



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGOLAHAN LIMBAH CAIR YANG MENGANDUNG
SENYAWA *p*-KLOROFENOL MENGGUNAKAN REAKTOR
HIBRIDA OZON-PLASMA**

SKRIPSI

**MAYLEN RHONA VIKA
0806321373**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGOLAHAN LIMBAH CAIR YANG MENGANDUNG
SENYAWA *p*-KLOROFENOL MENGGUNAKAN REAKTOR
HIBRIDA OZON-PLASMA**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

**MAYLEN RHONA VIKA
0806321373**

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

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

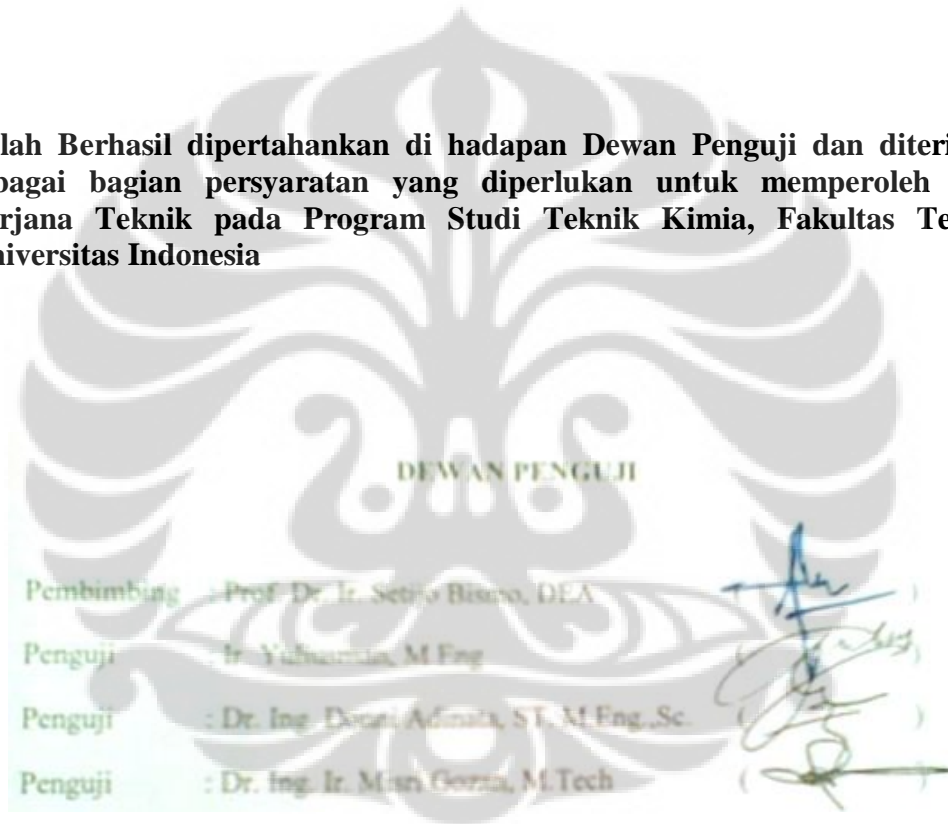


Nama : Maylen Rhona Vika
NPM : 0806321373
Tanda Tangan : 
Tanggal : 28 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Maylen Rhona Vika
NPM : 0806321373
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Skripsi : Pengolahan Limbah Cair yang Mengandung
Senyawa *p*-klorofenol Menggunakan Reaktor
Hibrida Ozon-Plasma

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



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 28 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas limpahan rahmat dan petunjuk-Nya sehingga makalah skripsi dapat selesai dengan baik dan tepat waktu. Penulisan makalah skripsi dengan judul “Pengolahan Limbah Cair yang Mengandung Senyawa *p*-klorofenol Menggunakan Reaktor Hibrida Ozon-Plasma” ini untuk memenuhi tugas skripsi sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana Teknik Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

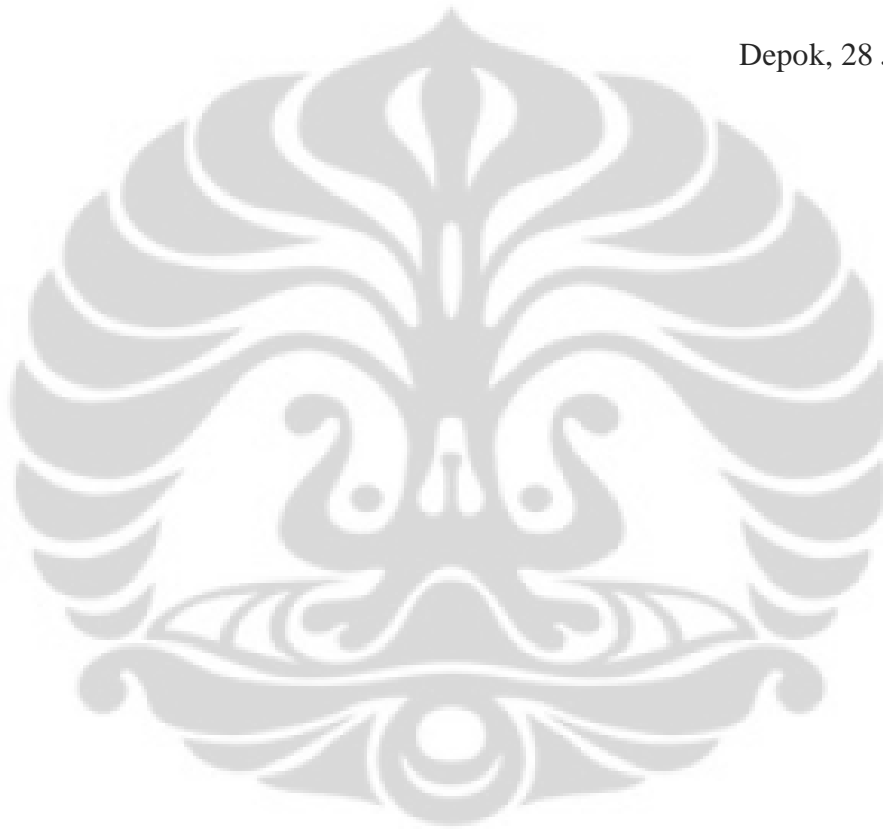
Penulisan makalah skripsi ini tidak lepas dari bantuan beberapa pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Ir Setijo Bismo, DEA sebagai pembimbing akademik dan pembimbing skripsi yang telah membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyusun makalah skripsi ini;
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Widodo W. Purwanto, DEA selaku Ketua Departemen Teknik Kimia FTUI;
3. Bapak Ir. Yuliusman, M.Eng selaku kordinator skripsi Teknik Kimia FTUI;
4. Mba Tiwi, Mang Ijal, Kang Jajat, dan Mas Taufik atas bantuannya pada saat penulis melakukan penelitian;
5. Bapak, Mama', Ayuk Ii, Dang Aldes, Adek Vonny dan keluarga besar saya yang selalu memberi dukungan dan semangat;
6. Indi, Nia, Vina dan Lydia teman seperjuangan yang berbagi suka, duka, canda dan tawa selama kuliah dan penelitian;
7. Mba Veny, Mba Ika, Wiwi, Cristin, Fatimah, Ria, Adi dan Migel selaku rekan penelitian satu bimbingan;
8. Teman-teman di riset grup Teknologi intensifikasi Proses yang telah membantu selama penelitian ini berlangsung
9. Teman-teman Teknik Kimia 2008 atas semangat dan informasinya selama ini
10. Semua Pihak yang telah membantu penyusunan makalah skripsi ini secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis menyadari betul bahwa masih terdapat kekurangan dalam makalah skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun sehingga dapat menyempurnakan skripsi ini dan melaksanakan perbaikan di masa yang akan datang. Semoga tulisan ini bermanfaat bagi pembaca dan memberikan manfaat bagi dunia pendidikan dan ilmu pengetahuan. Akhir kata, penulis berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Depok, 28 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 : Maylen Rhona Vika
NPM : 0806321373
Program Studi : Teknik Kimia
Departemen : Teknik Kimia
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Skripsi

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

**Pengolahan Limbah Cair yang Mengandung Senyawa *p*-klorofenol
Menggunakan Reaktor Hibrida Ozon-Plasma**

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 memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada Tanggal : 28 Juni 2012
Yang menyatakan



(Maylen Rhona Vika)

ABSTRAK

Nama : Maylen Rhona Vika
Program Studi : Teknik Kimia
Judul Penelitian : Pengolahan Limbah Cair yang Mengandung Senyawa *p*-klorofenol Menggunakan Reaktor Hibrida Ozon-Plasma

Dalam penelitian ini limbah cair yang mengandung limbah sintesis *p*-klorofenol sebesar 50 ppm diozonasi menggunakan RHOP (reaktor hibrida ozon-plasma) dan ozonator standar, pada kondisi asam, netral, dan basa. Penelitian ini dilakukan dengan variasi lainnya, yaitu 3 (tiga) macam konfigurasi sistem reaksi (reaksi penyisihan limbah dalam RHOP, ozon dikontakkan dengan limbah cair dalam skema reaksi CSTR, dan ozon dikontakkan dengan limbah cair yang dilanjutkan dengan reaksi dalam RHOP). Kondisi pH limbah cair yang digunakan adalah 3,9 (asam), 6,8 (netral) dan 10,8 (basa). Penelitian ini menghasilkan kondisi terbaik untuk mendegradasi *p*-klorofenol yang terkandung dalam limbah cair yaitu, kondisi basa pH 10,8 dan sistem reaksi ozon dikontakkan dengan limbah cair yang dilanjutkan dengan reaksi dalam RHOP. Persentase degradasi yang dihasilkan mencapai 83,97%, dengan konsentrasi akhir 8,01 ppm.

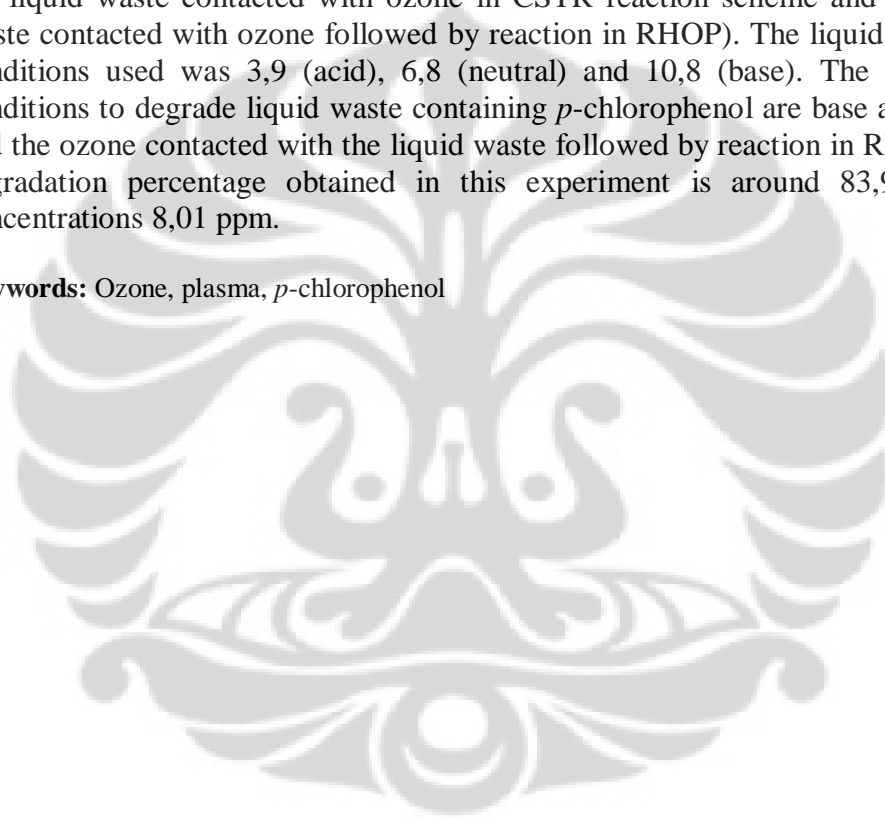
Kata kunci: Ozon, plasma, *p*-klorofenol

ABSTRACT

Name : Maylen Rhona Vika
Study Program : Chemical Engineering
Title : Liquid Waste Treatment Containing *p*-chlorophenol Using
Ozone-Plasma Hybrid Reactor

In this experiment the liquid waste of *p*-chlorophenol synthetic 50 ppm ozonated by RHOP (ozone-plasma hybrid reactor) and standard ozonator, in acid, neutral and base condition. The experiment was carried out with 3 kinds variations of system configurations reaction (elimination reaction liquid waste in RHOP, the liquid waste contacted with ozone in CSTR reaction scheme and the liquid waste contacted with ozone followed by reaction in RHOP). The liquid waste pH conditions used was 3,9 (acid), 6,8 (neutral) and 10,8 (base). The maximum conditions to degrade liquid waste containing *p*-chlorophenol are base at pH 10,8 and the ozone contacted with the liquid waste followed by reaction in RHOP. The degradation percentage obtained in this experiment is around 83,97% with concentrations 8,01 ppm.

Keywords: Ozone, plasma, *p*-chlorophenol



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
1. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Sistematika Penulisan.....	3
2. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Sifat dan Karakteristik <i>p</i> - Klorofenol (4-klorofenol)	5
2.2. Ozon (O ₃) dan Teknik Ozonasi dalam Advance Oxidation Process.....	7
2.2.1. Ozon (O ₃)	7
2.2.2. Teknik Ozonasi dalam <i>Advanced Oxidation Process</i>	10
2.3. Teknologi Plasma dan Pembangkitan Ozon	12
2.3.1. Pengertian Plasma	12
2.3.2. Pembangkitan Ozon	14
2.4. Ozon Sebagai Plasma Oksigen	16
2.5. Aplikasi Teknologi Plasma dan Keuntungannya	17
3. METODE PENELITIAN	
3.1. Diagram Alir Penelitian.....	19
3.2. Deskripsi Alat penelitian	20
3.2.1. Ozonator.....	20
3.2.2. Sistem RHOP (Reaktor Hibrida Ozon-Plasma)	21
3.3. Alat dan Bahan Penelitian	27
3.3.1. Alat Penelitian	27
3.3.2. Bahan Penelitian.....	28
3.4. Parameter Penelitian.....	28
3.5. Langkah Pengoperasian Reaktor Hibrida Ozon-Plasma	28
3.6. Prosedur Pengolahan Limbah Cair yang mengandung <i>p</i> -klorofenol Menggunakan Reaktor hibrida ozon-plasma	29
3.6.1. Persiapan Sampel	29
3.6.2. Uji Produktivitas Ozon Ozonator Reson RSO-9805 2.8 g.....	29
3.6.3. Uji Produktivitas Ozon Reaktor Hibrida Ozon-Plasma pada Fasa Cair	30
3.6.4. Reaksi Penyisihan <i>p</i> -klorofenol dengan RHOP (Reaktor Hibrida Ozon-Plasma).....	30

3.6.5. Reaksi Penyisihan <i>p</i> -klorofenol dengan Mengontakkan Oaon dan Limbah Cair dalam Skema Reaksi CSTR	31
3.6.6. Penyisihan <i>p</i> -klorofenol dengan Mengontakkan Oaon dan Limbah Cair yang dilanjutkan dengan Reaksi dalam RHOP (reaktor Hibrida Ozon-Plasma).....	31
3.6.7. Pengambilan Sampel	31
3.7. Analisis Hasil Penelitian	32
3.7.1. Alat analisis	32
3.7.2. Bahan Analisis	32
3.7.3. Prosedur Analisis	32
3.7.3.1. Membuat Larutan Uji.....	32
3.7.3.2. Membuat Kurva Kalibrasi.....	33
3.7.3.3. Prosedur Analisis Limbah <i>p</i> -klorofenol.....	34
4. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1. Analisis Produktivitas Ozonator Reson RSO-9805	35
4.2. Analisis Produktivitas Ozon Terlarut pada RHOP dalam Fasa Cair.....	36
4.3. Reaksi Penyisihan <i>p</i> -klorofenol dalam RHOP.....	37
4.3.1. Reaksi Penyisihan pada Kondisi asam	37
4.3.2. Reaksi Penyisihan pada Kondisi Netral	39
4.3.3. Reaksi Penyisihan pada Kondisi Limbah Basa.....	40
4.4. Penyisihan <i>p</i> -klorofenol dengan Teknik Ozonasi dalam CSTR	43
4.4.1. Penyisihan <i>p</i> -klorofenol pada Kondisi Asam	43
4.4.2. Penyisihan <i>p</i> -klorofenol pada Kondisi Netral.....	44
4.4.3. Penyisihan <i>p</i> -klorofenol pada Kondisi Basa.....	45
4.5. Penyisihan <i>p</i> -klorofenol dengan mengontakkan ozon dan limbah cair yang dilanjutkan dengan reaksi dalam RHOP (Reaktor Hibrida Ozon-Plasma)	47
4.5.1. Penyisihan <i>p</i> -klorofenol pada Kondisi Asam	47
4.5.2. Penyisihan <i>p</i> -klorofenol pada Kondisi Netral.....	50
4.5.3. Penyisihan <i>p</i> -klorofenol pada Kondisi Basa.....	51
5. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.7. Kesimpulan.....	55
5.8. Saran	55
DAFTAR REFERENSI	56
LAMPIRAN	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Struktur molekul 4-klorofenol.....	6
Gambar 2.2a. Struktur molekul ozon.....	7
Gambar 2.2b. Struktur resonansi molekul ozon	7
Gambar 2.3. a. Skema reaksi ozon dan 4-klorofenol, b. reaksi ozon dan radikal OH° dengan 4-klorofenol.....	11
Gambar 2.4. Petir sebagai contoh plasma bumi	12
Gambar 2.5. Tingkatan materi hingga plasma sebagai materi keempat	12
Gambar 2.6. Mekanisme pembentukan ozon melalui radiasi sinar ultraviolet ...	15
Gambar 2.7. Diagram skematis pembentukan ozon dengan metoda corona discharge	15
Gambar 2.8. Ilustrasi pembentukan ozon dengan corona discharge secara parsial	16
Gambar 2.9. Pembentukan gas ozon melalui proses tumbukan yang terjadi di antara molekul dengan elektron.....	17
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian	19
Gambar 3.2. skema sistem reaktor hibrida ozon-plasma	20
Gambar 3.3. ozonator.....	21
Gambar 3.4. elektroda batang.....	22
Gambar 3.5. elektroda jala	22
Gambar 3.6. skema reaktor hibrida ozon-plasma	23
Gambar 3.7. amperemeter 22	23
Gambar 3.8. voltmeter	24
Gambar 3.9. flowmeter fluida	24
Gambar 3.10. stopwatch 24.....	25
Gambar 3.11. regulator tegangan	25
Gambar 3.12. trafo tegangan tinggi 24.....	26
Gambar 3.13. pompa	26
Gambar 3.14. bak penampung 25.....	27
Gambar 3.15. Injektor / Mixer 26.....	27
Gambar 4.1. Perkembangan konsentrasi <i>p</i> -klorofenol selama penyisihan dalam kondisi asam	38
Gambar 4.2. Perkembangan konsentrasi <i>p</i> -klorofenol selama penyisihan dalam kondisi netral.....	39
Gambar 4.3. Perkembangan konsentrasi <i>p</i> -klorofenol selama penyisihan dalam kondisi basa	41
Gambar 4.4. Perkembangan konsentrasi <i>p</i> -klorofenol pada penyisihan dalam RHOP pada berbagai pH	42
Gambar 4.5. Perkembangan konsentrasi <i>p</i> -klorofenol selama penyisihan dalam kondisi asam	43
Gambar 4.6. Perkembangan konsentrasi <i>p</i> -klorofenol selama penyisihan dalam kondisi netral	44
Gambar 4.7. Perkembangan konsentrasi <i>p</i> -klorofenol selama penyisihan dalam kondisi basa	45
Gambar 4.8. Perkembangan konsentrasi <i>p</i> -klorofenol pada penyisihan dengan teknik ozonasi dalam CSTR pada berbagai pH	46

Gambar 4.9. Perkembangan konsentrasi <i>p</i> -klorofenol selama penyisihan dalam kondisi asam	48
Gambar 4.10. Perkembangan konsentrasi <i>p</i> -klorofenol selama penyisihan dalam kondisi netral	50
Gambar 4.11. Perkembangan konsentrasi <i>p</i> -klorofenol selama penyisihan dalam kondisi basa	51
Gambar 4.12. Perkembangan konsentrasi <i>p</i> -klorofenol pada penyisihan dengan teknik ozonasi dalam CSTR dan dilanjutkan dengan reaksi di dalam RHOP pada berbagai pH.....	52



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Sifat fisika dan kimia <i>p</i> -klorofenol.....	6
Tabel 2.2. Sifat fisika ozon	8
Tabel 2.3. Kelarutan ozon dan oksigen dalam air.....	9
Tabel 2.4. Perbedaan fasa padat, cair, gas dan plasma.....	13
Tabel 2.5. Potensial oksidasi	14



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Kurva Kalibrasi <i>p</i> -klorofenol.....	60
Lampiran 2. Data Penelitian.....	61
Lampiran 3. Baku Mutu Limbah Cair.....	60
Lampiran 4. Pengukuran Produktivitas Ozonator Resonansi RSO 9805 2.8 g dengan Metode Iodometri.....	71
Lampiran 5. Pengukuran Kadar Ozon Reaktor Hibrida Ozon-Plasma pada Fasa cair.....	72



BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Limbah senyawa fenolik merupakan limbah berbahaya yang perlu mendapat perhatian khusus di Indonesia, seperti yang telah dilakukan oleh negara-negara lain di dunia. EPA memuat 12 jenis limbah senyawa fenolik dari 126 jenis limbah berbahaya yaitu 2,4-diklorofenol, 2-klorofenol, 2,4-diklorofenol, 2,4-dimetilfenol, 2-metil-4klorofenol, 2,4-dinitrofenol, 2-nitrofenol, 4-nitrofenol, 3-metil-4-klorofenol, pentaklorofenol, fenol dan 2,4,6-triklorofenol (Code Of Federal Regulation, 1993). Limbah senyawa fenolik termasuk klorofenol, 2-dinitrofenol, dan *p*-klorofenol memberikan dampak berbahaya bagi makhluk hidup dan lingkungan. Limbah senyawa fenolik termasuk fenol dan *p*-klorofenol berasal dari limbah industri tekstil, industri petrokimia, industri pelumas, pengolahan minyak dan baja (Beltra et al., 1997). Senyawa *p*-klorofenol merupakan senyawa beracun dan sulit didegradasi. Pada konsentrasi tertentu *p*-klorofenol memberikan dampak yang buruk terhadap manusia. Senyawa *p*-klorofenol dapat menyebabkan kerusakan hati, kerusakan ginjal, penurunan tekanan darah, pelemahan detak jantung, hingga dapat menyebabkan kematian.

Senyawa fenolik termasuk yang sulit untuk didegradasi dalam pengolahan limbah (Boari et al., 1984; Hamid,1991). Senyawa fenolik bersifat beracun dan sulit dioksidasi dengan pengolahan biologi secara tradisional. Pengolahan secara biologi mendapatkan hasil yang tidak memuaskan dan membutuhkan waktu yang lama (Calvosa et al., 1991). Akan tetapi, pada saat ini pengolahan limbah senyawa fenolik telah dilakukan dengan teknik ozonasi dan plasma. Pengolahan menggunakan kedua teknik ini lebih efisien dibanding secara biologi.

Pengolahan limbah menggunakan teknologi plasma lebih murah dan lebih ramah lingkungan dibandingkan pengolahan limbah secara biologi karena tidak menghasilkan limbah baru dan tidak berbahaya (Zhang, 2007). Sebelumnya Zhang et al., (2007) pernah melakukan pengolahan 2,4-dinitrofenol menggunakan plasma pada suhu rendah dengan efisiensi pengolahan 83,6%. Pengolahan klorofenol menggunakan reaktor plasma coaxial BDB pada tekanan atmosfer

(Dojcinovic et al., 2008). Disamping itu juga, Departemen Teknik Kimia UI sudah melakukan beberapa penelitian mengenai degradasi senyawa fenol, yaitu penyisihan senyawa fenol dengan teknik ozonasi pada suasana basa dalam kolom sistem injeksi ozon berganda (Kurniawan, 2000), uji kinerja penyisihan senyawa fenolik dengan teknik ozonasi/UV-C menggunakan kolam aerasi injeksi berganda dalam suasana basa (Tirta Ayu, 2001), dan pengaruh pH dan konsentrasi awal fenol terhadap proses ozonasi limbah fenol (Cipto, 2005).

Penelitian ini merupakan pengembangan dari berbagai penelitian tentang teknologi plasma dan ozon yang telah dilakukan di Departemen Teknik Kimia UI sejak tahun 1997 disamping mengacu pada hasil-hasil penelitian oleh para peneliti. Dalam penelitian ini, akan dilakukan pengolahan limbah yang mengandung *p*-klorofenol menggunakan teknologi hibrida ozon-plasma, menggunakan Sistem RHOP (reaktor hibrida ozon-plasma) hasil rancang bangun Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA dan dilengkapi juga dengan ozonator standar. Efektivitas kinerja sistem reaktor hibrida ozon-plasma akan dilihat dari hasil degradasi *p*-klorofenol dengan variasi konfigurasi sistem pengolahan dan kondisi pH limbah.

Pengolahan dengan menggunakan teknologi ini diharapkan dapat menghasilkan limbah yang aman sebelum dibuang ke lingkungan, sesuai dengan Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor KEP-51/MENLH/10/1995 tentang baku mutu limbah cair bagi kegiatan industri. Limbah cair memiliki total konsentrasi senyawa fenolik 0,5 mg/L untuk limbah golongan I dan 1 mg/L untuk limbah golongan II dapat dilihat pada lampiran 3.

1.2. Perumusan Masalah

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

1. Bagaimana kinerja pengolahan limbah cair yang mengandung *p*-klorofenol dengan teknologi hibrida ozon-plasma?
2. Bagaimana pengaruh variasi konfigurasi sistem reaksi dan kondisi pH limbah, terhadap kinerja pengolahan limbah cair yang mengandung senyawa *p*-klorofenol?

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa tujuan, yaitu:

1. Menguji kinerja pengolahan limbah cair yang mengandung senyawa *p*-klorofenol dengan teknologi hibrida ozon-plasma.
2. Mendapatkan kondisi operasi terbaik reaktor hibrida ozon-plasma pada pengolahan limbah cair yang mengandung senyawa *p*-klorofenol.

1.4. Batasan Penelitian

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

1. Limbah cair *p*-klorofenol digunakan merupakan limbah *p*-klorofenol sintesis dengan konsentrasi awal 50 ppm.
2. Reaktor hibrida ozon-plasma yang digunakan merupakan hasil rancang-bangun Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA
3. Ozonator yang digunakan Reson jenis RSO-9805 2.8 g buatan Hong.Kong.
4. Kondisi limbah *p*-klorofenol sintesis yang digunakan adalah asam (pH=3,9), basa (pH=10,8), dan netral (pH=6,8)
5. Laju alir gas yang digunakan 10 L/menit dan laju alir cairan 1,2 L/menit.
6. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknologi Intensifikasi Proses (TIP) dengan kondisi operasi kontinyu.

1.5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

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

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Berisi teori-teori yang berhubungan dengan kinerja pengolahan limbah cair yang mengandung *p*-klorofenol dengan teknologi hibrida ozon-plasma.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Berisi metode, alat, dan prosedur yang digunakan untuk mengetahui kinerja pengolahan limbah cair yang mengandung *p*-klorofenol dengan teknologi hibrida ozon-plasma.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi data hasil percobaan, pengolahan data, dan pembahasan dari percobaan.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi kesimpulan dan saran terhadap penelitian yang telah dilakukan secara menyeluruh.



BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

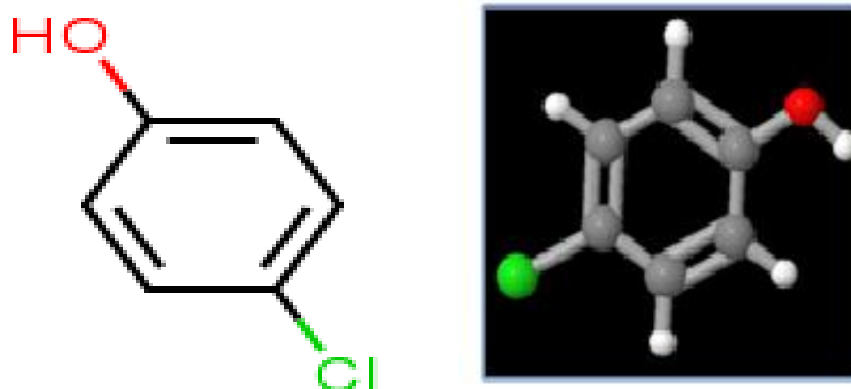
Limbah senyawa fenolik merupakan limbah yang berbahaya bagi lingkungan dan makhluk hidup. Limbah senyawa fenolik telah mendapat perhatian khusus di beberapa negara di dunia. EPA memuat 12 jenis limbah senyawa fenolik dan turunannya ke dalam 126 daftar limbah berbahaya yaitu 2,4-diklorofenol, 2-klorofenol, 2,4-diklorofenol, 2,4-dimetilfenol, 2-metil-4klorofenol, 2,4-dinitrofenol, 2-nitrofenol, 4-nitrofenol, 3-metil-4-klorofenol, pentaklorofenol, fenol dan 2,4,6-triklorofenol (Code Of Federal Regulations, 1993).

Penelitian ini akan difokuskan pada *p*-klorofenol, dikarenakan merupakan senyawa fenolik yang berbahaya tetapi belum mendapat perhatian khusus dan belum dikategorikan ke dalam limbah berbahaya. Pengolahan limbah *p*-klorofenol difokuskan dengan menggunakan teknologi ozon, lebih khusus lagi menggunakan RHOP (reaktor hibrida ozon-plasma) dengan prinsip ozon dan plasma bekerja secara konsekutif. Pengolahan dengan RHOP kami katagorikan dalam AOP (*Advanced Oxidation Process*).

Pengolahan limbah yang mengandung senyawa fenolik menggunakan teknologi ozon dan plasma telah banyak dilakukan sebelumnya. Pengolahan dengan menggunakan RHOP ini diharapkan dapat lebih efisien, tidak menghasilkan limbah baru, dan lebih ramah lingkungan.

2.1. Sifat dan Karakteristik *p*-klorofenol (4-klorofenol)

Senyawa *p*-klorofenol atau 4-klorofenol merupakan fenol yang tersubstitusi oleh klor pada posisi para. Senyawa *p*-klorofenol memiliki rumus molekul C_6H_4OHCl . Senyawa *p*-klorofenol pada umumnya berbentuk padat pada suhu ruang dan memiliki bau yang tajam. Senyawa *p*-klorofenol yang berada dalam perairan diketahui sebagai polutan yang berbahaya karena bersifat karsinogenik (pemicu kanker) dan beracun (U.S.EPA,1994a). Pembakaran terhadap senyawa *p*-klorofenol akan menghasilkan HCl dan Cl_2 yang bersifat racun dan korosif.



Gambar 2.1. Struktur molekul 4-klorofenol
(Jynto, 2011)

Senyawa *p*-klorofenol digunakan sebagai bakterisida, fungisida, dan zat pengawet. Senyawa *p*-klorofenol merupakan bahan baku gersimisida seperti 2-benzil-4-klorofenol, kemudian dapat dikonversi lagi menjadi analgesik asetofenetidin. Selain itu digunakan juga sebagai antingengat, antiseptik, disinfektan benih, dan bahan yang dapat meningkatkan produksi latek dari pohon karet tua, sehingga keberadaan klorofenol di lingkungan sangat banyak.

Senyawa *p*-klorofenol memiliki beberapa sifat fisika dan kimia, adapun kedua sifat ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini, yaitu:

Tabel 2.1. Sifat Fisika Dan Kimia *p*-Klorofenol

Sifat	Nilai
Berat molekul, gram/mol	125,56
Rumus molekul	C_6H_4OHCl
Titik lebur, °C	44
Titik didih, °C	220
Vapour density	4,43
Density, gram/mL pada 25 °C	1,306
Tekanan kritis, mmHg pada 49,8 °C	1
Flash point, °C	121
Specific gravity	1,3

Sumber: Anonim, 2010

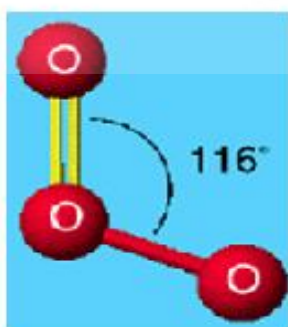
Senyawa *p*-klorofenol sangat berbahaya bagi manusia, antara lain jika terhirup dapat mengganggu pernapasan, kontak dengan mata dapat menyebabkan iritasi, jika kontak dengan kulit dapat menyebabkan kulit melepuh dan sangat beracun jika tertelan. Tindakan pencegahan untuk keselamatan adalah setelah kontak dengan kulit, maka kulit harus segera dicuci dengan air yang cukup. Pada konsentrasi yang sangat tinggi dapat menyebabkan kematian.

2.2. Ozon(O_3) dan Teknik Ozonasi dalam *Advanced Oxidation Process*

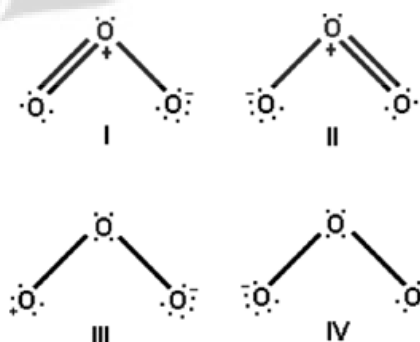
2.2.1. Ozon(O_3)

Ozon yang berada pada bagian atas dan bawah dari lapisan stratosfer melindungi bumi dari radiasi berlebihan sinar ultraviolet. Ozon merupakan gas yang berbau tajam. Bau ozon dapat terdeteksi oleh hidung manusia pada konsentrasi 0,01 ppm - 0,04 ppm (Said, 2007). Pada lapisan troposfer ozon merupakan polutan yang sangat berbahaya dan bersifat toksisitas. Adapun ambang maksimum paparan ozon untuk manusia adalah 0,06 ppm dalam periode delapan jam, dan 0,3 ppm dalam 15 menit (OSHA).

Ozon terdiri atas tiga atom oksigen yang tersusun pada suatu sudut tumpul. Atom oksigen pusat terikat dengan dua atom oksigen dengan jarak yang ekuivalen. Sudutnya berkisar 116° dan panjang ikatannya adalah $1,278 \text{ \AA}$. Adapun susunan oksigen pada sudut tumpul ditunjukkan pada Gambar 2.2a. dan empat struktur resonansi ozon ditunjukkan pada Gambar 2.2b.



Gambar 2.2a. Struktur Molekul Ozon
(Ophardt, 2003)



Gambar 2.2b. Struktur Resonansi Molekul
(Oehlschlaeger, 1978)

Ozon memiliki kemampuan oksidasi tinggi sehingga dapat digunakan untuk menghilangkan warna (*decoloration*), menghilangkan bau (*deodoration*), menguraikan senyawa kimia (*degradation*) dan memurnikan air. Ozon secara komersial pertama kali digunakan pada tahun 1907 pada pengolahan air kota di Nice dan pada tahun 1910 di St. Petersburg (Kogelschatz, 1988). Adapun sifat fisika ozon murni dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Sifat Fisika Ozon

Karakteristik	Nilai
Berat molekul, gram/mol	48
Tekanan kritis, kPa	5460
Temperature kritis, °C	-12,10
Densitas (0°C dan 1 atm), kg/m ³	2,143
Densitas relative (di udara), kg/m ³	1,667
Energi, kJ/mol	142,3
Potensial oksidasi	2,07
Waktu paruh dalam larutan cair (20°C), menit	20 – 30
Waktu paruh (pada udara kering), jam	12

Sumber: Damayunda, 2010

Ozon dalam wujud gas mempunyai waktu paruh lebih lama dibandingkan dalam larutan yang mengandung air (Rice, 1986). Waktu paruh ozon di dalam air mencapai 30 menit (Purwadi et al., 2006). Ozon memiliki kelarutan lebih besar daripada oksigen pada suhu 0 – 30 °C di dalam air dan semakin lebih cepat larut dalam air dingin (Rice, 1986). Kelarutan ozon dalam air juga bergantung pada temperatur, dan pH cairan.

Tabel 2.3. Kelarutan Ozon dan Oksigen Dalam Air

Temperatur (°C)	Kelarutan ozon (mg/L)	Kelarutan oksigen (mg/L)
0	20	6,9
2	10	6,6
20	8,92	4,3
28	1,5	3,7

(Sumber: Rice dan Browning, 1981)

Secara kimiawi, ozon merupakan senyawa yang tidak stabil, sangat reaktif dan mudah sekali terdekomposisi kembali menjadi oksigen. Laju dekomposisinya sebanding dengan kenaikan suhu dan pH (Rice dan Browning, 1981). Fenomena terurainya ozon dalam air digambarkan melalui reaksi sebagai berikut (Metcalf & Eddy, 1991):



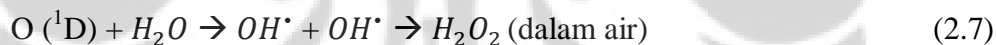
Untuk dapat menghasilkan ozon, satu molekul oksigen diatomik harus dipisah. Oksigen radikal bebas untuk bereaksi dengan oksigen diatomik yang lain untuk membentuk molekul ozon triatomik. Untuk memutuskan ikatan O–O memerlukan banyak energi.

Ozonasi sangat efektif dalam mengolah limbah yang mengandung senyawa fenolik (Hoigne, 1982; Hoigne dan Brader, 1983; Langlais et al., 1990). Ozon bereaksi dengan senyawa di dalam fasa cair dalam dua cara, yaitu reaksi langsung antara molekul ozon dengan senyawa dan reaksi tidak langsung dari hasil pembentukan radikal dari hasil dekomposisi ozon dengan senyawa (Hoigne, 1982). Pada umumnya reaksi langsung lebih banyak terjadi di dalam kondisi larutan asam, sedangkan reaksi tidak langsung yang terbentuknya radikal terjadi pada kondisi derajat keasamaan basa (Hoigne, 1982; Vatistas, 1987; Langlais et al., 1990).

2.2.2. Teknik Ozonasi dalam *Advanced Oxidation Process*

Teknik ozonasi dalam *Advanced Oxidation Process* merupakan metode oksidasi fasa larutan yang berdasarkan prinsip pembentukan dan pemanfaatan radikal OH^{\bullet} . Radikal OH^{\bullet} merupakan hasil sampingan di dalam proses yang dapat mengakibatkan kehancuran dari senyawa yang akan didegradasi dengan menggunakan oksidator kuat dan dapat digunakan secara terpisah atau dikombinasikan antara metode yang satu dan lainnya (Alnaizy, 2000). Oksidator kuat yang yang dipakai dapat berupa ozon, UV, campuran ozon dengan hydrogen peroksida ($O_3 + H_2O_2$), ozon dengan sinar ultraviolet ($O_3 + UV$), dan campuran hydrogen peroksida dengan sinar ultra violet ($H_2O_2 + UV$). Radikal aktif hidroksil yang dilepaskan senyawa-senyawa di atas dengan cepat akan mengoksidasi polutan-polutan dalam limbah cair.

Produksi radikal OH^{\bullet} dengan sinar ultraviolet (UV) dapat diilustrasikan sebagai reaksi fotolisis ozon seperti berikut (Metcalf & Eddy, 1991.):



Penguraian ozon karena sinar matahari (fotolisis) dalam udara yang basah akan menghasilkan radikal OH^{\bullet} . Di dalam air fotolisis ozon lebih cenderung membentuk hydrogen peroksida (H_2O_2). Proses fotolisis ozon akan menjadi lebih efektif apabila senyawa yang akan di degradasi mempunyai penyerapan yang baik terhadap sinar UV.

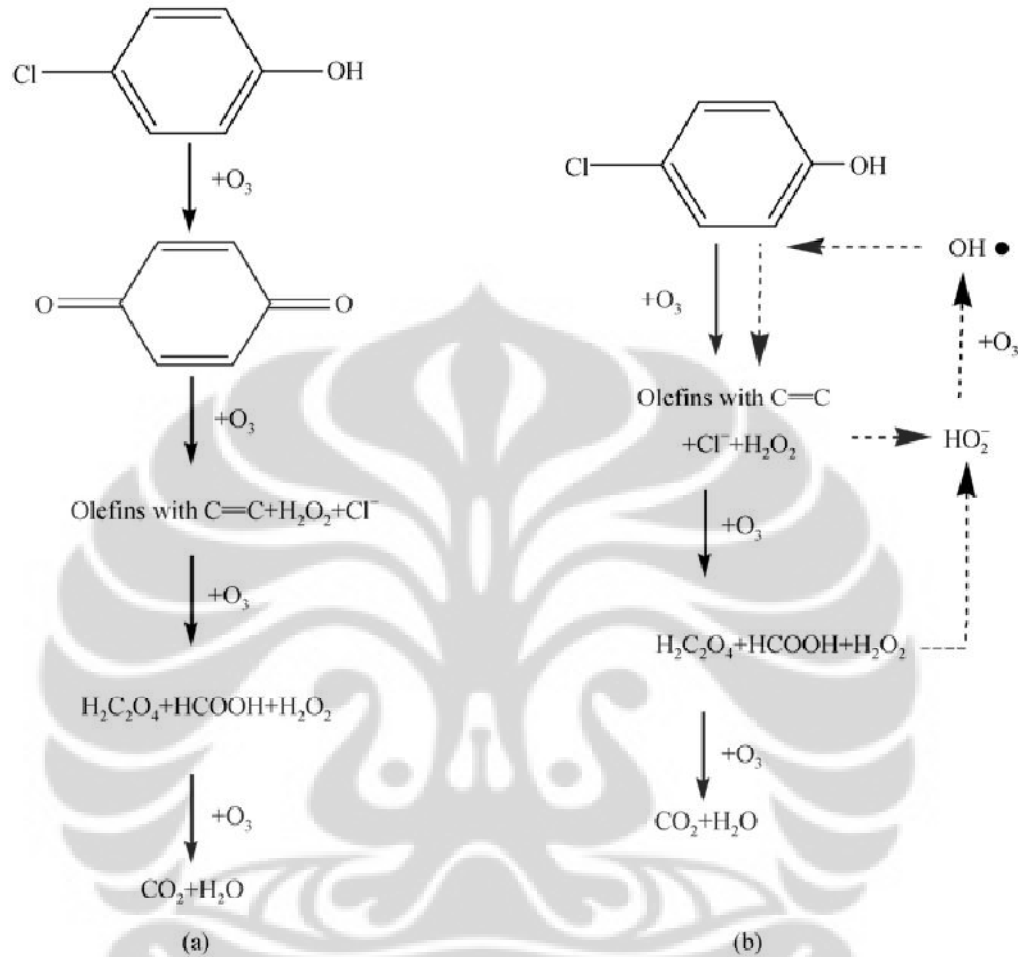
Untuk senyawa yang tidak dapat menyerap sinar UV, proses oksidasi lanjutan lebih efektif menggunakan campuran O_3 dan H_2O_2 . Reaksi untuk memproduksi radikal OH^{\bullet} menggunakan hydrogen peroksida dan ozon adalah sebagai berikut (Karimi et al., 1997):



Radikal OH^{\bullet} juga terbentuk pada saat air yang mengandung hydrogen peroksida terkena sinar UV (200nm-280 nm). Adapun reaksinya sebagai berikut:



Adapun skema reaksi *p*-klorofenol dengan ozon dan skema reaksi *p*-klorofenol dengan radikal OH^\bullet sebagai berikut:



Gambar 2.3. a. Skema Reaksi Ozon dan *p*-Klorofenol, b. Skema Reaksi Ozon dan Radikal OH^\bullet Dengan *p*-Klorofenol (Yunzheng, PI dan Wang, 2005)

2.3. Teknologi Plasma dan Pembangkitan Ozon

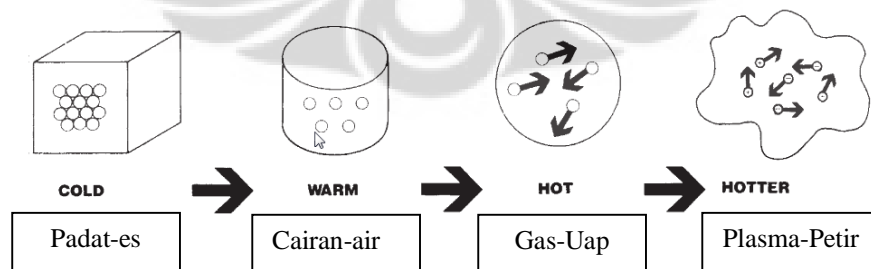
2.3.1. Pengertian Plasma

Plasma pertama kali diketahui oleh seorang ilmuwan Inggris bernama Sir William Crookes pada tahun 1879. Plasma merupakan zat yang paling umum kita temui di alam semesta ini. Petir merupakan bentuk plasma bumi yang sering terjadi, seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Petir Sebagai Contoh Plasma Bumi (Ricky, 2011)

Plasma merupakan gas yang bermuatan listrik atau gas yang terionisasi (gas yang elektronnya lepas). Plasma terdiri atas kumpulan ion-ion (atom yang kehilangan atau kelebihan elektron) dan elektron-elektron yang bergerak bebas (DR. Irving Langmir, 1929). Sehingga secara sederhana plasma merupakan gas terionisasi dan dikenal sebagai fasa keempat setelah fasa padat, cair, dan gas.



Gambar 2.5. Tingkatan Materi Hingga Plasma Sebagai Materi Keempat

(Ellizer et al., 2001)

Tabel 2.4. Perbedaan Fasa Padat, Cair, Gas dan Plasma

Parameter	Padat	Cair	Gas	Plasma
Fasa	Memiliki bentuk dan volume tertentu	Bentuk mengikuti wadahnya tetapi memiliki volume tertentu	Volume dan bentuknya tidak jelas	Volume dan bentuknya tidak jelas
Partikel pembentuk	Tersusun dalam jarak paling dekat (kompak)	Tersusun dalam jarak agak renggang	Tersusun dalam jarak paling renggang	Tersusun dari gas-gas yang terionisasi
Kemampuan berpindah	Tidak dapat berpindah dengan bebas	Dapat berpindah dengan bebas	Dapat berpindah dengan bebas	Tercipta karena adanya perpindahan muatan listrik
Energi pergerakkan	Rendah	Lebih tinggi daripada padatan	Tinggi	Sangat tinggi
Perubahan bentuk	Dapat dilakukan secara paksa	Berdasarkan bentuk wadahnya	Terjadi berdasarkan wadahnya	Bentuknya tidak jelas
Suhu	$< 0^{\circ}\text{C}$	$0 < T < 100^{\circ}\text{C}$	$T > 100^{\circ}\text{C}$	$T > 10000^{\circ}\text{C}$

Sumber: Lieberman et al, 1994

Plasma yang dibuat di dalam air akan menghasilkan berbagai macam spesi aktif seperti OH^{\bullet} , O^{\bullet} , H^{\bullet} , O_3 , dan H_2O_2 (Sugiarto, 2003). Spesi aktif yang terbentuk ini memiliki potensial oksidasi tinggi yang berpotensi dalam menguraikan kandungan senyawa organik dalam air. Selain itu plasma dalam air dapat menghasilkan sinar ultraviolet serta *shockwaves* yang juga dapat menguraikan senyawa organik (Clements et al., 1987).

Tabel 2.5. Potensial Oksidasi

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

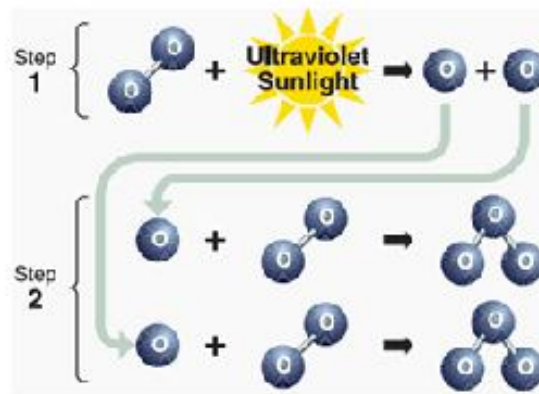
Sumber: Sun et al., 1996

2.3.2. Pembangkitan Ozon

Ozon dapat dibentuk secara alami dan buatan. Secara alami ozon terbentuk melalui radiasi sinar ultraviolet, sedangkan secara buatan dapat dilakukan dengan beberapa teknologi, seperti corona discharge. Berikut akan dibahas secara rinci pembentukan ozon melalui radiasi sinar ultraviolet dan corona discharge yaitu

- Radiasi sinar ultraviolet di lapisan stratosfer

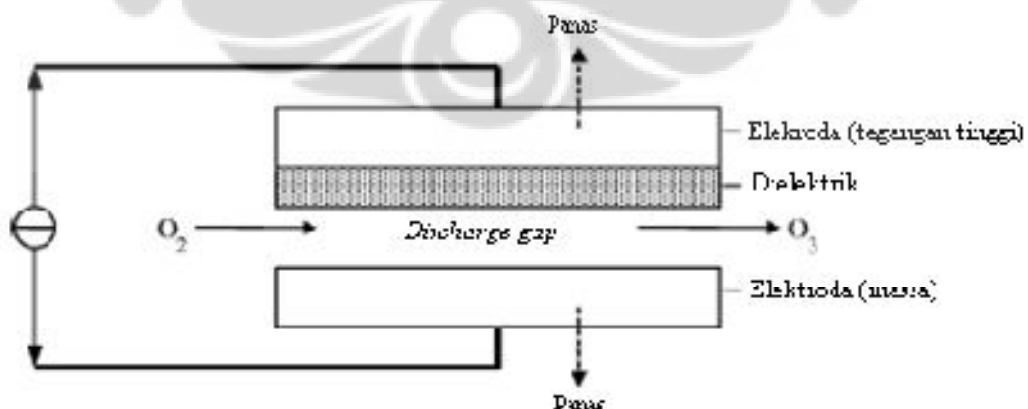
Ozon secara alami terbentuk di lapisan stratosfer. Proses pembentukan ozon dimulai dengan pecahnya molekul oksigen (O_2) oleh radiasi ultraviolet dari matahari menjadi dua atom oksigen ($2O$). Kemudian masing-masing atom oksigen tersebut bereaksi dengan sebuah molekul oksigen menghasilkan molekul ozon (O_3). Reaksi pembentukan ozon ini berjalan terus-menerus karena keberadaan radiasi sinar ultraviolet matahari di stratosfer. Sehingga produksi ozon terbesar terjadi di lapisan stratosfer.



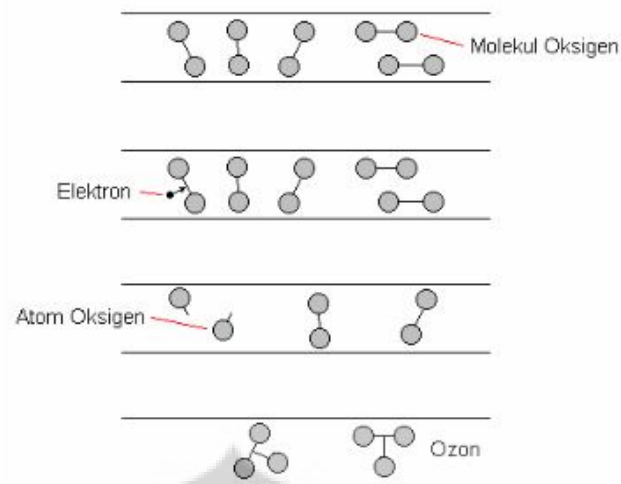
Gambar 2.6. Mekanisme Pembentukan Ozon Melalui Radiasi Sinar Ultraviolet
(Fahey, 2006)

- *Corona discharge*

Metode *corona discharge* pertama kali dilakukan oleh Siemens pada tahun 1857. Prinsip metode ini adalah dengan melewati udara kering atau oksigen pada ruang diantara dua elektroda yang dialiri listrik bolak-balik tegangan tinggi yaitu 8000-20000 volt. Aliran listrik ini menyebabkan elektron-elektron bertabrakan dengan molekul oksigen sehingga terbentuklah senyawa ozon (O_3). Dengan metode ini dapat menghasilkan ozon dalam jumlah tinggi yaitu 100lbs/hari. (Anonim, 2012). Mekanisme pembentukan ini secara sederhana dapat dilihat pada Gambar 2.7 dan 2.8:



Gambar 2.7. Diagram Skematis Pembentukan Ozon Dengan Metoda *Corona Discharge*.
(Rice & Browning, 1981)



Gambar 2.8. Ilustrasi Pembentukan Ozon Dengan Corona Discharge Secara Parsial
(Design Criteria For Waterworks Facilities, JWVA 1978)

2.4. Ozon Sebagai Plasma Oksigen

Ozon dibentuk dengan menggunakan teknologi plasma (Siemens, 1857). Ozon dibentuk dengan melewati gas oksigen (O_2) pada daerah yang memiliki tegangan tinggi. Oksigen (O_2) yang mendapat tegangan tinggi akan mengalami ionisasi yaitu, proses terlepasnya suatu atom atau molekul dari ikatan menjadi ion-ion oksigen dan menghasilkan ozon.

Pembentukan ozon melalui teknologi plasma diawali dengan pembentukan oksigen radikal bebas dengan tahapan reaksi sebagai berikut (Warsito, 2009):

a. Disosiasi



b. Pengikatan disosiatif



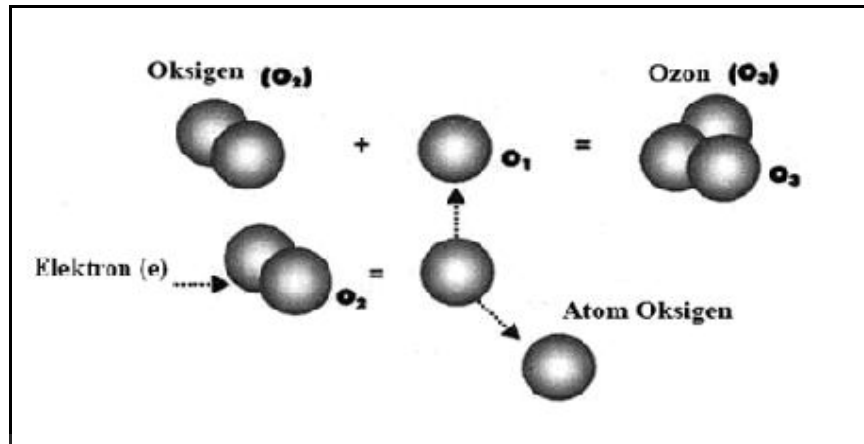
c. Ionisasi disosiatif



Kemudian radikal oksigen akan bereaksi dengan oksigen menghasilkan ozon



dengan M adalah sisi aktif seperti elektroda.



Gambar 2.9. Pembentukan Gas Ozon Melalui Proses Tumbukan Yang Terjadi Di Antara Molekul Dengan Elektron (Warsito, 2009)

Ozon memiliki sifat yang berbeda-beda untuk disetiap suasana pH. Pada suasana asam ozon bersifat stabil dan ozonasi secara langsung oleh ozon, sedangkan ozonasi secara tidak langsung diabaikan karena pembentukan OH^* sangat kecil (Beltra et al., 2001). Di suasana basa ozon bersifat reaktif dan mudah terdekomposisi menjadi radikal hidroksil (OH^*). Sedangkan di kondisi netral ozon terdekomposisi menjadi (OH^*), akan tetapi laju dekomposisinya lebih lambat dibandingkan pada suasana basa (Cipto, 2005).

2.5. Aplikasi Teknologi Plasma dan Keuntungannya

Teknologi plasma merupakan teknologi yang banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari. Teknologi plasma digunakan hampir disemua bidang terutama di bidang lingkungan, bidang industri, di bidang kesehatan, di bidang pertanian dan bidang elektronik.

a. Di bidang lingkungan

Teknologi plasma digunakan untuk mengolah limbah gas, cair, dan padat yang dihasilkan industri sebelum dibuang ke lingkungan.

b. Di industri

Teknologi plasma digunakan dalam pengolahan mekanis seperti, pengelasan plasma, pemotongan, *electrical discharge machining* dan plasma penyemprotan.

c. Di bidang kesehatan

Teknologi plasma digunakan untuk mensterilkan peralatan medis dan untuk pembangkitan radio frekuensi untuk fisioterapi.

d. Di bidang pertanian

Teknologi plasma digunakan untuk tumbuhan melalui implantasi biji tomat, biji sawi, biji jagung dan bibit mangrove.

e. Dibidang elektronik

Teknologi plasma digunakan sebagai sumber cahaya, sebuah layar elektronik dan analisis optik.

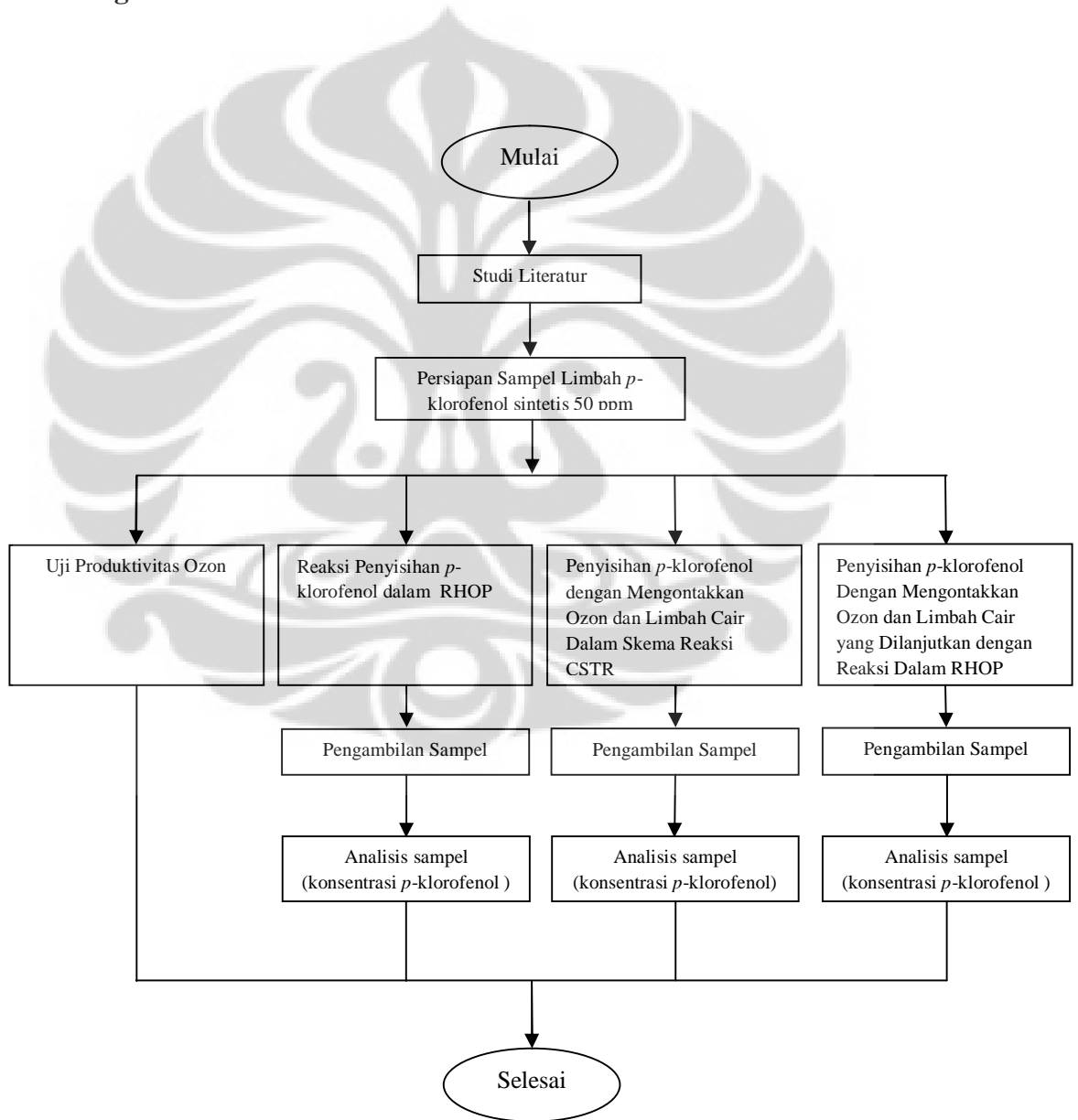
Teknologi plasma memiliki beberapa keuntungan dalam pengolahan limbah cair. Berikut keuntungan pengolahan limbah cair dengan menggunakan teknologi plasma (Sugiarto et al., 2001), yaitu:

- 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.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan tahap awal pengembangan teknologi plasma untuk pengolahan limbah cair. Penelitian ini bertujuan untuk melihat kinerja pengolahan limbah cair yang mengandung *p*-klorofenol dengan teknologi hibrida ozon-plasma. Pada bab ini akan dijelaskan tentang diagram alir penelitian, rancangan penelitian, prosedur penelitian, pengolahan data, dan analisis yang dilakukan.

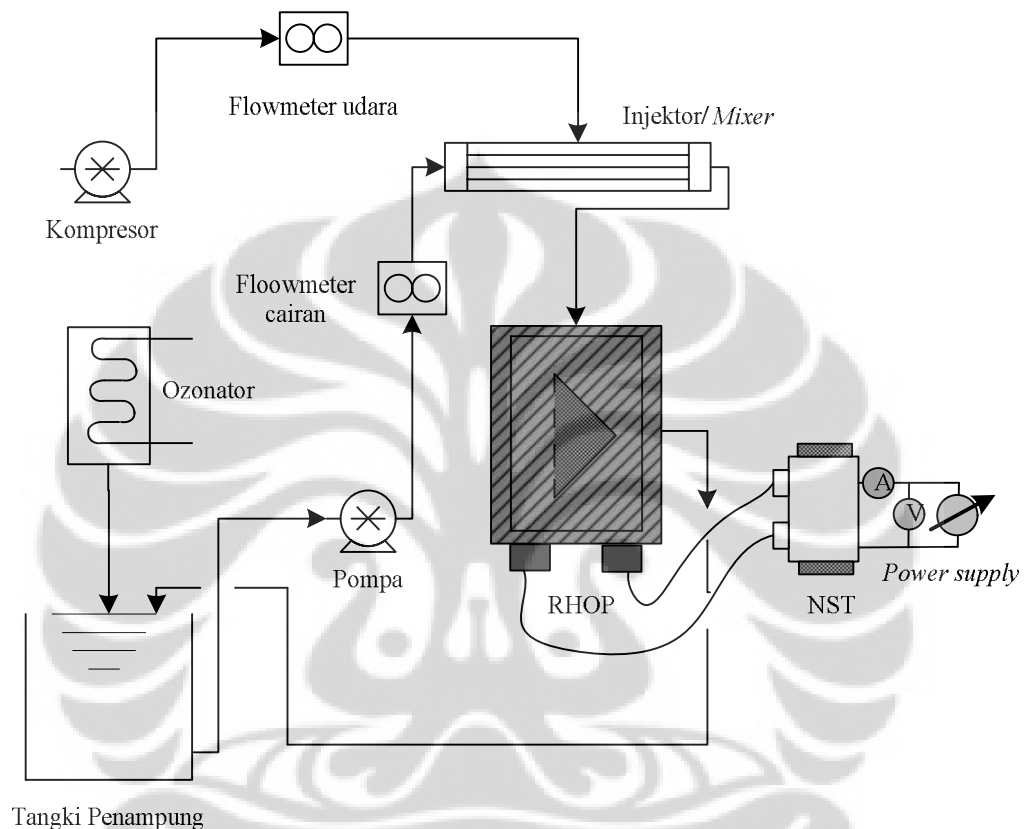
3.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

3.2. Deskripsi Alat Penelitian

Penelitian ini menggunakan dua sistem peralatan reaksi kimia dalam medan plasma, yaitu ozonator dan sistem reaktor hibrida ozon-plasma yang skemanya dapat disederhanakan sebagai berikut ini:



Gambar 3.2. Skema sistem reaktor hibrida ozon-plasma dan ozonator

3.2.1. Ozonator

Ozonator yang digunakan adalah ozonator komersil Resun RSO-9805 2.8 g. Ozonator yang digunakan memiliki fungsi utama dalam pengolahan air. Ozonator jenis ini memiliki kemampuan mengoksidasi yang tinggi, sehingga dapat mengurangi atau mengurai senyawa berbahaya yang terkandung di dalam air, seperti bahan kimia berbahaya dan membunuh kuman.



Gambar 3.3. Ozonator

3.2.2. Sistem RHOP (Reaktor Hibrida Ozon-Plasma)

Sistem reaktor hibrida ozon-plasma yang digunakan merupakan sistem reaktor hibrida ozon-plasma hasil rancangan Prof. Dr. Ir. Setijo Bismo, DEA. Sistem reaktor hibrida ozon-plasma ini menggunakan prinsip pembentukan plasma dan ozon di dalam reaktor hibrida ozon-plasma secara bersamaan.

Reaktor hibrida ozon-plasma ini dibangkitkan menggunakan tegangan tinggi yaitu 225 volt. Pembentukan plasma dan ozon di dalam reaktor plasma ini didahului dengan terjadinya kontak antara udara dan cairan (limbah *p*-klorofenol) di dalam injektor. Setelah terjadi kontak umpan akan masuk kedalam reaktor hibrida ozon-plasma yang memiliki elektroda batang yang telah dialiri tegangan tinggi. Sehingga terbentuklah plasma dan ozon pada saat umpan melewati reaktor. Plasma dan ozon yang terbentuk inilah yang menyerang senyawa tertentu yang ada di dalam cairan (limbah). Sistem reaktor hibrida ozon-plasma ini berlangsung secara sirkulasi. Sistem reaktor hibrida ozon-plasma terdiri dari beberapa alat utama, yaitu:

- a. Elektroda tegangan tinggi, terdapat dua elektroda tegangan tinggi yang digunakan dalam reaktor ini, yaitu:

Elektroda batang, yaitu elektroda massa yang terbuat dari bahan stainless steel ANSI 316 yang tahan korosi. Elektroda batang ini berbentuk pipa berongga dengan salah satu sisinya tertutup dan diberi ulir pemasangan baut tempat pemasangan kabel tegangan tinggi yang dihubungkan ke NST. Pada bagian ujung bawah elektroda batang ini terdapat dua lubang sebagai tempat keluarnya limbah yang telah diplasma. Sisi lain dari elektroda ini dibiarkan terbuka dan dihubungkan

dengan sumber limbah. Elektroda ini memiliki diameter dalam 0,7 cm, diameter luar 1 cm, dan panjang 36 cm.



Gambar 3.4. elektroda batang

Elektroda jala, yang digunakan terbuat dari bahan stainless steel 316, berukuran 100 mesh. Elektroda ini digunakan untuk menyelimuti permukaan luar reaktor (gelas dielektrik). Untuk mengikatkan elektroda ini menggunakan kawat stainless steel.



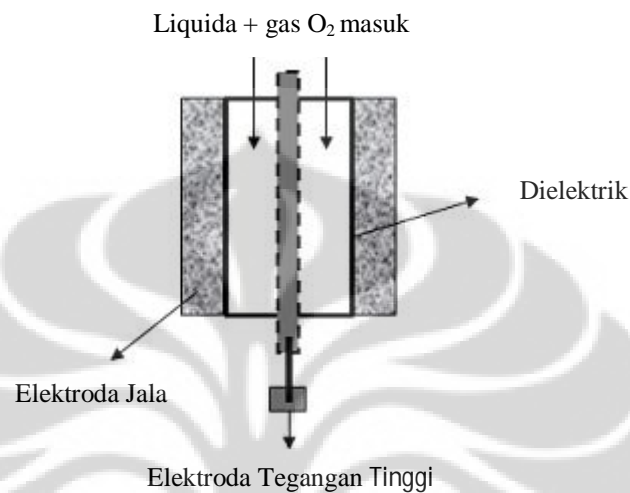
Gambar 3.5. elektroda jala

b. Tabung gelas dielektrik

Material dielektrik yang digunakan merupakan gelas dari bahan borosilikat yang berbentuk tabung. Bahan borosilikat digunakan karena bahan ini memiliki ketahanan panas yang cukup tinggi dengan harga yang relatif murah. Menggunakan borosilikat bening bertujuan memudahkan pengamatan pada saat penelitian. Tabung gelas dielektrik memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- panjang :24 cm
- diameter:2 cm
- tebal :0,1 cm

Pada kedua ujung tabung gelas dielektrik ini dilengkapi dengan tutup berulir sebagai penyangga elektroda tegangan tinggi. Limbah hasil proses akan keluar pada bagian atas tabung ini. Lubang kecil tempat keluar limbah hasil proses memiliki diameter 0,3 cm dan berjarak 3 cm dari ujung bagian atas tabung gelas dielektrik ini. Berikut reaktor hibrida ozon-plasma gambar 3.6. di bawah ini:



Gambar 3.6. skema reaktor hibrida ozon-plasma

c. Amperemeter

Amperemeter berfungsi untuk mengukur arus yang keluar dari regulator tegangan. Amperemeter yang digunakan adalah amperemeter jenis panel bermerek Heles dengan rentang 0-500 mA.



Gambar 3.7. amperemeter

d. Voltmeter

Voltmeter berfungsi untuk mengukur tegangan yang keluar dari regulator tegangan. Voltmeter yang digunakan adalah voltmeter jenis panel bermerek Heles dengan rentang 0-500 V. Voltmeter dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 3.8. voltmeter

e. Flowmeter

Flowmeter fluida berfungsi untuk mengukur laju alir reaktan yang digunakan. Flowmeter yang digunakan memiliki rentang laju alir 1 – 7 liter/menit.



Gambar 3.9. flowmeter fluida

f. Stopwatch

Stopwatch berfungsi sebagai penunjuk waktu pemaparan untuk tiap variasi yang dilakukan.



Gambar 3.10. stopwatch

g. Regulator Tegangan

Regulator tegangan yang digunakan bermerek OKI dengan tegangan maksimal 250 volt. Regulator tegangan berfungsi sebagai pengatur tegangan keluaran yang diinginkan agar terbentuk plasma di dalam reaktor. Regulator dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 3.11. regulator tegangan

h. Trafo tegangan tinggi

Trafo tegangan tinggi berfungsi untuk menaikkan tegangan (*set-up*) sehingga menghasilkan energi yang cukup agar reaktor menghasilkan plasma.



Gambar 3.12. trafo tegangan tinggi

i. Pompa

Pompa berfungsi sebagai pendorong aliran limbah dari bak penampung limbah menuju ke reaktor plasma. Pompa yang digunakan bermerek Deng Yuan seri DY-2600, dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Ampere : 0,8 A
- Pressure : 80 – 90 psi
- Volt : 24 – 29 VDC



Gambar 3.13. pompa

j. Bak penampung limbah (*reservoir*)

Bak penampung yang digunakan berfungsi sebagai tempat menampung limbah sebelum dan sesudah proses pengolahan. Bak penampung memiliki kapasitas 5,5 liter dan terbuat dari plastik.



Gambar 3.14. bak penampung

k. Injektor

Injektor yang digunakan berfungsi sebagai tempat kontak antara udara dan aliran fluida, sehingga terjadi proses pencampuran dan akan terbentuk gelembung-gelembung di dalam fluida. Gelembung-gelembung ini merupakan hasil diinjeksikan udara ke dalam aliran fluida agar fluida kaya oksigen untuk proses ozonasi. Injektor dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.15. Injektor / Mixer

3.3. Alat dan Bahan Penelitian

3.3.1. Alat Penelitian

- Ozonator Reson RSO-9805 2.8 g
- Sistem reaktor hibrida ozon-plasma
- pH meter
- labu volumetrik 100 mL, 5 buah
- labu volumetrik 1000 mL, 1 buah
- erlemeyer 100 mL, 7 buah

- pipet tetes
- erlemeyer 1000 mL, 1
- botol sampel 150 mL, 5 buah
- sarung tangan, masker, dan jas lab

3.3.2. Bahan Penelitian

- Aquades
- Udara bertekanan dari kompresor
- Limbah *p*-klorofenol artifisial dari Merck
- H₂SO₄ dari Merck
- NaOH dari Merck

3.4. Parameter Penelitian

Seperti yang telah dijelaskan dalam bab sebelumnya penelitian ini menggunakan tiga parameter, yaitu:

- a. **Variabel kontrol**, yang digunakan dalam penelitian ini konsentrasi *p*-klorofenol (digunakan 50 ppm). Variabel kontrol lainnya yaitu, waktu pemaparan plasma (1 jam), tegangan pembangkit plasma (225 volt), laju alir udara 10 L/menit dan laju alir *p*-klorofenol (1,2 liter/menit).
- b. **Variabel bebas**, yang digunakan dalam penelitian ini pH limbah *p*-klorofenol (suasana asam, basa, dan netral) dan konfigurasi sistem reaksi (reaksi penyisihan dalam RHOP, Ozon dikontakkan dengan limbah cair dalam skema reaksi CSTR, dan Ozon dikontakkan dengan limbah cair yang dilanjutkan dengan reaksi dalam RHOP).
- c. **Variabel terikat**, yang digunakan dalam penelitian ini konsentrasi *p*-klorofenol setelah proses pengolahan.

3.5. Langkah Pengoperasian Sistem Reaktor Hibrida Ozon-Plasma

- pastikan semua sambungan selang yang digunakan terhubung dengan baik dan kuat
- pastikan semua sambungan kabel tegangan tinggi dengan masing-masing peralatan terhubung dengan baik
- pastikan flow meter telah diatur sesuai laju alir yang diinginkan

- nyalakan sumber tegangan listrik dengan cara menghubungkan ke sumber listrik PLN.

3.6. Prosedur Pengolahan Limbah Cair yang Mengandung *p*-klorofenol Menggunakan Reaktor Hibrida Ozon-Plasma

3.6.1. Persiapan Sampel

- buat limbah *p*-klorofenol sintetis dengan konsentrasi 50 ppm sebanyak dua liter
- buat limbah konsentrai 50 ppm pada keadaan asam, basa, dan netral
- masukkan limbah *p*-klorofenol dengan konsentrasi 50 ppm sesuai dengan kondisi yang akan diuji ke dalam bak penampungan.

3.6.2. Uji Produktivitas Ozon Ozonator Reson RSO-9805 2.8 g

- buat larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0,005 M
- larutkan KI sebanyak 20 g ke dalam aquades hingga volumenya mencapai 1000 mL
- buat indikator amilum
- buat larutan H_2SO_4 2N
- masukkan larutan KI ke dalam bubbler yang terdiri dari bagian hulu dan hilir masing-masing sebanyak 200 mL, kemudian nyalakan ozonator, buka katup laju alir udara dan lewatkan ke dalam bubbler
- ambil sampel untuk dititrasi ketika warna larutan KI pada bagian hilir menjadi kuning muda
- tambahkan H_2SO_4 2N sebanyak 4 mL dan indikator amilum sehingga sampel berwarna biru tua
- titrasi sampel menggunakan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0,005 M, titrasi dihentikan sampai warna larutan tepat menjadi bening
- catat volume titran yang diperlukan untuk menitrasi larutan KI
- lakukan hal yang sama untuk bagian hulu dan hilir
- lakukan tahap 1 – 10 untuk larutan KI yang berbeda untuk waktu yang sama (5 menit).

3.6.3. Uji Produktivitas Ozon Reaktor Hibrida Ozon-Plasma dalam Fasa Cair

- buat larutan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0,005 M
- larutkan KI sebanyak 40 g ke dalam aquades hingga volumenya mencapai 2000 mL
- buat indikator amilum
- buat larutan H_2SO_4 2N
- masukkan larutan KI ke dalam reservoir
- nyalakan kompresor sebagai sumber udara dan atur laju alir udara 10 L/menit
- nyalakan pompa
- nyalakan regulator, dan atur tegangan menjadi 225 volt
- lakukan proses pemaparan plasma dengan sirkulasi selama 15 menit
- ambil sampel sebanyak 25 mL
- tambahkan H_2SO_4 2N sebanyak 2 mL dan indikator amilum sebanyak 3 tetes
- titrasi sampel menggunakan $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0,005 M, titrasi dihentikan sampai warna larutan tepat menjadi bening
- catat volume titran yang diperlukan untuk menitrasi larutan KI.

3.6.4. Reaksi Penyisihan *p*-klorofenol dalam RHOP (Reaktor Hibrida Ozon-Plasma)

- masukkan limbah *p*-klorofenol sintetis 50 ppm dengan kondisi asam ke dalam bak penampungan
- nyalakan pompa air, kompresor, dan tegangan tinggi (pembangkit plasma)
- atur laju alir di flowmeter fluida menjadi 1,2 liter/menit
- atur laju alir di flowmeter udara menjadi 10 liter/menit
- atur regulator tegangan sebesar 225 volt
- ambil sampel limbah sebanyak 10 mL setelah pemaparan plasma setiap variasi yaitu 15 menit, 30 menit, 45 menit dan 60 menit
- lakukan prosedur yang sama dari nomor 1 – 6 untuk kondisi limbah *p*-klorofenol basa dan netral.

3.6.5. Penyisihan *p*-klorofenol dengan Mengontakkan Ozon dan Limbah Cair Dalam Skema Reaksi CSTR

- masukkan limbah *p*-klorofenol artifisial 50 ppm dengan kondisi asam ke dalam bak penampungan
- nyalakan ozonator
- ambil sampel limbah sebanyak 10 mL setelah diozonasi setiap variasi yaitu 15 menit, 30 menit, 45 menit, 60 menit
- lakukan prosedur yang sama dari nomor 1 – 4 untuk kondisi limbah *p*-klorofenol basa dan netral.

3.6.6. Penyisihan *p*-klorofenol Dengan Mengontakkan Ozon dan Limbah Cair yang Dilanjutkan dengan Reaksi Dalam RHOP (Reaktor Hibrida Ozon-Plasma)

- masukkan limbah *p*-klorofenol sintetis 50 ppm dengan kondisi asam ke dalam bak penampungan
- nyalakan pompa air, kompresor, tegangan tinggi (pembangkit plasma), dan ozonator
- atur laju alir di flowmeter fluida menjadi 1,2 liter/menit
- atur laju alir di flowmeter udara menjadi 10 liter/menit
- atur regulator tegangan sebesar 225 volt
- ambil sampel limbah sebanyak 10 mL setelah pemaparan plasma setiap variasi yaitu 15 menit, 30 menit, 45 menit dan 60 menit
- lakukan prosedur yang sama dari nomor 1 – 6 untuk kondisi limbah *p*-klorofenol basa dan netral.

3.6.7. Pengambilan Sampel

Sampel diambil setiap 15 menit sistem reaktor hibrida ozon-plasma beroperasi selama 60 menit. Sampel diambil sebanyak 10 mL, menggunakan gelas beker. Kemudian sampel dianalisis konsentrasi *p*-klorofenol menggunakan metode aminoantipirin sesuai SNI 06-6989.21-2004.

3.7. Analisis Hasil Penelitian

Pada penelitian ini yang dianalisis adalah konsentrasi *p*-klorofenol setelah pemaparan plasma. Sampel diambil setiap 15 menit selama 60 menit. Analisis konsentrasi *p*-klorofenol dilakukan metode aminoantipirin dengan menggunakan spektrofotometer UV/Vis dengan basis metode aminoantipirin sesuai SNI 06-6989.21-2004.

3.7.1. Alat

Peralatan yang digunakan pada analisis ini adalah:

- Spektrofotometer UV/Vis
- Kuvet kaca
- pH meter
- Gelas ukur 10 mL dan 100 mL
- Kaca arloji
- Gelas piala 250 mL
- Erlenmeyer 500 mL
- Pipet 10 mL

3.7.2. Bahan

Bahan yang digunakan dalam analisa ini adalah:

- 4-aminoantipirin dari Merck
- $K_4Fe(CN)_6$ dari Merck
- NH_4OH 0,5 N dari Merck
- Buffer fosfat (K_2HPO_4 dan KH_2PO_4) dari Merck
- Aquades

3.7.3. Prosedur Analisis

Berikut prosedur analisis konsentrasi *p*-klorofenol dilakukan metode aminoantipirin dengan menggunakan spektrofotometer UV/Vis dengan basis metode aminoantipirin.

3.7.3.1. Membuat Larutan Uji

Larutan-larutan uji yang dibutuhkan dalam analisis ini, yaitu:

- Larutan amonium hidroksida, NH_4OH 0,5 N

encerkan 35 mL NH_4OH pekat dalam aquades sampai 1000 mL

- Larutan penyangga fosfat
larutkan 104,5 gram K_2HPO_4 dan 72,3 gram KH_2PO_4 dalam 1000 mL aquades, pH harus 6,8
- Larutan 4-aminoantipirin
larutkan dua gram kristal 4-aminoantipirin dalam 100 mL aquades, disiapkan setiap akan melakukan analisis
- Larutan Kalium ferisianida, $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$
larutkan 8 gram kristal kalium ferisianida dalam 100 mL aquades, larutan ini mempunyai waktu simpan selama satu minggu.

3.7.3.2. Membuat Kurva Kalibrasi

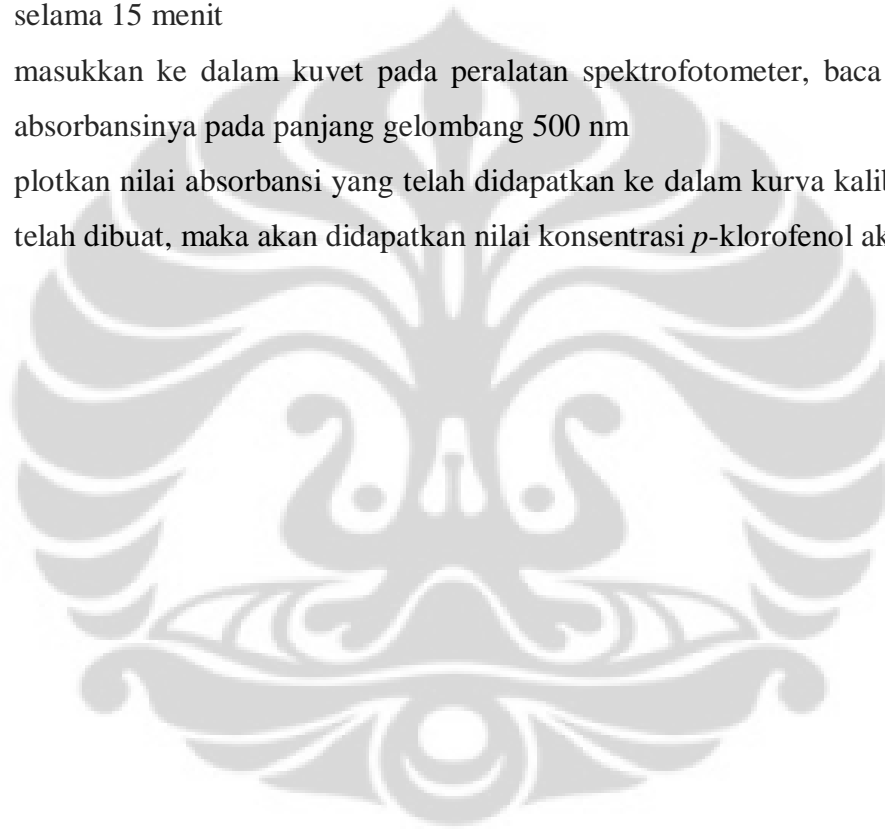
Untuk mengetahui konsentrasi *p*-klorofenol didalam larutan, pertama kita membuat kurva kalibrasi. Adapun tahapan membuat kurva kalibrasi untuk larutan yang memiliki kadar *p*-klorofenol 0,200 mg/L – 5,00 mg/L sebagai berikut :

- optimalkan alat spektrofotometer sesuai dengan petunjuk penggunaan alat untuk pengujian *p*-klorofenol 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 dan tambahkan 1 mL larutan aminoantipirin sambil diaduk
- tambahkan 1 mL larutan kalium ferisianida sambil diaduk dan diamkan selama 15 menit
- masukkan 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
- buat kurva kalibrasi (konsentrasi vs absorbansi).

3.7.3.3. Prosedur Analisis Limbah *p*-klorofenol

Untuk menguji kadar *p*-klorofenol dalam air limbah dengan kadar 0,200 mg/L – 5,00 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 atur pH menjadi $7,9 \pm 0,1$ dengan menambahkan larutan penyangga fosfat
- tambahkan 1 mL larutan aminoantipirin sambil diaduk
- tambahkan 1 mL larutan kalium ferisianida sambil diaduk, dan diamkan selama 15 menit
- masukkan 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 *p*-klorofenol akhir.



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

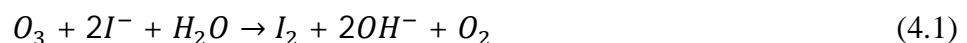
Bab ini akan membahas kinerja reaktor hibrida ozon-plasma dalam mendegradasi *p*-klorofenol. Pada proses penyisihan dilakukan beberapa variasi konfigurasi sistem reaksi (reaksi penyisihan dalam RHOP, ozon dikontakkan dengan limbah cair dalam skema reaksi CSTR, dan ozon dikontakkan dengan limbah cair yang dilanjutkan dengan reaksi dalam RHOP) dan kondisi limbah *p*-klorofenol (asam, basa, dan netral).

Penelitian ini diawali dengan mengukur produktivitas ozon yang dihasilkan ozonator standar dan RHOP. Kemudian memvariasikan konfigurasi sistem reaksi untuk kondisi limbah yang berbeda. Sehingga didapatkan kondisi optimal untuk pengolahan limbah *p*-klorofenol baik kondisi limbah dan konfigurasi sistem reaksi penyisihan yang digunakan.

4.1. Analisis Produktivitas Ozonator Reson RSO-9805

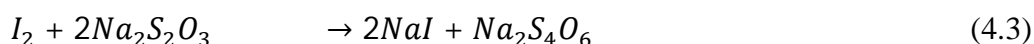
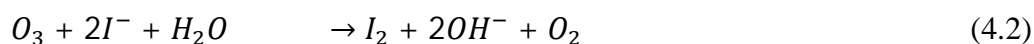
Tujuan utama dari pengujian produktivitas ozonator ini adalah untuk mengetahui jumlah ozon yang diproduksi selama digunakan dalam penelitian ini. Pengujian produktivitas dilakukan menggunakan metode iodometri. Parameter utama yang diambil dalam pengamatan ini adalah volume natrium tiosulfat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) yang diperlukan untuk menitrasi larutan *bubbler* ozon (bagian hulu dan hilir) yang berubah warna dari bening menjadi kuning kecokelatan (menunjukkan adanya O_3 yang mengoksidasi KI) untuk mengetahui banyaknya ozon yang diproduksi.

Ozon dikontakkan dengan larutan KI dalam bubbler, sehingga terjadi reaksi oksidasi antara ozon dan KI. Reaksi oksidasi ini menyebabkan larutan berubah warna menjadi kuning kecokelatan. Warna ini merupakan warna I_2 yang terbentuk melalui reaksi oksidasi I^- , adapun reaksinya sebagai berikut :



Persamaan 4.1 menunjukkan bahwa mol I_2 yang terbentuk sebanding dengan mol ozon yang diperlukan untuk mengoksidasi KI, sehingga mol I_2 dapat dipergunakan untuk menghitung mol ozon yang diproduksi ozonator. Warna

kuning kecoklatan terbentuk karena molekul I_2 yang berasosiasi dengan KI membentuk KI_3 . Jumlah mol I_2 yang terbentuk dihitung dengan cara menitrasi larutan dengan natrium tiosulfat (larutan setelah ditambahkan asam sulfat dan amilum). Asam sulfat berfungsi untuk meminimalisasi I_2 yang terlepas ke udara dan amilum sebagai indikator (campuran I_2 dengan amilum akan menimbulkan warna biru-ungu). Persamaan reaksi titrasi secara lengkap adalah sebagai berikut :



Titrisasi dilakukan sampai warna larutan menjadi jernih, hal ini menunjukkan bahwa jumlah I_2 sebanding secara stoikiometris dengan natrium tiosulfat. Persamaan reaksi di atas menunjukkan jumlah mol ozon yang terbentuk oleh ozonator akan sama dengan setengah dari jumlah mol natrium tiosulfat yang terpakai. Produktivitas ozonator dapat dihitung dengan membagi jumlah mol ozon dengan waktu kontak ozon dengan larutan KI.

Produktivitas ozon dari ozonator Reson RSO-9805 dengan laju alir gas sebesar 9 L/menit adalah $0,0495 \pm 0,0005$ g/jam. Pengukuran produktivitas ozon rata-rata ini digunakan untuk mengetahui massa ozon fasa gas yang masuk ke dalam cairan sampel. Perhitungan secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran 4.

4.2. Analisis Produktivitas Ozon Terlarut pada RHOP dalam Fasa Cair

Produktivitas reaktor hibrida ozon-plasma dilakukan dengan cara menghitung jumlah ozon yang terlarut. Untuk uji produktivitas ozon terlarut ini menggunakan aquades 2 L dan KI 2% yang diproses menggunakan reaktor hibrida ozon-plasma selama 15 menit. Kemudian mengambil sampel dari hasil proses sebanyak 25 mL, sampel ini berwarna kuning muda. Hal ini menunjukkan adanya O_3 yang mengoksidasi KI.

Kemudian ke dalam sampel ditambahkan H_2SO_4 2N sebanyak 2 mL, dan indikator amilum sebanyak 3 tetes. Sampel dikocok, dan didiamkan selama beberapa menit sampai warnanya menjadi biru. Setelah itu sampel dititrasi menggunakan larutan natrium tiosulfat 0,005 M sampai sampel berubah menjadi bening kembali. Natrium tiosulfat yang digunakan sebanyak 1,2 mL. Perubahan

warna menjadi bening ini menunjukkan bahwa jumlah I_2 sebanding secara stoikiometris dengan natrium tiosulfat.

Jumlah ozon berdasarkan perhitungan di Lampiran 5 merupakan jumlah ozon yang terlarut dalam fasa cair pada reaktor hibrida ozon-plasma dengan laju alir gas 10 L/menit yaitu, 0,576 mg/L. Pengukuran ini digunakan untuk mengetahui massa ozon fasa gas yang terlarut dalam cairan sampel.

4.3. Reaksi Penyisihan *p*-klorofenol dalam RHOP

Penyisihan *p*-klorofenol dengan reaktor hibrida ozon-plasma tegangan 225 volt dan stirer dilakukan pada tiga kondisi limbah, yaitu kondisi asam, basa, dan netral. Tegangan yang diberikan melalui elektroda pada reaktor hibrida ozon-plasma mengakibatkan semakin banyak elektron yang terkandung sehingga akan terjadi perbedaan ionisasi, disosiasi, dan eksitasi dalam plasma (Sugiarto, 2005). Tegangan tinggi berarti memperbanyak jumlah elektron yang terbentuk. Setiap elektron yang terbentuk memiliki energi tinggi dan dapat membentuk spesi aktif berupa radikal hidroksil OH^\bullet , O^\bullet dan O_3 . Spesi aktif yang terbentuk dari tumbukan elektron dengan air dan udara dalam reaktor hibrida ozon-plasma terjadi melalui mekanisme reaksi berikut (Malik et al, 2001).



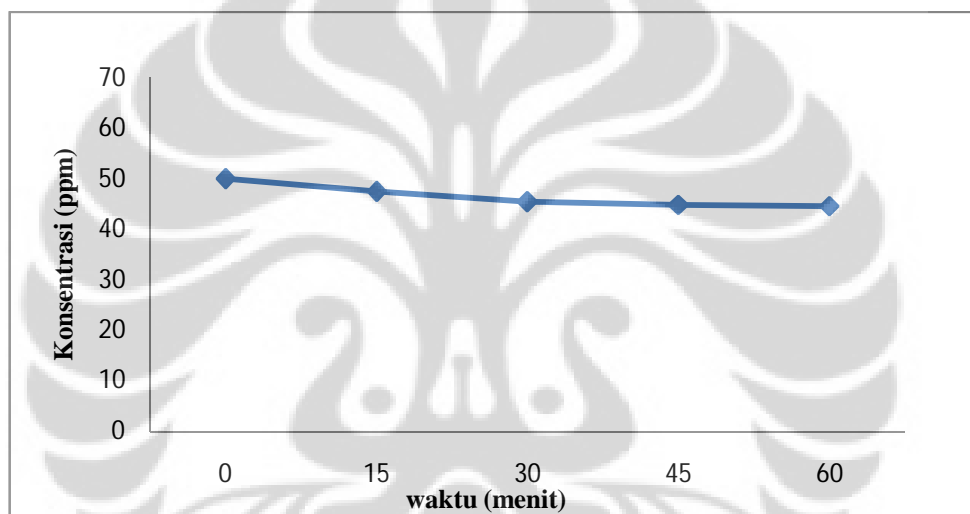
(keterangan: * = elektron yang mempunyai suatu besaran tingkat energi, M = partikel yang menyertai pembentukan ozon dari O_2 dan O^\bullet dapat berupa O_2 , N_2 , OH^\bullet dan sebagainya).

4.3.1. Reaksi Penyisihan pada Kondisi asam

Kondisi asam yang dimaksudkan adalah kondisi limbah yang diatur sedemikian rupa sehingga pH-nya 3,9. Penyisihan *p*-klorofenol menggunakan limbah sintesis *p*-klorofenol sebanyak 2 L dengan konsentrasi awal 50 ppm. Kondisi limbah *p*-klorofenol sintesis diubah menjadi kondisi asam dengan menambahkan H_2SO_4 . Limbah *p*-klorofenol dimasukkan ke dalam bak penampung (*reservoir*), yang diletakkan di atas stirer. Kemudian menyalakan sistem reaktor hibrida ozon-plasma, mengatur laju alir udara 10 L/menit, dan

mengatur regulator tegangan sebesar 225 volt. Proses penyisihan dilakukan selama 60 menit dengan pengambilan sampel dilakukan setiap 15 menit.

Pada proses penyisihan ini terbentuknya plasma terlihat pada reaktor hibrida ozon-plasma yang ditandai dengan terbentuknya percikan warna ungu pada bagian atas dan bawah reaktor. Selama proses penyisihan tidak ada perubahan warna limbah yang diproses. Limbah tetap berwarna bening seperti keadaan awal. Hal ini menunjukkan bahwa sedikitnya senyawa yang terdegradasi. Penurunan konsentrasi selama 60 menit proses penyisihan dapat dilihat pada Gambar 4.1. di bawah ini.



Gambar 4.1. Perkembangan Konsentrasi *p*-klorofenol Selama Penyisihan dalam Kondisi Asam

Gambar 4.1. menunjukkan persentase Penyisihan mencapai 10,75% dengan konsentrasi akhir 44,2 ppm setelah 60 menit proses penyisihan. Penyisihan paling efektif pada 15 – 30 menit pertama. Setelah itu pada menit ke- 45 penurunan konsentrasi akhir hanya meningkat hanya 0,4%. Pada menit ke 45 dan 60 konsentrasi akhir hampir sama, hal ini menunjukkan bahwa pada menit ke 60 merupakan titik jenuh penyisihan sehingga tidak terjadi peningkatan persentase penyisihan.

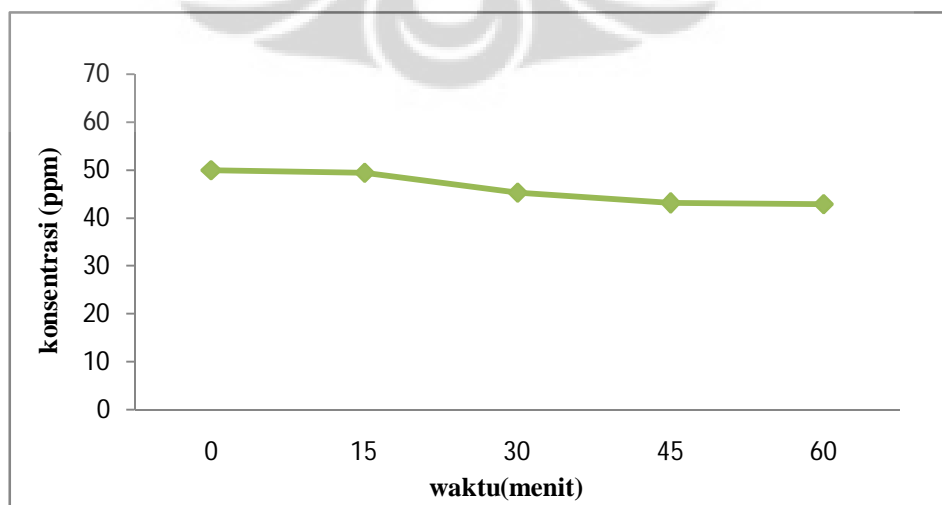
Rendahnya penyisihan pada kondisi asam dengan RHOP karena rendahnya jumlah ozon yang terlarut dalam fasa cair yang dihasilkan RHOP. Pada kondisi asam penyisihan yang terjadi merupakan reaksi langsung antara OH^* , O^* dan O_3 yang terbentuk dari RHOP dengan senyawa *p*-klorofenol (Beltra et al., 2001).

Pada kondisi asam ozon lebih mudah terdekomposisi kembali menjadi oksigen. Rendahnya potensial oksidasi ozon dan mudahnya ozon berubah kembali menjadi oksigen menyebabkan lambatnya penyisihan.

4.3.2. Reaksi Penyisihan pada Kondisi Netral

Kondisi netral yang dimaksudkan adalah kondisi limbah pada pH 6,8. Penyisihan *p*-klorofenol menggunakan limbah sintetis *p*-klorofenol sebanyak 2 L dengan konsentrasi awal 50 ppm. Kondisi limbah *p*-klorofenol sintetis diubah menjadi kondisi netral dengan menambahkan NaOH. Limbah *p*-klorofenol dimasukkan ke dalam bak penampung (*reservoir*), yang diletakkan di atas stirer. Kemudian menyalakan sistem reaktor hibrida ozon-plasma, mengatur laju alir udara 10 L/menit, dan mengatur regulator tegangan sebesar 225 volt. Proses penyisihan dilakukan selama 60 menit, dengan pengambilan sampel dilakukan setiap 15 menit.

Pada proses penyisihan ini terbentuknya plasma terlihat pada reaktor hibrida ozon-plasma yang ditandai dengan terbentuknya percikan warna ungu pada bagian atas dan bawah reaktor, yang merupakan warna plasma yang terbentuk dengan alir gas udara. Selama proses penyisihan tidak ada perubahan warna limbah yang diproses, hal ini menunjukkan bahwa sedikitnya senyawa yang terdegradasi. Perkembangan penurunan konsentrasi selama 60 menit proses penyisihan dapat dilihat pada Gambar 4.2. di bawah ini.



Gambar 4.2. Perkembangan Konsentrasi *p*-klorofenol Selama Penyisihan dalam Kondisi Netral pH=6

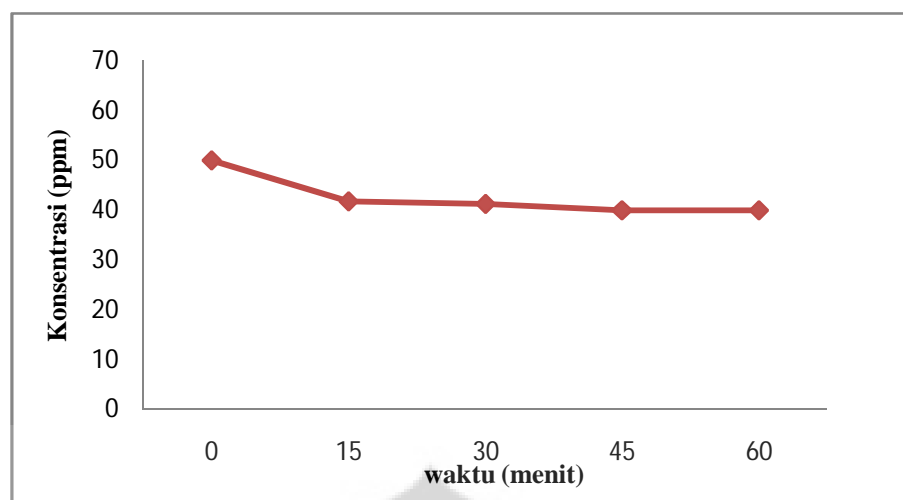
Pada Gambar 4.2. dapat dilihat setelah 60 menit proses penyisihan konsentrasi akhir menjadi 42,91 ppm dengan persentase penyisihan 14,17%. Penyisihan paling efektif pada 30 menit pertama, yaitu konsentrasi menjadi 46,30 ppm dengan persentase penyisihan 9,38%. Pada menit ke 45 dan 60 konsentrasi akhir *p*-klorofenol tidak menunjukkan peningkatan yang signifikan. Pada menit ke 60 peningkatan degradasi hanya sebesar 0,04 ppm (0,4%), hal ini menunjukkan bahwa pada menit ke 60 merupakan titik jenuh penyisihan (penyisihan mulai konstan).

Pada kondisi netral ini penyisihan dengan reaktor hibrida ozon-plasma menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi asam. Pada kondisi ini penyisihan yang terjadi merupakan reaksi langsung antara spesi aktif yang terbentuk dari reaktor hibrida ozon-plasma dan OH^{\bullet} (hasil dekomposisi O_3) dengan senyawa *p*-klorofenol (Clements, 1987). Banyaknya jumlah spesi aktif yang terbentuk ini menyebabkan cepatnya degradasi.

4.3.3. Reaksi Penyisihan pada Kondisi Limbah Basa

Kondisi basa yang dimaksudkan adalah kondisi limbah yang diatur sedemikian rupa sehingga pH-nya 10,8. Limbah sintesis *p*-klorofenol yang digunakan sebanyak 2 L dengan konsentrasi awal 50 ppm. Kondisi limbah *p*-klorofenol sintesis diubah menjadi kondisi basa dengan menambahkan NaOH. Limbah *p*-klorofenol dimasukkan ke dalam bak penampung (*reservoir*), yang diletakkan di atas stirer. Kemudian menyalakan sistem reaktor hibrida ozon-plasma, mengatur laju alir udara 10 L/menit dan mengatur regulator tegangan sebesar 225 volt. Proses penyisihan dilakukan selama 60 menit, dengan pengambilan sampel dilakukan setiap 15 menit.

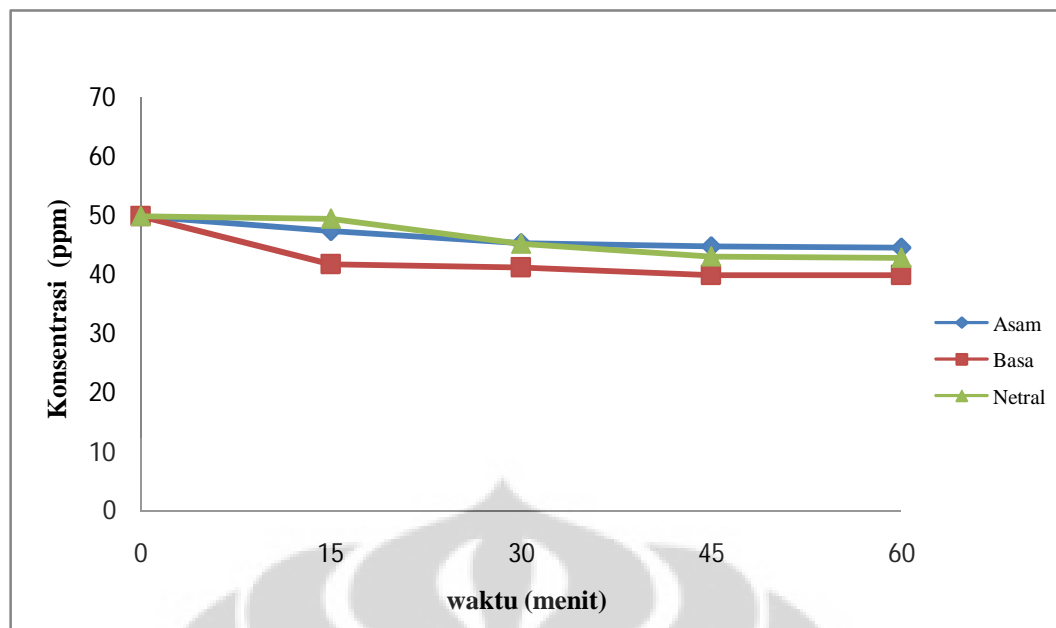
Pada proses penyisihan ini terbentuknya plasma terlihat pada reaktor hibrida ozon-plasma yang ditandai dengan terbentuknya percikan warna ungu pada bagian atas dan bawah reaktor. Selama proses penyisihan tidak ada perubahan warna limbah yang diproses. Limbah tetap berwarna bening seperti keadaan awal, hal ini menunjukkan bahwa sedikitnya senyawa yang terdegradasi. Perkembangan penurunan konsentrasi khir selama 60 menit proses penyisihan dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Perkembangan Konsentrasi *p*-klorofenol Selama Penyisihan dalam Kondisi Basa pH= 10,8

Pada Gambar 4.3. dapat dilihat konsentrasi akhir setelah 60 menit proses penyisihan menjadi 40,01 ppm dengan persentase penyisihan 19,96%. Penyisihan paling efektif pada 15 menit pertama, yaitu konsentrasi akhir menjadi 41,81 ppm dengan persentase penyisihan 16,36%. Pada menit ke 45 dan 60 konsentrasi akhir proses sama yaitu 40,01 ppm, hal ini menunjukkan bahwa pada menit ke 60 merupakan titik jenuh degradasi.

Pada kondisi basa ini penyisihan dengan reaktor hibrida ozon-plasma menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibanding kondisi asam dan netral karena pada penyisihan yang terjadi merupakan reaksi langsung antara spesi aktif yang terbentuk dari reaktor hibrida ozon-plasma dan OH^{\bullet} (hasil dekomposisi O_3) dengan senyawa *p*-klorofenol. Reaksi OH^{\bullet} dengan senyawa *p*-klorofenol ini yang mempercepat penyisihan, dikarenakan OH^{\bullet} memiliki potensial reduksi yang tinggi yaitu 2,8 (Clements,1987). Oleh karena itu, kondisi basa memiliki persentase penyisihan yang lebih tinggi dibandingkan asam dan netral. Perbandingan penurunan konsentrasi selama penyisihan selama 60 menit untuk ketiga kondisi limbah dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Perkembangan Konsentrasi *p*-klorofenol Pada Penyisihan dalam RHOP pada kondisi asam pH=3,9, netral pH=6,8 dan basa pH=10,8

Pada Gambar 4.4. dapat dilihat penyisihan dengan reaktor hibrida ozon-plasma paling efektif pada kondisi basa pH 10,8. Konsentrasi akhir setelah 60 menit proses penyisihan mencapai 40,01 ppm dengan persentase penyisihan mencapai 19,96%, hal ini dikarenakan pada kondisi basa ozon akan yang dihasilkan reaktor hibrida ozon-plasma lebih mudah terdekomposisi terdekomposisi menjadi radikal hidroksil OH^{\bullet} . Radikal hidroksil OH^{\bullet} yang mempercepat proses penyisihan dikarenakan radikal hidroksil OH^{\bullet} bereaksi langsung dengan senyawa *p*-klorofenol.

Pada kondisi netral yang terjadi adalah reaksi O_3 dan OH^{\bullet} dengan *p*-klorofenol, tetapi pada kondisi netral ozon tidak mudah terdekomposisi menjadi OH^{\bullet} seperti pada kondisi basa. Hal ini yang menyebabkan konsentrasi akhir pada kondisi netral lebih tinggi dibanding pada kondisi basa. Sedangkan pada kondisi asam yang terjadi adalah reaksi langsung antara O_3 , OH^{\bullet} , dan O^{\bullet} dengan senyawa *p*-klorofenol menyebabkan rendahnya persentase degradasi. O_3 memiliki potensial oksidasi yang lebih rendah dibanding OH^{\bullet} yaitu 2,07 (Clements, 1987), sehingga konsentrasi akhir pada kondisi asam lebih tinggi dibandingkan kondisi netral dan basa (persentase penyisihan paling rendah). Jadi dapat disimpulkan kondisi basa

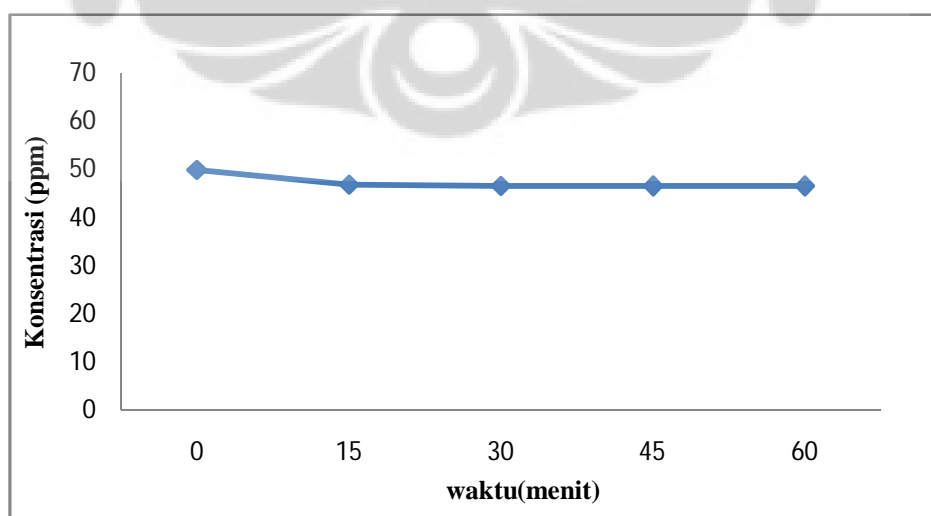
merupakan kondisi terbaik untuk penyisihan menggunakan reaktor hibrida ozon-plasma.

4.4. Penyisihan *p*-klorofenol dengan Teknik Ozonasi dalam CSTR

Penyisihan *p*-klorofenol dengan teknik ozonasi dalam CSTR. Penyisihan ini menggunakan ozonator Resun RSO-9805 dan stirer. Produktivitas ozon yang dihasilkan ozonator Resun RSO-9805 sebesar 0,05 g/jam. Stirer digunakan untuk membuat sampel diozonasi rata saat akan diambil sampelnya. Limbah sintesis *p*-klorofenol yang digunakan sebanyak 2 L, dengan konsentrasi awal 50 ppm. Penyisihan dilakukan untuk ketiga kondisi limbah *p*-klorofenol yaitu kondisi asam, netral dan basa.

4.4.1. Penyisihan *p*-klorofenol pada Kondisi Asam

Kondisi asam yang dimaksudkan adalah kondisi limbah yang diatur sedemikian rupa sehingga pH-nya 3,9. Limbah dikondisikan menjadi asam dengan menambahkan H₂SO₄. Penyisihan ini dilakukan selama 60 menit, dan data diambil setiap 15 menit. Selama proses penyisihan berlangsung, tidak ada perubahan warna pada limbah yang diolah. Hal ini menunjukkan sedikitnya degradasi senyawa *p*-klorofenol. Perkembangan penurunan konsentrasi selama penyisihan dapat dilihat pada Gambar 4.5. di bawah ini.



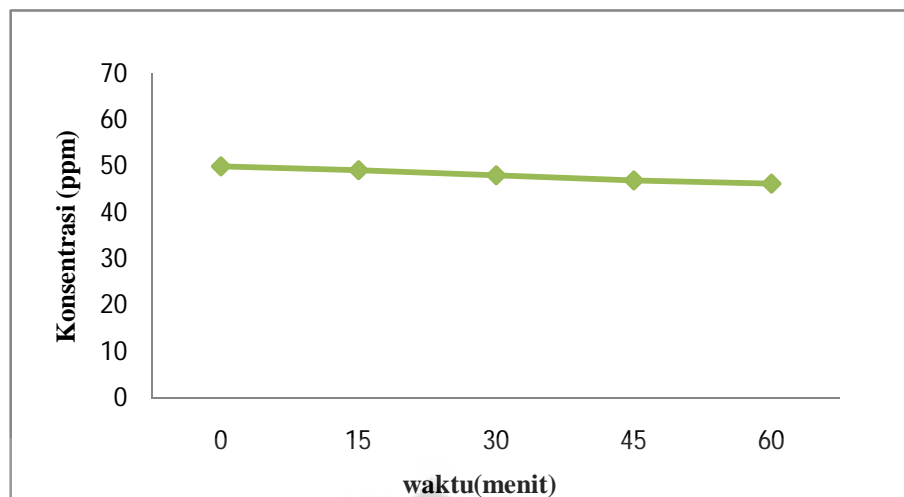
Gambar 4.5. Perkembangan Konsentrasi *p*-klorofenol Selama Penyisihan dalam Kondisi Asam pH=3,9

Pada Gambar 4.5. dapat dilihat konsentrasi akhir penyisihan pengolahan menunjukkan data yang relatif sama, yaitu 46,60 ppm dengan persentase penyisihan 6,78%. Penyisihan paling efektif pada 15 menit pertama, yaitu dengan konsentrasi 46,90 ppm. Setelah itu penurunan yang terjadi tidak signifikan, dan pada menit ke 45 dan 60 menunjukkan konsentrasi yang sama, yaitu 46,60 ppm. Kecenderungan ini menunjukkan bahwa pada menit ke 45 dan 60 penyisihan relatif konstan atau sudah mencapai titik batas penyisihan karena pada kondisi asam ozon lebih stabil, akan tetapi kurang reaktif sehingga laju dekomposisi ozon akan semakin rendah dan reaksi yang terjadi adalah reaksi langsung antara molekul dan senyawa *p*-klorofenol. Selain itu pada kondisi asam ozon yang terbentuk lebih mudah terdekomposisi kembali menjadi oksigen.

Pada kondisi asam penyisihan *p*-klorofenol secara ozonasi dominan yang terjadi ozonasi secara langsung oleh ozon, sedangkan ozonasi secara tidak langsung diabaikan karena pembentukan OH^{\cdot} sangat kecil (Beltra et al., 2001). Akibatnya penyisihan *p*-klorofenol pada kondisi asam lebih lambat dibandingkan dengan kondisi basa.

4.4.2. Penyisihan *p*-klorofenol pada Kondisi Netral

Kondisi netral yang dimaksudkan adalah kondisi limbah pada pH 6,8. Penyisihan *p*-klorofenol menggunakan limbah sintesis *p*-klorofenol sebanyak 2 L. Limbah dikondisikan menjadi netral dengan menambahkan NaOH. Penyisihan ini dilakukan selama 60 menit, dan data diambil setiap 15 menit. Selama proses penyisihan berlangsung, tidak terjadi perubahan warna. Warna tetap berwarna bening menunjukkan rendahnya penurunan konsentrasi penyisihan. Perkembangan penurunan konsentrasi selama proses penyisihan selama 60 menit dapat dilihat pada Gambar 4.6.

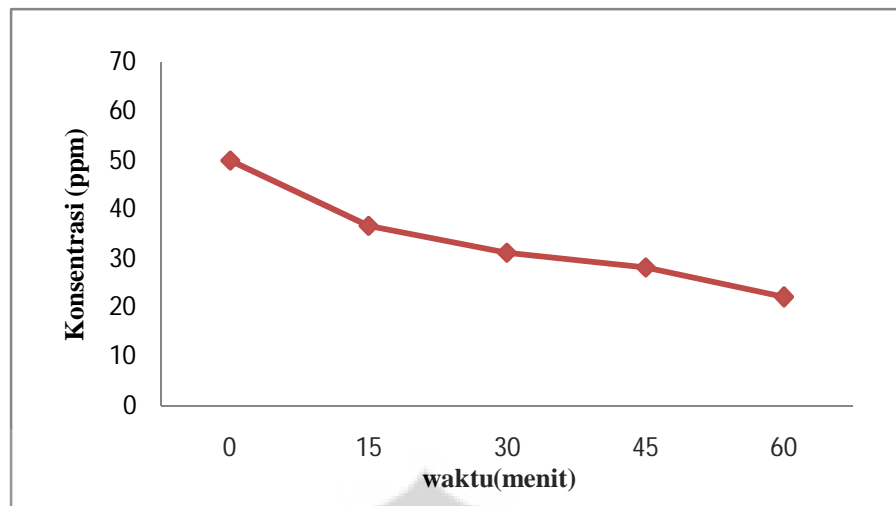


Gambar 4.6. Perkembangan Konsentrasi *p*-klorofenol Selama Penyisihan Kondisi Netral pH=6,8

Pada Gambar 4.6. dapat dilihat konsentrasi akhir penyisihan yang diperoleh adalah 46,30 ppm dengan persentase penyisihan 7,38% setelah proses penyisihan selama 60 menit. Besarnya penurunan konsentrasi yang diperoleh menunjukkan penurunan konsentrasi yang relatif sama setiap 15 menit. Penurunan konsentrasi penyisihan ini menunjukkan bahwa kecepatan reaksinya berlangsung relatif konstan. Pada kondisi netral reaksi yang berlangsung adalah OH^{\bullet} dan O_3 . Pada pH netral ozonasi secara langsung oleh ozon dan secara tidak langsung oleh radikal hidroksil OH^{\bullet} . Akan tetapi, pada pH netral dekomposisi ozon lebih lambat dibanding pH basa sehingga penurunan konsentrasi akhir lebih kecil dibanding basa (Clements, 1987).

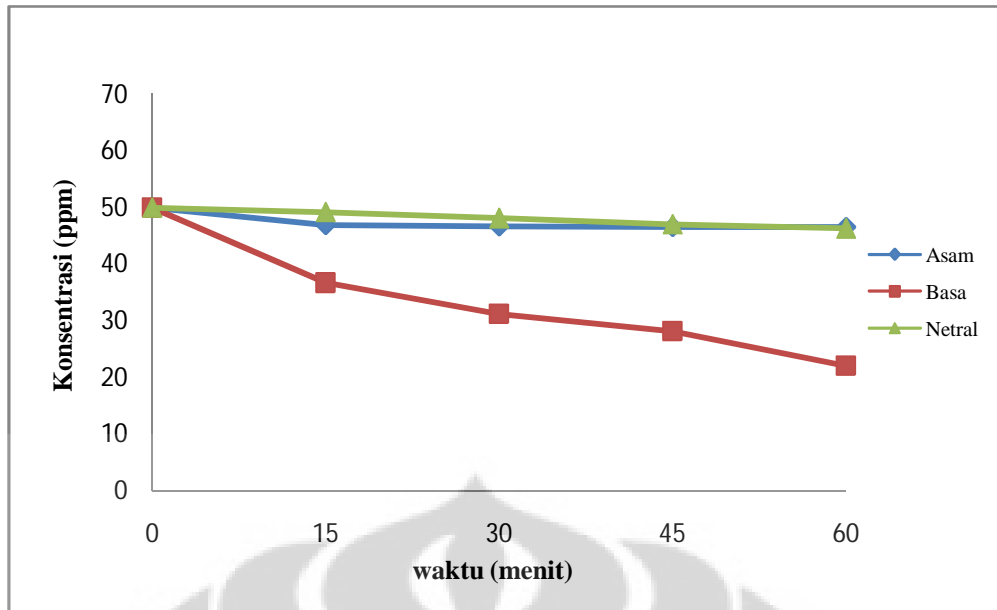
4.4.3. Penyisihan *p*-klorofenol pada Kondisi Basa

Kondisi basa yang dimaksudkan adalah kondisi limbah pada pH 10,8. Penyisihan *p*-klorofenol menggunakan limbah sintetis sebanyak 2 L, dan mengubah limbah menjadi kondisi basa dengan menambahkan NaOH. Penyisihan ini dilakukan selama 60 menit, dan data diambil setiap 15 menit. Selama proses penyisihan berlangsung, terjadi perubahan warna menjadi coklat muda. Perubahan ini menunjukkan banyaknya senyawa *p*-klorofenol yang terdegradasi. Perkembangan konsentrasi selama proses penyisihan dapat dilihat pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Perkembangan Konsentrasi *p*-klorofenol Selama Penyisihan dalam Kondisi Basa pH=10,8

Pada Gambar 4.7. dapat dilihat konsentrasi akhir pada kondisi basa setelah proses penyisihan selama 60 menit adalah 22,10 ppm dengan presentase penyisihan 55,78%. Penyisihan paling efektif pada 15 menit pertama, yaitu dengan konsentrasi 36,71 ppm dengan persentase penyisihan 26,57%. Penyisihan pada kondisi basa efektif karena pada kondisi basa terbentuk radikal hidroksil (OH^{\bullet}) yang membantu proses degradasi. Kondisi basa pada pH basa merupakan kondisi terbaik dalam penyisihan senyawa fenol (Cipto, 2005). Pada kondisi basa ozon akan mudah terdekomposisi yang berarti bahwa ozon akan makin reaktif pada pH tinggi. Selanjutnya pada proses dekomposisinya ozon menghasilkan senyawa antara berupa radikal hidroksil (OH^{\bullet}). Pada kondisi basa, ada dua mekanisme reaksi pada proses oksidasi *p*-klorofenol yaitu reaksi langsung antara *p*-klorofenol dengan molekul ozon dan reaksi radikal hidroksil (OH^{\bullet}) dengan senyawa *p*-klorofenol. Radikal hidroksil (OH^{\bullet}) mampu memecahkan senyawa *p*-klorofenol di dalam limbah sintetis dikarenakan mempunyai potensial oksidasi yang tinggi (lebih besar daripada potensial oksidasi ozon). Semakin banyak radikal hidroksil (OH^{\bullet}) yang terbentuk maka semakin cepat oksidasi senyawa *p*-klorofenol, sehingga degradasi senyawa *p*-klorofenol semakin cepat. Perbandingan penurunan konsentrasi selama penyisihan untuk ketiga kondisi limbah dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8. Perkembangan Konsentrasi *p*-klorofenol Pada Penyisihan dengan Teknik Ozonasi dalam CSTR Pada kondisi asam pH=3,9, netral pH 6,8 dan basa pH=10,8

Pada Gambar 4.8. dapat dilihat bahwa penyisihan dengan teknik ozonasi dalam CSTR paling efektif pada kondisi basa pada pH 10,8. Pada ozonasi semakin tinggi nilai pH maka persentase penyisihan semakin tinggi, dikarenakan semakin tingginya pH (kondisi basa) maka laju dekomposisi ozon semakin cepat, dan radikal hidroksil (OH^*) yang dihasilkan semakin cepat (Langlais et. al., 1991).

Adapun persamaan yang menggambarkan hubungan laju dekomposisi ozon dengan pH adalah sebagai berikut:

$$-\frac{d[O_3]}{dt} = k[O_3][OH^-] \quad (4.9)$$

dimana $k = \frac{k'}{[OH^-]}$

dengan meningkatnya nilai pH maka nilai k' juga bertambah. Hal ini akan menyebabkan laju dekomposisi ozon semakin meningkat sehingga pada pH basa ozon akan mudah terdekomposisi. Semakin mudahnya ozon terdekomposisi menunjukkan bahwa ozon semakin reaktif pada pH tinggi. Pada proses dekomposisi ozon menghasilkan senyawa radikal hidroksil (OH^*) sehingga menyebabkan proses penyisihan *p*-klorofenol berlangsung jauh lebih cepat dibandingkan pada kondisi asam dan netral.

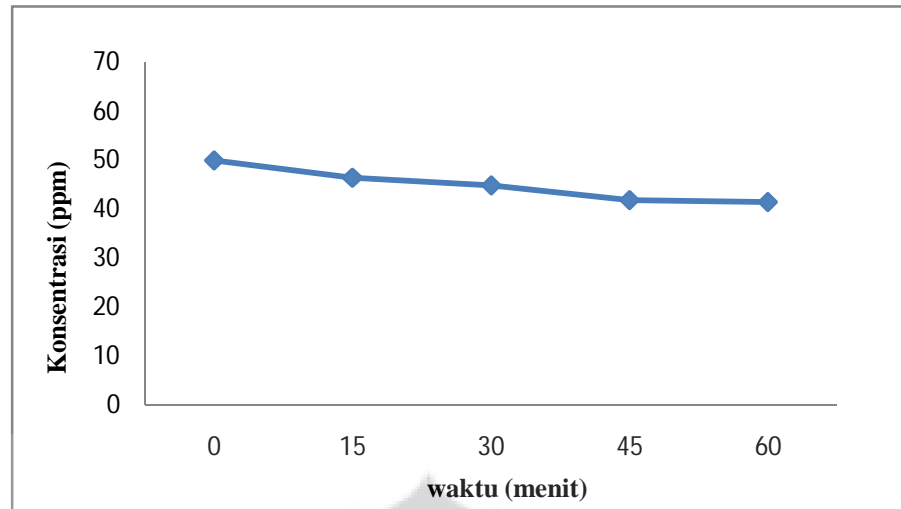
4.5. Penyisihan *p*-klorofenol dengan mengontakkan ozon dan limbah cair yang dilanjutkan dengan reaksi dalam RHOP (Reaktor Hibrida Ozon-Plasma)

Penyisihan *p*-klorofenol dengan mengontakkan ozon dan limbah cair yang dilanjutkan dengan reaksi dalam RHOP. Penyisihan menggunakan kombinasi kedua alat ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas penyisihan yang diperoleh dengan waktu proses yang sama. Pada proses penyisihan ini limbah sintesis *p*-klorofenol dikondisikan sama dengan penyisihan sebelumnya, yaitu asam, basa, dan netral.

4.5.1. Penyisihan *p*-klorofenol pada Kondisi Asam

Kondisi asam yang dimaksudkan adalah kondisi limbah pada pH 3,9. Penyisihan *p*-klorofenol dengan mengontakkan ozon dan limbah cair yang dilanjutkan dengan reaksi dalam RHOP menggunakan limbah sintesis *p*-klorofenol sebanyak 2 L, dengan konsentrasi awal 50 ppm. Kondisi limbah *p*-klorofenol sintesis diubah menjadi kondisi asam dengan menambahkan H₂SO₄. Limbah *p*-klorofenol dimasukkan ke dalam bak penampung (*reservoir*), yang diletakkan di atas stirer. Kemudian menyalakan sistem reaktor hibrida ozon-plasma, mengatur laju alir udara 10 L/menit, mengatur regulator tegangan sebesar 225 volt dan menyalakan ozonator. Proses penyisihan dilakukan selama 60 menit, dengan pengambilan sampel dilakukan setiap 15 menit.

Pada proses penyisihan ini terbentuknya plasma terlihat pada reaktor hibrida ozon-plasma yang ditandai dengan terbentuknya percikan warna ungu pada bagian atas dan bawah reaktor yang merupakan warna plasma dengan masukkan gas udara. Sedangkan ozonasi langsung dilakukan di bak penampung limbah (*reservoir*). Selama proses penyisihan tidak ada perubahan warna limbah yang diproses. Limbah tetap berwarna bening seperti keadaan awal, hal ini menunjukkan bahwa sedikitnya senyawa yang terdegradasi. Perkembangan penurunan konsentrasi selama proses penyisihan dapat dilihat pada Gambar 4.9.



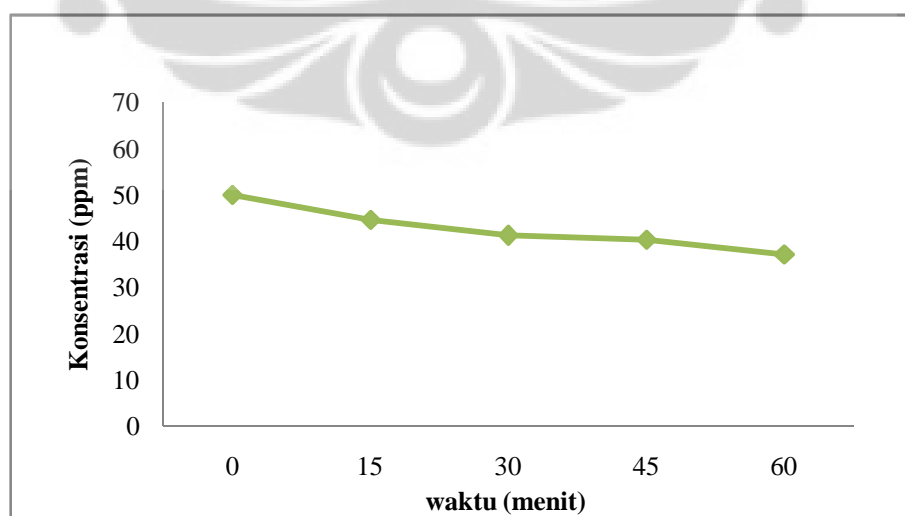
Gambar 4.9. Perkembangan Konsentrasi *p*-klorofenol Selama Penyisihan dalam Kondisi Asam pH=3,9

Pada Gambar 4.9. dapat dilihat konsentrasi akhir setelah 60 menit proses penyisihan adalah 41,51 ppm dengan persentase penyisihan 16,96%. Penurunan konsentrasi setiap 15 menit proses penyisihan hampir konstan, yaitu sebesar 2,5 ppm (6% penyisihan). Pada menit ke 45 dan 60 konsentrasi penyisihan hampir menunjukkan nilai yang sama (tidak ada penurunan yang signifikan), sehingga dapat disimpulkan menit ke 60 merupakan titik jenuh penyisihan (penyisihan mulai konstan). Pada kondisi asam ini penyisihan dengan mengontakkan ozon dan limbah cair yang dilanjutkan dengan reaksi dalam RHOP menunjukkan nilai yang cukup tinggi. Persentase penyisihan yang dihasilkan dari proses penggabungan penyisihan ini merupakan proses penguatan, yang berarti penurunan konsentrasi penyisihan yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan dengan penjumlahan penurunan konsentrasi penyisihan yang dihasilkan hanya dengan reaktor hibrida ozon-plasma atau dengan ozonator resun. Pada kondisi ini penyisihan yang terjadi merupakan reaksi langsung antara OH^* , O^* , dan O_3 yang terbentuk dari reaktor hibrida ozon-plasma dan ozonator dengan senyawa *p*-klorofenol. Ozon yang terbentuk pada kondisi asam ini akan tetap dijaga keberadaannya disepanjang RHOP. Banyaknya jumlah spesi aktif yang terbentuk dan stabilitas ozon menyebabkan penyisihan lebih cepat dibandingkan dengan kedua proses penyisihan sebelumnya.

4.5.2. Penyisihan *p*-klorofenol pada Kondisi Netral

Kondisi netral yang dimaksudkan adalah kondisi limbah pada pH 6,8. Penyisihan *p*-klorofenol dengan mengontakkan ozon dan limbah cair yang dilanjutkan dengan reaksi dalam RHOP menggunakan limbah sintetis *p*-klorofenol sebanyak 2 L, dengan konsentrasi awal 50 ppm. Kondisi limbah *p*-klorofenol sintetis diubah menjadi kondisi netral dengan menambahkan NaOH. Limbah *p*-klorofenol dimasukkan ke dalam bak penampung (*reservoir*), yang diletakkan di atas stirer. Kemudian menyalakan sistem reaktor hibrida ozon-plasma, mengatur laju alir udara 10 L/menit, mengatur regulator tegangan sebesar 225 volt dan menyalakan ozonator. Proses penyisihan dilakukan selama 60 menit, dengan pengambilan sampel dilakukan setiap 15 menit.

Pada proses penyisihan ini terbentuknya plasma terlihat pada reaktor hibrida ozon-plasma yang ditandai dengan terbentuknya percikan warna ungu pada bagian atas dan bawah reaktor yang merupakan warna plasma dengan masukan gas udara. Ozonasi langsung dilakukan di dalam bak penampung (*reservoir*). Selama proses penyisihan tidak ada perubahan warna limbah yang diproses, hal ini menunjukkan bahwa sedikitnya senyawa yang terdegradasi. Perkembangan penurunan konsentrasi selama penyisihan dapat dilihat pada Gambar 4.10. di bawah ini.



Gambar 4.10. Perkembangan Konsentrasi *p*-klorofenol Selama Penyisihan dalam Kondisi Netral pH=6,8

Pada Gambar 4.10. dapat dilihat konsentrasi akhir setelah proses penyisihan selama 60 menit adalah 37,12 ppm dengan persentase penyisihan 25,74%. Penyisihan paling efektif pada 15 menit pertama dengan konsentrasi 44,61 ppm dan persentase penyisihan 10,77%. Hal ini menunjukkan semakin tingginya konsentrasi maka persentase penyisihan semakin efektif. Pada kondisi netral ini penyisihan dengan reaktor hibrida ozon-plasma menunjukkan nilai yang cukup tinggi. Pada kondisi ini penyisihan yang terjadi merupakan reaksi langsung antara spesi aktif yang terbentuk dari reaktor hibrida ozon-plasma dan OH^* (hasil dekomposisi O_3 yang dihasilkan reaktor dan ozonator) dengan senyawa *p*-klorofenol. Banyaknya jumlah spesi aktif yang terbentuk ini menyebabkan penyisihan cukup cepat.

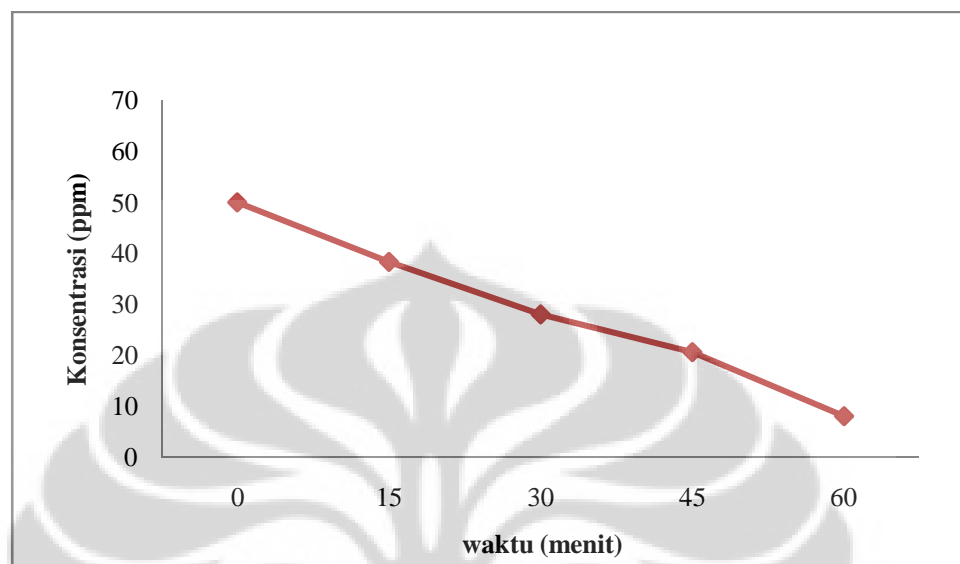
Penyisihan kondisi netral dengan menggunakan penggabungan reaktor hibrida ozon-plasma dan ozonator menunjukkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan penjumlahan yang dihasilkan hanya menggunakan reaktor hibrida ozon-plasma atau ozonator resun RSO-9805 2,8 g. Penyisihan yang dihasilkan merupakan penguatan dari kemampuan penyisihan yang dimiliki kedua jenis alat yang digunakan. Hal ini karena RHOP menjaga stabilitas dari ozon dan radikal hidroksil OH^* yang terbentuk di sepanjang RHOP.

4.5.3. Penyisihan *p*-klorofenol pada Kondisi Basa

Kondisi basa yang dimaksudkan adalah kondisi limbah pada pH 10,8. Penyisihan *p*-klorofenol menggunakan limbah sintesis *p*-klorofenol sebanyak 2 L, dengan konsentrasi awal 50 ppm. Kondisi limbah *p*-klorofenol sintesis diubah menjadi kondisi basa dengan menambahkan NaOH. Limbah *p*-klorofenol dimasukkan ke dalam bak penampung (*reservoir*), yang diletakkan di atas stirer. Kemudian menyalakan sistem reaktor hibrida ozon-plasma, mengatur laju alir udara 10 L/menit, mengatur regulator tegangan sebesar 225 volt, dan menyalakan ozonator. Proses penyisihan dilakukan selama 60 menit, dengan pengambilan sampel dilakukan setiap 15 menit.

Pada proses penyisihan ini terbentuknya plasma terlihat pada reaktor hibrida ozon-plasma yang ditandai dengan terbentuknya percikan warna ungu pada bagian atas dan bawah reaktor. Sedangkan ozonasi langsung dilakukan di dalam bak penampung (*reservoir*). Selama proses penyisihan terjadi perubahan warna limbah

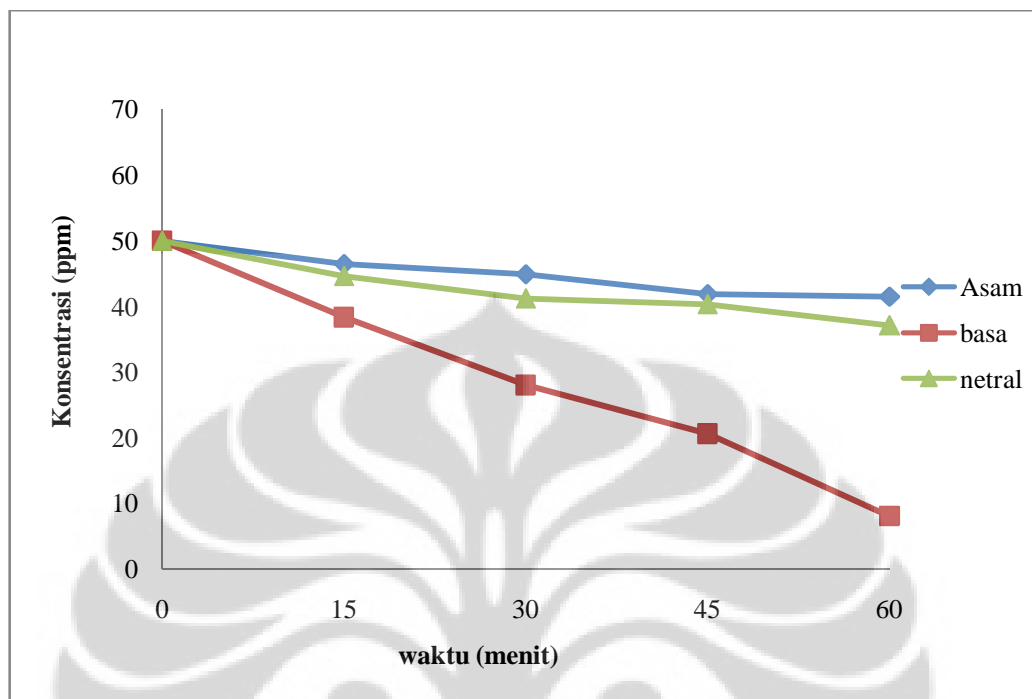
yang diproses. Limbah berubah menjadi coklat muda, hal ini menunjukkan banyaknya *p*-klorofenol yang terdegradasi. Perkembangan penurunan konsentrasi selama proses penyisihan dapat dilihat pada Gambar 4.11. di bawah ini.



Gambar 4.11. Perkembangan Konsentrasi *p*-klorofenol Selama Penyisihan dalam Kondisi Basa pH 10,8

Pada Gambar 4.11. dapat dilihat konsentrasi akhir setelah proses penyisihan selama 60 menit adalah 8,01 ppm dengan persentase penyisihan 83,97%. Penurunan konsentrasi setiap 15 menit proses penyisihan relatif konstan. Proses penyisihan pada kondisi basa dengan reaktor hibrida ozon-plasma dan ozonator menunjukkan penurunan konsentrasi yang sangat tinggi. Penyisihan menggunakan gabungan reaktor hibrida ozon-plasma dan ozonator resun RSO-9805 2,8 merupakan proses penguatan penyisihan, karena RHOP menjaga stabilitas dari O_3 dan OH^* yang terbentuk di sepanjang RHOP. Penurunan penyisihan yang dihasilkan lebih tinggi dibanding penjumlahan penurunan konsentrasi penyisihan menggunakan dengan hanya menggunakan ozonator dan hanya menggunakan reaktor hibrida ozon-plasma. Pada kondisi ini penyisihan yang terjadi merupakan reaksi langsung antara spesi aktif yang terbentuk dari reaktor hibrida ozon-plasma dan OH^* (hasil dekomposisi O_3 yang dihasilkan reaktor dan ozonator) dengan senyawa *p*-klorofenol. Banyaknya jumlah spesi aktif yang terbentuk ini menyebabkan proses degradasi sangat cepat (Clements, 1987). Perbandingan

penurunan konsentrasi selama prose penyisihan untuk ketiga kondisi limbah dapat dilihat pada Gambar 4.12. di bawah ini.



Gambar 4.12. Perkembangan Konsentrasi *p*-Klorofenol Pada Penyisihan dengan Teknik Ozonasi Dalam CSTR dan Dilanjutkan Dengan Reaksi di Dalam RHOP pada kondisi asam pH 3,9, netral pH 6,8 dan basa 10,8.

Pada Gambar 4.12. dapat dilihat bahwa penyisihan dengan mengontakkan ozon dan limbah cair yang dilanjutkan dengan reaksi dalam RHOP paling efektif pada kondisi limbah basa pH 10,8 karena pada pH tinggi (kondisi basa) dekomposisi ozon lebih cepat, sedangkan pada pH rendah ozon bersifat stabil sehingga radikal OH^{\bullet} yang terbentuk lebih banyak pada pH tinggi dan hal ini menjelaskan bahwa laju penyisihan senyawa fenolik lebih cepat pada pH tinggi (Chen & Zhang, 2004). Pada proses penyisihan menggunakan penggabungan reaktor hibrida ozon-plasma dan ozonator, penurunan konsentrasi (presentase penyisihan) yang dihasilkan merupakan penguatan persentase yang dihasilkan masing-masing alat. Hal ini dikarenakan RHOP menghambat dekomposisi ozon menjadi O_2 dan menjaga stabilitas konsentrasi ozon di sepanjang reaktor. Sehingga jumlah ozon dan radikal hidroksil OH^{\bullet} yang terbentuk akan dijaga tetap sama dan menyerang *p*-klorofenol. Penurunan konsentrasi terbaik adalah pada

kondisi basa dengan konsentrasi akhir 8,01 ppm dan persentase degradasi sebesar 83,97%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa proses penyisihan yang paling efektif adalah pada kondisi basa dengan mengontakkan ozon dan limbah cair yang dilanjutkan dengan reaksi dalam RHOP.



BAB V 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 $0,0495 \pm 0,0005$ g/jam.
- Produktivitas ozon terlarut pada RHOP dengan laju alir udara 10 L/menit pada fasa cair adalah $0,000576$ g/liter.
- Kondisi terbaik limbah sintesis *p*-klorofenol untuk pengolahan menggunakan RHOP dan ozonator adalah kondisi basa pada pH 10,8.
- Konfigurasi sistem reaksi terbaik dari sistem yang diujikan untuk pengolahan limbah sintesis *p*-klorofenol adalah dengan mengontakkan ozon dan limbah cair yang dilanjutkan dengan reaksi dalam RHOP.
- Persentase penyisihan *p*-klorofenol terbaik adalah pada pH 10,8 dan dengan dengan mengontakkan ozon dan limbah cair yang dilanjutkan dengan reaksi dalam RHOP yaitu sebesar 83,97%.

5.2. Saran

Ada beberapa saran untuk pengembangan penelitian pengolahan limbah cair yang mengandung *p*-klorofenol menggunakan RHOP (reaktor hibrida ozon-plasma), antara lain:

- Sebaiknya menggunakan tegangan yang lebih tinggi, sehingga ozon dan plasma yang terbentuk lebih banyak.
- Sebaiknya dilakukan pengukuran radikal hidroksil (OH^{\bullet}) yang dihasilkan RHOP.
- Sebaiknya dilakukan pengukuran produktivitas ozon yang dihasilkan RHOP dalam fasa gas.
- Sebaiknya ukuran RHOP dan elektroda yang digunakan diperbesar.

REFERENSI

- Anonim. (2010). *Material Safety Data Sheet Phenol, Liquified MSDS*. <http://www.sciencelab.com/msds.php?msdsId=9926464>.
- Anonim. (2012). *Ozone Basics*. <http://www.ozonesolutions.com/info/ozone-basics>.
- Alnaizy, R., & Akgerman, A. (2000). *Advanced oxidation of phenolic compounds*. Department of Chemical engineering Texas A & M universitu, College Station, Tx 77843, USA.
- Badan Pengendalian Dampak Lingkungan, Kep MENLH. NO. Kep. 51/MENLH/10/1955, Tentang Baku Mutu Limbah Cair Bagi Kesehatan Industri, Deputi Bidang Pengendalian Pencemaran Air, 1995.
- Bardos, Ladislav., & Barankova, Hana. (2009). *Plasma Process at Atmospheric and Low Pressures*, Vacuum 83. 522-527.
- Beltra' n, F.J., J.M. Encinar., & J.F. Gonza' lez. (1997). *Industrial Wastewater Advanced Oxidation. Part 2. Ozone Combined with Hydrogen Peroxide or UV Radiation*. Water Res. 31(10):2415-2428
- Biljana, P., Dragan Manojlovic., & Bratislav, M. (2008). *Plasma Assisted Degradation Of Phenol Solutions*. Center Of Chemistry, Institute Of Chemistry, Technology and Metallurgy, Belgrade, Serbia.
- Boari, G., Brunetti, A., R, Passino., & A, Rozzi. (1984). *Anaerobic Digestion of OilMollWastewater*. Agricultural Wastes 10(3):161-175.
- Calvosa, L., A, Monteverdi., B, Rindone., & G, Riva. (1991). *Ozone Oxidation of Compounds Resistant to Biological Degradation*. Water Res. 25(8):985-993.
- Cheng, hsu-Hui., dan Chen, Shiao-shing. (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, Taiperi, 1, Sec 3, Chung-Hsiao E. Rd., Taipei.
- Chen, Yin-Sheng., & Zhang, Xin-Sheng. (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.

- Cipto, Irawati. (2005). *Pengaruh pH dan Konsentrasi Awal Fenol Terhadap Proses Ozonasi Limbah Fenol*. S1 Skripsi, Universitas Indonesia.
- Clements J. S., Sato, M., dan Davis R. (1987). *Preliminary Investigation Of Prebreakdown Phenomena And Chemical Reactions Using A Pulsed High-Voltage Discharge In Water*. IEEE Transactions on industrial applications, Vol. IA-23, No. 2, 224-234.
- Code, Of Federal Regulation. (1993). 40 CFR 131.36.
- Damayunda. (2010). *Ozon (O_3)*. <http://damayuda.blogspot.com/2010/12/ozon-o3.html>.
- Design, Criteria For Waterworks Facilities. (1987). JWWA.
- Dojcinovi., Dragan, Manojlovic., & Goran, M. (2009). *Plasma assisted degradation of phenol solutions*. University of Belgrade:Faculty of Chemistry.
- Eliezer, Shalom., & Eliezer, Yaffa. (2001). *The Fourth State of Matter. An Introduction to Plasma Science*. Institute of Physics Publishing: J W Arrowsmith Ltd, Bristol
- Fahey, D.W. (2006). *Twenty Questions And Answers About The Ozone Layer: 2006 Update*. Switzerland: Les Diablerets
- Goto, Motonobu., & Yoshida, Akihiro. *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*. School of Chemistry and Environment, Beihang University, Beijing.
- Hao, Xiaolong., Zhou, Minghua., Xin, Qing., & 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.
- Higne, J., 1982. In Rice, R.G., netzer, A. (Eds.), *Handbook Of Ozone Technology And Applications, Chapter 12, Mechanisms, Rater And Selectivity Of*

- Oxidations Of Organic Coumpounds Initiated By Ozonation Of Water*. Ann Arbor science, Michigan, pp. 341-379
- Hoigne, J., & Bode, H. (1983). *Rate Constans Of Reaction Of Ozone With Organic And Inorganic Coumpounds In Water-I:Non Dissociating Organic Compound*. Water Res. 17, 185-194.
- Jynto. (2011). *4-Chlorophenol*. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:4-Chlorophenol-3D-balls.png>.
- Karimi, A., Redman., & Glaze. (1997). *Technology Overview*. Jurnal AWWA.
- Kogelschatz, Ulrich. (2003). *Dielectric-Barrier Discharge: Their History, Discharge Physics, and Industrial Pplication*. Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol 23, No. 1, March 2003, 1-46.
- Kronholm, Juhani., & Hutala, Sami. (2002). *Oxidation Of 4-Chloro-3-metylphenol in Pressurized Hot Water in Liquid and Vapor Phases*. Laboratory of Analytical Chemistry, P.O. Box 55, FIN-00014 University of Helsinki, Helsinki, Finland.
- Kurniawan, Winarto. (2000). *Penyisihan Senyawa Fenol dengan Teknik Ozonasi Pada Suasana Basa dalam Kolom Sistem Injeksi Ozon Berganda*. S1 Skripsi, Universitas Indonesia
- Langlais, B., Reckhow., & D.A., Brink, D.R. (1990). *Ozone In water Treatment: Application and Engineering*. vol 36-38. Lewis Publisher, Boca Raton, Florida, pp. 43-45.
- Liberman, Michael A., & Lichtenberg, Allan J. (2005). *Principles Of Plasma Discharge and Materials Processing (2nd Ed)*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Malik M A., Ghaffar A., & Malik S A. (2001). *Plasma Sources Sci. Technol*. 10 82-9.
- Material Safety, Data Sheet Phenol. (2010). <http://www.sciencelab.com/msds.php?msdsId=9926464>
- Metcalf., & Eddy. (1991). *Waste water engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*. McGraw-Hill Book Co. Singapore
- Narengerile., Yuan, Min-Hao., & Watanabe, Takayuki. (2010). *Decomposition Mechanism Of Phenol In water Plasmas by DC Discharge at Atmospheric*

- Pressure*. Department Of Enviromental Chemistry and Engineering, Tokyo Institute of technology, Japan.
- Oehlschlaeger, H. F. (1978). *Reactions Of Ozone With Organic Compounds*. Cleveland: Ozone Press International.
- Prrwadi, Agus., Usada, Widdi., Suryadi., & Isyuniarto. (2006). *Konstruksi Tabung Lucutan Plasma Pembangkit Ozon 100 watt dan Karakterisasinya*. Batan Yogyakarta: Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan.
- Rice, R.G., & M.E. Browning. (1981). *Ozone Treatment of Industrial Wastewater*. Notes Data Corroration, Park Ridly.
- Ricky. (2011). *Petir dan Keistimewaannya*. <http://rickyradit.blogspot.com/2011/04/petir-dan-keistimewaannya.html>
- Said, Nusa Idaman. (2007). *Disinfeksi Untuk Proses Pengolahan Air Minum*. BPPT: Pusat Teknologi Lingkungan.
- Siemens, W. (1857) *Ann. Phys. Chem.* 102 66–122
- SNI 06-6989.21-2004. Bagian 21: Cara uji kadar fenol secara spektrofotometri.
- Sugiarto, Anto Tri. (2003). *Role Of Plasma In Radical Formation Using Plasma in water*. Research Center For Calibration, Instrumentation and Metrology Indonesian Institute Of Sciences. Komplek Puspitek Serpong, Tangerang.
- Sugiarto, Anto Tri., & Sato, Masayuki. (2001). *Pulsed Plasma Processing Of Organic Compounds In Aqueous Solution*. Department Of Biological and Chemical engineering, Faculty Of Engineering, Gunma University, Japan.
- Sun, Bing., Sto, Masayuki., & J.S Clements. (1996). *Optical Study Of Active Species Produced By A Pulsed Streamer Corona Discharge In Water*. Department Of Biological and Chemical engineering, Gunma University, Kiryu Gunma, 376 Japan.
- Tirta Ayu, Syarifah Nina. (2001). *Uji Kinerja Penyisihan Senyawa Fenolik dengan Teknik Ozonisasi/UV-C Menggunakan Kolam Aerasi Injeksi Berganda dalam Suasana Basa*. S1 Skripsi, Universitas Indonesia
- U.S. EPA. 1994a. *Interim Policy For Particle Size And Limit Concentration Issues In Inhalation Toxicity: Notice Of Availability*. Federal Register 59(206):53799.

- Warsito, Agung. (2009). *Aplikasi Reaktor Plasma Lucutan Korona Untuk Menurunkan Kasar Limbah Cair Industri Minuman Ringan*. Universitas Diponegoro: Fakultas Teknik.
- Wu, Jiangning., Rudy, Klaas., & Spark., Josef. (2000). *Oxidation Of Aqueous Phenol by Ozone and Peroxidase*. School Of Chemical Engineering, Ryerson Polytechnic University, Toronto, Ontario, Canada
- Yamato, Toshiaki., & Okubo, Masaaki. (2004). *Non –Thermal Plasma Technology*. Handbook Of Enviromental Engineering, Volume 5: Advanced Physicochemical Treatment Technologies. Totowa, NJ: The Humana Press Inc.
- Yunzheng, PI., & Wang, Jianlong. (2005). *The Mechanism And Pathway Of The Ozonation Of 4-Chlorophenol In Aqueous Solution*. Institute of Nuclear Energy Technology: Laboratory of Environmental Technology
- Zhang, Jibiao., Zheng-zheng., & Yinni, Zhang. (2007). *Low – Temperature Plasma- Induced Degradation Of Aqueous 2,4-dinitrophenol*. School of The Environment, Nanjing University.

LAMPIRAN

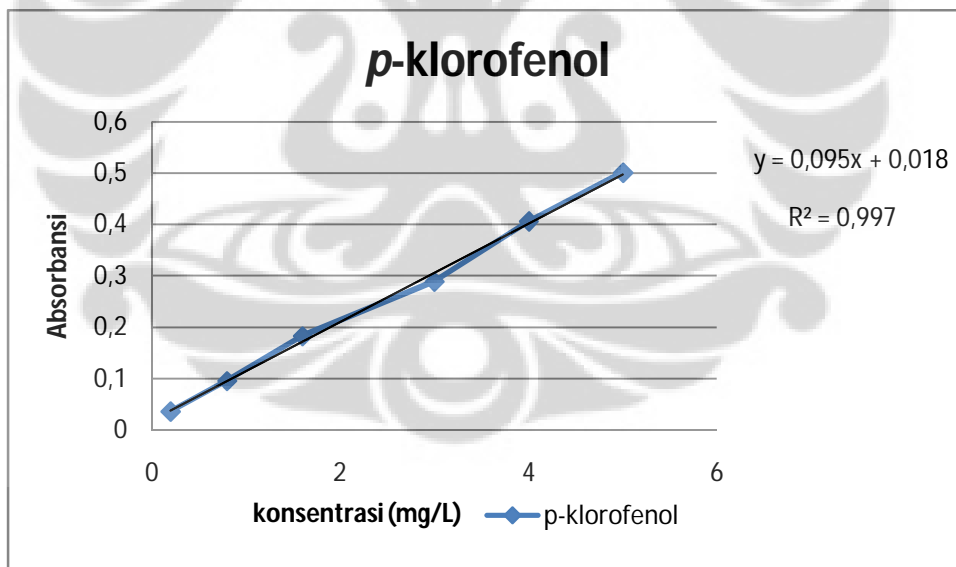
Lampiran 1. Kurva Kalibrasi *p*-klorofenol

Hasil dari kalibrasi spektrofotometer sesuai SNI 06-6989.21-2004 sebagai berikut:

Tabel 1. Data Absorbansi Kurva Standar *p*-Klorofenol

Absorbansi Pengukuran ke-1	Absorbansi Pengukuran ke- 2	Konsentrasi (mg/L)
0,036	0,036	0,2
0,095	0,095	0,8
0,182	0,182	1,6
0,288	0,288	3
0,406	0,406	4
0,501	0,501	5

Kurva yang diperoleh dari hasil kalibrasi:



Gambar 1. Kurva Standar *p*-klorofenol

a. Reaksi Penyisihan *p*-klorofenol dalam RHOP

- Untuk Kondisi asam pH 3,9, volume limbah 2 liter, konsentrasi awal 50 ppm dan tegangan 225 volt

Tabel 2. Data Reaksi Penyisihan *p*-Klorofenol Dalam RHOP

Waktu (menit)	Absorbansi Pengukuran Ke-1	Absorbansi Pengukuran Ke-2	Konsentrasi (ppm)	Persen tidak terdegradasi (%)	Persen degradasi(%)
0	0,493	0,493	50	100	0
15	0,468	0,468	47,46	94,92	5,07
30	0,448	0,448	45,43	90,87	9,12
45	0,442	0,442	44,82	89,65	10,34
60	0,44	0,44	44,62	89,24	10,75

(Lanjutan)

- Untuk Kondisi netral pH 6,8 volume limbah 2 liter, konsentrasi awal 50 ppm dan tegangan 225 volt

Tabel 3. Data Reaksi Penyisihan *p*-klorofenol dalam RHOP

Waktu (menit)	Absorbansi Pengukuran Ke-1	Absorbansi Pengukuran Ke-2	Konsentrasi (ppm)	Persen tidak terdegradasi(%)	Persen degradasi (%)
0	0,501	0,501	50	100	0
15	0,496	0,496	49,50	99,00	0,99
30	0,454	0,454	45,30	90,61	9,38
45	0,432	0,432	43,11	86,22	13,77
60	0,43	0,43	42,91	85,82	14,17

- Untuk Kondisi basa pH 10,8 volume limbah 2 liter, konsentrasi awal 50 ppm dan tegangan 225 volt

Tabel 4. Data Reaksi Penyisihan *p*-klorofenol dalam RHOP

Waktu (menit)	Absorbansi Pengukuran Ke-1	Absorbansi Pengukuran Ke-2	Konsentrasi (ppm)	Persen tidak terdegradasi (%)	Persen degradasi(%)
0	0,501	0,501	50	100	0
15	0,419	0,419	41,81	82,36	16,36
30	0,414	0,414	41,31	82,36	17,36
45	0,401	0,401	40,01	80,03	19,96
60	0,401	0,401	40,01	80,03	19,96

(Lanjutan)

b. Penyisihan *p*-klorofenol Dengan Mengontakkan Ozon Dan Limbah Cair Dalam Skema Reaksi CSTR

- Untuk Kondisi asam pH 3,74, volume limbah 2 liter, dan konsentrasi awal 50 ppm.

Tabel 5. Penyisihan *p*-klorofenol dengan Mengontakkan Ozon dan Limbah Cair dalam Skema Reaksi CSTR

Waktu (menit)	Absorbansi Pengukuran Ke-1	Absorbansi Pengukuran Ke-2	Konsentrasi (ppm)	Persen tidak terdegradasi(%)	Persen degradasi (%)
0	0,501	0,501	50	100	0
15	0,47	0,47	46,90	93,81	6,18
30	0,468	0,468	46,70	93,41	6,58
45	0,467	0,467	46,60	93,21	6,78
60	0,467	0,467	46,60	93,21	6,78

(Lanjutan)

- Untuk Kondisi netral pH 6,8 volume limbah 2 liter, dan konsentrasi awal 50 ppm

Tabel 6. Penyisihan *p*-klorofenol dengan Mengontakkan Ozon dan limbah Cair dalam Skema Reaksi CSTR

Waktu (menit)	Absorbansi Pengukuran Ke-1	Absorbansi Pengukuran Ke-2	Konsentrasi (ppm)	Prsen tidak terdegradasi (%)	Persen degradasi(%)
0	0,501	0,501	50	100	0
15	0,493	0,493	49,20	98,40	1,59
30	0,482	0,482	48,10	96,20	3,79
45	0,471	0,471	47,00	94,01	5,98
60	0,464	0,464	46,30	92,61	7,38

(Lanjutan)

- Untuk Kondisi basa pH 10,8 volume limbah 2 liter, dan konsentrasi awal 50 ppm

Tabel 7. Penyisihan *p*-klorofenol dengan Mengontakkan Ozon dan Limbah Cair dalam Skema Reaksi CSTR

Waktu (menit)	Absorbansi Pengukuran Ke-1	Absorbansi Pengukuran Ke-2	Konsentrasi (ppm)	Persen tidak terdegradasi(%)	Persen degradasi (%)
0	0,493	0,493	50	100	0
15	0,362	0,362	36,71	73,42	26,57
30	0,308	0,308	31,23	62,47	37,52
45	0,278	0,278	28,19	56,38	43,61
60	0,218	0,218	22,10	44,21	55,78

(Lanjutan)

c. Penyisihan *p*-klorofenol Dengan Mengontakkan Ozon Dan Limbah Cair Yang Dilanjutkan Dengan Reaksi Dalam RHOP (Reaktor Hibrida Ozon-Plasma)

- Untuk Kondisi asam pH 3,9, volume limbah 2 liter, konsentrasi awal 50 ppm, dan tegangan 225 volt

Tabel 8. Penyisihan *p*-klorofenol Dengan Mengontakkan Ozon dan Limbah Cair yang Dilanjutkan Dengan Rreaksi Dalam RHOP

Waktu (menit)	Absorbansi Pengukuran Ke-1	Absorbansi Pengukuran Ke-2	Konsentrasi (ppm)	Persen tidak terdegradasi (%)	Persen degradasi (%)
0	0,501	0,501	50	100	0
15	0,466	0,466	46,50	93,01	6,98
30	0,45	0,45	44,91	89,82	10,17
45	0,42	0,42	41,91	83,83	16,16
60	0,416	0,416	41,51	83,03	16,96

(Lanjutan)

- Untuk Kondisi netral pH 6,8, volume limbah 2 liter, konsentrasi awal 50 ppm, dan tegangan 225 volt

Tabel 9. Penyisihan *p*-klorofenol Dengan Mengontakkan Ozon dan Limbah Cair yang Dilanjutkan Dengan Reaksi Dalam RHOP

Waktu (menit)	Absorbansi Pengukuran Ke-1	Absorbansi Pengukuran Ke-2	Konsentrasi (ppm)	Persen tidak terdegradasi (%)	Persen degradasi (%)
0	0,501	0,501	50	100	0
15	0,447	0,447	44,61	89,22	10,77
30	0,413	0,413	41,21	82,43	17,56
45	0,404	0,404	40,31	80,63	19,36
60	0,372	0,372	37,12	74,24	25,74

(Lanjutan)

- Untuk Kondisi basa pH 10,8, volume limbah 2 liter, konsentrasi awal 50 ppm, dan tegangan 225 volt

Tabel 10. Penyisihan *p*-klorofenol Dengan Mengontakkan Ozon dan Limbah Cair yang Dilanjutkan Dengan Reaksi Dalam RHOP

Waktu (menit)	Absorbansi Pengukuran Ke-1	Absorbansi Pengukuran Ke-2	Konsentrasi (ppm)	Persen tidak terdegradasi (%)	Persen degradasi (%)
0	0,493	0,493	50	100	0
15	0,378	0,378	38,33	76,67	23,32
30	0,276	0,276	27,99	55,98	44,01
45	0,203	0,203	20,58	41,17	58,82
60	0,079	0,079	8,01	16,02	83,97

Lampiran 3. Baku Mutu Limbah Cair

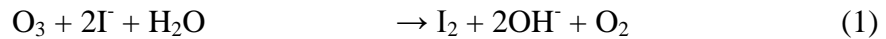
Tabel 11. Baku Mutu Limbah Cair Bagi Kegiatan Industri

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	Slanida (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**)		-	-

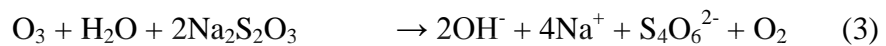
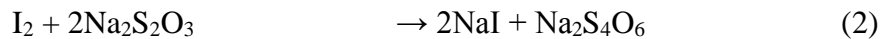
Sumber: Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor Kep-51/Menlh/10/1995

Lampiran 4. Pengukuran Produktivitas Ozonator Reson RSO 9805 2.8 g dengan Metode Iodometri

Reaksi ozon dengan KI :



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



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

Prosedur perhitungan :

Diketahui $[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}] = 0,005 \text{ M}$

- $\text{mmol Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = (\text{Vol. Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ hulu} + \text{Vol. Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ hilir}) \times 0,005\text{M}$

- $\text{mol Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = \frac{(\text{Vol. Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ hulu} + \text{Vol. Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \text{ hilir}) \times 0,005}{1000}$

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

- $\text{gram O}_3 = \text{mol} \times 48$

- $\text{produktivitas ozon} = \frac{\text{gr O}_3}{t} \times 3600$

dimana :

- t = waktu kontak antara ozon dengan larutan KI
- produktivitas ozon memiliki satuan gram/jam

Data yang didapatkan dari percobaan adalah sebagai berikut :

Laju alir ozonator = 9 L/menit

Tabel 12. 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

(Lanjutan)

Hasil perhitungan yang didapatkan adalah sebagai berikut :

Tabel 13. 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



Lampiran 5. Pengukuran Kadar Ozon Reaktor Hibrida Ozon-Plasma pada Fasa cair

$$\text{mol ozon} = 0,5 \text{ mol Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{mol Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} &= \text{molaritas Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} \times \text{volume Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} \\ &= 0,005 \text{ M} \times 0,012 \text{ L} \\ &= 0,000006 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\text{mol ozon} = 0,5 \text{ mol Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$$

$$\begin{aligned} \text{mol ozon} &= 0,5 \times 0,000006 \\ &= 0,000003 \end{aligned}$$

$$\text{gram ozon} = \text{mol ozon} \times \text{berat molekul ozon}$$

$$= 0,000003 \times 48$$

$$= 0,000144 \text{ gram} \times 4 = 0,000576 \text{ gram}$$

Maka jumlah ozon yang terlarut pada fasa cair adalah 0,576 mg/liter