hidroksil (OH^{\bullet})	2,80
3	Atom oksigen (O^{\bullet})	2,42
4	Ozon (O_3)	2,07
5	Hidrogen peroksida (H_2O_2)	1,78
6	Perhydroxyl radikal (H^{\bullet})	1,70
7	Klorin	1,36

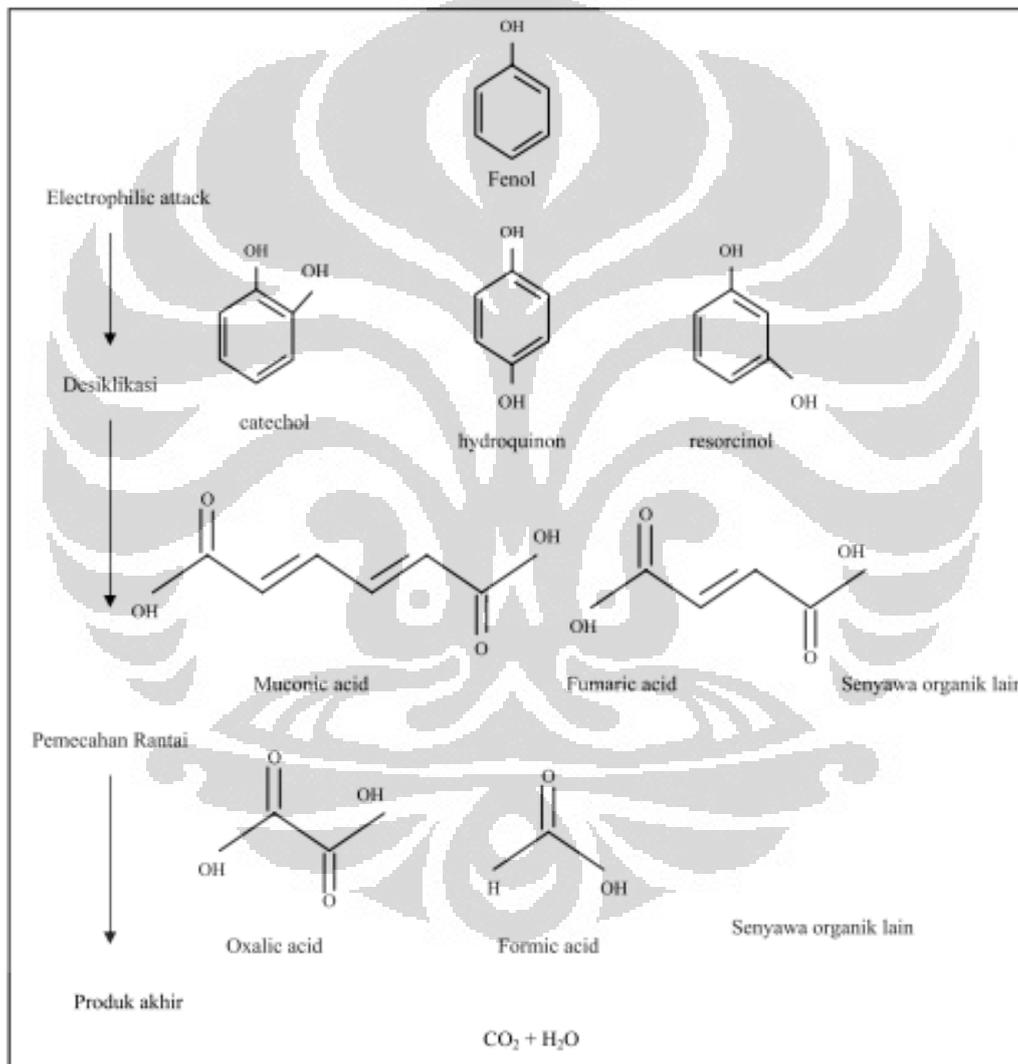
Beberapa sifat kimia ozon dalam larutan air, terutama di dasarkan pada fenomena terurainya ozon dalam air seperti dapat digambarkan sebagai berikut (Metcalf & Eddy, 1991) :





Ozon murni memiliki kelarutan 12,5 kali kelarutan oksigen dalam air. Konsentrasi ozon terlarut dalam air pada keadaan jenuh dapat dinyatakan sebagai fungsi kelarutan atau koefisien kelarutan. Kelarutan didefinisikan sebagai volume gas terlarut per unit volume cairan pada suhu dan tekanan di bawah kesetimbangan dan dengan keberadaan gas yang berkesetimbangan pada 1 atmosfer.

Proses penyisihan senyawa fenolik dengan menggunakan ozon di dalam limbah cair secara kimiawi dapat di sederhanakan seperti Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Skema Reaksi zonasi Fenol

2.6. Ozonasi dalam *Advanced Oxidation Processes* (AOPs)

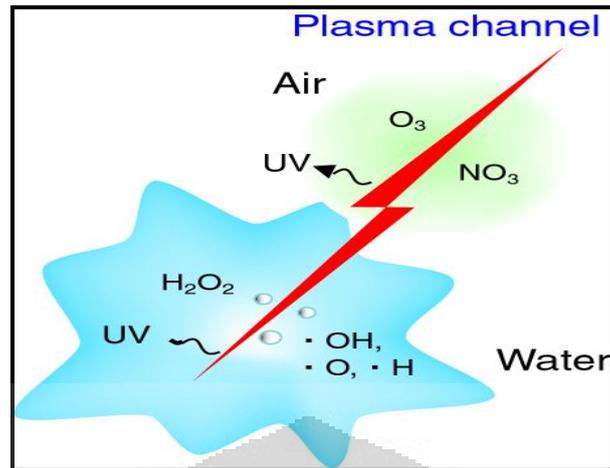
Teknologi yang banyak digunakan dan dikembangkan dalam proses ozonasi adalah *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) di mana dapat dilakukan dalam beberapa

kondisi yang berbeda, yaitu ozon/UV, ozon/H₂O₂, ozon/UV/H₂O₂, H₂O₂/UV dan ozon pada pH tinggi. Pada AOPs mendorong terbentuknya produksi hidroksil radikal aktif yang akan mempunyai kemampuan tinggi dalam menetralkan material organik. Oksidasi terjadi melalui tiga proses, yaitu : (1) Abstraksi hidrogen; (2) Transfer elektron; dan (3) Pembentukan radikal (Masten *and* Davies, 1994).

Proses oksidasi lanjut adalah metode oksidasi fasa liquida yang terutama di dasari oleh pembentukan dan penggunaan radikal OH[•] sebagai hasil samping dalam proses yang dapat mengakibatkan kehancuran dari senyawa pencemar dan biasa digunakan secara terpisah atau dalam berbagai kombinasi. Ozon dapat digunakan sebagai pengoksidasi senyawa pencemar hasil proses industri seperti senyawa fenol.

Proses oksidasi pada kondisi ringan oleh spesi reaktif seperti radikal hidroksil yang dihasilkan oleh radiasi ultra violet (UV) dalam reaksi antara oksidan yang ada yaitu ozon dan hidrogen peroksida, hal ini yang kemudian disebut sebagai *Advanced Oxidation Processes* (AOPs). AOPs merupakan teknologi alternatif yang sangat menarik untuk dipelajari dalam penghancuran kontaminan-kontaminan organik yang berbahaya (Alnaizy and Akgerman, 2000).

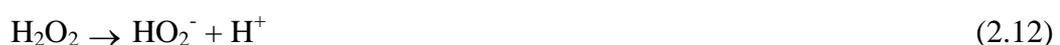
Pada penelitian yang dilakukan oleh Christensen *et al.* (1982) menyatakan bahwa degradasi fenol dan pembentukan catechol menurun secara teratur pada saat kondisi larutan pada pH kurang dari 7 dan lebih besar dari 9, hal ini dikarenakan penurunan tersebut berdasarkan pada dekomposisi hidroksil radikal yang cepat dari hidrogen peroksida pH tinggi. Begitu pula pada penelitian yang dilakukan oleh Lipczynska-Kochany (1993) menyatakan bahwa oksidasi fenol dengan menggunakan AOPs mempunyai efek yang tidak signifikan pada pH antara 7 – 9. Kedua penelitian tersebut menjelaskan bahwa hidrogen peroksida berdisosiasi dalam media alkali. Juga kecepatan reaksi dari radikal hidroksil dengan hidrogen peroksida merupakan hal penting yang menjadi parameter dalam memutuskan ikatan fenol pada kondisi pH asam.



Gambar 2.7. Proses terbentuknya spesi aktif oleh plasma

Banyaknya reaksi fisika dan kimia yang dihasilkan oleh proses oksidasi, membuat teknologi ini dapat menjadi solusi beberapa proses yang dibutuhkan dalam pengolahan air limbah. Sinar ultraviolet yang dihasilkan mampu mengoksidasi senyawa organik sekaligus membunuh bakteri. Dan yang paling penting adalah banyak dihasilkan spesi aktif seperti OH^\bullet , O^\bullet , H^\bullet , dan H_2O_2 yang berupa oksidan kuat yang dapat mengoksidasi berbagai senyawa organik sekaligus membunuh bakteri. Proses oksidasi oleh hidroksil radikal merupakan proses yang utama selama pengolahan dengan menggunakan plasma.

Mekanisme pembentukan OH^\bullet pada plasma dikenal sebagai akibat dari tumbukan elektron dari proses disosiasi pada molekul air. Reaksi pembentukan spesi aktif menurut Munter (2001), adalah sebagai berikut:





Ozon pada pH basa:



Ozon pada pH asam:



Dalam cairan, ozon dapat bereaksi dengan berbagai senyawa melalui dua cara yaitu reaksi langsung dengan molekul ozon dan reaksi dengan spesi radikal yang terbentuk ketika ozon terdekomposisi dalam air. Pada struktur resonansi molekul ozon akan berlaku sebagai dipol yaitu sebagai agen elektrofilik dan agen nukleofilik. Mekanisme reaksi yang terjadi akibat sifat tersebut dapat dikategorikan menjadi tiga yaitu adisi siklik, reaksi elektrofilik dan reaksi nukleofilik. Diantara ketiga reaksi mekanisme tersebut, mekanisme yang menggambarkan reaksi antara ozon dengan senyawa fenol adalah reaksi elektrofilik.

Reaksi elektrofilik terutama terjadi pada daerah molekular yang memiliki densitas elektron yang besar, khususnya senyawa aromatik. Senyawa aromatik yang tersubstitusi gugus donor elektron (OH, NH₂ dan gugus sejenis) menunjukkan densitas elektron yang besar pada atom karbon posisi orto dan para, sehingga atom karbon pada posisi ini sangat reaktif terhadap ozon (Cipto, 2005).

Oksidasi ozon dengan senyawa alifatik tak jenuh atau senyawaan aromatis mengakibatkan terbentuknya reaksi dengan air dan oksigen untuk membentuk senyawa asam-asam organik, keton dan alkohol. Pada suasana pH lebih tinggi dari 9 dengan kehadiran garam-garam redoks seperti Fe, Mn dan Cu, senyawa aromatik kemungkinan besar membentuk senyawa hidroksiaromatik (fenolik) yang relatif beracun. Produk samping dari proses oksidasi senyawa organik dengan ozon kebanyakan dapat diuraikan secara biologis (*biodegradable*) (Langlais *et al.*, 1991).

Pembuatan senyawa ozon yang paling efektif dilakukan menggunakan bahan baku udara atau oksigen murni yang dilewatkan diantara dua elektroda saling berdekatan yang dialiri arus listrik bertegangan tinggi yaitu antara 10.000 sampai 25.000 Volt.

2.7. Teknologi Plasma dalam Ozonasi

Di dalam ilmu fisika dan ilmu kimia, plasma merupakan gas yang terionisasi secara parsial, di mana proporsi tertentu dari elektron berada dalam keadaan bebas dari pada berikatan dengan atom atau molekul. Plasma juga dapat dikatakan sebagai atom yang kehilangan elektron karena beberapa atau semua elektron di orbit atom luar terpisah dari atom atau molekulnya. Hasilnya adalah sebuah ion atau elektron yang tidak lagi berikatan satu sama lain. Kemampuan muatan positif dan muatan negatif untuk sedikit berpindah dengan bebas membuat plasma bersifat induktif secara listrik sehingga memberikan respon yang kuat pada bidang elektromagnetik. Oleh karena itu plasma mempunyai sifat tidak sama dengan padatan, cairan atau gas dan di anggap sebagai satu keadaan materi yang berbeda. Plasma berbentuk gas netral seperti awan, tidak mempunyai bentuk dan volum terbatas, kecuali dalam kotak tertutup, tetapi tidak sama dengan gas, dalam pengaruh medan magnet, plasma mungkin membentuk struktur seperti kawat pijar, sinar dan lapisan ganda.

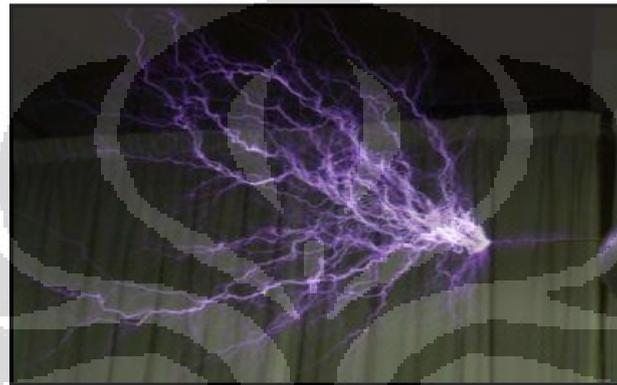
Solid	Liquid	Gas	Plasma
Example Ice H_2O	Example Water H_2O	Example Steam H_2O	Example Ionized Gas $H_2 \rightarrow H^+ + H^+ + 2e^-$
Cold $T < 0^\circ C$	Warm $0 < T < 100^\circ C$	Hot $T > 100^\circ C$	Hotter $T > 100,000^\circ C$ > 10 electron Volts
			
Molecules Fixed in Lattice	Molecules Free to Move	Molecules Free to Move, Large Spacing	Ions and Electrons Move Independently, Large Spacing

Gambar 2.8. Perbandingan fase padat, cair, gas, dan plasma

Plasma banyak terdapat di alam, hampir 99% alam semesta ini merupakan fase plasma. Beberapa contoh fase plasma di alam antara lain adalah proses pembentukan jagad raya (big bang), api, halilintar atau petir, fenomena St. Elmo's fire, reaksi termonuklir pada matahari, dan juga kreasi manusia lainnya.



Gambar 2.9. Kilat yang merupakan plasma alami



Gambar 2.10. Contoh plasma buatan

Plasma memiliki karakteristik yang berbeda dari gas biasa yang tidak terionisasi. Plasma memiliki beberapa karakteristik. Berikut beberapa karakteristik dan aplikasi plasma dalam kehidupan sehari-hari :

- a. Energi tinggi dan suhu tinggi (gas atau elektron). Plasma dengan suhu $10-100 \times 10^6$ °C akan menghasilkan reaksi fusi nuklir. Plasma ini diharapkan dapat menjadi sumber energi yang dapat digunakan pada abad 21. Pada daerah suhu yang lebih rendah, plasma dapat digunakan dalam pengolahan mekanis seperti pengelasan plasma, pemotongan, *electrical discharge machining*, *plasma spraying*, dan sebagainya.
- b. Aktivasi kimia sangat tinggi. Plasma sangat mudah menghasilkan radikal ketika gas dimasukkan ke dalamnya, yang mendorong reaksi kimia agar lebih mudah terjadi. Bidang plasma kimia, plasma digunakan untuk perlindungan lingkungan dan *chemical vapour deposition* (CVD) memanfaatkan karakteristik ini.

- c. Menghantarkan arus listrik. Arus listrik bisa dihantarkan melalui plasma di karenakan banyak partikel-partikel bermuatan listrik yang terdapat dalam plasma, seperti ion dan elektron. Dengan menggunakan fitur ini, parameter plasma dapat dikontrol dan plasma dapat dipanaskan hingga suhu tinggi.
- d. Radiasi elektromagnetik dan emisi cahaya. Banyak jenis gelombang elektromagnetik kuat dipancarkan dari plasma karena temperatur ionisasi yang tinggi. Hal ini dapat digunakan sebagai sumber cahaya, sebuah layar elektronik, dan analisis optik.

Plasma merupakan gas yang terionisasi, maka ionisasi selalu ada pada proses terjadinya plasma (Krane dalam Nur, 2006). Plasma terbentuk karena adanya ionisasi fluida yang ada di sekitar elektroda dan adanya perbedaan tegangan yang sangat tinggi antara kedua elektroda. Mekanisme pembentukan plasma adalah sebagai berikut:

- Atom netral atau molekul dalam media pada perbedaan tegangan yang sangat tinggi akan terionisasi menghasilkan ion positif dan elektron bebas.
- Elektroda akan memisahkan dan mencegah penggabungan ion positif dan elektron serta menggerakkan elektron menuju elektroda positif.
- Elektron yang berkumpul pada elektroda akan bergerak dengan kecepatan yang sangat tinggi dan energi yang sangat besar dan menumbuk atom netral sehingga terjadi proses ionisasi, disosiasi, dan eksitasi.

Elektron dan partikel atom dengan energi yang tinggi tersebut akan saling bertumbukan dengan cara ionisasi, disosiasi, dan eksitasi yang kemudian menghasilkan elektron bebas yang mendorong terjadinya fenomena loncatan elektron (*avalanche electron*).

Ionisasi didefinisikan sebagai proses terlepasnya elektron suatu atom atau molekul dari ikatannya. Energi yang dibutuhkan untuk melepas satu atau lebih elektron dari orbitnya pada sebuah atom atau molekul dapat didefinisikan sebagai energi ionisasi E_i .

Reaksi ionisasi adalah :



Pada proses tumbukan antara elektron dengan partikel-partikel gas tidak hanya proses ionisasi yang terjadi melainkan juga menyebabkan peristiwa-peristiwa yang

lainnya, di antaranya yaitu proses rekombinasi, disosiasi dan eksitasi (Chapman, 1990 dalam Nur, 2006).

Kebalikan dari proses ionisasi adalah proses rekombinasi. Rekombinasi terjadi dengan cara pengikatan elektron oleh ion dan pengikatan antar atom menjadi molekul sehingga menjadi spesi netral atau ion negatif yang disertai pemancaran foton (Chapman, 1990 dalam Nur, 2006).

Dissosiasi adalah pemisahan molekul menjadi atom-atom penyusunnya. Partikel gas yang terdissosiasi ini dapat pula terionisasi menjadi ion-ion positif dan negatif.

Reaksi disosiasi adalah :

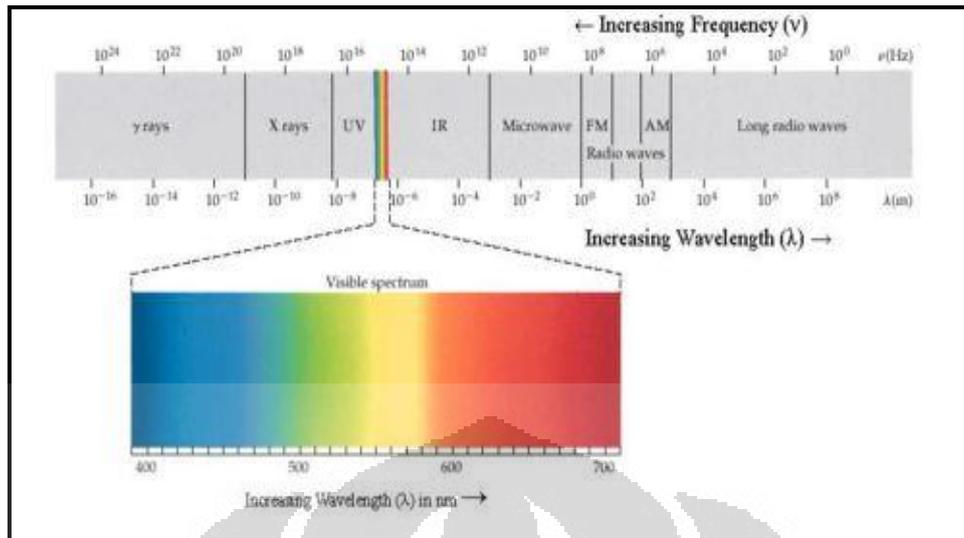


Eksitasi adalah peristiwa dimana elektron yang berada di tingkat energi yang lebih rendah berpindah ke tingkat energi yang lebih tinggi dengan menyerap energi tumbukannya dengan elektron. Peristiwa kebalikan dari eksitasi tersebut disebut relaksasi dan peristiwa ini disertai pemancaran foton. Reaksi eksitasi adalah:



Pada proses eksitasi di atas terjadi suatu loncatan elektron yang sangat cepat dalam situs aktif senyawa dimana elektron-elektron yang meloncat tersebut menempel pada elektroda (e^{-*}). Oksigen mempunyai kulit terluar s dan p. Kulit s merupakan kulit teraktif yang mengalami proses eksitasi. Proses tersebut berlangsung sangat cepat yang biasa disebut dengan *intermediate*.

Relaksasi memerlukan waktu 10^{-8} s untuk kembali ke tempat semula yang disertai dengan pemancaran foton. Energi foton dipengaruhi oleh besarnya frekuensi yang digunakan oleh pembangkit tegangan. Energi foton ini akan menghasilkan radiasi berbagai macam sinar seperti sinar kosmik, sinar X, *microwaves*, infra merah, *visible*, dan sinar uv. Sinar-sinar ini dapat diketahui dari panjang gelombang yang dikeluarkan (Beiser dalam Aryanto, 2007).



Gambar 2.11. Spektrum gelombang elektromagnetik

2.8. Aplikasi Teknologi Plasma

Aplikasi plasma dalam kehidupan manusia adalah sebagai berikut:

1. Bidang Kesehatan
 - a) Sterilisasi instrumen-instrumen medis.
 - b) Pemanfaatan plasma melalui pembangkitan radio frekuensi (RF) untuk fisioterapi.
2. Bidang Pertanian

Radiasi ion plasma untuk tumbuhan melalui implantasi ion pada biji tomat, biji sawi, biji jagung, bibit mangrove.
3. Bidang Industri
 - a) Plasma sebagai pemotong, pelobang, penyambung, dan pengerasan.
 - b) Plasma sebagai sumber pembuatan lampu.
4. Bidang Lingkungan
 - a) Pengendalian polusi udara oleh sisa pembakaran hidrokarbon.
 - b) Pengolahan limbah cair industri.
 - c) Pengolahan lumpur yang mengandung bahan berbahaya dan beracun (B3).

Menurut Bismo *et al.* (2008), Teknologi plasma memiliki beberapa keuntungan dalam pengolahan limbah cair. Berikut keuntungan pengolahan limbah cair dengan menggunakan teknologi plasma, yaitu :

- a. Teknologi plasma ramah lingkungan.

- b. Teknologi plasma mudah digunakan.
- c. Biaya pengolahan limbah cair dengan teknologi plasma relatif murah.
- d. Teknologi plasma dapat digunakan berulang-ulang.
- e. Waktu yang dibutuhkan relatif singkat.

2.9. Reaktor Hibrida Ozon-Plasma

Pengolahan limbah cair dari hasil proses industri yang mengandung polutan organik lain yang tidak berbahaya di dalam suatu instalasi pengolahan limbah pada dasarnya dilakukan di dalam suatu sistem pemroses yang disebut dengan reaktor.

Alat pembangkit ozon atau biasa disebut dengan ozonator yang merupakan perancangan instalasi pengolahan limbah dengan metode kimiawi ini merupakan sebuah reaktor aliran sumbat atau reaktor tubular, dimana :

- Reaktan dan produk keduanya mengalir.
- Tidak adanya pengadukan dengan proses difusi atau dispersi.
- Reaksi untuk fasa cair dan gas.

Reaktor tubular, yang biasa disebut juga dengan PFR (*Plug Flow Reactor*), merupakan reaktor kimia yang di dalamnya di anggap tidak ada pencampuran dalam arah aliran dan pencampuran secara tegak lurus terhadap arah aliran. Konsentrasi akan bervariasi sepanjang koordinat z , tetapi tidak untuk koordinat r . Temperatur juga akan bervariasi terhadap z .

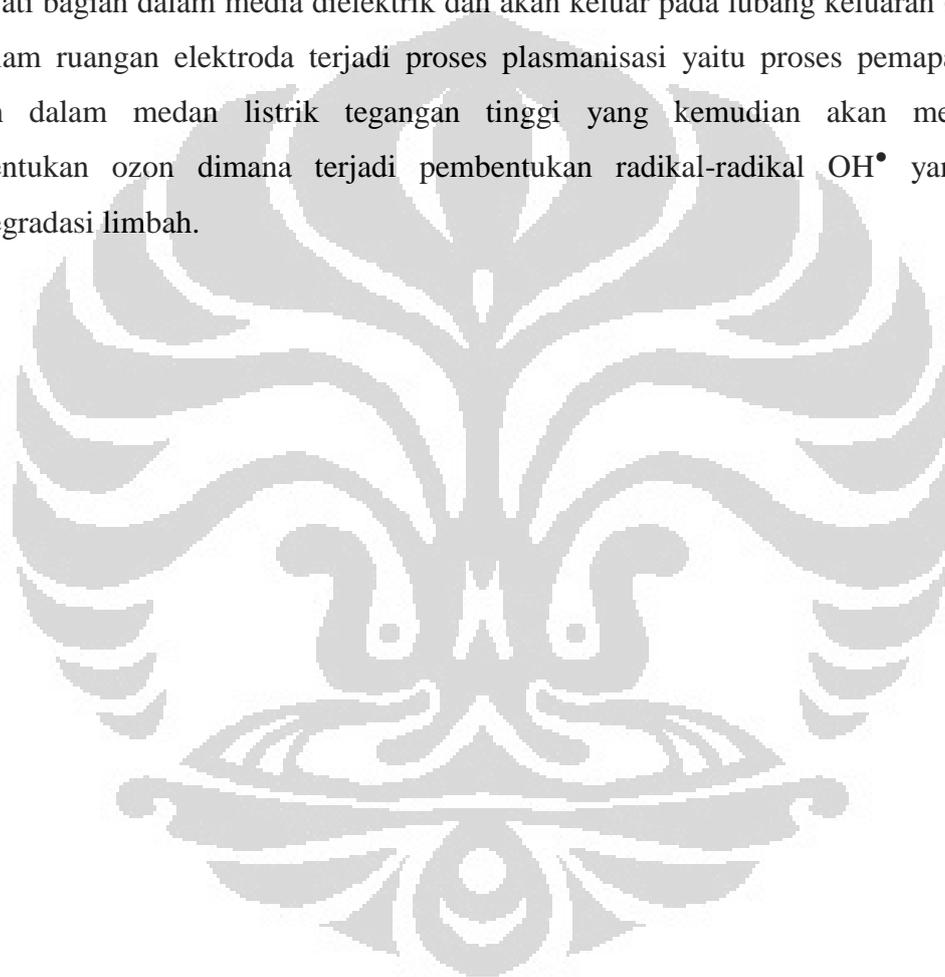
Plug flow atau aliran sumbat adalah gambaran ideal gerakan aliran dengan seluruh elemen fluida bergerak pada kecepatan yang sama di sepanjang aliran. Pada reaktor tubular ideal tidak terjadi pencampuran secara aksial dan kecepatan seragam sepanjang aliran. Penyimpangan yang mungkin terjadi pada reaktor tubular ini adalah jika terjadi:

- Pencampuran dengan arah longitudinal.
- Pencampuran tidak sempurna pada arah radial.

Reaktor Hibrida Ozon-Plasma berbentuk tabung gelas yang memiliki lubang tempat diinjeksikan udara atau campuran ozon-gas O_2 ke dalamnya sedemikian rupa sehingga akan terjadi kontak langsung dengan aliran limbah di dalamnya. Di harapkan aliran limbah dengan debit yang telah ditentukan tersebut akan bercampur homogen dengan gas Oksigen. Ozonator tersebut dirancang sedemikian rupa sehingga dapat

menggunakan oksigen sebagai gas reaktan dan sekaligus digunakan pula sebagai media pendingin.

Reaktor Hibrida Ozon-Plasma berbentuk tabung dengan pemasangan elektroda, media dielektrik, dan elektroda tegangan tinggi yang disusun berada pada satu sumbu dan searah aliran gas reaktan dan limbah hasil. Ozonator tersebut dirancang sedemikian rupa sehingga dapat menggunakan gas Oksigen sebagai reaktan atau umpan. Aliran umpan melewati ruangan elektroda tegangan tinggi untuk selanjutnya berbalik arah melewati bagian dalam media dielektrik dan akan keluar pada lubang keluaran (*output*). Di dalam ruangan elektroda terjadi proses plasmanisasi yaitu proses pemaparan gas umpan dalam medan listrik tegangan tinggi yang kemudian akan mengalami pembentukan ozon dimana terjadi pembentukan radikal-radikal OH^\bullet yang akan mendegradasi limbah.



BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1. Pendahuluan

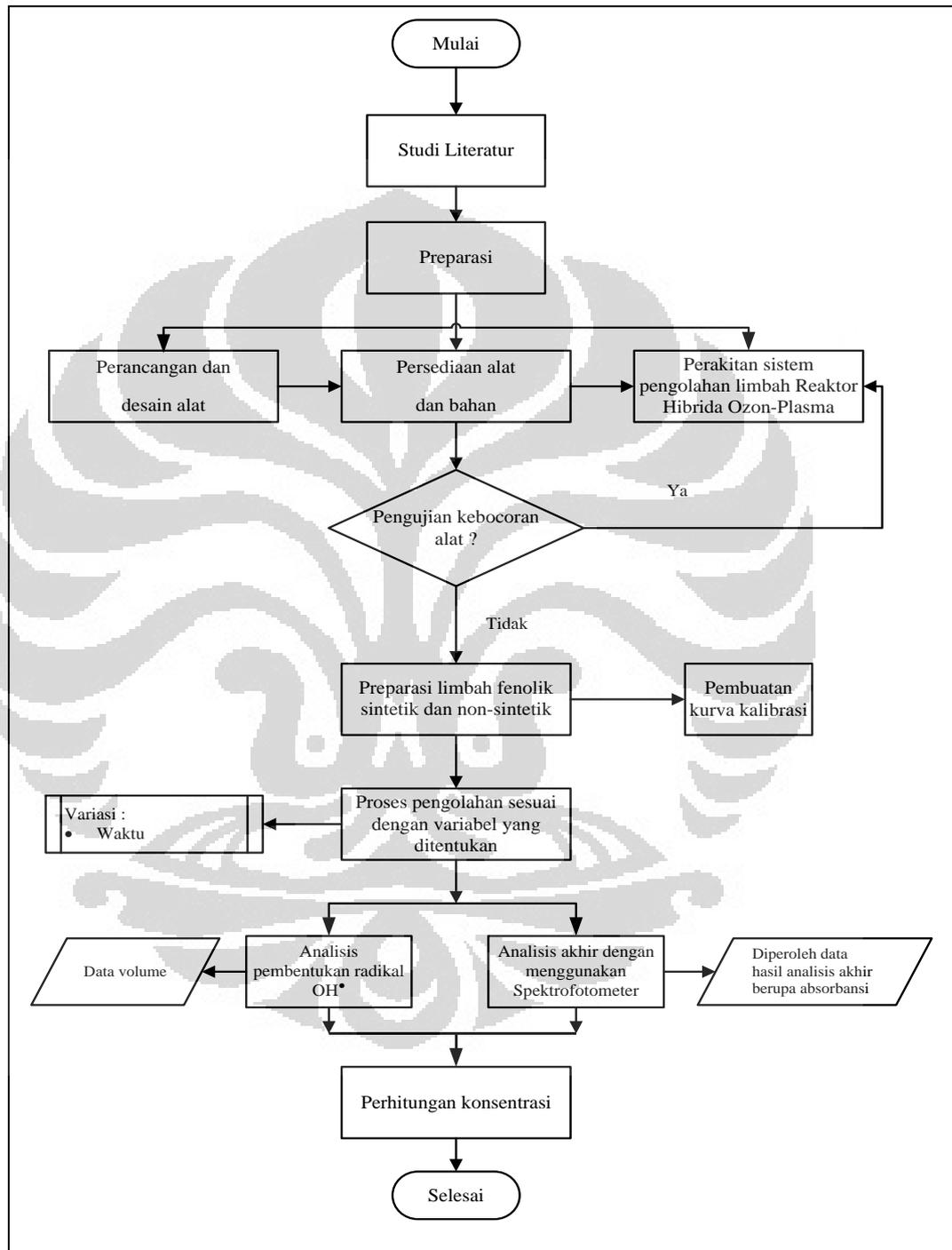
Pada bab ini akan dijelaskan berbagai hal tentang metode penelitian yang dilakukan, terutama yang berhubungan dengan rancangan penelitian, peralatan, bahan yang akan digunakan dalam penelitian, diagram alir penelitian serta prosedur yang harus dilakukan untuk tercapainya tujuan penelitian.

3.2. Rancangan Penelitian

Tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1. yang merupakan langkah-langkah rinci sebagaimana akan dilakukan dan akan dijelaskan secara detail pada bab ini. Tahapan penelitian dibagi dalam tiga tahap yaitu preparasi dan pembuatan Reaktor Hibrida Ozon-Plasma, proses pengolahan, dan perhitungan data hasil analisis.

- (a). Studi Literatur, tahap ini meliputi studi literatur yang berkaitan dengan rancang bangun pembuatan reaktor plasma sehingga menjadi suatu sistem yang dapat digunakan sebagai solusi pengolahan limbah cair.
- (b). Perancangan Alat, merupakan lanjutan dari studi yang telah dilakukan untuk membuat suatu sistem pengolahan limbah cair dengan memperhitungkan berbagai faktor sehingga desain yang dibuat dapat optimal.
- (c). Persiapan Alat dan Bahan, pada tahap ini akan dilakukan pengadaan berbagai material yang diperlukan untuk membuat peralatan dan juga dipersiapkan bahan-bahan yang akan digunakan dalam penelitian.
- (d). Perakitan Reaktor Hibrida Ozon-Plasma, membuat alat yang sesuai dengan perancangan dan desain yang telah dilakukan pada tahap sebelumnya.
- (e). Preparasi Limbah Fenolik Sintetik, pada tahap ini dibuat limbah sintetik fenol dengan konsentrasi 50 ppm dan 15 ppm yang kemudian akan diukur nilai absorbansinya dan hasilnya dibuat kurva kalibrasi.
- (f). Proses Pengolahan, proses pengujian limbah sesuai dengan variabel-variabel yang telah ditetapkan.

- (g). Analisis limbah setelah pengolahan, pada tahap ini dilakukan pengujian konsentrasi limbah senyawa fenol setelah melalui proses pengolahan, sehingga dapat diketahui efektifitas alat yang digunakan.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

3.3. Peralatan dan Bahan

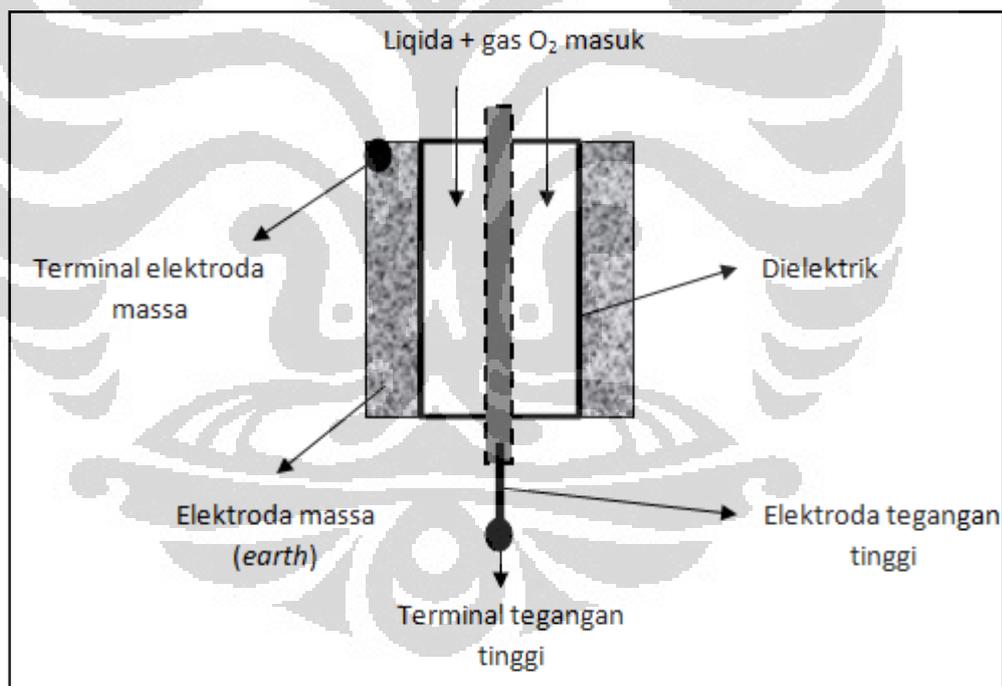
3.3.1. Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari :

a) **Media Dielektrik (selubung dielektrik)**, yang digunakan berbentuk pipa selongsong yang terbuat dari bahan gelas borosilikat. Kedua ujungnya dilengkapi dengan tutup berulir (*screw cap*) sebagai penyangga elektroda tegangan tinggi. Pada jarak 3 cm dari ujung bagian atas diberi lubang kecil berdiameter 3 mm yang digunakan sebagai keluaran (*output*) aliran limbah setelah proses. Spesifikasi dielektrik adalah sebagai berikut :

- Panjang : 24 cm
- Diameter : 2 cm
- Tebal : 1 mm

Media dielektrik dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Media dielektrik

b) **Elektroda Tegangan Tinggi**, elektroda yang digunakan berbentuk pipa berbahan Stainless Steel tipe SS-316 dengan diameter 3/8 di mana salah satu ujungnya disumbat dan diberi lubang sebagai keluaran aliran limbah, sedangkan ujung yang lainnya di biarkan terbuka yang akan

dihubungkan dengan tangki limbah. Spesifikasi elektroda tegangan tinggi adalah sebagai berikut :

- Panjang : 36 cm
- Diameter dalam : 0,7 cm
- Diameter luar : 1 cm

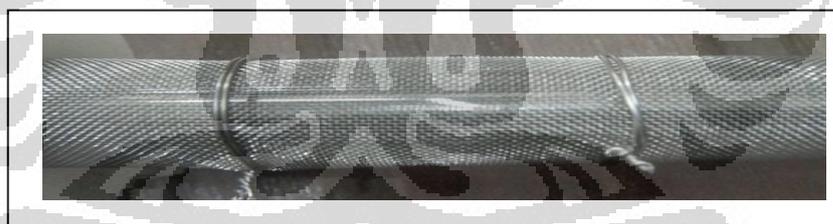
Elektroda tegangan tinggi dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Elektroda tegangan tinggi

- c) **Elektroda Massa (Elektroda Kasa)**, terbuat dari bahan Stainless Steel tipe SS-316 yang dililitkan pada dinding reaktor bagian luar yang berfungsi sebagai elektroda.

Elektroda kasa dapat dilihat pada Gambar 3.4



Gambar 3.4. Kawat kasa SS-316

- d) **Neon Sign Transformator (NST)**, berfungsi untuk menaikkan tegangan sehingga akan menghasilkan energi yang cukup untuk menghasilkan *corona discharge*. Spesifikasi NST adalah tegangan 220V /12000V, daya 100 Watt dan frekuensi 50/60 Hz. Transformator dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5. Transformator tegangan tinggi

e) **Pompa**, digunakan sebagai pendorong aliran dari tangki penampung limbah menuju ke reaktor. Spesifikasi pompa adalah :

- Merek : Deng Yuan seri DY-2600
- Pressure : 80 – 90 psi
- Volt : 24 - 29 VDC
- Ampere : 0,8 A

Pompa dapat dilihat pada Gambar 3.6.



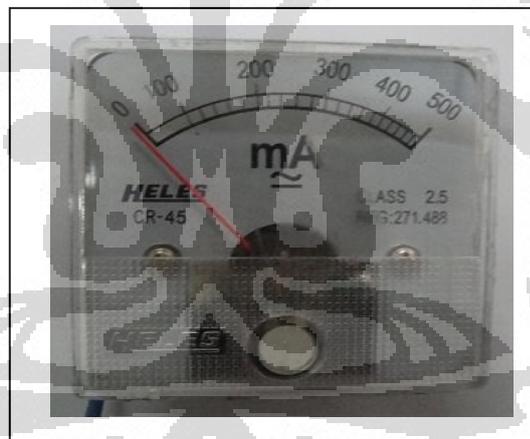
Gambar 3.6. Pompa

f) **Voltmeter**, bermerek Heles yang digunakan untuk mengukur besar tegangan bolak balik (AC) yang dialirkan ke NST untuk pembangkitan plasma dalam reaktor dipasang secara paralel. Voltmeter dapat dilihat pada Gambar 3.7.



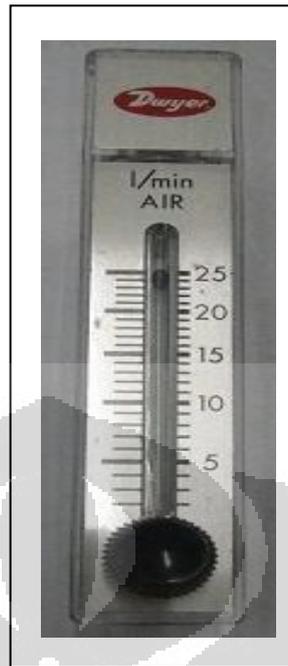
Gambar 3.7. Voltmeter

- g) **Amperemeter**, digunakan untuk mengukur besar arus yang mengalir ke dalam rangkaian. Amperemeter dipasang seri pada rangkaian dengan NST (pembangkit plasma). Amperemeter dapat dilihat pada Gambar 3.8.



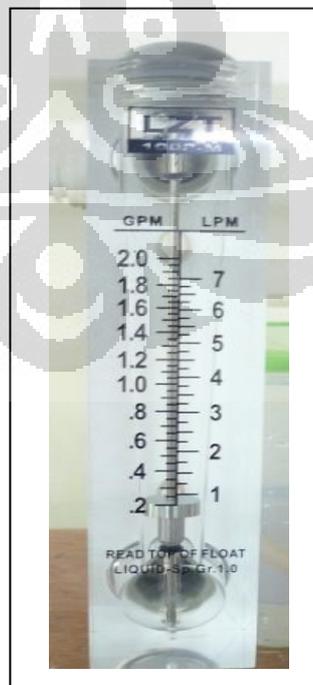
Gambar 3.8. Amperemeter

- h) **Flow meter**, terdiri dari dua macam, yaitu :
- **Flowmeter gas/ udara**, untuk mengetahui laju alir udara yang mengalir yang ditentukan sesuai dengan variabel. Voltmeter dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9. Flowmeter gas

- **Flowmeter cairan**, untuk mengetahui debit limbah yang mengalir yang ditentukan sesuai dengan variabel. Flowmeter cairan dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10. Flowmeter cairan

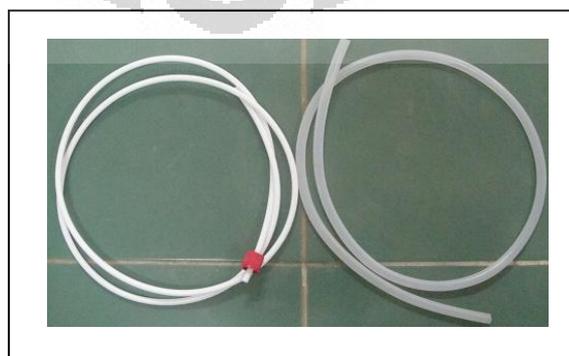
- i) **Regulator Tegangan**, berfungsi sebagai pengatur tegangan keluaran untuk NST sesuai dengan yang diinginkan agar terjadi pelepasan korona. Regulator yang digunakan bermerek OKI dengan tegangan 0-250 V dengan kapasitas daya 2 kVA. Regulator dapat dilihat pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11. Regulator tegangan

- j) **Selang**, berfungsi sebagai penghubung antara satu alat dengan alat lainnya. Selang yang digunakan terdiri dari tiga macam, yaitu :
- Selang berbahan *Polivinyl Chloride* (PVC) yang digunakan untuk aliran gas berwarna agak buram dan kaku.
 - Selang berbahan silikon yang digunakan untuk aliran limbah berwarna putih dan lentur.
 - Selang berbahan polikarbonat yang digunakan untuk aliran liquida berwarna putih dan kaku.

Selang dapat dilihat pada Gambar 3.12.



Gambar 3.12. Selang

- k) *Nipple*, berfungsi sebagai masukan umpan, terbuat dari bahan plastik dan Stainless Steel, dan berukuran 1/4 inci dan 3/8 inci . *Nipple* dapat dilihat pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13. *Nipple*

- l) *Elbow*, berfungsi sebagai penghubung antara media dielektrik dan selang, terbuat dari bahan plastik dan dan berukuran 1/4 inci dan 3/8 inci. *Elbow* dapat dilihat pada Gambar 3.14.



Gambar 3.14. *Elbow*

- m) **Tangki Penampung**, digunakan sebagai tempat menampung limbah sebelum dan sesudah proses dengan kapasitas tampung 5 liter. Tangki penampung dapat dilihat pada Gambar 3.15.



Gambar 3.15. Tangki penampungan

- n) **Mur dan Baut**, digunakan sebagai alat kontak dan juga sebagai alat penguat pada papan penyangga, terbuat dari bahan besi dan yang digunakan berukuran 2 mm dan 3 mm. Mur dan baut dapat dilihat pada Gambar 3.16.



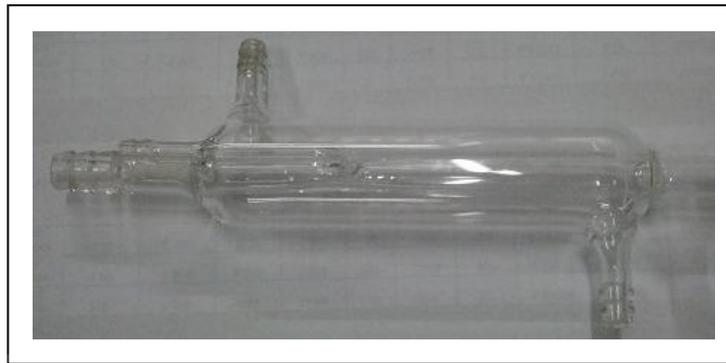
Gambar 3.16. Mur dan Baut

- o) **Stopwatch**, berfungsi sebagai penunjuk waktu pemaparan untuk tiap variasi yang dilakukan. *Stopwatch* dapat dilihat dari Gambar 3.17.



Gambar 3.17. *Stopwatch*

- p) **Injektor-Mixer**, berfungsi sebagai tempat bertemunya udara dan aliran fluida yang mana akan terjadi proses pencampuran dan terlihat gelembung-gelembung dalam fluida. Gelembung-gelembung yang terjadi merupakan udara yang diinjeksikan ke dalam aliran fluida agar fluida tersebut kaya akan kandungan gas Oksigen untuk proses ozonasi. Injektor dapat dilihat pada Gambar 3.18.



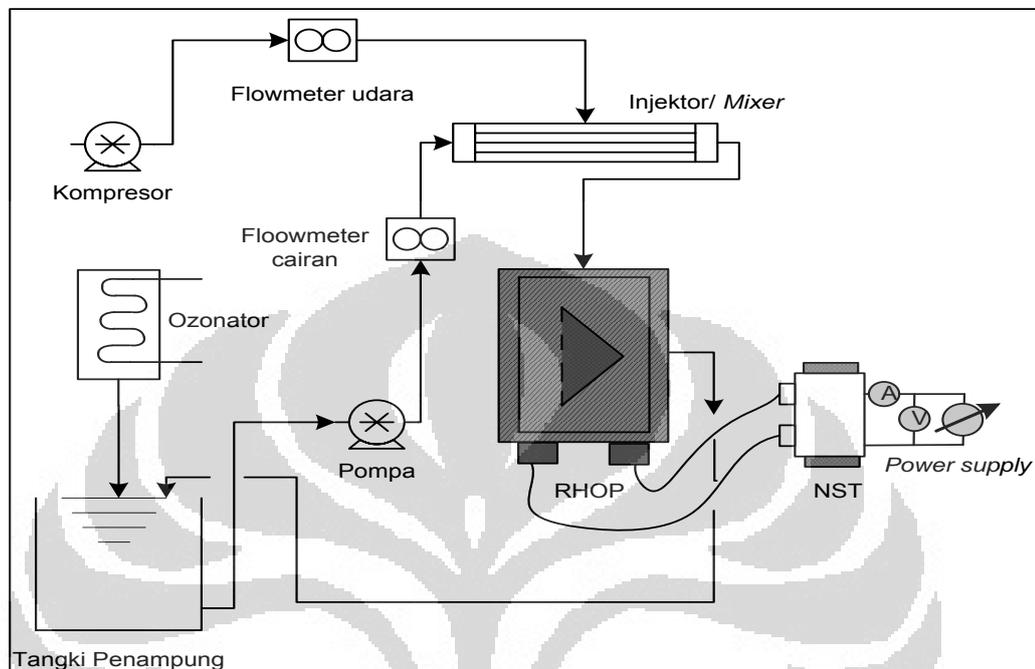
Gambar 3.18. Injektor-Mixer

q) **Ozonator Resun RSO-9805**, digunakan untuk membantu proses pengolahan menjadi lebih maksimal dalam proses pengolahan dan dapat dilihat pada Gambar 3.19.



Gambar 3.19. Ozonator Resun RSO-9805

Adapun skema laju alir penelitian pada Gambar 3.20. menjelaskan rangkaian peralatan yang digunakan dalam sistem pengolahan limbah dengan menggunakan Reaktor Plasma Ozon Hibrida pada penelitian ini.



Gambar 3.20. Skema sistem reaktor hibrida ozon-plasma

3.3.2. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari :

- Aquades ;
- Udara ;
- Limbah *p*-klorofenol sintetis dari Merck ;
- NaOH dari Merck ;
- Limbah tekstil dari PT.YKK dan Plant Pengolahan Limbah Jababeka;
- Limbah bahan peledak dari PT. Pindad (Persero).

3.4. Prosedur Penelitian

3.4.1. Variabel Penelitian

Penelitian ini memiliki tiga parameter, yaitu:

- **Variabel kontrol** yaitu konsentrasi *p*-klorofenol 50 ppm.
- **Variabel bebas** yaitu waktu proses.

- **Variabel terikat** yaitu konsentrasi fenol setelah proses pengolahan limbah dan COD (*Chemical Oxygen Demand*)

3.4.2. Prosedur Pengolahan Limbah

3.4.2.1. Persiapan sampel

- Buat limbah *p*-klorofenol dengan konsentrasi 50 ppm.
- Buat kondisi limbah konsentrai 50 ppm dengan pH basa antara 10-11.
- Memasukkan limbah *p*-klorofenol dengan konsentrasi 50 ppm ke dalam bak penampung.
- Ulangi langkah di atas untuk limbah tekstil dan limbah bahan peledak tanpa mengkondisikan derajat keasamannya.

3.4.2.2. Penyisihan fenol dengan RHOP

Prosedur pada proses pengolahan adalah sebagai berikut :

- Memasukkan limbah ke dalam bak penampung.
- Atur laju alir di flowmeter menjadi 1,2 liter/ menit (LPM).
- Hidupkan pompa air, pompa udara, dan tegangan tinggi (pembangkit plasma), ozonator dan *stirrer*.
- Atur tegangan regulator 225 Volt.
- Ambil sampel limbah sebanyak 10 ml setelah pemaparan plasma setiap variasi yaitu 15 menit, 30 menit, 45 menit, 60 menit, 75 menit, 105 menit dan 120 menit.

3.5. Analisis Hasil Penelitian

Pada penelitian ini yang dianalisis adalah konsentrasi fenol setelah pemaparan plasma. Sampel diambil setiap selang waktu 15 menit selama 2 jam (dimulai dari menit ke-15). Analisis konsentrasi fenol yang dilakukan adalah dengan menggunakan metode aminoantipirin yang sesuai dengan SNI 06-6989.21-2004.

3.5.1. Analisis Pembentukan Radikal OH[•]

Sebelum melakukan proses pengolahan limbah senyawa fenol, maka terlebih dahulu dilakukan Analisis penentuan radikal OH[•] yaitu dengan menghitung konsentrasi H₂O₂ sebagai indikator terbentuknya radikal OH[•] (Sengupta,1994)

3.5.1.1. Peralatan

- Gelas ukur 10 mL, 100 mL ;
- Buret ;
- *Beaker glass* ;
- Erlenmeyer.

3.5.1.2. Bahan Analisis Konsentrasi H₂O₂

- H₂SO₄ p.a dari Merck. ;
- KI dari Merck ;
- KMnO₄ 0,002 M dari Merck;
- Aquades.

3.5.1.3. Penentuan Konsentrasi H₂O₂

- Tambahkan aquades dengan larutan H₂SO₄.
- Tambahkan KI 2% ke dalam larutan pada poin 1.
- Sirkulasikan dengan menggunakan reaktor hibrida ozon-plasma selama 20 menit.
- Ambil sampel sebanyak 20 mL dan kemudian dititrasikan dengan menggunakan KMnO₄ 0,002 M.
- Hitung nilai konsentrasi.

3.5.2. Analisis Limbah Senyawa Fenol

3.5.2.1. Peralatan

Peralatan yang digunakan adalah:

- Spektrofotometer UV-Vis ;
- Kuvet kaca ;
- Gelas ukur ;

- Labu ukur 100 mL, 1000 mL ;
- Erlenmeyer 200 mL ;
- Pipet 10 mL dan 100 mL ;
- Kaca arloji.

3.5.2.2. Bahan Analisis Limbah Senyawa Fenol

Bahan yang digunakan dalam analisis ini adalah:

- NH_4OH dari Merck ;
- K_2HPO_4 dari Merck;
- KH_2PO_4 dari Merck;
- 4-aminoantipirin dari Merck;
- $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ dari Merck;
- Aquadest.

3.5.2.3. Prosedur Analisis Limbah Senyawa Fenol

Berikut prosedur analisis konsentrasi fenol dilakukan metode aminoantipirin yang sesuai dengan SNI 06-6989.21-2004.

3.5.2.3.1. Membuat Larutan Uji

Larutan-larutan uji yang dibutuhkan antara lain :

- Larutan amonium hidroksida, NH_4OH 0,5 N yaitu dengan cara mengencerkan 35 mL NH_4OH pekat dengan aquades sampai 1000 mL.
- Larutan penyangga fosfat yaitu dengan cara melarutkan 104,5 g K_2HPO_4 dan 72,3 g KH_2PO_4 dalam 1000 mL aquades, pH harus 6,8.
- Larutan 4-aminoantipirin yaitu dengan cara melarutkan 2 g kristal 4-aminoantipirin dalam 100 mL aquades, siapkan setiap akan melakukan analisis.
- Larutan Kalium ferisianida, $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ yaitu dengan cara melarutkan 8 g kristal kalium ferisianida dalam 100 mL aquades, larutan ini mempunyai waktu simpan selama 1 minggu.

3.5.3.3.2. Membuat Kurva Kalibrasi

Untuk mengetahui konsentrasi fenol di dalam suatu larutan, maka terlebih dahulu kita akan membuat kurva kalibrasinya. Apabila kadar fenol antara 0,200 mg/L sampai dengan 5,000 mg/L buat kurva kalibrasi dengan tahapan sebagai berikut :

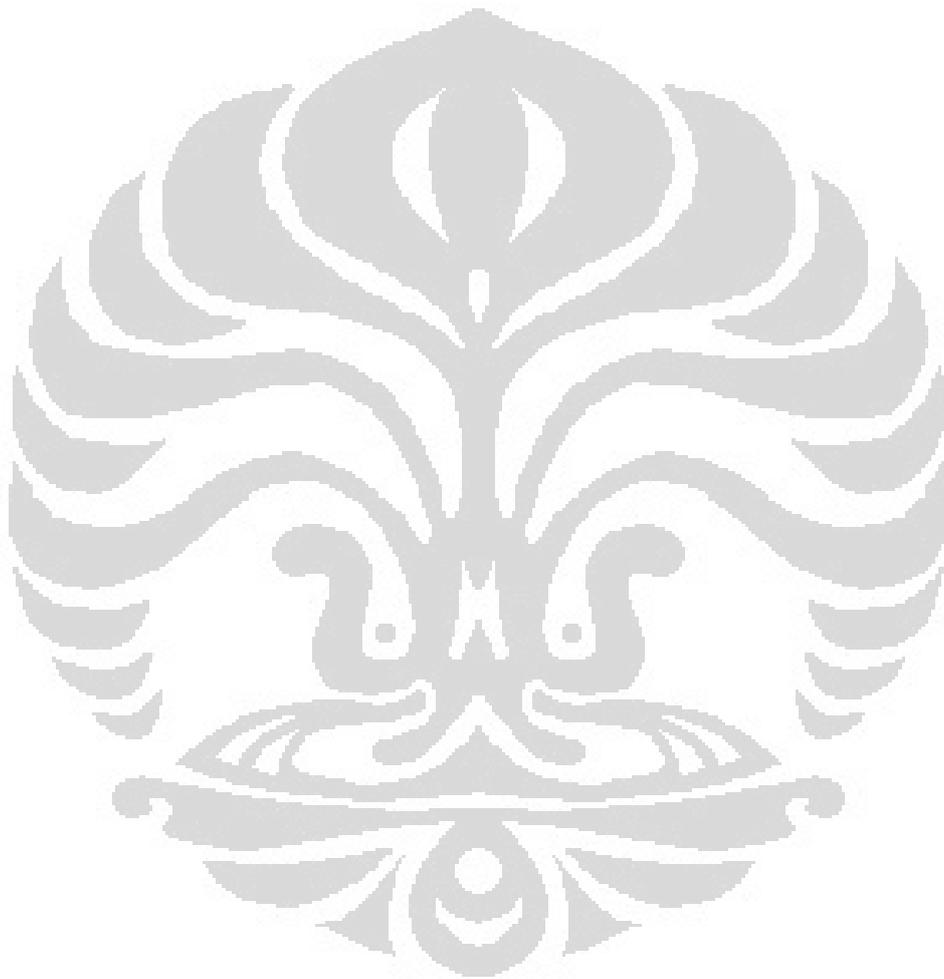
- Optimalkan alat spektrofotometer sesuai dengan petunjuk penggunaan alat untuk pengujian fenol kadar tinggi.
- Ukur 100 mL larutan baku secara duplo dan masukkan ke dalam erlenmeyer 200 mL.
- Tambahkan 2,5 mL larutan NH_4OH 0,5 N dan atur pH menjadi $7,9 \pm 0,1$ dengan penambahan larutan penyangga fosfat.
- Pindahkan larutan ke dalam erlenmeyer tambahkan 1 mL larutan aminoantipirin sambil diaduk.
- Tambahkan 1 mL larutan kalium ferisianida sambil diaduk, diamkan selama 15 menit.
- Memasukkan ke dalam kuvet pada alat spektrofotometer, baca, dan catat absorbansinya pada panjang gelombang 500 nm.
- Apabila perbedaan hasil pengukuran secara duplo lebih besar dari 2%, periksa keadaan alat dan ulangi pekerjaan mulai tahap 1), apabila lebih kecil atau sama dengan 2% rata-ratakan hasilnya.
- Buatlah kurva kalibrasi (konsentrasi vs absorbansi).

3.5.2.3.3. Prosedur Analisis Limbah Fenol

Pengujian kadar fenol dalam air limbah antara 0,200 mg/L sampai dengan 5,000 mg/L dengan tahapan sebagai berikut :

- Ukur 100 mL contoh uji secara duplo dan masukkan ke dalam erlenmeyer.
- Tambahkan 2,5 mL larutan NH_4OH 0,5N dan mengatur pH menjadi $7,9 \pm 0,1$ dengan penambahan larutan penyangga fosfat.
- Tambahkan 1 mL larutan aminoantipirin sambil diaduk.
- Tambahkan 1 mL larutan kalium ferisianida sambil diaduk, diamkan selama 15 menit.

- Memasukkan ke dalam kuvet pada peralatan spektrofotometer, baca dan catat absorbansinya pada panjang gelombang 500 nm.
- Plotkan nilai absorbansi yang telah didapatkan ke dalam kurva kalibrasi yang telah dibuat, maka akan didapatkan nilai konsentrasi fenol akhir.



BAB 4

HASIL PERCOBAAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Pendahuluan

Data tentang fenomena penyisihan senyawa fenolik dalam air pada kondisi basa dengan menggunakan proses ozonasi dalam medan plasma diperoleh berupa konsentrasi akhir dari senyawa fenolik, dengan waktu pemaparan yang divariasikan, yaitu 0, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 dan 120 menit. Penyisihan senyawa fenolik ini dilakukan untuk mengetahui kinerja dari alat yang telah dirancang seperti yang dijelaskan pada Bab 3. Penelitian dilakukan dalam dua tahap, yaitu rancang bangun Reaktor Hibrida Ozon-Plasma (RHOP) dan kemudian dilakukan pengujian kinerja reaktor terhadap limbah senyawa fenol sintetik, limbah tekstil dan limbah bahan peledak yang mengandung senyawa fenol dalam konsentrasi tertentu.

Data yang diperoleh berupa nilai absorbansi yang akan digunakan untuk penentuan konsentrasi fenol, yang kemudian dari data tersebut akan ditentukan nilai efisiensi dari RHOP. Proses penyisihan senyawa fenol ini menggunakan limbah sintetik *p*-klorofenol 50 mg/L dan juga limbah industri lain yang mengandung senyawa fenol yaitu limbah tekstil dan limbah bahan peledak. Penggunaan konsentrasi tersebut diterapkan untuk dapat mewakili kondisi limbah cair yang sebenarnya yaitu antara 5 sampai 50 mg/L. Sedangkan kondisi pH yang digunakan dalam penelitian ini adalah dalam kondisi basa yang merupakan kondisi terbaik dalam menghasilkan persentase penyisihan senyawa fenolik yang paling tinggi dalam suatu konsentrasi.

4.2. Pengukuran Produktivitas Ozon Terlarut pada Reaktor Hibrida Ozon-Plasma dalam Fasa Cair

Penelitian ini merupakan perancangan suatu sistem pengolahan limbah yang menggabungkan antara proses ozonasi dan pembangkitan plasma secara bersamaan dalam suatu reaktor RHOP. Untuk mengetahui reaktor ini dapat bekerja dalam mendegradasi limbah, maka akan dilakukan terlebih dahulu pengukuran terhadap ozon terlarut yang ada dalam cairan yaitu dengan

menggunakan KI (kalium iodida) 2% dimana hal tersebut digunakan untuk membuktikan bahwa RHOP dapat menghasilkan ozon.

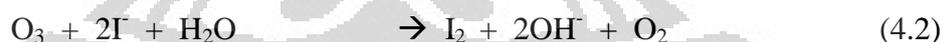
Laju alir cairan yang digunakan adalah 1,2 LPM (Liter per Menit) dengan tegangan 225 Volt dan laju alir gas adalah 10 LPM serta dilakukan pada suhu ruangan dan tekanan 1 atm.

Akibat dari adanya kontak tersebut, maka akan terjadi reaksi antara ozon yang dihasilkan oleh reaktor dan KI yang menyebabkan larutan berubah warna menjadi kuning kecoklatan. Warna ini merupakan warna dari iodine yang terbentuk melalui reaksi oksidasi sebagai berikut :



Pada persamaan tersebut di atas dapat dilihat bahwa 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 reaktor.

Cara penentuan jumlah mol I_2 yang terbentuk adalah dengan mentitrasi larutan dengan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (natrium tiosulfat) 0,005M, namun sebelum dititrasi terlebih dahulu menambahkan larutan H_2SO_4 2N sebanyak 4 mL yang berfungsi untuk meminimalisasi I_2 terlepas ke udara dan juga menambahkan amilum 1% sebanyak 3 tetes yang berfungsi sebagai indikator. Apabila amilum bercampur dengan I_2 akan menimbulkan warna biru keunguan. Dari rangkaian langkah analisis produksi ozon di atas akan didapatkan reaksi sebagai berikut :



Titration dilakukan sampai jumlah I_2 sebanding dengan natrium tiosulfat secara stoikiometri yaitu dengan adanya perubahan warna biru keunguan menjadi jernih. Dari kedua persamaan di atas, maka jumlah mol ozon yang terbentuk akan sama dengan setengah jumlah mol natrium tiosulfat yang terpakai. Produktivitas ozon dapat dihitung dengan jalan membagi jumlah mol ozon tersebut dengan waktu yang diperlukan untuk merubah larutan KI.

Pengukuran produktivitas ozon ini dilakukan untuk mengukur jumlah ozon yang terlarut dalam cairan. Pada penelitian ini, data yang diperoleh menunjukkan

jumlah ozon yang dihasilkan adalah sebesar 0,576 mg/jam dengan jumlah ozon terlarut sebesar 0,008 g/L.

4.3. Pengukuran Produktivitas Ozonator Resun RSO-9805

Pada penelitian ini digunakan pula ozonator dengan konsentrasi yang lebih tinggi untuk mengoptimalkan proses pengolahan. Untuk itu digunakan Ozonator bermerek Resun RSO-9805 buatan Hong Kong yang memiliki laju alir ozonator sebesar 9 Liter per Menit (LPM).

Tujuan utama dari pengujian produktivitas ozonator ini adalah untuk mengetahui jumlah ozon yang diproduksi selama digunakan dalam penelitian ini. Pengujian produktivitas dilakukan menggunakan metode iodometri. Ozon dikontakkan dengan larutan KI, sehingga terjadi reaksi oksidasi antara ozon dan KI. Reaksi oksidasi ini menyebabkan larutan berubah warna menjadi kuning kecoklatan. Dengan mekanisme yang sama dengan metode iodometri pada pengukuran produktivitas ozon pada RHOP, maka didapatkan hasil bahwa produktivitas ozon dari ozonator merek Resun RSO-9805 adalah 0,0495 g/jam. Pengukuran produktivitas ozon rata-rata ini digunakan untuk mengetahui massa ozon fasa gas yang masuk ke dalam cairan sampel.

4.4. Penyisihan *p*-klorofenol dalam RHOP

Penyisihan senyawa fenolik dalam penelitian ini adalah menggunakan larutan *p*-klorofenol sintetik dengan konsentrasi awal 50 mg/L. Parameter yang diambil adalah konsentrasi akhir pengolahan yang akan menunjukkan nilai degradasi senyawa fenol. Kondisi pH *p*-klorofenol yang digunakan adalah pada kondisi basa sebesar 10,8. Pemilihan kondisi pH tinggi di karenakan reaksi oksidasi senyawa fenolik berlangsung optimal pada pH antara 9 sampai 11 (Langlais *et al.*, 1991).

Pada kondisi basa terdapat dua mekanisme reaksi yang terjadi pada oksidasi senyawa fenol, yaitu reaksi dengan molekul ozon itu sendiri dan yang kedua adalah reaksi radikal hidroksil dengan senyawa fenol. Radikal OH[•] mampu memecahkan senyawa organotoksik di dalam liquidida di karenakan mempunyai potensial oksidasi yang cukup tinggi. Dengan adanya konsentrasi radikal yang

tinggi, maka degradasi senyawa fenol akan semakin cepat karena pada dasarnya senyawa fenol cepat teroksidasi.

Oksidasi senyawa fenol oleh ozon akan terbentuk senyawa-senyawa yang bersifat asam seperti asam maleat, asam mukonat, asam oksalat, asam glioksalat dan asam formiat (Langlais *et al.*, 1991) sehingga akan terjadi penurunan pH pada awal proses. Namun pada akhir proses oksidasi akan terbentuk CO_2 sehingga pH sudah lebih stabil, apabila terjadi penurunan sudah tidak terlalu signifikan.

Senyawa fenol merupakan senyawa organik yang tidak dapat terdegradasi secara hayati. Mekanisme oksidasi senyawa organik yang terlarut dalam air dengan menggunakan ozon adalah sebagai berikut :

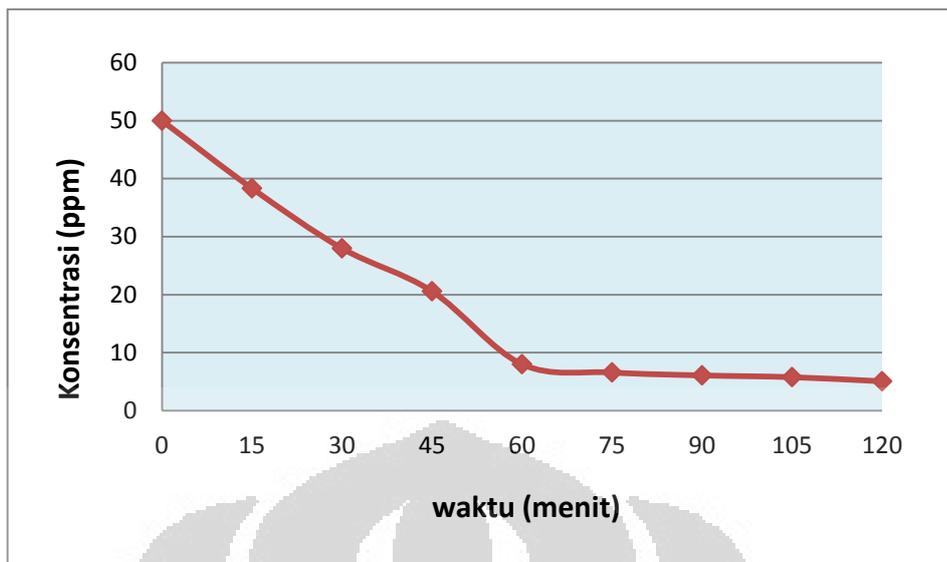
- Oksidasi senyawa alkohol membentuk aldehid yang diteruskan hingga terbentuk asam karboksilat.
- Substitusi sebuah atom oksigen ke dalam cincin aromatis.
- Pemutusan ikatan rangkap ($\text{C}=\text{C}$).

Pada proses penyisihan senyawa fenol dalam air limbah menggunakan ozon di dalam limbah cair terjadi reaksi antara fenol dengan ozon. Reaksi tersebut terjadi karena adanya interaksi antara gugus fenil dan hidroksil pada fenol yang menyebabkan senyawa ini sangat reaktif dengan berbagai senyawa termasuk ozon. Terdapat dua mekanisme penyerangan fenol oleh ozon, yaitu :

- Pada kondisi pH asam atau netral, terjadi mekanisme penyerangan elektrofilik pada atom karbon reaktif (posisi orto dan para).
- Pada kondisi pH netral atau basa, selain mekanisme tersebut pada point 1 juga terjadi penyerangan elektrofilik pada ion fenat atau melalui mekanisme pembentukan radikal OH^\bullet yang dapat diinisiasi oleh ion fenat atau ion hidroksil.

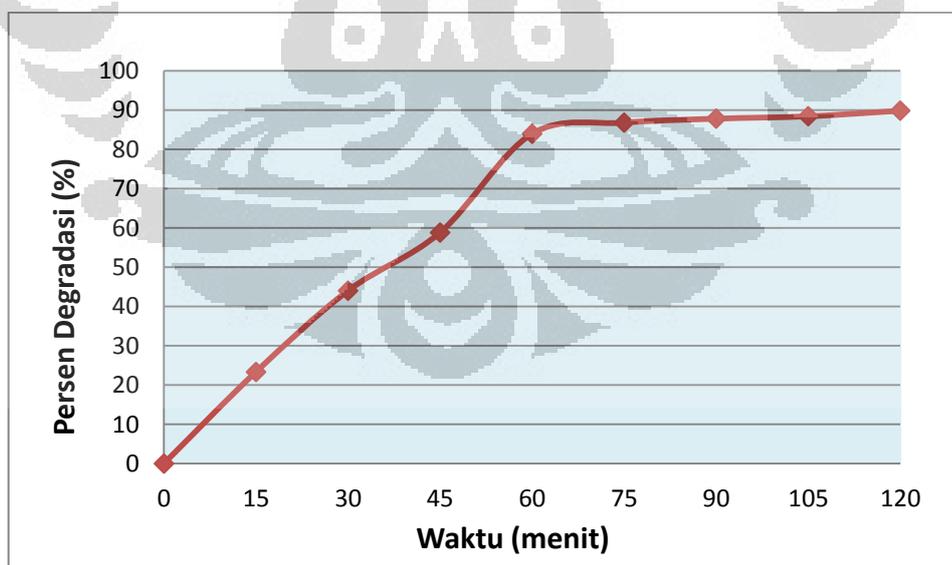
Oksidasi akan menghasilkan produk antara berupa produk hasil dari hidroksilasi aromatik, seperti difenol dan quinon serta produk hasil dari pemutusan cincin, seperti asam mukonat dan turunannya.

Dari penelitian yang dilakukan didapatkan data seperti pada Gambar 20.1 dan Gambar 20.2. di mana waktu pemaparan ternyata sangat berpengaruh terhadap penurunan konsentrasi *p*-klorofenol.



Gambar 4.1. Degradasi Konsentrasi *p*-klorofenol pada proses pemaparan dalam RHOP

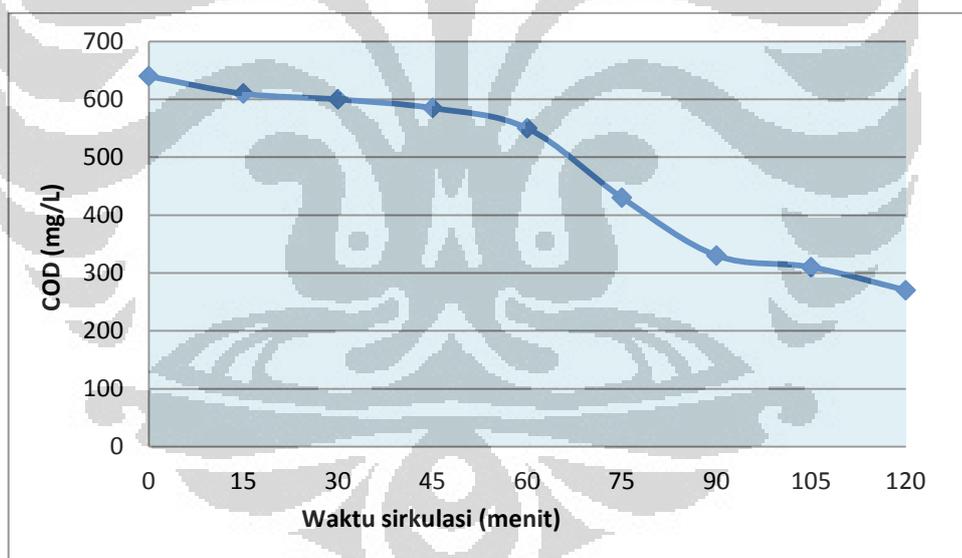
Semakin lama waktu sirkulasi yang dilakukan, maka akan semakin besar pula kuantitas *p*-klorofenol yang didegradasi. Hal ini disebabkan oleh adanya ozon yang berikatan dengan liquida akan terurai menjadi radikal-radikal bebas yang bekerja untuk memecahkan ikatan pada senyawa fenolik. Sehingga konsentrasi *p*-klorofenol yang semula 50 mg/L, dengan adanya pemaparan selama 2 jam menjadi semakin berkurang.



Gambar 4.2. Persen degradasi konsentrasi limbah *p*-klorofenol pada proses pemaparan dalam RHOP

Pada kedua gambar di atas dapat dilihat bahwa konsentrasi *p*-klorofenol setelah pemaparan selama 120 menit dengan menggunakan RHOP dan ozonator mengalami degradasi sebesar 89,86% yaitu menjadi 5,07 mg/L . Hal ini menunjukkan bahwa proses degradasi dapat dilakukan dengan menggunakan RHOP meskipun masih memerlukan waktu yang lebih lama untuk mencapai nilai baku mutu dan juga penyempurnaan proses lainnya.

Dari gambar 4.1 di atas dapat dilihat bahwa pada konsentrasi fenol yang lebih tinggi, terdapat penyisihan konsentrasi *p*-klorofenol yang lebih besar. Semakin tinggi konsentrasi *p*-klorofenol maka laju degradasi akan semakin cepat dan akan semakin banyak pula senyawa fenol yang akan terdegradasi sehingga terjadi penurunan konsentrasi yang cepat. Tetapi kemudian penurunan konsentrasi menjadi lebih lambat atau cenderung konstan, hal ini di sebabkan konsentrasi senyawa fenol yang didegradasi sudah tidak tinggi lagi sehingga menyebabkan laju reaksi degradasi semakin lambat.



Gambar 4.3. Nilai COD *p*-klorofenol pada proses pemaparan dalam RHOP

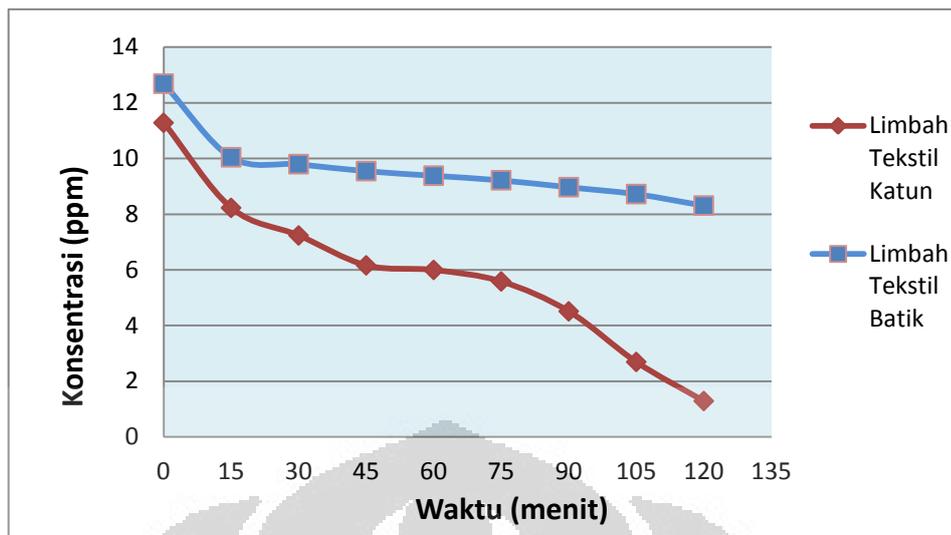
Sedangkan pada pengukuran nilai COD didapatkan bahwa nilai COD sebelum pengolahan adalah sebesar 640 mg/L dan setelah mengalami pemaparan selama dua jam dalam RHOP menjadi 270 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa RHOP mampu bekerja pula dalam menurunkan parameter lainnya seperti COD.

Nilai COD memberikan gambaran kehadiran senyawa organik dalam limbah. Pada Gambar 4.3. nilai COD menunjukkan penurunan yang sejalan

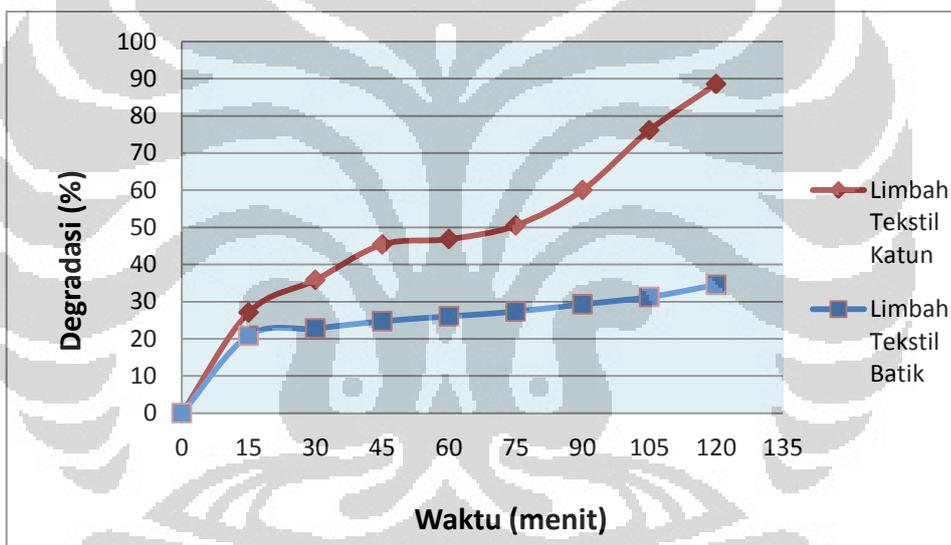
dengan penurunan konsentrasi *p*-klorofenol. Hal ini berarti selama proses oksidasi, produk hasil dekomposisi fenol telah terurai. Dan adanya zat organik lainnya yang belum selesai terdekomposisi. Nilai COD hasil pengolahan pada penelitian ini belum mencapai baku mutu. Untuk dapat mencapai baku mutu dapat dilakukan dengan penambahan jumlah sirkulasi yang berarti pula memperpanjang waktu kontak plasma dengan limbah.

4.5. Penyisihan Senyawa Fenol dalam Limbah Tekstil

Sampel limbah tekstil yang digunakan terdiri dari dua macam, yaitu limbah pencucian katun yang berasal dari PT YKK Cibitung dan juga limbah batik yang berasal dari *Plant* Pengolahan Limbah Industri Jababeka. Analisis karakteristik awal sampel limbah cair industri pencelupan tekstil PT. YKK Cibitung dilakukan sebelum sampel limbah diolah, diperoleh bahwa kandungan fenol yang ada adalah sebesar 11,27 mg/L, sedangkan kandungan awal fenol untuk batik adalah sebesar 12,68 mg/L. Parameter yang dianalisis mengacu pada Surat Keputusan Kepala Daerah Tingkat I Jawa Barat Nomor 6 Tahun 1999 mengenai Standar Baku Mutu Limbah Cair Industri Tekstil yang menyatakan bahwa limbah industri tekstil yang dapat dibuang ke lingkungan adalah sebesar 1 mg/L. Kondisi limbah dari kedua industri tekstil di atas belum memenuhi standar baku mutu sehingga limbah tekstil yang ada haruslah diolah terlebih dahulu. Dengan mengacu pada perlakuan optimal pada proses pemaparan limbah senyawa fenolik *p*-klorofenol, maka digunakanlah ozonator-plasma-stirrer dengan tegangan primer 225 Volt dengan waktu pemaparan selama 2 jam. Dari percobaan yang dilakukan, diperoleh hasil seperti pada Gambar 4.4. dan 4.5. berikut :



Gambar 4.4. Perbandingan degradasi konsentrasi limbah tekstil pada proses pemaparan dalam RHOP



Gambar 4.5. Perbandingan persen degradasi konsentrasi limbah tekstil pada proses pemaparan dalam RHOP

Degradasi penurunan konsentrasi fenol pada limbah tekstil katun akan lebih mudah terdegradasi bila dibandingkan dengan limbah batik. Hal ini dikarenakan pada limbah tekstil batik menggunakan beberapa warna dengan konsentrasi tinggi sehingga sangat sulit untuk diolah. Pada limbah tekstil katun, diperoleh konsentrasi awal fenol adalah 11,28 mg/L dan setelah pemaparan dengan menggunakan RHOP diperoleh degradasi sebesar 88,58% atau turun hingga 1,29 mg/L. Sedangkan pada limbah tekstil pencucian batik dengan

menggunakan perlakuan yang sama hanya diperoleh penurunan sampai dengan 34,51% saja dalam waktu yang sama yaitu 120 menit.

Pada Gambar 4.4. dapat dilihat bahwa kinerja RHOP dalam mendegradasi limbah tekstil batik sangat rendah, hal ini dikarenakan limbah yang digunakan tanpa pengkondisian awal dan juga dimungkinkan karena adanya bahan lain yang terkandung dalam limbah tersebut seperti amonia, krom, nitroso dan nitro yang relatif tinggi. Pada kondisi tersebut, radikal OH^\bullet yang terbentuk pada reaktor akan bekerja tidak hanya untuk mendegradasi senyawa fenol tetapi juga dikonsumsi untuk mendegradasi senyawa-senyawa lain seperti amonia dan sebagainya.

Pada industri tekstil, terdapat dua hal yang selama ini menjadi pantauan dari pemerintah maupun NGO (*Non-Government Organization*) dalam menangani masalah limbah tekstil yaitu warna dan juga fenol. Warna merupakan spektrum tertentu yang terdapat di dalam suatu cahaya sempurna (berwarna putih). Identitas suatu warna ditentukan panjang gelombang cahaya tersebut. Sebagai contoh warna biru memiliki panjang gelombang 460 nanometer. Panjang gelombang warna yang masih bisa ditangkap mata manusia atau daerah tampak spektrum dari radiasi elektromagnetik berkisar antara 380-780 nanometer.

Pada tahun 1876 Witt menyatakan bahwa molekul zat warna merupakan gabungan dari zat organik yang tidak jenuh, kromofor sebagai pembawa warna dan auksokrom sebagai pengikat antara warna dengan serat. Secara lebih luas zat warna tersusun dari hidrokarbon tak jenuh, *chromogen*, *auxochrome* dan zat aditif (*migration*, *levelling*, *wetting agent*, dsb).

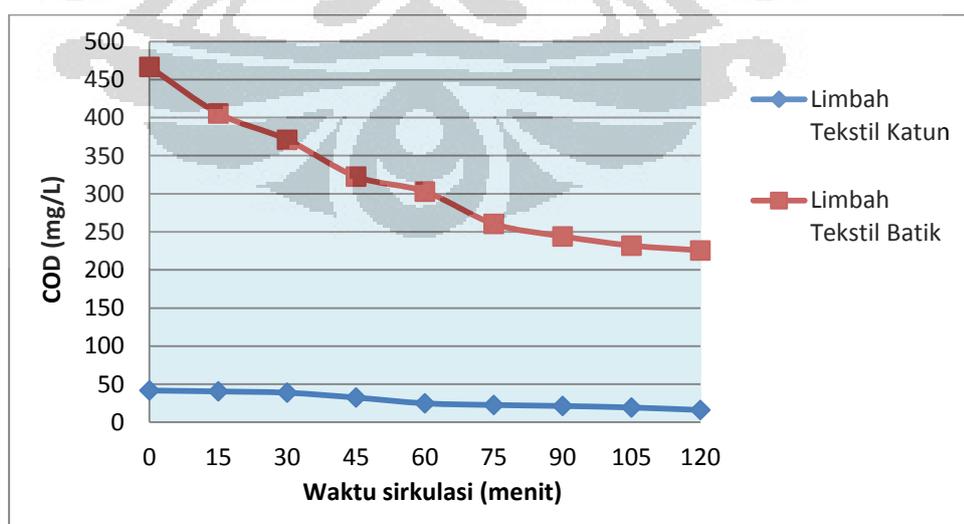
Kromofor merupakan zat pemberi warna yang berasal dari radikal kimia, seperti kelompok nitroso, kelompok nitro, kelompok azo, kelompok etilen, kelompok karbonil, kelompok karbon–nitrogen dan kelompok belerang. Macam–macam zat warna dapat diperoleh dari penggabungan radikal kimia tersebut dengan senyawa kimia lain. Sebagai contoh kuning jeruk (*orange*) diperoleh dari radikal etilen yang bergabung dengan senyawa lain membentuk hidrokarbon dimetil fulvena.

Pewarna sintetik secara cepat menggantikan peran dari pewarna alami sebagai bahan pewarna. Hal ini disebabkan karena biaya produksinya yang lebih murah, jenis warna yang lebih banyak, dan kemampuan pewarnaan yang lebih

baik. Pewarna sintetis diklasifikasikan berdasarkan cara penggunaan pada proses pewarnaan. Secara umum, pewarna sintetis digolongkan sebagai pewarna asam, pewarna basa, pewarna langsung, pewarna mordant, pewarna vat, pewarna reaktif, pewarna dispersi, pewarna azo dan pewarna sulfur. Zat organik tak jenuh umumnya berasal dari senyawa aromatik dan derivatifnya (benzene, toluene, xilena, naftalena, antrasena, dsb.), fenol dan derivatifnya (fenol, orto/meta/para kresol), senyawa mengandung nitrogen (piridina, kinolina, korbazolum).

Limbah hasil pencelupan batik dengan pewarna alami dinilai lebih aman dan tidak menimbulkan dampak pencemaran lingkungan, hal ini disebabkan berasal dari alam dan mudah didegradasi dengan sendirinya zat-zat yang terkandung dalam pewarna alami dapat mudah terurai. Berbeda dengan pewarna tekstil sintetis yang sulit terurai di alam. Namun sebagian besar industri tekstil saat ini menggunakan pewarna sintetis yang lebih murah harganya.

Senyawa-senyawa kimia yang umumnya ada di dalam air limbah industri tekstil adalah senyawa organik. Senyawa organik ini umumnya adalah senyawa azo yaitu zat warna yang digunakan pada pencelupan dan pewarnaan tekstil. Kadar senyawa organik yang ada dalam suatu perairan dapat diukur dengan parameter COD (*chemical oxygen demand*) atau dengan parameter BOD (*biochemical oxygen demand*). Sedangkan untuk melihat kepekatan warna maka dapat dilakukan pengukuran intensitas warna. Pada penelitian ini, hanya akan dilakukan analisis COD dengan hasil seperti pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6. Perbandingan nilai pengukuran COD limbah tekstil pada proses peaparan dalam RHOP

Data hasil uji karakteristik akhir sampel limbah cair industri pencelupan tekstil PT.YKK dan *Plant* Pengolahan Limbah Industri Jababeka khusus untuk limbah tekstil batik setelah diolah menggunakan teknologi plasma dengan 225 Volt (tegangan primer) atau setara dengan 12 kV (tegangan sekunder) dan disirkulasi selama 2 jam, dengan laju alir udara dari kompresor sebesar 10 L/menit mengalami penurunan COD dari 41,8 mg/L menjadi 16,1 mg/L untuk pemaparan selama 2 jam pada limbah tekstil katun, sedangkan untuk limbah tekstil batik mengalami penurunan nilai COD dari 466,5 mg/L menjadi 225,5 mg/L.

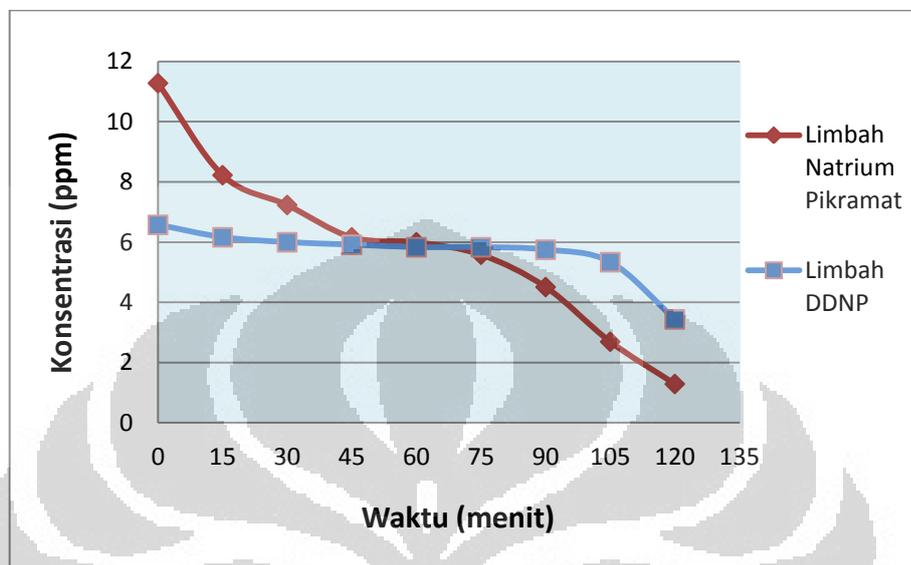
Nilai kandungan fenol dan COD semakin turun seiring dengan peningkatan waktu pemaparan yang dilakukan pada RHOP. Penurunan parameter terbesar diperoleh waktu terlama yaitu 120 menit. Dari kecenderungan tersebut, dapat disimpulkan bahwa waktu sirkulasi sangat berpengaruh terhadap penurunan semua parameter.

Nilai COD memberikan gambaran kehadiran senyawa organik dalam limbah. Pada Gambar 4.6. nilai COD limbah tekstil katun sebenarnya tidak memerlukan pengolahan lebih lanjut di karenakan sudah mencapai baku mutu untuk dibuang ke lingkungan, tetapi dalam hal ini tetap dilakukan pengukuran untuk mengetahui kinerja dari RHOP dalam menurunkan nilai COD. Sedangkan nilai COD pada limbah tekstil batik menunjukkan penurunan yang sejalan dengan waktu sirkulasi. Nilai COD hasil pengolahan pada penelitian ini belum mencapai baku mutu. Untuk dapat mencapai baku mutu dapat dilakukan dengan penambahan jumlah sirkulasi yang berarti pula memperpanjang waktu kontak plasma dengan limbah.

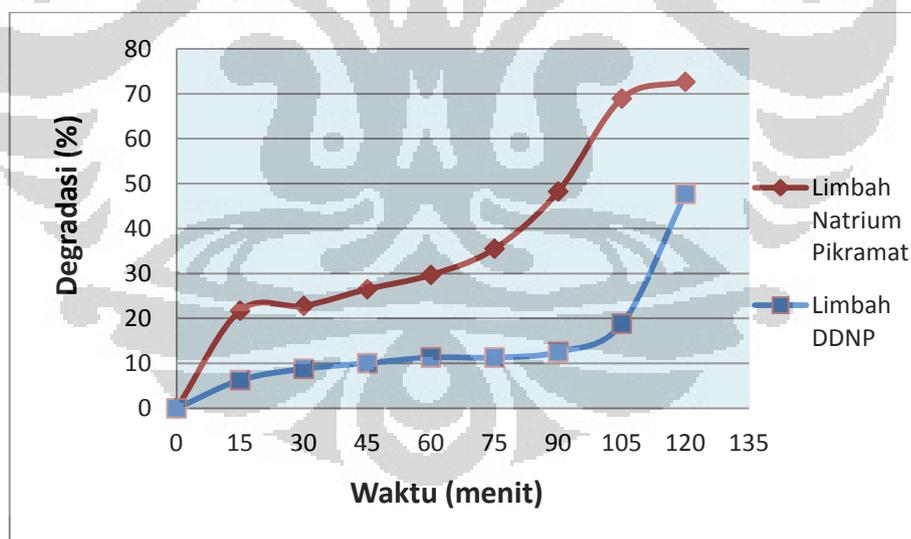
4.6. Penyisihan Senyawa Fenol dalam Limbah Bahan Peledak

Limbah bahan peledak yang diolah dalam penelitian ini didapatkan dari PT. Pindad (Persero) yang mengandung Diazo Di-Nitro Phenol (DDNP) dan natrium pikramat. Limbah bahan peledak ini berasal dari pembuatan amunisi dengan bahan dasar fenol. Karakteristik kedua limbah bahan peledak ini berbeda, dimana natrium pikramat mengandung senyawa fenol sebesar 15,57 mg/L sedangkan DDNP mengandung senyawa fenol sebesar 6,57 mg/L.

Pada percobaan dengan menggunakan RHOP yang telah dilakukan terhadap pengolahan limbah bahan peledak didapatkan data karakteristik proses pengolahan seperti pada Gambar 4.7 dan 4.8. berikut :



Gambar 4.7. Perbandingan degradasi konsentrasi limbah bahan peledak pada proses pemaparan dalam RHOP



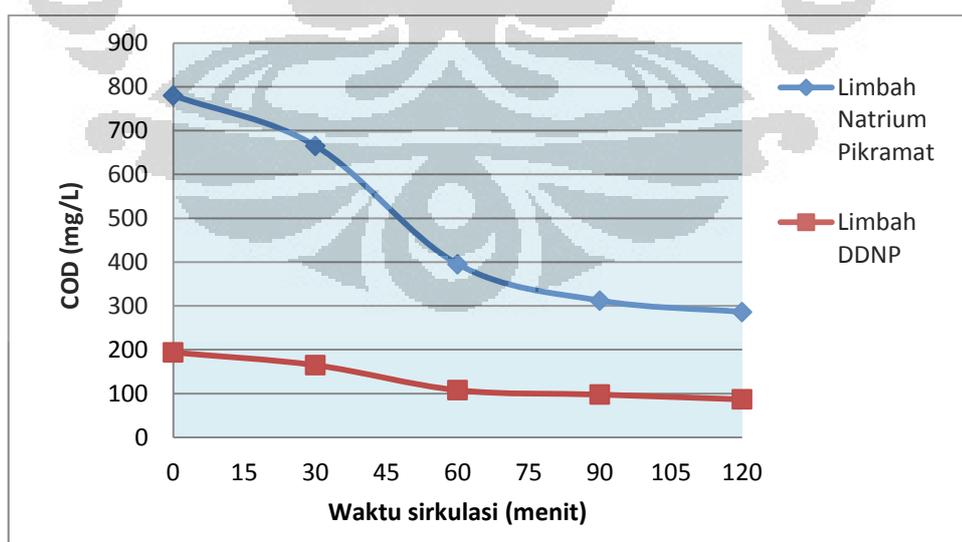
Gambar 4.8. Perbandingan persen degradasi konsentrasi limbah bahan peledak pada proses pemaparan dalam RHOP

Nilai kandungan fenol limbah natrium pikramat sebelum pengolahan adalah sebesar 15,57 mg/L dan setelah mengalami pemaparan dalam RHOP selama dua jam mengalami penurunan menjadi 4,26 mg/L. Sedangkan kandungan fenol limbah DDNP sebelum pengolahan adalah sebesar 6,57 mg/L dan setelah

pemaparan dalam RHOP selama dua jam turun menjadi 3,44 mg/L. Degradasi penurunan konsentrasi senyawa fenol pada limbah natrium pikramat lebih besar daripada DDNP, hal ini dikarenakan limbah natrium pikramat yang diolah terlebih dahulu telah mengalami pengenceran, sehingga penurunan laju degradasi lebih besar.

Pada pengolahan limbah bahan peledak natrium pikramat diperoleh degradasi penurunan yang lebih tinggi. Kondisi pH yang digunakan pada proses pengolahan ini adalah sebesar 6,8. Derajat keasaman dari limbah natrium pikramat akan sangat berpengaruh terhadap proses degradasi. Pada proses ini terjadi penyerangan secara elektrofilik di mana ozon yang memiliki peran dominan dan kaya elektron, akan menyerang nukleofilnya yaitu fenol untuk selanjutnya terjadi induksi ke dalam cincin benzena dan cenderung menjadi negatif.

Sedangkan pada limbah DDNP terjadi degradasi limbah yang kecil dan cenderung stabil. Hal ini di karenakan DDNP mengandung nitroso dan fenol yang besar. Untuk itu peranan radikal OH^\bullet yang lebih berpengaruh, akan tetapi radikal OH^\bullet yang terbentuk dalam RHOP sangat kecil yaitu 0,5 mg/L. Sehingga pada proses degradasi limbah DDNP belum maksimal. Untuk mengetahui hasil analisis COD dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9. Perbandingan nilai pengukuran COD limbah bahan peledak pada proses pemaparan dalam RHOP

Nilai COD yang telah diukur sebelum pengolahan untuk limbah natrium pikramat adalah sebesar 780 mg/L dan setelah mengalami pengolahan dalam RHOP selama dua jam mengalami penurunan nilai COD menjadi 286 mg/L. Begitu pula dengan limbah DDNP sebelum pengolahan yaitu sebesar 194 mg/L dan setelah mengalami pengolahan selama dua jam, turun menjadi 87 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa RHOP dapat bekerja dengan baik untuk menurunkan nilai COD limbah meskipun masih membutuhkan banyak penyempurnaan.

Nilai COD memberikan gambaran kehadiran senyawa organik dalam limbah. Pada Gambar 4.9, nilai COD limbah DDNP dan natrium pikramat mengalami penurunan seiring dengan waktu sirkulasi. Semakin lama waktu sirkulasi, maka penurunan nilai COD juga semakin tinggi. Nilai COD hasil pengolahan pada penelitian ini belum mencapai baku mutu. Untuk dapat mencapai baku mutu dapat dilakukan dengan penambahan jumlah sirkulasi yang berarti pula memperpanjang waktu kontak plasma dengan limbah.

4.7. Karakteristik Reaktor Hibrida Ozon-Plasma

Reaktor yang digunakan dalam penelitian ini adalah Reaktor Hibrida Ozon-Plasma (RHOP). Plasma terbentuk dari elektroda yang diletakkan di tengah reaktor, sedangkan sampel limbah cair mengalir di sekeliling reaktor yang berbentuk tabung dengan bahan gelas borosilika, sehingga dapat dikatakan pula bahwa plasma terbentuk di fase gas pada permukaan air.

RHOP dipilih karena beberapa kelebihan yang dimiliki reaktor ini. Diantaranya adalah elektroda tidak akan mengalami kenaikan suhu yang relatif tinggi, hal ini karena cairan kontak langsung dengan elektroda. Selain itu, tegangan yang dibutuhkan juga lebih kecil bila dibandingkan dengan pembangkitan plasma dalam air yang membutuhkan tegangan listrik sangat tinggi (10-1000 kV) (Chang J.S *et al.*, 1998 dalam Sugiarto, 2002), tegangan sekunder yang digunakan dalam penelitian ini lebih kecil yaitu sebesar 12 kV. Meskipun tegangan yang digunakan lebih kecil, namun plasma tetap dapat terbentuk yaitu mulai tegangan primer 150 Volt regulator. Hal itu dikarenakan plasma dibangkitkan dalam fase gas, bukan fase air. Sesuai dengan sifatnya, gas adalah isolator sehingga tidak mampu menghantarkan arus listrik, sedangkan air adalah konduktor yang baik. Pada isolator, karena arus listrik tidak mengalir maka

pergerakan elektron yang terbentuk akan lebih terpusat dan cepat mengalami loncatan elektron sehingga plasma dapat terbentuk pada tegangan yang lebih kecil.

Ketika plasma terbentuk di fase gas pada permukaan air, maka spesi aktif yang dihasilkan pada fase gas akan larut dalam air dan kemudian mendegradasi zat organik dalam air dengan proses oksidasi. Oleh karena itu, reaktor plasma dalam penelitian ini dibuat sedemikian rupa dengan tujuan agar aliran sampel limbah cair yang akan dikontakkan dengan plasma ini bisa setipis mungkin sehingga seluruhnya dapat kontak dengan plasma pada waktu yang bersamaan.

Pembentukan plasma pada fase gas sangat dipengaruhi oleh sumber gas dalam reaktor. Pada penelitian ini, digunakan udara yang berasal dari kompresor sebagai sumber gas dalam reaktor. Dalam sistem ini diperlukan O_2 yang dapat diubah menjadi O_3 . O_3 dapat larut di air serta memperbanyak terbentuknya radikal OH^\bullet melalui reaksi dekomposisi terutama pada pH basa. Hal ini akan meningkatkan degradasi limbah mengingat waktu hidup OH^\bullet yang sangat singkat. Laju alir udara yang digunakan adalah 10 L/menit.

Secara visual, besar energi yang dimiliki plasma pada tiap tegangan dapat dilihat dari karakter suara, warna, dan bentuk yang dihasilkan plasma. Tegangan primer maksimum yang digunakan dalam penelitian ini adalah 225 Volt regulator atau setara dengan 12 kV (tegangan sekunder). Dalam penelitian ini plasma yang terbentuk sangat efektif di karenakan cairan akan kontak langsung dengan plasma pada semua titik, sehingga pengolahan terjadi secara maksimal. Akan tetapi plasma dan radikal bebas yang dihasilkan masih sangat kecil sehingga tegangan yang digunakan harus lebih besar dan waktu sirkulasi yang lebih lama untuk mencapai efisiensi proses yang lebih tinggi.

4.8. Mekanisme Reaksi dalam Reaktor Plasma

Mekanisme reaksi dalam reaktor plasma adalah bahwa OH^\bullet dan O^\bullet merupakan spesi dominan dalam degradasi polutan. Selanjutnya, Hayashi, *et al.* (2000) meneliti bahwa penggunaan O_2 sebagai sumber gas untuk reaktor plasma akan menghasilkan oksidan dominan OH^\bullet dan O^\bullet , yang sebagian besar dihasilkan karena disosiasi tumbukan elektron dari H_2O dan O_2 (sebagai sumber gas dalam

reaktor). Berdasarkan hasil penelitian tersebut, maka pada reaktor ini yang dianggap sebagai oksidator utama yaitu OH^\bullet , O^\bullet dan O_3 dengan persamaan sebagai berikut :



dimana * menunjukkan besarnya tingkat energi yang dimiliki, e^- adalah elektron, dan M adalah partikel ketiga yang dapat berupa O_2 , N_2 , OH^\bullet dan sebagainya.

Pada penelitian ini akan menjelaskan dua hal, yaitu yang pertama adalah pembentukan plasma pada reaktor yang akan menghasilkan ozon. Ozon yang terbentuk akan larut melalui permukaan air, dan kemudian bereaksi dengan zat organik dalam limbah oleh radikal hidroksil atau spesi aktif lainnya sebagai hasil konversi ozon terlarut. Selanjutnya, dua radikal hidroksil yang terbentuk dapat berkombinasi satu sama lain dan kemudian memproduksi produk yang stabil dengan reaksi sebagai berikut :



H_2O_2 juga dapat dihasilkan dari reaksi di bawah ini :



4.9. Pengaruh Tegangan terhadap Degradasi Limbah

Peningkatan tegangan dan kuat arus, berarti pula peningkatan energi. Energi yang besar akan membentuk plasma menjadi lebih panjang dan filamen (pijar)-nya lebih besar karena elektron yang dihasilkan juga semakin banyak (Sugiarto, 2002). Perbedaan jumlah elektron menunjukkan adanya perbedaan proses ionisasi, disosiasi, dan eksitasi dalam plasma. Apabila jumlah elektron dalam reaktor semakin banyak, maka pembentukan OH^\bullet , O^\bullet , dan O_3 sebagai oksidator dominan dalam penelitian ini akan semakin banyak pula. Dapat disimpulkan bahwa apabila terjadi peningkatan tegangan maka energi akan meningkat pula dan jumlah elektron yang terbentuk pada reaktor akan semakin bertambah, kemudian kemungkinan tumbukan elektron dengan oksigen dan air semakin besar. Selanjutnya, OH^\bullet , O^\bullet , dan O_3 yang terbentuk pada reaktor menjadi lebih banyak, dan proses degradasi limbah cair industri meningkat. Oleh karena

itu dapat dikatakan bahwa peningkatan tegangan memberi pengaruh dalam hal peningkatan energi dan jumlah spesi aktif yang terbentuk pada reaktor plasma.

4.10. Pengaruh Sirkulasi terhadap Degradasi Limbah

Pada hasil penelitian yang telah dilakukan dapat dilihat bahwa semakin lama sirkulasi, maka semakin besar persentase penurunan parameter, yang berarti menandakan bahwa semakin banyak zat organik yang terdegradasi. Sirkulasi perlu dilakukan beberapa kali dalam waktu yang lebih lama untuk mengoptimalkan proses degradasi limbah. Hal itu dikarenakan waktu hidup (*lifetime*) radikal OH^\bullet yang sangat pendek dalam cairan, sedangkan ozon lambat bereaksi tetapi memiliki waktu hidup yang lebih lama yaitu 20 sampai 30 menit (Munter, 2001). Semakin lama waktu kontak, maka hidroksil radikal yang hilang akan tergantikan oleh hidroksil radikal yang baru, dan ozon yang terlarut akan semakin banyak.

Sirkulasi dalam penelitian ini merupakan faktor yang sangat penting untuk meningkatkan kontak limbah dengan elektron yang terbentuk. Lebih jauh, memperbanyak kemungkinan tumbukan antara elektron dengan molekul air dan oksigen (sebagai sumber gas dalam reaktor), serta memperbanyak kemungkinan terbentuknya ozon, sehingga dihasilkan spesi aktif yang berperan dalam proses oksidasi limbah cair industri. Semakin banyak elektron, maka akan semakin banyak pula kandungan radikal OH^\bullet , O^\bullet , dan O_3 di reaktor. Dapat disimpulkan bahwa sirkulasi memberi pengaruh pada banyaknya kemungkinan kontak antara limbah dengan spesi aktif yang dihasilkan plasma. Fenomena ini menjadi dasar dihasilkannya degradasi terbesar seluruh parameter dalam penelitian ini pada sirkulasi selama dua jam.

4.11. Perhitungan Energi

Perhitungan energi listrik dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui besar energi input yang diperlukan dalam penelitian pada setiap tegangan. Perhitungan dilakukan dengan volume sampel 2 liter dan waktu pengolahan dua jam. Perhitungan secara lengkap dapat dilihat pada tabel C.1. lampiran C. Hasil perhitungan besar energi yang dibutuhkan untuk seluruh sirkulasi pada tiap tegangan dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tegangan listrik yang digunakan pada RHOP adalah 225 V (tegangan primer) dan 12 kV (tegangan sekunder). Tegangan ini sangatlah kecil untuk membangkitkan plasma, sehingga listrik yang dibutuhkan juga lebih murah. Oleh karena itu metode pengolahan limbah dengan menggunakan RHOP ini relatif murah, sehingga menjadi alternatif pengolahan limbah masa depan.

Tabel 4.1 . Perhitungan Energi dan Biaya Listrik Skala Laboratorium

Tegangan (kV)	Kuat arus (A)	Daya (kW)	Waktu sirkulasi (jam)	Energi (kWh)	Biaya listrik total (Rp/kWh)
12	0,3	0,066	0,25	0,0165	182,16
			0,50	0,033	
			0,75	0,0495	
			1,00	0,066	
			1,25	0,0825	
			1,50	0,099	
			1,75	0,1155	
			2,00	0,132	

Dari tabel 4.1. dapat disimpulkan bahwa untuk mendapatkan efisiensi degradasi limbah terbesar diperlukan energi input sebesar 0,132 kWh pada sirkulasi selama dua jam.

BAB 5

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Produktivitas ozon dari ozonator Reson RSO-9805 dengan laju alir gas 9 L/menit adalah 0,05 g/jam.
- Produktivitas ozon terlarut pada RHOP dengan laju alir udara 10 L/menit pada fasa cair adalah 0,000576 g/liter.
- Persentase penyisihan *p*-klorofenol adalah sebesar 83,98% pada pH 10,8 dalam RHOP dan penurunan COD sampai dengan 42,19% .
- Persentase penyisihan limbah tekstil katun adalah sebesar 88,58% dan dengan penurunan nilai COD sebesar 38,51%, sedangkan persentase penyisihan limbah tekstil batik adalah sebesar 34,51% dan penurunan nilai COD sebesar 48,34%.
- Persentase penyisihan limbah natrium pikramat adalah sebesar 72,64% dan dengan penurunan nilai COD sebesar 33,67%, sedangkan persentase penyisihan limbah DDNP adalah sebesar 47,74% dan penurunan nilai COD sebesar 44,85%.
- Sistem RHOP yang telah dirancang terbukti dapat digunakan untuk mendegradasi limbah dengan waktu sirkulasi tertentu meskipun masih membutuhkan beberapa penyempurnaan.

5.2. Saran

Ada beberapa saran untuk pengembangan penelitian pengolahan limbah cair dengan menggunakan RHOP, antara lain:

- Sebaiknya dilakukan pengukuran radikal hidroksil (OH^*) yang dihasilkan dalam RHOP.
- Sebaiknya dilakukan kajian tentang jarak antara elektroda yang digunakan, sehingga akan diperoleh hasil plasma yang paling efektif.

- Sebaiknya ditambahkan sistem untuk mempertahankan *life time* ozon dan radikal bebas dalam cairan, sehingga proses degradasi akan lebih baik dan mencapai konversi di atas 90%.



DAFTAR PUSTAKA

- Abidin. 2010. Produksi Hidrogen Menggunakan Elektrolisis Plasma Non-Termal Dari Larutan Elektrolit KOH.
- Adrian Nengkoda. 1997. *Uji Kinerja dan Produktivitas Ozonator dalam Kolom Aerasi Berganda*. TPG TFUI. Depok.
- Alnaizy and Akgerman. 2000. *Advanced Oxidation Of Phenolic Compounds*.
- Arnold E. G., Lenore S. C., Andrew D. E. 1992. *Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater. 18th edition*. American Public Health Association. pp 5-31, 5-33.
- Aryanto I.S. 2007. Penurunan Kadar Fenol dan COD pada Limbah Cair Industri Cat dengan Teknologi Plasma pada Permukaan Air.
- Bardos, Ladislav dan Barankova, Hana. 2009. *Plasma Process at Atmospheric and Low Pressures*, Vacuum 83. 522-527.
- Beltra´n, F.J., J.M. Encinar, and J.F. Gonza´lez., *Industrial Wastewater Advanced Oxidation. Part 2. Ozone Combined with Hydrogen Peroxide or UV Radiation*. Water Res. 31(10):2415–2428 (1997).
- Biljana P, Dragan Manojlovic dan Bratislav M. 2008. *Plasma Assisted Degradation Of Phenol Solutions*. Center Of Chemistry, Institute Of Chemistry, Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia.
- Bismo *et al.* 2008. Studi Awal Degradasi Fenol Dengan Teknik Ozonasi Di Dalam Reaktor Annular.
- Boes Evita. 2007. Validasi Analisis Senyawa Fenol Total Dan Perhitungan Nilai Ketidakpastian.
- Brisset, J.L. 1996. *Air Corona Removal of Phenols*.
- Cheng, hsu-Hui., chen, Shiao-shing., et all. 2007. *Liquid- Phase Non –Thermal Plasma Technology For Degradation Of Two High Strength Phenols in Aqueous Solution*. Institute engineering technology, National Taipei University Of technology, Taipei, 1, Sec 3, Chung-Hsiao E. Rd., Taipei.
- Chen, Yin-Sheng ., Zhang, Xin-Sheng., et all. 2004. *Pulsed high-Voltage Discharge Plasma for degradation Of Phenol in Aqueous Solution*.

UNILAB Research Center Of Chemical Reaction Engineering, East China University Of Science and Technology, China.

Chemtrec. 2012., <http://www.sciencelab.com/msds.php?msdsId=9926464>.

Eckenfelder Jr. 2000. *Industrial Water Pollution Control*. McGraw-Hill, New York.

Goto, Motonobu., Yoshida, Akihiro. 2011. *Reaction Of Phenol by Discharge Plasma Generated In Subcritical Water*. Bioelectrics Research Center, kumamoto University.

Guijie An, Yifei Sun, Tianle Zhu, Xiao Yan. 2011. *Degradation Of Phenol In Mists By A Non-Thermal Plasma Reactor*.

Hao, Xiaolong., Zhou, Minghua., Xin, Qing dan Lei, Lecheng. 2006. *Pulsed Discharge Plasma Induced Fenton-Like Reactions For The Enhancement Of The degradation Of 4-Chlorophenol in water*. Institute Of Enviromental pollution Control Technologies, Xixi Campus, Zhejiang University.

Hsu-Hui Cheng, *et al.* *Liquid-phase Non-thermal Plasma Technology for Degradation of Two High Strength Phenols in Aqueous Solution*.

Jiangning Wu, Klaas Rudy, Josef Spark. 2000. *Oxidation Of Aquous Phenol By Ozone And Peroxidase*.

Juhani Kronholm, Sami Huhtala, Heikki Haario, Marja-Liisa Riekkola. 2002. *Oxidation of 4-chloro-3-methylphenol in Pressurized Hot Water in Liquid and Vapor Phases*.

Kogelschatz, Ulrich. 2003. *Dielectric-Barrier Discharge: Their History, Discharge Physics, and Industrial Application*. Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol 23, No. 1, March 2003, 1-46.

Kustiningsih I. 2005. *Pengolahan Limbah Cr(VI) dan Fenol dengan Fotoreaktor Berenergi Matahari*.

Langlais, B., Reckhow, D. A., Brink, D.R. 1991. *Ozone In Water Treatment: Application And Engineering*. Michigan.

Lieberman M.A. and Lichtenberg A.J. 2005. *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. 2nd eddition. Wiley. pp 369-370.

Masayuki Sato, *et al.* 2004. *Developing Water Surface Discharge For Wastewater Treatment*.

- Metcalf & Eddy. 1991. *Wastewater Engineering 3rd Ed.* McGraw-Hill International Edition. New York.
- Motonubu Goto, Akihiro Yoshida, Masafumi Mitsugi, *et al.* 2011. *Reaction of Phenols by Discharge Plasma Generated in Subcritical Water.*
- Munter, Rein. 2001. *Advanced Oxidation Processes – Current Status And Prospects.*
- Narengerile, Min-Hao Yuan, Takayuki Watanabe. 2011. *Decomposition Mechanism of Phenol in Water Plasmas by DC Discharge at Atmospheric Pressure.*
- Nur R. 2006. Pengolahan Limbah Cair Industri Tekstil dengan Menggunakan *Advanced Oxidation Processes (AOPs).*
- Roth J.R. 1995. *Industrial Plasma Engineering.* Vol. 1. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia. pp 283-285.
- SNI 06-6989.21-2004. Bagian 21: Cara uji kadar fenol secara spektrofotometri.
- Sugiarto, A T. 2007. Mengatasi Limbah Tanpa Masalah Penerapan Teknologi Plasma untuk Lingkungan. pp 4-23.
- Sugiarto, *et al.*, 2000. *Pulsed Plasma Processing Of Organic Compound In Aqueous Solution.*
- Susan J. Masten, Simon H. R. Davies. 1994. *The Use of Ozonization Degrade of Organic Contaminants in Wastewater.*
- Tchobanoglous, George, Burton, F.L., Stensel, H.D. 2003. *Wastewater Engineering, Treatment And Reuse.* 4th Edition. Metcalf & Eddy, Inc. McGraw Hill, New York.
- Vitiligo S.I. 2011., <http://www.vitiligosupport.org/newsletters/fall10.html>.
- Winarto Kurniawan. 2000. *Penyisihan Senyawa Fenol dengan Teknik Ozonasi pada Suasana Basa dalam Kolom sistem Injeksi Berganda.* Jurusan TGP FTUI. Depok.
- Yin-Sheng Chen, Xin-Sheng Zhang, Yin-Chun Dai, Wei-Kang Yuan. 2003. *Pulsed High Voltage Discharge Plasma For Degradation Of Phenol In Aquous Solution.*

LAMPIRAN A : PENGUKURAN PRODUKTIVITAS OZON DALAM REAKTOR HIBRIDA OZON-PLASMA

A.1. Pengukuran Produktivitas Ozon Terlarut pada Reaktor Hibrida Ozon Plasma dalam Fasa Cair

Kondisi operasi :

1. Udara yang digunakan 10 LPM (Liter per Menit)
2. Tegangan 225 Volt
3. Larutan KI 2%
4. Volume liquida = 1 liter
5. Waktu sirkulasi = 15 menit

Prosedur :

1. Mengambil 25 mL sampel yang sudah diozonasi.
2. Menambahkan H₂SO₄ 2N sebanyak 4 mL.
3. Menambahkan amilum 1% sebanyak 3 tetes sampai larutan berubah menjadi warna biru.
4. Kemudian larutan dititrasi dengan menggunakan Na₂S₂O₃.5H₂O 0,005M
5. Menghitung mol ozon yang terbentuk.

Reaksi Ozon dengan KI :



Sehingga dari reaksi di atas diperoleh hubungan :

$$1 \text{ mol O}_3 \approx 2 \text{ mol KI} \approx 2 \text{ mol Na}_2\text{S}_4\text{O}_6$$

Hasil percobaan diperoleh :

Volume Na₂S₂O₃.5H₂O adalah sebanyak 1,2 mL.

Hasil Perhitungan :

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

$$\text{mol ozon} = \frac{1}{2} 0,005\text{M} \cdot 0,0012\text{L}$$

$$\text{mol ozon} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ mol}$$

$$\text{gram ozon terlarut} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot 48 \frac{\text{gram}}{\text{mol}}$$

$$\text{gram ozon terlarut} = 1,44 \cdot 10^{-4} \text{ gram}$$

$$\text{Produktivitas ozon} = \frac{1,44 \cdot 10^{-4} \text{ gram}}{15 \text{ menit}} \cdot \frac{60 \text{ menit}}{1 \text{ jam}} = 0,000576 \frac{\text{gram}}{\text{jam}}$$

$$\text{Produktivitas ozon} = \frac{0,000576 \frac{\text{gram}}{\text{jam}} \cdot 1 \text{ jam}}{1,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Liter}}{\text{menit}} \cdot 60 \text{ menit}}$$

$$\text{Produktivitas ozon} = 0,008 \frac{\text{gram}}{\text{L}}$$

Dari perhitungan di atas, didapatkan besarnya ozon yang diproduksi oleh Reaktor Hibrida Ozon-Plasma adalah sebesar 0,000576 gram/jam dan yang terlarut dalam liquids adalah sebesar 0,008 g/Liter.

A.2. Pengukuran Produktivitas Ozonator Reson RSO-9805 2,8 g

Data yang didapatkan dari percobaan adalah sebagai berikut :

Laju alir ozonator = 9 L/menit

Tabel A.1. Data Percobaan pada Analisis Produktivitas Ozonator

t (menit)	V Na ₂ S ₂ O ₃ ·5H ₂ O	
	hulu (ml)	hilir (ml)
4,59	31,76	2,16
4,35	29,6	2,8

Data pada tabel di atas diolah dengan perhitungan sesuai dengan prosedur perhitungan dibawah ini :

Diketahui : [Na₂S₂O₃·5H₂O] = 0,005 M

- mmol Na₂S₂O₃·5H₂O = (Vol. Na₂S₂O₃ hulu + Vol. Na₂S₂O₃ hilir) x 0,005
- mol Na₂S₂O₃·5H₂O = $\frac{(\text{Vol. Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ hulu} + \text{Vol. Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ hilir}) \times 0,005}{1000}$

- mol O_3 = $\frac{1}{2} \times \text{mol Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
- gram O_3 = mol $\times 48$
- produktivitas ozon = $\frac{\text{gr } O_3 \times 3600}{t}$

dimana : t = waktu kontak antara ozon dengan larutan KI
 produktivitas ozon memiliki satuan gr/jam

Dari prosedur perhitungan di atas, maka diperoleh hasil seperti pada Tabel A.2 berikut :

Tabel A.2. Hasil perhitungan pada Analisis Produktivitas Ozonator

M $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	mol $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	mol O_3	Massa O_3 (g)	Produktivitas Ozonator (g/jam)
0,005	0,0001696	0,0000848	0,004074	0,049
0,005	0,000162	0,000081	0,003888	0,050
Produktivitas Ozon Rata-rata (g/jam)				0,0495

Jumlah ozon rata-rata berdasarkan perhitungan di atas merupakan nilai produktivitas dari ozonator. Produktivitas ozon dari ozonator merek Resun RSO 9805 dengan laju alir gas sebesar 9 L/menit adalah 0,0495 g/jam. Pengukuran produktivitas ozon rata-rata ini digunakan untuk mengetahui massa ozon fasa gas yang masuk ke dalam cairan sampel.

A.3. Pengukuran Radikal OH^\bullet pada RHOP

Spesi reaktif yang berperan dalam proses degradasi limbah ini adalah radikal OH^\bullet . *Life time* radikal OH^\bullet dalam cairan sangatlah singkat dan apabila bertumbukan dengan radikal OH^\bullet yang lainnya, maka akan mudah untuk berkombinasi menjadi H_2O_2 .

Tabel A.3. Nilai Pengukuran H_2O_2

Waktu	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)	Volume (mL)	mmol H_2O_2
0	0	0	0	0
15	0,445	3,494	1000	0,013
20	0,498	3,912	1000	0,015

Contoh Perhitungan :

Dari kurva standar diperoleh persamaan : $y = 0,1268x + 0,0019$

Sehingga,

$$0,498 = 0,1268x + 0,0019$$

$$x = \frac{0,498 - 0,0019}{0,1268}$$

$$x = 3,912 \text{ ppm}$$

$$\text{mmol H}_2\text{O}_2 = \frac{3,912}{34} \cdot \frac{1000}{1000}$$

$$\text{mmol H}_2\text{O}_2 = 0,115 \text{ mmol}$$

$$\text{gram H}_2\text{O}_2 = 0,115 \text{ mmol} \cdot 34 \text{ g/mol}$$

$$\text{gram H}_2\text{O}_2 = 0,498 \text{ mg}$$

Dari perhitungan di atas, didapatkan besarnya H_2O_2 yang diproduksi oleh Reaktor Hibrida Ozon-Plasma adalah sebesar 0,498 mg/L.

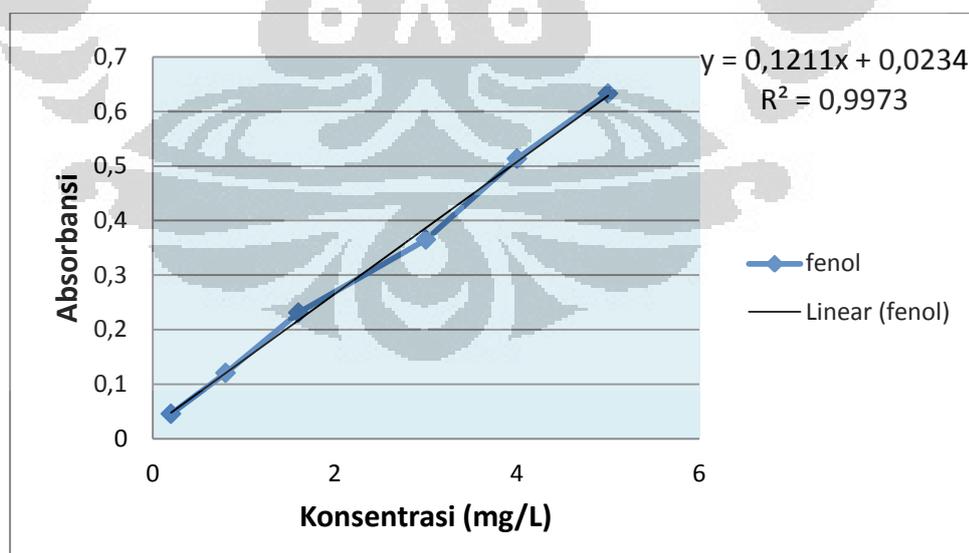
LAMPIRAN B : PENYISIHAN FENOL DALAM REAKTOR HIBRIDA OZON-PLASMA

1. Membuat Kurva Kalibrasi Standar Fenol

Sebelum melakukan pengukuran konsentrasi akhir pengolahan untuk limbah tekstil dan bahan peledak dimana masih terdapat kandungan fenol, terlebih dahulu dilakukan pembuatan kurva kalibrasi standar fenol yang digunakan sebagai acuan dalam menentukan nilai persamaan yang akan digunakan dalam menentukan konsentrasi fenol sesudah proses.

Tabel B.1. Nilai Absorbansi Fenol

Absorbansi	Konsentrasi
0,0455	0,2
0,1205	0,8
0,2310	1,6
0,3650	3,0
0,5135	4,0
0,6330	5,0



Gambar B.1. Kurva Kalibrasi Fenol

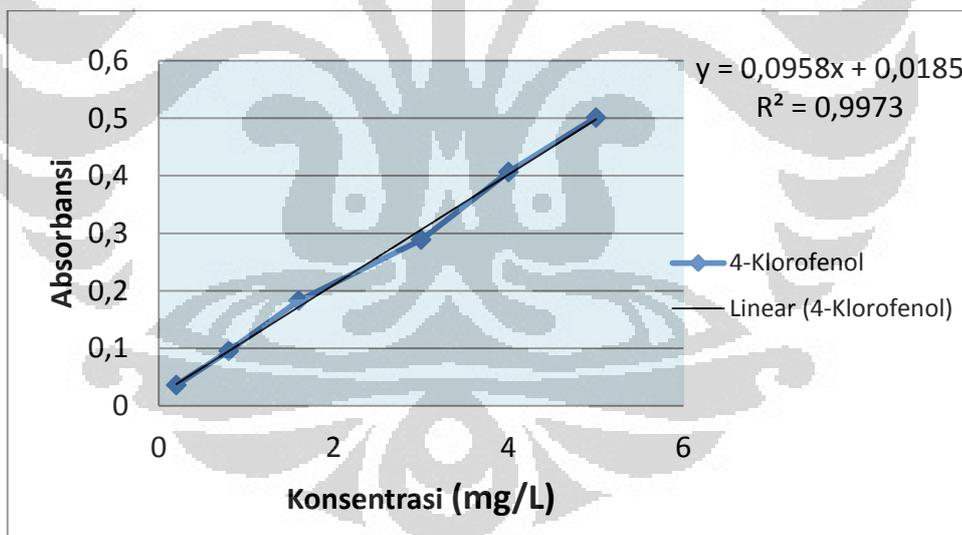
Dari kurva di atas didapatkan persamaan yang dijadikan acuan untuk menghitung konsentrasi fenol, yaitu $y = 0,1211x + 0,0234$ dengan y adalah % absorbansi yang didapatkan dan x adalah besarnya konsentrasi.

2. Membuat Kurva Kalibrasi Standar *p*-klorofenol

Tabel B.2. Nilai Absorbansi *p*-klorofenol

Absorbansi	Konsentrasi
0,036012	0,2
0,095372	0,8
0,182829	1,6
0,288886	3,0
0,406419	4,0
0,501000	5,0

Dari Tabel di atas, dapat dibuat grafik seperti pada Gambar dibawah ini :



Gambar B.2. Kurva Kalibrasi *p*-klorofenol

Dari kurva di atas didapatkan persamaan yang dijadikan acuan untuk menghitung konsentrasi fenol, yaitu $y = 0,0958x + 0,0185$ dengan y adalah % absorbansi yang didapatkan dan x adalah besarnya konsentrasi.

3. Penyisihan larutan *p*-klorofenol dalam Reaktor Hibrida Ozon-Plasma Dalam Suasana Basa

- Perlakuan 1 : pH = 10,8
Ozonator dan Stirrer
Konsentrasi awal = 50 ppm
Tegangan = 225 volt

Tabel B.3. Penyisihan *p*-klorofenol menggunakan ozonator

Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)	Persen konsentrasi sisa (%)	Persen degradasi (%)
0	0,493	50	100	0
15	0,362	36,71400	73,42799	26,57201
30	0,308	31,23732	62,47465	37,52535
45	0,278	28,19473	56,38945	43,61055
60	0,218	22,10953	44,21907	55,78093

- Perlakuan 2 : pH = 10,8
Plasma dan Stirrer
Konsentrasi awal = 50 ppm
Tegangan 225 volt

Tabel B.4. Penyisihan *p*-klorofenol menggunakan plasma

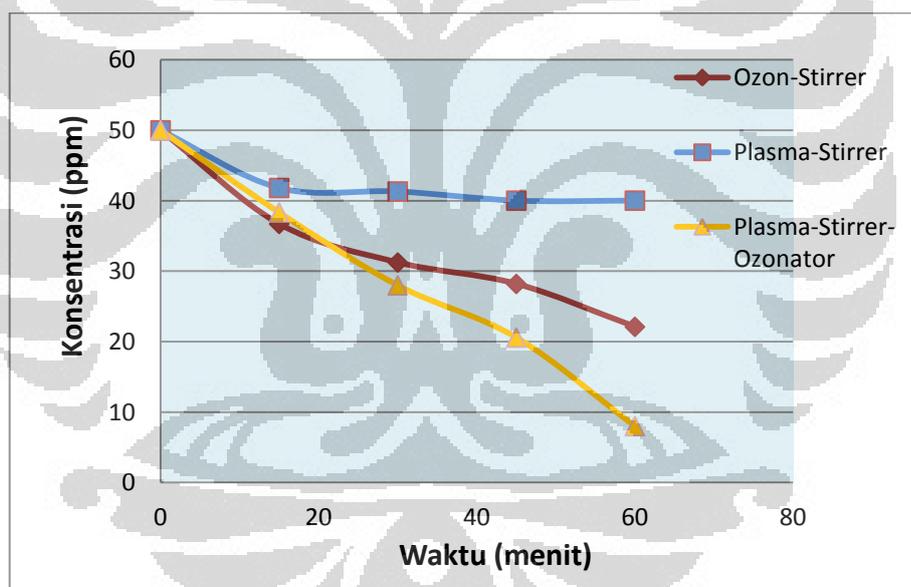
Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)	Persen konsentrasi sisa (%)	Persen degradasi (%)
0	0,501	50	100	0
15	0,419	41,81637	83,63273	16,36727
30	0,414	41,31737	82,63473	17,36527
45	0,401	40,01996	80,03992	19,96008
60	0,401	40,01996	80,03992	19,96008

- Perlakuan 3 : pH = 10,8
Plasma, Stirrer dan Ozonator
Konsentrasi awal = 50 ppm
Tegangan 225 volt

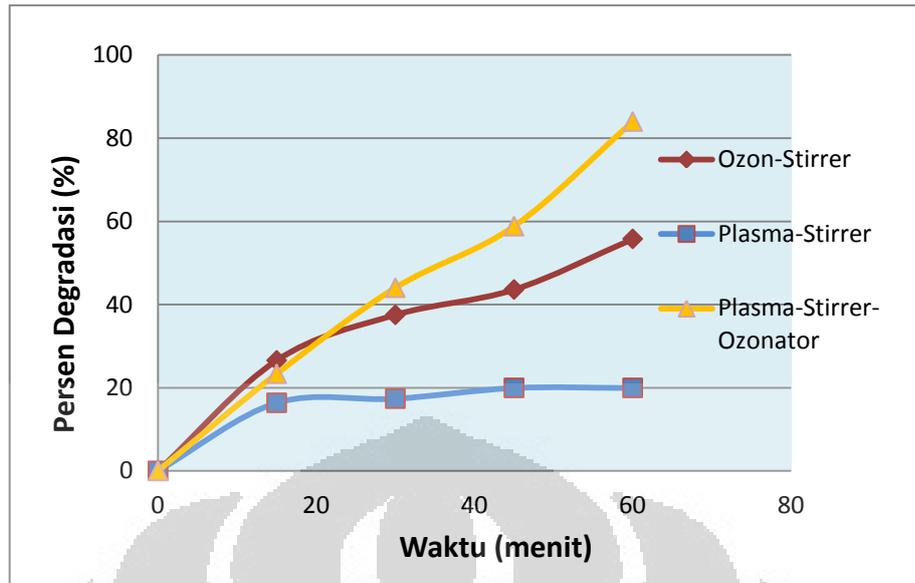
Tabel B.5. Penyisihan *p*-klorofenol menggunakan plasma dan ozonator

Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)	Persen konsentrasi sisa (%)	Persen degradasi(%)	COD (mg/L)
0	0,493	50	100	0	640
15	0,378	38,33671	76,67343	23,32657	610
30	0,276	27,99189	55,98377	44,01623	600
45	0,203	20,58824	41,17647	58,82353	585
60	0,079	8,01217	16,02434	83,97566	550
75	0,065	6,59229	13,18458	86,81542	430
90	0,060	6,08519	12,17039	87,82961	330
105	0,057	5,78093	11,56187	88,43813	310
120	0,050	5,07099	10,14199	89,85801	270

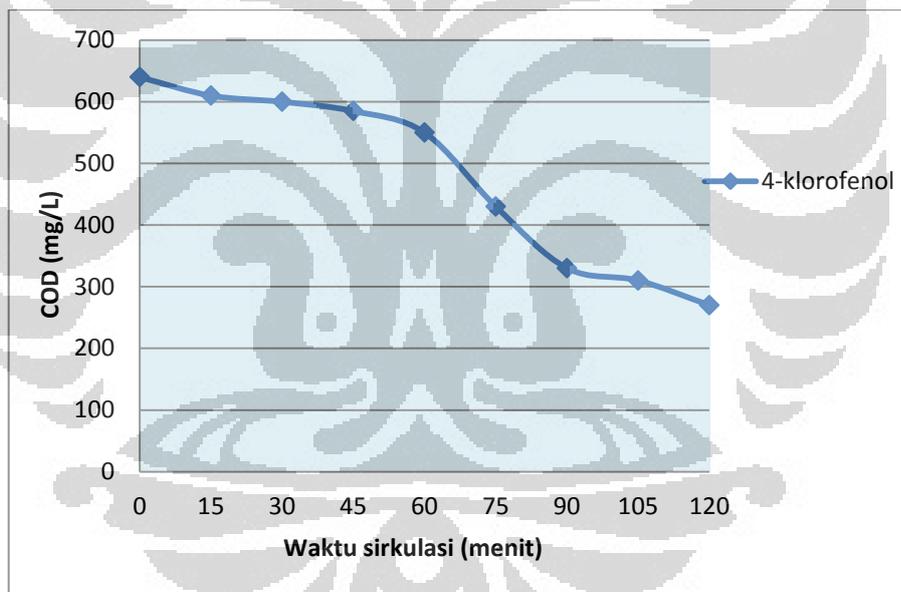
Dari tiap perlakuan di atas, maka akan didapatkan penggabungan grafik sebagai berikut :



Gambar B.3. Perbandingan degradasi konsentrasi dengan ketiga jenis penyisihan *p*-klorofenol



Gambar B.4. Perbandingan %degradasi dengan ketiga jenis penyisihan *p*-klorofenol



Gambar B.5. Nilai penurunan COD *p*-klorofenol

4. Penyisihan Limbah Tekstil dalam Reaktor Hibrida Ozon-Plasma

Perlakuan : Limbah Tekstil Katun
 pH = 8,4
 Plasma, Stirrer dan Ozonator
 Tegangan 225 volt

Tabel B.6. Penyisihan limbah tekstil katun dalam RHOP

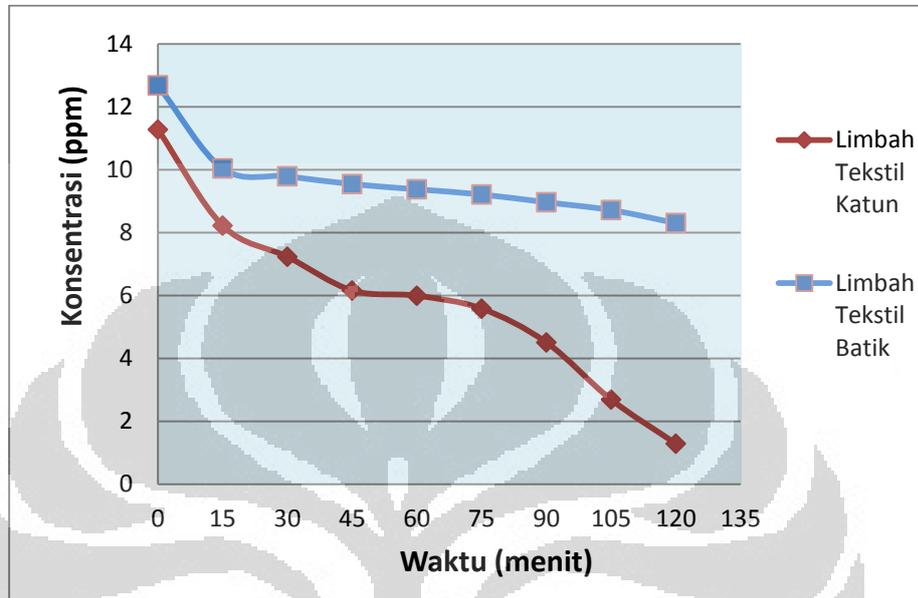
Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)	Persen konsentrasi sisa (%)	Persen degradasi(%)	COD
0	0,160	11,27993	100	0	41,8
15	0,123	8,22461	72,91362	27,08638	40,6
30	0,111	7,23369	64,12884	35,87116	38,9
45	0,098	6,16020	54,61201	45,38799	32,5
60	0,096	5,99505	53,14788	46,85212	24,9
75	0,091	5,58216	49,48755	50,51245	22,7
90	0,078	4,50867	39,97072	60,02928	21,4
105	0,056	2,69199	23,86530	76,13470	19,4
120	0,039	1,28819	11,42020	88,57980	16,1

Perlakuan : Limbah Tekstil Batik
 pH = 9,2
 Plasma, Stirrer dan Ozonator
 Tegangan 225 volt

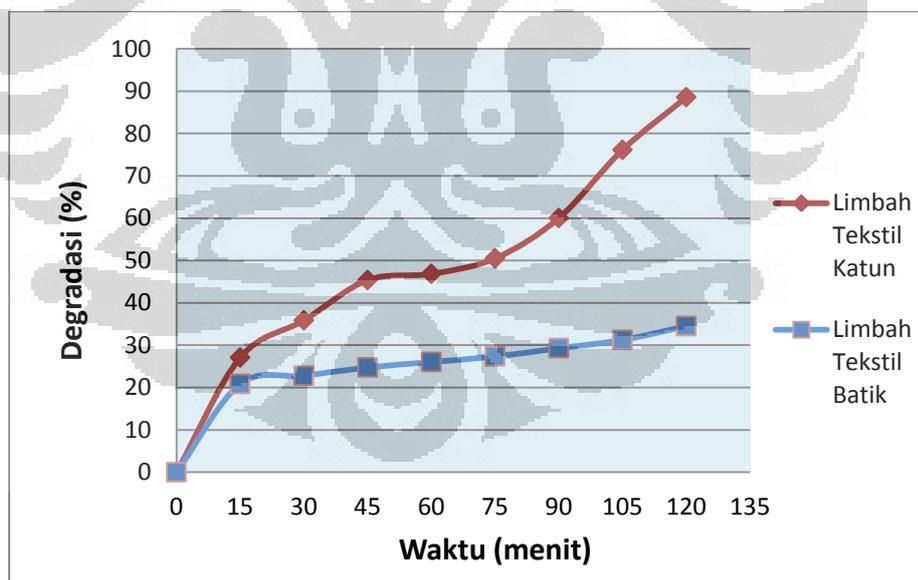
Tabel B.7. Penyisihan limbah tekstil katun dalam RHOP

Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)	Persen konsentrasi sisa (%)	Persen degradasi(%)	COD
0	0,177	12,68373	100	0	466,5
15	0,145	10,04129	79,16667	20,83333	405,4
30	0,142	9,79356	77,21354	22,78646	370,8
45	0,139	9,54583	75,26042	24,73958	322,5
60	0,137	9,38068	73,95833	26,04167	302,7
75	0,135	9,21552	72,65625	27,34375	260,4
90	0,132	8,96780	70,70313	29,29688	243,9
105	0,129	8,72007	68,75000	31,25000	231,8
120	0,124	8,30718	65,49479	34,50521	225,5

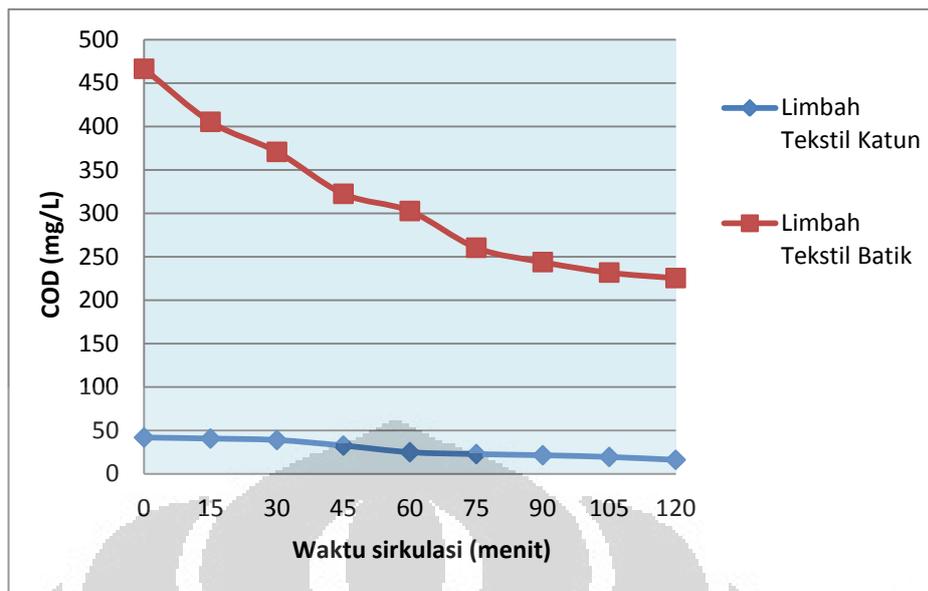
Dari data-data di atas, didapatkan bahwa degradasi penurunan konsentrasi fenol pada limbah tekstil dengan produksi bahan katun akan lebih mudah terdegradasi bila dibandingkan dengan limbah pencucian batik sebagaimana terlihat pada grafik dibawah ini :



Gambar B.6. Perbandingan degradasi konsentrasi limbah tekstil



Gambar B.7. Perbandingan %degradasi konsentrasi limbah tekstil



Gambar B.8. Perbandingan nilai pengukuran COD limbah tekstil

5. Penyisihan Limbah Bahan Peledak dalam Reaktor Hibrida Ozon-Plasma

Perlakuan : Natrium Pikramat

pH = 6,2

Plasma, Stirrer dan Ozonator

Tegangan 225 volt

Tabel B.8. Penyisihan limbah natrium pikramat dalam RHOP

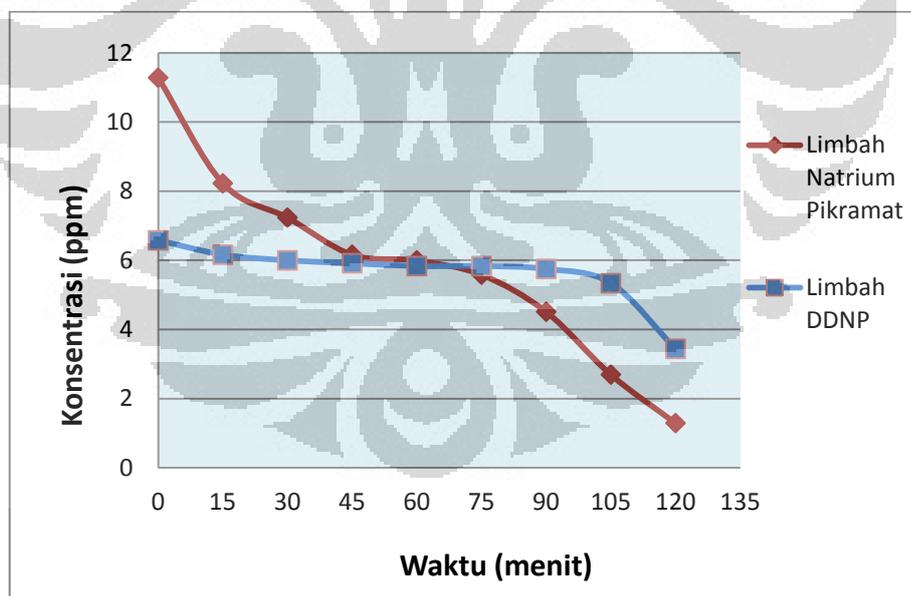
Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)	Persen konsentrasi sisa (%)	Persen degradasi (%)	COD
0	0,212	15,57391	100	0	780
15	0,171	12,18827	78,26087	21,73913	-
30	0,169	12,02312	77,20042	22,79958	665
45	0,162	11,44509	73,48887	26,51113	-
60	0,156	10,94963	70,30753	29,69247	395
75	0,145	10,04129	64,47508	35,52492	-
90	0,121	8,05945	51,74973	48,25027	312
105	0,082	4,83898	31,07105	68,92895	-
120	0,075	4,26094	27,35949	72,64051	286

Perlakuan : Diazo Di-nitro Phenol (DDNP)
 pH = 8,2
 Plasma, Stirrer dan Ozonator
 Tegangan 225 volt

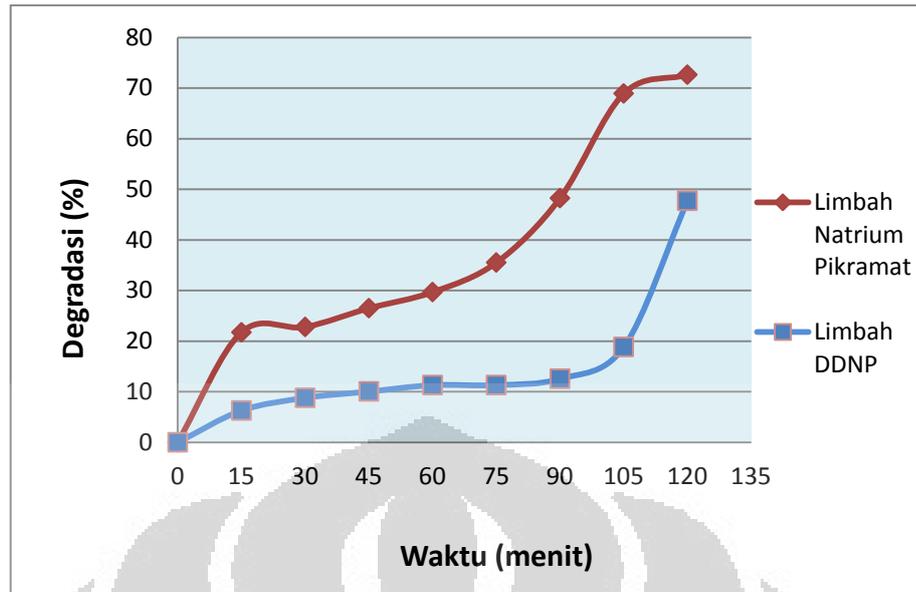
Tabel B.9. Penyisihan limbah DDNP dalam RHOP

Waktu (menit)	Absorbansi	Konsentrasi (ppm)	Persen konsentrasi sisa (%)	Persen degradasi (%)	COD
0	0,103	6,57308	100	0	194
15	0,098	6,16020	93,71859	6,28141	-
30	0,096	5,99505	91,20603	8,79397	165
45	0,095	5,91247	89,94975	10,05025	-
60	0,094	5,82989	88,69347	11,30653	108
75	0,094	5,82989	88,69347	11,30653	-
90	0,093	5,74732	87,43719	12,56281	98
105	0,088	5,33443	81,15578	18,84422	-
120	0,065	3,43518	52,26131	47,73869	87

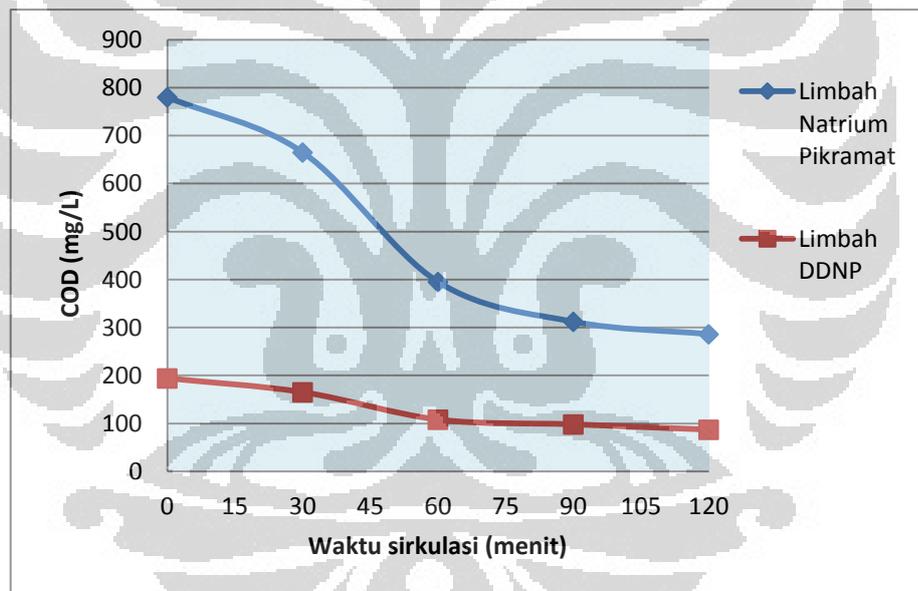
Dari data yang ada, maka didapatkan grafik sebagai berikut :



Gambar B.12. Perbandingan degradasi konsentrasi limbah bahan peledak



Gambar B.13. Perbandingan %degradasi limbah bahan peledak



Gambar B.14. Perbandingan nilai pengukuran COD limbah bahan peledak

LAMPIRAN C : HASIL PERHITUNGAN ENERGI

Tabel C.1. Perhitungan Energi dan Biaya Listrik Skala Laboratorium

Tegangan (kV)	Kuat arus (A)	Daya (kW)	Waktu sirkulasi (jam)	Energi (kWh)	Biaya listrik total (Rp/kWh)
12	0,3	0,066	0,25	0,0165	182,16
			0,50	0,033	
			0,75	0,0495	
			1,00	0,066	
			1,25	0,0825	
			1,50	0,099	
			1,75	0,1155	
			2,00	0,132	

Contoh Perhitungan :

Tegangan (V) = 12 kV

Arus (I) = 300 mA = 0,3 A

Berdasarkan persamaan :

$$P = V \cdot i$$

$$P = 220 \text{ V} * 0,3 \text{ A} = 66 \text{ W}$$

Untuk perhitungan energi, menggunakan persamaan :

$$kWh = kW \cdot jam$$

$$kWh = 0,066 \text{ kW} * 2 \text{ h} = 0,132 \text{ kWh}$$

Biaya listrik dihitung berdasarkan tarif dasar listrik untuk industri adalah sebesar Rp 796,- per kWh, maka :

$$\text{Biaya listrik total} = \text{Rp } 796 \cdot 0,132 = \text{Rp } 105, -$$

LAMPIRAN D : ATURAN BAKU MUTU LIMBAH CAIR

Tabel D.1. Baku Mutu Limbah Cair Bagi Kegiatan Industri

NO	PARAMETER	SATUAN	GOLONGAN BAKU MUTU LIMBAH CAIR	
	FISIK			
1	Temperatur	der.C	38	40
2	Zat padat larut	mg/L	2000	4000
3	Zat padat tersuspensi	mg/L	200	400
	KIMIA			
1	pH		6,0 sampai 9,0	
2	Besi terlarut (Fe)	mg/L	5	10
3	Mangan terlarut (Mn)	mg/L	2	5
4	Barium (Ba)	mg/L	2	3
5	Tembaga (Cu)	mg/L	2	3
6	Seng (Zn)	mg/L	5	10
7	Krom Heksavalen (Cr ⁺⁶)	mg/L	0,1	0,5
8	Krom total (Cr)	mg/L	0,5	1
9	Cadmium (Cd)	mg/L	0,05	0,1
10	Raksa (Hg)	mg/L	0,002	0,005
11	Timbal (Pb)	mg/L	0,1	1
12	Stanum	mg/L	2	3
13	Arsen	mg/L	0,1	0,5
14	Selenium	mg/L	0,05	0,5
15	Nikel (Ni)	mg/L	0,2	0,5
16	Kobalt (Co)	mg/L	0,4	0,6
17	Sianida (CN)	mg/L	0,05	0,5
18	Sulfida (H ₂ S)	mg/L	0,05	0,1
19	Fluorida (F)	mg/L	2	3
20	Klorin bebas (Cl ₂)	mg/L	1	2
21	Amonia bebas (NH ₃ -N)	mg/L	1	5
22	Nitrat (NO ₃ -N)	mg/L	20	30
23	Nitrit (NO ₂ -N)	mg/L	1	3
24	BOD	mg/L	50	150
25	COD	mg/L	100	300
26	senyawa aktif biru metilen	mg/L	5	10
27	Fenol	mg/L	0,5	1
28	Minyak nabati	mg/L	5	10
29	Minyak mineral	mg/L	10	50
30	Radioaktivitas**)		-	#REF!

Sumber: Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor Kep-51/Menlh/10/1995

KEPUTUSAN GUBERNUR KEPALA DAERAH TINGKAT I JAWA BARAT
NOMOR : 6 TAHUN 1999

TENTANG

BAKU MUTU LIMBAH CAIR BAGI KEGIATAN INDUSTRI
DI JAWA BARAT

BAKU MUTU LIMBAH CAIR UNTUK INDUSTRI TEKSTIL

Parameter	Kadar Maksimum (mg/L)	Beban pencemaran maksimum (kg/ton)
BOD	85	12,75
COD	250	37,5
TSS	60	9,0
Fenol Total	1,0	0,15
Krom total	2,0	0,30
Minyak dan Lemak	5,0	0,75
pH	6,0 – 9,0	
Debit limbah maksimum	150 m ³ per ton produk tekstil	

Catatan :

1. Kadar maksimum untuk setiap parameter pada tabel di atas dinyatakan dalam miligram per liter limbah.
2. Beban pencemaran maksimum untuk setiap parameter pada tabel di atas dinyatakan dalam kilogram parameter per ton produk tekstil.



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN DAN UJI KINERJA REAKTOR
HIBRIDA OZON-PLASMA DINGIN UNTUK PENGOLAHAN
LIMBAH FENOLIK CAIR**

TESIS

VENY LUVITA

1006755481

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK KIMIA
DEPOK
JUNI 2012**